

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL**



**OPTIMIZACIÓN DE LOS PLANES DE MANTENIMIENTO DEL ÁREA DE**  
**FIBRA EN CELULOSA ARAUCO PLANTA NUEVA ALDEA**

**ROBERTO ANDRÉS ALVIÑA INOSTROZA**  
INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
**INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL**

**Profesor Guía**

Cristian Cárdenas Oviedo

**Encargado en Empresa**

Jorge Meza Reyes

Concepción, Septiembre de 2015

# Resumen

---

Este proyecto tiene por finalidad obtener una mejora en la distribución de las cargas de trabajo correspondientes a los trabajos asociados a los planes de mantenimiento preventivo del área de Fibra de Celulosa Arauco Planta Nueva Aldea, mediante la modificación de las frecuencias de ejecución de los trabajos de mantenimiento.

Actualmente, se utilizan frecuencias de ejecución asignadas a los trabajos de mantenimiento determinadas mediante información de los equipos entregada por sus proveedores, análisis del historial de falla de los equipos o mediante el criterio del personal del Departamento de Mantenimiento del área. Sin embargo, las frecuencias generan sobrecargas de trabajos donde la cantidad de Horas Hombre (HH) disponibles por cada puesto de trabajo del área de Fibra, puesto Mecánico y de Electrocontrol, se ven sobrepasadas por la cantidad de Horas Hombres (HH) requeridas por los trabajos de mantenimiento programados.

Para dar una respuesta a tal disyuntiva, se segmentan las operaciones asociadas a los planes de mantenimiento de acuerdo al tiempo de trabajo, frecuencia y fecha de programación. Determinando el comportamiento de las cargas de trabajo durante el año 2015, donde se obtuvieron las semanas con sobrecargas de trabajo.

Luego, conocidos los efectos producidos por las frecuencias, se optimizaron los planes de mantenimiento mediante el uso de un modelo de optimización obtenido de un artículo de investigación, mediante el cual se pueden obtener frecuencias de mantenimiento que minimizan el costo por unidad de tiempo y aumentan la disponibilidad del equipo.

Además, para obtener un resultado que garantice una carga de trabajo menor a la cantidad disponible para realizar durante todo el año 2015, se realizaron modificaciones a las fechas de inicio de los planes de mantenimiento usando como criterio las semanas de trabajo con menos densidad de trabajo programados.

Finalmente, se obtuvo un listado de planes de mantenimiento con frecuencias optimizadas y fechas de inicio modificadas, que generan una distribución de las cargas de trabajo inferiores a la cantidad de HH disponibles, disminuyendo el costo por unidad de tiempo y la aumentando la disponibilidad de los equipos.

# Abstract

---

This project aims to obtain a better distribution of workloads corresponding to the work associated with preventive maintenance plans in the area of Fiber of Celulosa Arauco Planta Nueva Aldea, by changing the frequency of execution of maintenance works.

Currently, execution frequencies assigned to the maintenance works are determined by information provided by equipment suppliers, history analysis of equipments failure or by the judgment of the Maintenance Department staff of the area of Fiber. However, the frequencies generated work overloads where the amount of Man-hours (HH) available for each job of the area of Fiber, Mechanic and Electrocontrol, are overwhelmed by the amount of Man-hours (HH) required by the scheduled maintenance works.

To give an answer to this dilemma, the operations associated with maintenance plans are segmented according to working time, frequency and schedule date. In order to determine the behavior of the workloads during 2015, where the weeks with work overloads were obtained.

Then, known the effects produced by frequencies, the Maintenance Plans were optimized by using an algorithm obtained from a research work, obtaining the maintenance frequencies that minimize the cost per unit of time and increase the equipment availability.

In addition, for obtain a result that guarantees a workload of less than the amount available for all 2015, amendments were made to the starting dates of the maintenance plans using as criteria the weeks of work with less workload scheduled.

Finally, was obtained a Maintenance Plans list with optimized frequencies and modified beginning dates, that generate a distribution of workloads below to the amount of HH available, reducing the cost per unit of time and increasing the equipment availability.

# Dedicatoria y agradecimientos

---

Doy gracias a Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el período de estudio.

A mi padre Roberto, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi madre Verónica, por haberme apoyado en todo momento, por los ejemplos de perseverancia y constancia que la caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

A Francisca, por su compañía, alegría y comprensión, animándome a continuar en momentos de flaqueza. A mis ángeles, mi abuelita Nina, mi abuelita Eliana y a mi amigo Juan Pablo Dauros, por protegerme desde el cielo, por motivarme a realizar mis sueños y por enseñarme a valorar la vida.

A mi hermano Juan Pablo, por estar conmigo y apoyarme siempre. A mi padrino Hugo, por sus palabras de aliento. A mi familia y amigos en general, porque me han brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

A los docentes, secretarias y personal de la Universidad, por su tiempo compartido y por impulsar el desarrollo de mi formación profesional. Al personal del área de Fibra de Celulosa Nueva Aldea, por confiar en mis capacidades y en mi trabajo.

Y a todos quienes me apoyaron emocionalmente a culminar con esta etapa.

# Índice

---

Capítulo I: Introducción .....	11
1.1 Descripción de la empresa .....	12
1.2 Justificación de la propuesta .....	13
1.3 Delimitación del problema.....	15
1.4 Objetivos .....	15
1.5 Metodología .....	16
1.6 Situación actual de la empresa .....	17
Capítulo II: Marco Teórico .....	24
2.1 Industria de la Celulosa.....	24
2.2 Mantenimiento .....	26
2.3 Tipos de Mantenimiento .....	28
2.4 Costos asociados al Mantenimiento .....	32
2.5 Planes de Mantenimiento .....	37
2.6 Optimización de los Planes de Mantenimiento .....	39
2.6.1 Conceptos y resultados previos .....	40
2.6.2 Modelo y supuestos.....	42
2.6.3 Optimización de los planes de mantenimiento de un sistema de componentes en serie.....	43
Capítulo III: Desarrollo de la Optimización de los Planes de Mantenimiento.....	47
3.1 Primera Optimización .....	53
3.2 Segunda Optimización .....	60
3.3 Primera Recalendarización .....	63
3.4 Segunda Recalendarización .....	68
Capítulo V: Resultados y Conclusiones.....	74
Bibliografía Seleccionada .....	77
Anexos .....	79
Anexo 1 – Distribución de carga de trabajo para el año 2015 del puesto de trabajo Mecánico ....	80
Anexo 2 – Distribución de carga de trabajo para el año 2015 del puesto de trabajo Electrocontrol .....	81

Anexo 3 – Resultados primera optimización del puesto de trabajo Mecánico .....	82
Anexo 4 – Resultados primera optimización del puesto de trabajo Electrocontrol .....	83
Anexo 5 – Resultados segunda optimización del puesto de trabajo Electrocontrol.....	84
Anexo 6 – Resultados primera recalendarización del puesto de trabajo Mecánico .....	85
Anexo 7 – Resultados primera recalendarización del puesto de trabajo Electrocontrol .....	86
Anexo 8 – Resultados segunda recalendarización del puesto de trabajo Mecánico .....	87
Anexo 9 – Resultados segunda recalendarización del puesto de trabajo Electrocontrol .....	88

# Índice de tablas

---

Tabla I.1. Resumen de cantidad de Horas Hombre (HH) totales del año 2015 por puesto de trabajo y respectivas densidades medias de carga de trabajo.....	18
Tabla I.2. Resumen de costos reales y planificados asociados a los Planes de Mantenimiento del puesto Mecánico en cifras monetarias y respectivos porcentajes, desde el año 2011 al 2014.....	22
Tabla I.3. Resumen de costos reales y planificados asociados a los Planes de Mantenimiento del puesto de Electrocontrol en cifras monetarias y respectivos porcentajes, desde el año 2011 al 2014. ....	23
Tabla II.1. Productores de celulosa en Chile. ....	25
Tabla II.2. Características que deben tenerse en cuenta al evaluar el costo de oportunidad perdido.	36
Tabla III.1. Cantidad de Planes de Mantenimiento clasificados por tipo de mantención. ....	47
Tabla III.2. Nomenclatura de variables utilizadas para al utilizar el algoritmo de optimización. ....	49
Tabla III.3. Cantidad de Planes programados “En Servicio” y clasificados como Rutas de Inspección. ....	53
Tabla III.4. Disponibilidad promedio de los Planes de Mantenimiento por puesto de trabajo del área de Fibra. ....	53
Tabla III.5. Comparación de la Disponibilidad del Sistema Actual y la optimizada mediante el algoritmo, del Plan de Mantenimiento código 35949. ....	54
Tabla III.6. Comparación de la Disponibilidad del Sistema Actual y la optimizada mediante el algoritmo, del Plan de Mantenimiento código 36153. ....	55
Tabla III.7. Tabla comparativa de Costos y Disponibilidad antes y después de la primera optimización para el puesto de trabajo Mecánico. ....	57
Tabla III.8. Tabla comparativa de Costos y Disponibilidad antes y después de la primera optimización para el puesto de trabajo Electrocontrol. ....	60
Tabla III.9. Disponibilidad promedio de los Planes de Mantenimiento del puesto de trabajo Electrocontrol.....	61
Tabla III.10. Tabla comparativa de Costos y Disponibilidad antes de la primera optimización y después de la segunda optimización para el puesto de trabajo Electrocontrol.....	62
Tabla III.11. Plan de Mantenimiento del puesto de trabajo Mecánico elegido para modificar su Fecha de Inicio. ....	64
Tabla III.12. Planes de Mantenimiento del puesto de trabajo de Electrocontrol elegidos para modificar su Fecha de Inicio. ....	66

Tabla III.13. Planes de Mantenimiento del puesto de trabajo Mecánico elegidos para modificar su Fecha de Inicio.....69

Tabla III.14. Planes de Mantenimiento del puesto de trabajo de Electrocontrol elegidos para modificar su Fecha de Inicio.....71

# Índice de figuras

---

Figura I.1. Representación gráfica de las densidades de trabajos preventivos para el puesto de trabajo Mecánico durante las 52 semanas del año 2015. ....	19
Figura I.2. Representación gráfica de las densidades de trabajos preventivos para el puesto de trabajo Electrocontrol durante las 52 semanas del año 2015. ....	20
Figura II.1. Evolución del Mantenimiento. ....	26
Figura II.2. Relación entre la cantidad de Mantenimiento y diferentes costos. ....	35
Figura II.3. Un plan de mantenimiento preventivo. ....	779
Figura II.4. Ejemplo de una función de disponibilidad de un sistema. ....	41
Figura II.5. Un sistema de n componentes en serie. ....	43
Figura III.1. Ejemplo de parámetros requeridos para obtención de información. ....	50
Figura III.2. Captura de Planes de Mantenimiento del puesto de trabajo Mecánico con cálculo de variables previos a optimización. ....	51
Figura III.3. Comparación de los resultados de la optimización y los valores originales del Plan de Mantenimiento código 35949 del puesto de trabajo Mecánico. ....	54
Figura III.4. Comparación de los resultados de la optimización y los valores originales del Plan de Mantenimiento código 36153 del puesto de trabajo Electrocontrol. ....	55
Figura III.5. Representación gráfica de las distribuciones de trabajo actuales y después de la primera optimización para el puesto de trabajo Mecánico. ....	56
Figura III.6. Captura de planilla con información de costos planificados y reales para Planes de Mantenimiento del área de Fibra. ....	58
Figura III.7. Representación gráfica de las distribuciones de trabajo actuales y después de la primera optimización para el puesto de trabajo Electrocontrol. ....	59
Figura III.8. Representación gráfica de las distribuciones de trabajo antes y después de la segunda optimización para el puesto de trabajo Electrocontrol. ....	61
Figura III.9. Representación gráfica de las distribuciones de trabajo antes de la primera optimización y después de la primera recalendarización para el puesto de trabajo Mecánico. ....	64
Figura III.10. Representación gráfica de la proyección de las cargas de trabajo para el año 2016 del puesto de trabajo Mecánico. ....	65
Figura III.11. Representación gráfica de las distribuciones de trabajo antes de la primera optimización y después de la primera recalendarización para el puesto de trabajo Electrocontrol. ..	67
Figura III.12. Representación gráfica de la proyección de las cargas de trabajo para el año 2016 del puesto de trabajo Electrocontrol. ....	67

Figura III.13. Plan de Mantenimiento código 67061 con la información correspondiente de sus 2 operaciones. ....	69
Figura III.14. Representación gráfica de las distribuciones de trabajo antes de la primera optimización y después de la segunda recalendarización para el puesto de trabajo Mecánico.....	70
Figura III.15. Representación gráfica de la proyección de las cargas de trabajo para el año 2016 del puesto de trabajo Mecánico después de la segunda recalendarización. ....	71
Figura III.16. Representación gráfica de las distribuciones de trabajo antes de la primera optimización y después de la segunda recalendarización para el puesto de trabajo Electrocontrol...	72
Figura III.17. Representación gráfica de la proyección de las cargas de trabajo para el año 2016 del puesto de trabajo de Electrocontrol después de la segunda recalendarización. ....	73

# Capítulo I: Introducción

---

En la actualidad, es un desafío constante para los departamentos de mantenimiento de las empresas llevar un control eficiente y constante de las operaciones de mantenimiento que se deben desarrollar diariamente. Pues el mantenimiento, desde el punto de vista estratégico, se puede organizar de diferentes maneras, ya sea dependiendo de la utilización de los recursos, la ejecución de los tipos de mantenimiento, la efectividad de los planes de mantenimiento, etc.

Diariamente ocurren cambios que influyen notoriamente en las actividades de una empresa, donde cada uno de sus componentes debe ajustarse a estos cambios, el cual cada año se hace más exigente debido a que el entorno empresarial está en busca del mejoramiento continuo. Un punto indispensable para enfrentar este reto es contar con un plan integral de mantenimiento.

Las operaciones o trabajos de mantenimiento tienen como objetivo mantener un artículo o restaurarlo a un estado en el cual pueda llevar a cabo alguna función requerida (Dekker, 1996). Estas operaciones incluyen la combinación de las acciones técnicas y administrativas correspondientes, lo que permite a los usuarios desarrollar su trabajo, sin verse afectados por la falta de continuidad de producción producida por la falla de un equipo crítico y la demora en la reparación de este.

Son los planes de mantenimiento los que ayudan a organizar las actividades rutinarias que deben realizarse para mantener los equipos en funcionamiento (García Garrido, 2010). No obstante, un mal control de planes de mantenimiento puede producir alteraciones en la densidad de operaciones que deben ser ejecutadas, debido principalmente a la periodicidad con la que se realizan estas actividades. Es por ello que la frecuencia de mantenimiento debe ser determinada considerando aspectos tales como las especificaciones de los equipos, historiales de las fallas ocasionadas, etc. El problema radica cuando no se considera el

comportamiento futuro de las densidades de trabajo, lo que provoca trastornos en las jornadas laborales.

Este trabajo está enfocado en optimizar las frecuencias de mantenimiento actuales del Área de Fibra de Celulosa Nueva Aldea, por medio de un modelo de optimización que minimice los costos de ejecución de las operaciones de mantenimiento preventivo y al mismo tiempo modifique las frecuencias de mantenimiento de manera que se puedan homogenizar las densidades de trabajo actuales.

## **1.1 Descripción de la empresa**

Celulosa Arauco y Constitución S.A. es una empresa chilena dedicada a la fabricación de pulpa de celulosa y derivados como madera aserrada y paneles. Para el 2015, Celulosa Arauco tiene cinco plantas de celulosa en Chile: Planta Constitución, Planta Licancel, Planta Valdivia, Planta Arauco y Planta Nueva Aldea (Celulosa Arauco y Constitución S.A., 2015).

Planta Celulosa Nueva Aldea es una de las plantas más grandes y modernas de Sudamérica, con una capacidad productiva anual de 1.027.000 toneladas métricas de celulosa kraft blanqueada de pino y eucalipto, en partes iguales en sus dos líneas de producción. Estas líneas de producción son monitoreadas por diferentes áreas de trabajo dentro de la planta (Área de Fibra, Área de Maquinas, Área de Licores, etc.), las cuales están a cargo de las operaciones y el mantenimiento de los equipos pertenecientes a su área de trabajo.

En el Área de Fibra se producen cuatro procesos de ambas líneas de producción (Pino y Eucalipto), estos son: Cocción, Lavado, Oxigenación y Blanqueo. Para llevar a cabo estos procesos es necesaria la utilización de una variada gama de equipos específicos para la producción de celulosa, siendo el principal motivo por el cual el Área de Fibra, desde el punto de vista de operacional y de mantenibilidad, es considerada una de las áreas más complejas del proceso completo.

## 1.2 Justificación de la propuesta

El mantenimiento puede clasificarse en dos tipos: mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo (Gómez de León, 1998). El mantenimiento de tipo preventivo corresponde a las actividades de mantenimiento que ayudan a mantener el funcionamiento de los equipos evitando las fallas que se pudieran producir, a través de inspecciones realizadas periódicamente o intervalos de tiempo definidos por historiales de comportamiento de los equipos o bases estadísticas. Mientras que el mantenimiento correctivo corresponde a aquellas labores de trabajo destinadas a reparar las averías o fallas de los equipos que no pudieron ser evitadas, independientemente de las inspecciones periódicas o trabajos previos realizados para evitarlos.

Los Planes de Mantenimiento corresponden a la descripción detallada de las tareas de Mantenimiento Preventivo asociadas a un equipo o máquina, explicando las acciones, frecuencias y recambios a utilizar; en general, hablamos de tareas de limpieza, comprobación, ajuste, lubricación y sustitución de piezas. La frecuencia entrega la periodicidad con la que hay que realizar cada una de las tareas que componen un plan de mantenimiento generando una calendarización de los trabajos que se deben realizar en un periodo de tiempo determinado.

Todas las plantas de Celulosa Arauco tienen implementadas el sistema informático de gestión empresarial SAP<sup>1</sup>, el cual es un sistema de Planificación de Recursos Empresariales ERP (Enterprise Resource Planning). Este software maneja los procesos de negocios de las empresas que lo usan, gestionando sus recursos humanos, sus finanzas, el control de sus costos, su logística, sus materiales, etc.

Este software tiene en su base de datos todos los planes de mantenimiento preventivos que se deben realizar a los diferentes equipos industriales de cada área de trabajo, mientras

---

<sup>1</sup> SAP, líder mundial de software empresarial y servicios relacionados a bases de datos y aplicaciones. Para mayor información visitar: [www.sap.com](http://www.sap.com).

que los trabajos de mantenimiento correctivos son ingresados al sistema en el momento que se presentan. Este proceso ocurre cuando un técnico, supervisor u otro personal del área de trabajo, observa una falla en terreno y genera un “Aviso de trabajo”, el cual detalla los antecedentes observados en la falla y sus posibles consecuencias, el cual es analizado por un planificador. Este planificador es quien analiza dicha falla y posteriormente quien ingresa al sistema el aviso transformado en una “Orden de Trabajo” (OT).

Cada trabajador proporciona a cada área de trabajo dentro de una planta una cierta cantidad de horas de trabajo durante su jornada laboral, lo cual es conocido como Horas Hombre (HH). Por lo tanto, cada área de trabajo tiene una cantidad límite de HH disponibles dependiendo de la dotación de técnicos que tengan. De igual manera, las Órdenes de Trabajo (OTs) tienen asociadas una cierta cantidad de HH, las que se consideran como las HH necesarias para realizar dichos trabajos.

Los programas de trabajo consideran las operaciones de mantenimiento, preventivas y correctivas, que deben ser ejecutadas durante un periodo de trabajo determinado. El programa semanal establece la cantidad de Horas Hombre (HH) requeridas para el total de operaciones y a su vez la cantidad de HH disponible para realizar la operaciones, correspondientes al tiempo de trabajo efectivo entregado por los trabajadores del área en estudio.

Los problemas presentes en los programas semanales son consecuencia de una mala determinación de las frecuencias de los mantenimientos preventivos, pues las frecuencias asociadas a los planes de mantenimiento generan desordenes en las densidades de trabajo que provocan ligeras cargas de trabajo, o por el contrario, sobrecargas de trabajo. Además, cuando se generan sobrecargas de trabajo, los planes de mantenimiento deben ser reprogramados para otra fecha o estos son cerrados técnicamente en el sistema y no son realizados.

### **1.3 Delimitación del problema**

El trabajo se desarrolló en Celulosa Arauco y Constitución S.A., Planta Nueva Aldea, ubicada en la Autopista del Itata Km. 21 Nueva Aldea, comuna de Ránquil, región del Bío-Bío, Chile. En el Área de Celulosa de la Planta, con el fin de brindar apoyo técnico al Área de Fibra, específicamente a su Departamento de Mantenimiento.

La optimización contempla a los planes de mantenimiento preventivo que se utilizan en las dos sub áreas de trabajo que componen al Área de Fibra, Mecánico y Electrocontrol, y a su vez, se consideran solo los planes de mantenimiento programados para ser ejecutados En Servicio<sup>2</sup>.

Los planes de mantenimiento que no se consideran en la optimización son los planes programados para ser ejecutados en Parada de Área<sup>3</sup> y en Parada de Planta<sup>4</sup>, debido a que son ocasiones puntuales de requerimientos que no pueden ser ejecutados En Servicio.

Para efectos financieros, se requerirán los costos asociados a la ejecución de los planes de mantenimiento preventivo y los costos asociados a los mantenimientos correctivos correspondientes a cada plan.

### **1.4 Objetivos**

#### *Objetivo General*

Optimizar los Planes de Mantenimiento Preventivos del Área de Fibra de Celulosa Nueva Aldea.

---

<sup>2</sup> En Servicio, se le denomina a los trabajos que pueden ser ejecutados sin necesidad de detener el proceso productivo.

<sup>3</sup> Parada de Área, período en el cual se paraliza la producción en un área de trabajo determinada a fin de realizar mantenimiento parcial.

<sup>4</sup> Parada de Planta, período en el cual se paraliza la producción a fin de realizar mantenimiento parcial o completo.

### *Objetivos específicos*

1. Diagnosticar los efectos producidos por los Planes de Mantenimiento Preventivos actuales del Área de Fibra.
2. Establecer las frecuencias de mantenimiento más adecuadas para los Planes de Mantenimiento del Área de Fibra.
3. Elaborar y proponer un Plan Anual de Mantenimiento Preventivo para el Área de Fibra.

### **1.5 Metodología**

Para diagnosticar los problemas que presentan los planes de mantenimiento preventivos del Área de Fibra, es necesario la recopilación de información técnica de los Planes de Mantenimiento desde el sistema de gestión SAP y del nivel de fuerza de trabajo del área de Fibra, con el fin de elaborar un calendario con las densidades de cargas de trabajo para las semana del año 2015 para el puesto de trabajo Mecánico y de Electrocontrol. Dentro de esta información técnica, se requiere la duración de trabajo planificado para cada operación que componen a los planes de mantenimiento, las frecuencias y fechas de inicio asociadas a cada operación, entre otros.

Posteriormente se deben determinar las semanas que presentan sobrecarga de trabajo y graficar el comportamiento de las operaciones correspondientes a los planes de mantenimiento.

Para establecer las frecuencias más adecuadas para los planes de mantenimiento, se requiere de un modelo de optimización que modifique las frecuencias de ejecución y que al mismo tiempo genere una mejora de parámetros operacionales de los planes en sus componentes, tales como los costos asociados a la ejecución de los trabajos de mantenimiento

preventivo y las disponibilidades<sup>5</sup> de los equipos a los que se les realizan las acciones de mantenimiento correspondientes a los planes (Duarte, Craveiro, & Trigo, Optimization of the preventive maintenance plan of a series components system, 2006).

Se requiere recopilar datos de los parámetros operacionales de las componentes de mantenimiento tales como los costos de ejecución de los trabajos preventivos y correctivos, los tiempos de ejecución de las acciones de mantenimiento y los demás tópicos necesarios para el cálculo de las variables requeridas para el modelo de optimización.

Una vez calculadas las variables y obtenido el modelo de optimización con su función objetivo y restricciones, con la utilización del complemento de Excel, Solver, se optimizan las frecuencias de los planes de mantenimiento obteniendo frecuencias modificadas. Luego se tabulan nuevamente las operaciones de los planes de mantenimiento para poder obtener la nueva distribución de las cargas de trabajo de las semanas del año 2015 para su evaluación.

Una vez establecida la nueva distribución de las cargas de trabajo se cita al Jefe de Mantenimiento, al Programador y a los Planificadores del Departamento de Mantenimiento del Área de Fibra con el fin de presentar los resultados obtenidos y de proponer una mejora del resultado obtenido.

Finalmente, se elabora un listado con los planes de mantenimiento cuyas frecuencias fueron optimizadas y una distribución de cargas asociadas al cambio de las frecuencias para el año 2015 y una proyección para el año 2016.

## **1.6 Situación actual de la empresa**

En base a los datos obtenidos de SAP para el año 2015, se han detectado un total de 273 planes de mantenimiento programados “*En Servicio*” para el Área de Fibra, de los cuales

---

<sup>5</sup> Disponibilidad, corresponde a la probabilidad de que un equipo este en estado de trabajo.

91 corresponden al puesto de trabajo Mecánico y 182 planes al puesto de Electrocontrol. Considerando la calendarización de los Planes de Mantenimiento con respecto a la frecuencia asociada a cada Plan, se obtienen las densidades de trabajo por semana de trabajo SAP (de Miércoles a Martes) para el año 2015, las que son calculadas como porcentaje de las Horas Hombres (HH) programadas por la calendarización de los Planes de mantenimiento, con respecto a las HH disponibles por cada puesto de trabajo (disponibilidad asociada a la dotación real de cada equipo de trabajo).

De las densidades de trabajo semanales obtenidas, considerando una dotación de trabajadores permanente durante todo el año para cada puesto de trabajo, se detectaron las densidades medias de cargas de trabajo consideradas como las densidades óptimas para cada puesto, obtenidas con una distribución homogénea de los Planes de Mantenimiento durante las semanas de trabajo del calendario SAP. Para el año 2015 el puesto de trabajo Mecánico dispone de 12.979,2 HH (dotación de 6 técnicos con jornada laboral de 41,6 horas por semana)<sup>6</sup> de las cuales se requieren 8.088 HH programadas durante el calendario SAP, obteniendo una densidad media de carga de trabajo de un 62,32%. Para el puesto de trabajo Electrocontrol también se disponen de 12.979,2 HH (dotación de 6 técnicos con jornada laboral de 41,6 horas por semana) de las cuales se requieren 8.224,7 HH programadas, obteniendo una densidad media de carga de trabajo de un 63,37%.

En la tabla I.1 se resumirán en cantidad de Horas Hombre (HH) y porcentajes, las cifras mencionadas anteriormente.

	Mecánicos	Electrocontrol
Total HH Planificadas (*)	8.088	8.224,7
Total HH Disponibles (**)	12.979,2	12.979,2
Densidad media de carga de trabajo (*/**) (%)	62,32	63,37

Tabla I.1. Resumen de cantidad de Horas Hombre (HH) totales del año 2015 por puesto de trabajo y respectivas densidades medias de carga de trabajo. Fuente: Elaboración Propia.

<sup>6</sup> Se considera año calendario con 52 semanas

Mediante la determinación de las densidades medias de trabajo se detectaron los diferentes trastornos en el comportamiento de las cargas de los trabajos preventivos que se realizan en el Área de Fibra, tanto en el equipo Mecánico como en el de Electrocontrol, producto de la distribución actual dada por las frecuencias asociadas a los Planes de Mantenimiento. Así se determinaron las semanas críticas de cada puesto de trabajo, donde las densidades superan la cantidad de HH disponibles. O en su caso contrario, donde las densidades de trabajo son considerablemente inferiores a las densidades medias de trabajo. En la Figura I.1 y la Figura I.2, se muestra el comportamiento de las densidades de carga de trabajo para el puesto Mecánico y de Electrocontrol (respectivamente) durante las 52 semanas del año 2015 y sus respectivas densidades medias.

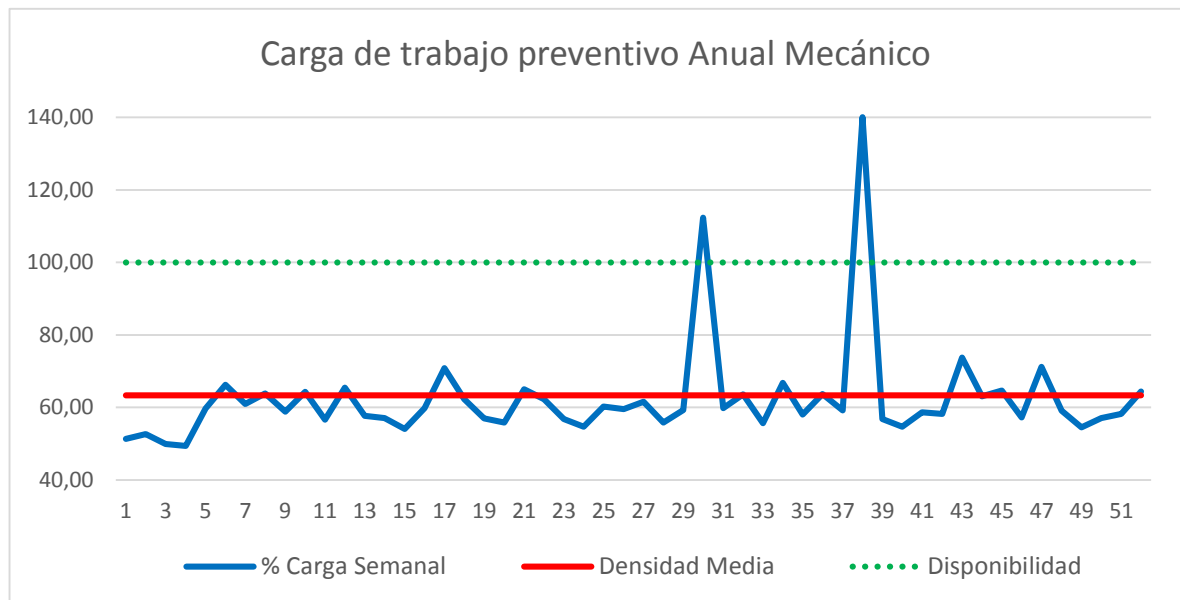


Figura I.1. Representación gráfica de las densidades de trabajos preventivos para el puesto de trabajo Mecánico durante las 52 semanas del año 2015. Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico representado en la Figura I.1<sup>7</sup>, se puede observar el comportamiento de las cargas de trabajos preventivos con respecto a la densidad media del puesto de trabajo Mecánico, durante las 52 semanas del año 2015. Cabe destacar el comportamiento cíclico de las cargas de trabajo con respecto a la densidad media, las que durante la mayor parte del

<sup>7</sup> Para mayor comprensión de la densificación de los programas semanales del puesto de trabajo Mecánico, revisar Anexo 1.

año fluctúan con densidades cercanas a la carga de trabajo media. No obstante, se pueden observar algunas densidades atípicas con respecto a la tendencia que establecen la mayor cantidad de densidades de trabajo durante el año, inclusive superan la cantidad de HH disponibles del puesto de trabajo Mecánico, generando una sobrecarga de trabajo.

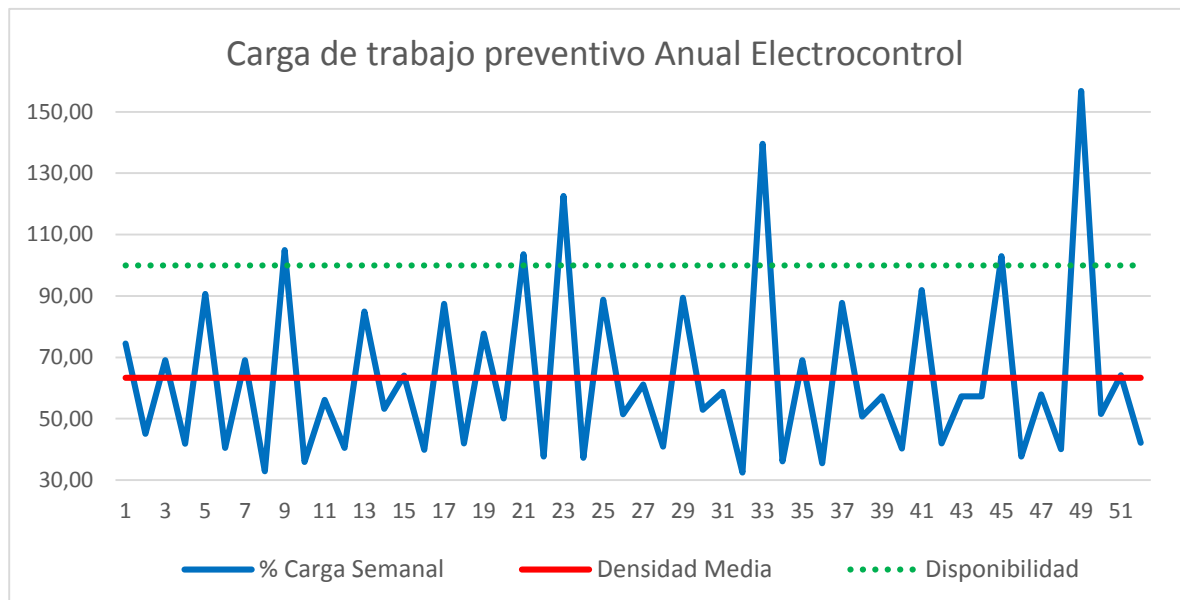


Figura I.2. Representación gráfica de las densidades de trabajos preventivos para el puesto de trabajo Electrocontrol durante las 52 semanas del año 2015. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico representado en la Figura I.2<sup>8</sup>, se puede observar el comportamiento de las cargas de trabajos preventivos con respecto a la densidad media del puesto de trabajo Electrocontrol, durante las 52 semanas del año 2015. Se observa un comportamiento cíclico con respecto a la densidad media, pero a diferencia del comportamiento de las cargas de trabajo del puesto Mecánico (Figura I.1), las variaciones están alejadas de la media a tal punto que llegan a superar la cantidad de HH disponibles por el puesto de Electrocontrol (sobrecarga de trabajo) o en su caso contrario, las cargas de trabajo llegan a ser demasiado bajas, que en caso de no contar con suficientes trabajos correctivos para poder densificar el programa semanal correspondiente, se genera tiempo de ociosidad, es decir, se deja de utilizar el total de HH disponibles para puesto de Electrocontrol.

<sup>8</sup> Para mayor comprensión de la densificación de los programas semanales del puesto de trabajo Electrocontrol, revisar Anexo 2.

Los problemas provocados por las frecuencias asociadas a los Planes de Mantenimiento de los puestos de trabajo del Área de Fibra, se deben principalmente a que estas frecuencias fueron establecidas algunas, usando datos históricos de las máquinas o equipos, otras usando la información entregada por proveedores directos y otras usando el criterio de las personas encargadas del Área. Siendo estas últimas la que se han considerado como las principales frecuencias de mantenimiento modificables.

Es por este motivo que este trabajo está enfocado a optimizar las frecuencias de mantenimiento de tal manera que genere un orden en las distribuciones de cargas de trabajo durante las 52 semanas de trabajo en un año determinado, generando densidades de trabajo cercanas a la densidad media de cada puesto de trabajo, de tal manera que se eviten los problemas generados por las frecuencias de los Planes de Mantenimiento.

Con respecto a los costos asociados a los Planes de Mantenimiento, según los datos obtenidos de SAP desde el año 2011 al año 2014, el costo total de ejecución de las operaciones de los Planes para el Área de Fibra fue de US\$ 205.102<sup>9</sup>, siendo que el costo total planificado para este periodo de tiempo era de US\$ 1.822.758. Por lo que se puede concluir que durante los años 2011 al 2014 no se ejecutaron todos los Planes de Mantenimiento planificados, ya sea porque no pudieron ser programados (debido a una sobrecarga de trabajo, falta de repuestos, etc.) o también sí pudieron ser ejecutadas pero las componentes asociadas a las operaciones que conforman el Plan de Mantenimiento no fueron necesarias para realizar el trabajo.

En la siguiente tabla se resume en valores monetarios y porcentuales los costos asociados a los Planes de Mantenimiento del puesto Mecánico, desde el año 2011 hasta el año 2014.

---

<sup>9</sup> Cambio respecto al valor promedio del dólar observado desde Enero a Mayo del año 2015, US\$ 1 = \$ 619,07 CLP. Para mayor información visitar: [www.sii.cl](http://www.sii.cl).

AÑO	MECÁNICO		
	COSTO REAL (MILES DE USD)	COSTO PLANIFICADO (MILES DE USD)	% CUMPLIMIENTO
2011	5,38	185,81	3%
2012	3,48	275,10	1%
2013	65,18	461,63	14%
2014	44,10	136,27	32%
<b>TOTAL</b>	<b>118,15</b>	<b>1.058,82</b>	<b>11%</b>

Tabla I.2. Resumen de costos reales y planificados asociados a los Planes de Mantenimiento del puesto Mecánico en cifras monetarias y respectivos porcentajes, desde el año 2011 al 2014. Fuente: Elaboración propia.

Se puede destacar de la Tabla I.2, que el costo total real asociado a la ejecución de los Planes de Mantenimiento fue muy inferior al costo total planificado, pues desde el año 2011 al año 2014 solo se utilizó un 11% de los costos totales planificados a gastar mediante la ejecución de las operaciones de mantenimiento preventivo. Dentro de los motivos que causan estos efectos están los que producen las frecuencias de los Planes de Mantenimiento en la densidad de las cargas semanales, pues al generar sobrecargas de trabajo se dejan de hacer operaciones preventivas. Otro motivo que genera estos efectos está asociado a la información que compone a cada trabajo preventivo perteneciente a los Planes de Mantenimiento, específicamente a los recursos necesarios para su ejecución, tales como aquellos repuestos necesarios para realizar un cambio de equipo y no tenga stock en bodega. Entre otros motivos.

En la siguiente tabla se resume en valores monetarios y porcentuales los costos asociados a los Planes de Mantenimiento del puesto de Electrocontrol, desde el año 2011 hasta el año 2014.

AÑO	ELECTROCONTROL		
	COSTO REAL (MILES DE USD)	COSTO PLANIFICADO (MILES DE USD)	% CUMPLIMIENTO
2011	12,49	242,01	5%
2012	17,45	278,05	6%
2013	25,72	181,99	14%
2014	31,29	61,89	51%
<b>TOTAL</b>	<b>86,95</b>	<b>763,94</b>	<b>11%</b>

Tabla I.3. Resumen de costos reales y planificados asociados a los Planes de Mantenimiento del puesto de Electrocontrol en cifras monetarias y respectivos porcentajes, desde el año 2011 al 2014. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla I.3, ocurre el mismo efecto que en el porcentaje de costos totales del puesto de trabajo Mecánico, pues el costo total real asociado a la ejecución de los Planes de Mantenimiento fue muy inferior al costo total planificado. Desde el año 2011 al año 2014 solo se utilizó un 11% de los costos totales planificados a gastar mediante la ejecución de las operaciones de mantenimiento preventivo. Esto debido a las mismas causas mencionadas para el puesto Mecánico.

Con respecto a la generación de los programas semanales de trabajo de cada puesto de trabajo, es el programa SAP que en su base de datos tiene incorporada, entre otras, toda la información correspondiente de los Planes de Mantenimiento del Área de Fibra. El calendario SAP comienza la semana los días miércoles y las finaliza los días martes, por lo que entrega los programas semanales que tiene calendarizados en el mismo sistema utilizando las frecuencias de mantenimiento y densifica las semanas con la cantidad de HH asociados a las operaciones. Por lo que la entrega de los programas semanales se realiza automáticamente.

## Capítulo II: Marco Teórico

---

### 2.1 Industria de la Celulosa

En las últimas décadas, el sector forestal ha presentado un gran desarrollo gracias a la industria de celulosa. En la actualidad, Chile posee una moderna industria de celulosa, papeles y cartones, madera aserrada y derivados, tableros enchapados, molduras, paneles y maderas remanufacturadas entre otros, que se abastece de una cosecha anual de 40 millones de metros cúbicos de madera, de las cuales el 98% proviene de plantaciones y el 2% restante del bosque nativo, alcanzando una notable competitividad en el ámbito internacional (Papermarket, 2014).

En la actualidad, según datos de la Sociedad de Fomento Fabril (SOFOFA), Chile ocupa el tercer lugar como exportador mundial. Este notable desarrollo se ve reflejado en los 4,94 millones de toneladas de celulosa producidas al año. Esta producción se debe, principalmente, a las doce plantas de celulosa que operan un total de 17 líneas de producción. De éstas, 11 líneas de producción fabrican celulosa Kraft y el resto produce pulpa mecánica (CMPC, 2011).

Con los antecedentes recopilados, se puede inferir que la Industria de la Celulosa contribuye al crecimiento económico del país. Además, que las dos grandes empresas productoras de Celulosa en Chile (Celulosa Arauco y CMPC) han evolucionado significativamente llevando al país a posicionarse como uno de los más grandes productores de celulosa a nivel mundial.

En la Tabla II.1, se muestran las plantas productoras de celulosa en Chile (Papermarket, 2014), donde se pueden apreciar, entre otros, sus respectivas capacidades de producción, destacando la cantidad de Toneladas al año que producen las empresas CMPC y Celulosa Arauco.

PRODUCTORES DE CELULOSA CHILE AÑO 2011						
Planta	Ubicación**	Propietario	Tipo	Capacidad*	Puerto cercano	A Santiago
Arauco	Arauco (VII)	Celulosa Arauco (Copec)	BKP-EKP	790.000	Lirquén (VIII)	588 Km Sur
Valdivia	Valdivia(X)	Celulosa Arauco (Copec)	BKP-EKP	550.000	Lirquén (VIII)	847 Km Sur
Pacífico	Angol (IX)	Empresas CMPC	BSKP	500.000	Lirquén (VIII)	580 Km Sur
Santa Fe	Nacimiento (VIII)	Empresas CMPC	BEKP	1.310.000	Lirquén (VIII)	516 Km Sur
Nueva Aldea	Ránquil (VIII)	Celulosa Arauco (Copec)	BKP-EKP	1.027.000	Lirquén (VIII)	847 Km Sur
Constitución	Constitución (VIII)	Celulosa Arauco (Copec)	UKP	355.000	Lirquén (VIII)	366 Km Sur
Laja	Laja (VIII)	Empresas CMPC	BSKP	260.000	Lirquén (VIII)	500 Km Sur
Papeles Río Vergara	Nacimiento (VII)	Empresas CMPC	BTMP	195.000	Sólo consumo propio	617 Km Sur
Cartulinas Maule	Yerbas Buenas(VII)	Empresas CMPC	BTMP	300.000	Sólo consumo propio	250 Km Sur
Licancel	Licantén (VII)	Celulosa Arauco (Copec)	BKP-UKP	140.000	Lirquén (VIII)	310 Km Sur
Norske Skog Bio-Bio	Concepción(VII l)	Norske Skog	PGW	125.000	Sólo consumo propio	513 Km Sur
Cartulinas Valdivia	Valdivia (X)	CMPC	SGW	70.000	Sólo consumo propio	841 Km Sur
(*)Tons/año				(**)Regiones		
Datos actualizados a diciembre de 2011, aportados por las mismas empresas						
Dpto. de Estudios						

Tabla II.1. Productores de celulosa en Chile. Fuente: Papermarket (2014)

## 2.2 Mantenimiento

El mantenimiento a lo largo de los años ha ido evolucionando en tres etapas muy marcadas de acuerdo al desarrollo industrial. Estas etapas fueron mencionadas y explicadas por Rey Sacristán (2001) y González Fernández (2005) en sus libros donde mencionan las etapas de desarrollo del mantenimiento durante la historia y como este ha ido modificando sus alcances y objetivos con respecto a las necesidades presentadas en las industrias.

La Figura II.1, contempla en la parte inferior los objetivos que de forma generalizada se han ido proponiendo las Empresas a lo largo de los decenios expuestos y, en la parte superior, los medios con que, también de forma generalizada, han utilizado (o siguen utilizando) para intentar alcanzar sus objetivos.

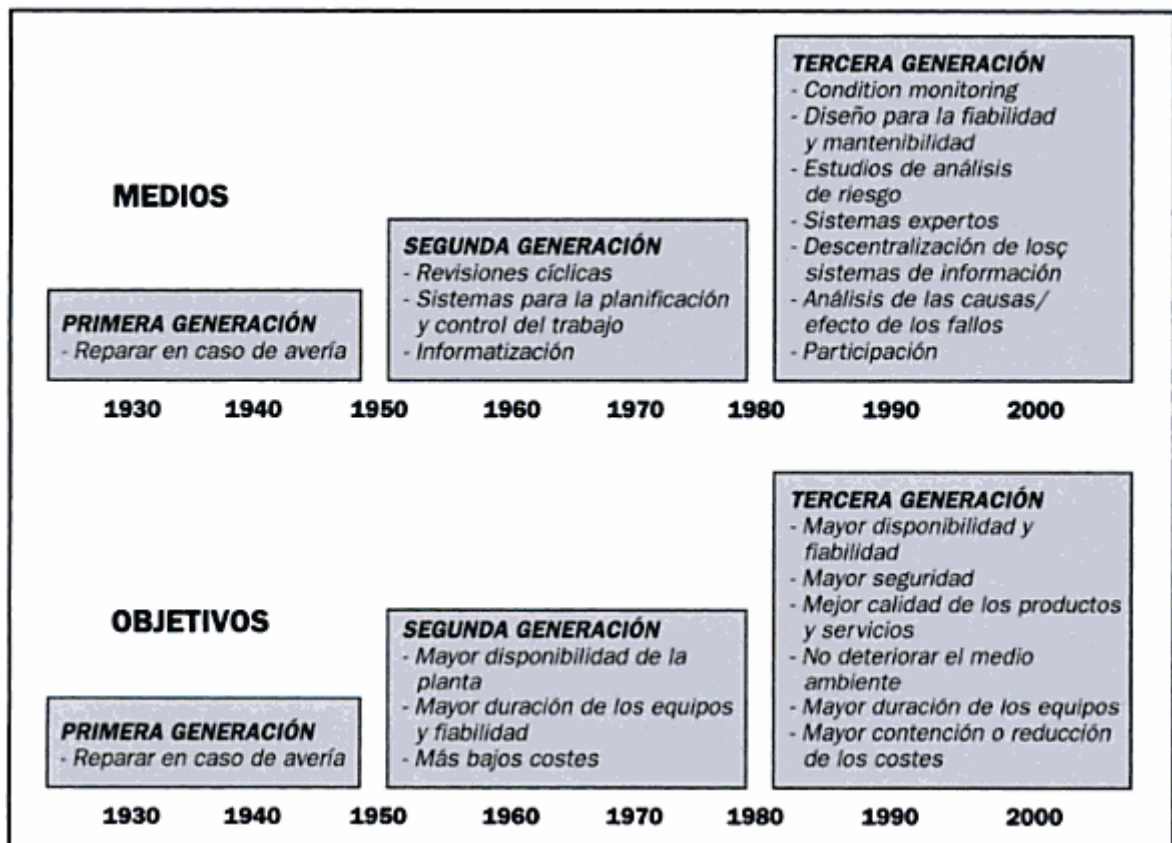


Figura II.1. Evolución del Mantenimiento. Fuente: González Fernández (2005).

*1ra Etapa:* “Mantenimiento por Rotura” o “Primera Generación”, utilizada hasta los años 50, solo se realizaban actividades básicas de mantenimiento tales como realizar lubricaciones periódicas, limpiezas y reparaciones de aquello que se averiaba. Esto ocurría debido a que la industria en este periodo no estaba muy mecanizada.

*2da Etapa:* “Mantenimiento Planificado (PM)” o “Segunda generación”, inició a principios de los años 50 en EE.UU. debido a la creciente automatización de los procesos productivos y su complejo mantenimiento. En la década de los 60 surgió el concepto de Mantenimiento Preventivo el cual hacía referencia a que el objetivo del Mantenimiento no era solo reparar sino también planificar y mejorar la productividad. De esta manera el Mantenimiento Planificado engloba el Mantenimiento Correctivo, Preventivo, Predictivo y de Mejora. Estos Tipos de Mantenimiento serán explicados más adelante.

En la década de los 80, se llegó a la conclusión que una vez optimizado este Mantenimiento Planificado en cuanto a periodicidades y consistencias de las revisiones cíclicas preventivas y una vez optimizados los sistemas de planificación y control, se llegaba a una situación de estancamiento. Lo que provoco el fin de esta etapa a fines de esta década.

*3ra Etapa:* “Mantenimiento Productivo Total (TPM)” o “Tercera Generación”, inició a fines de la década de los 80 con el concepto americano del Mantenimiento Planificado (MP) de la segunda etapa y separaba al personal de mantenimiento del personal de la producción, evolucionaron hacia el Mantenimiento y la Mejora de los equipos con la implicación de toda la organización. Además, en este mantenimiento de Tercera Generación, la elaboración de la normativa adquiere una importancia primordial y sus técnicas se basan en la incorporación de nuevos métodos más proclives a intervenir en los equipos e instalaciones sólo cuando sea necesario. A partir de 1980, aparece en el sector de mantenimiento la externalización, es decir, la contratación externa de actividades de mantenimiento.

Por último, hoy en día está claro que la maximización de la eficiencia de una planta

y de sus equipos, requiere un mantenimiento proactivo (centrado en la confiabilidad<sup>10</sup> y el riesgo<sup>11</sup>), totalmente integrado en la actividad global de la planta.

Existe una gran variedad de definiciones y tipos de mantenimientos según los autores. La British Standards Institution (1984), define Mantenimiento como “la combinación de todas las acciones administrativas y técnicas asociadas destinados para retener un elemento o sistema, o restaurarlo a un estado en el que se puede realizar la función requerida”.

Dhillon (2002), define Mantenimiento como “todas las acciones apropiadas para retener un elemento o parte de equipamiento, o restaurarlo a un estado determinado”, mientras que García Garrido (2010), define Mantenimiento como “el conjunto de técnicas destinado a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible (buscando la más alta disponibilidad) y con el máximo rendimiento”.

De las definiciones anteriores, se puede señalar que Mantenimiento es el conjunto de actividades destinadas a conservar los equipos e instalaciones en servicio, de manera que estas sigan operando y cumpliendo con sus operaciones lo más eficientemente posible para evitar una disminución en la productividad de la empresa. En caso que alguno de los equipos o instalaciones en servicio presenten una falla, el Mantenimiento debe restaurarlos a un estado que puedan realizar las funciones requeridas.

### **2.3 Tipos de Mantenimiento**

Tal como se observa en la literatura, con respecto a los tipos de mantenimiento, es variada la clasificación que se les ha dado durante la evolución del mantenimiento y se sigue dando en la actualidad. Según Gómez de León (1998), esto ocurre debido a que se pueden

---

<sup>10</sup> Confiabilidad, corresponde a la probabilidad de buen funcionamiento de un equipo.

<sup>11</sup> Riego, corresponde a la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas.

establecer diferentes clasificaciones del mantenimiento, atendiendo a las posibles funciones que se les atribuyan a este, así como a la forma de desempeñarlas.

Para el caso del estudio que se desarrollará, se deben analizar dos tipos de mantenimiento que son utilizados en el Área de Fibra de Celulosa Nueva Aldea y no obstante, independiente a la discrepancia que se observa en la literatura acerca de las clasificaciones que se le dan al mantenimiento, en todos los textos citados se hace mención a los Mantenimientos de tipo Preventivo y del tipo Correctivo.

- Mantenimiento Preventivo: Márquez (2007), indica que el mantenimiento preventivo se define como el mantenimiento llevado a cabo a intervalos predeterminados o según los criterios prescritos y encaminados a reducir la probabilidad de fallo o la degradación del funcionamiento del equipo. El mantenimiento preventivo puede ser predeterminado o basado en condición:
  - Mantenimiento Predeterminado: Es el mantenimiento preventivo llevado a cabo de acuerdo con los intervalos establecidos de tiempo o el número de unidades de uso (por ejemplo, mantenimiento programado), pero sin investigación previa como condición del artículo.
  - Basado en Condición: Es el mantenimiento preventivo basado en el rendimiento y/o monitoreo de parámetros y las acciones posteriores. Rendimiento y monitorización de parámetros se pueden programar, bajo petición o continuo. Dentro del mantenimiento basado en la condición se incluye el mantenimiento predictivo, que se puede definir de la siguiente manera:
    - Mantenimiento Predictivo: Estado de mantenimiento basado en el seguimiento de un pronóstico derivado del análisis y evaluación de los parámetros significativos de la degradación de los equipos.

Gómez de León (1998) define el tipo de mantenimiento preventivo aquel que pretende disminuir o evitar (en cierta medida) la reparación mediante una rutina de inspecciones periódicas y la renovación de los elementos deteriorados, lo que se conoce como “las tres erres del mantenimiento”. Si la segunda y la tercera no se realizan, la primera es inevitable.

En las inspecciones se procede al desmontaje total o parcial de la maquina con el fin de revisar el estado de los elementos, reemplazando aquellos que se estime oportuno a la vista del examen realizado. Otros elementos son sustituidos sistemáticamente en cada inspección, tomando como referencia el número de operaciones realizadas o un determinado periodo de tiempo de funcionamiento.

El éxito de este tipo de mantenimiento depende de la correcta elección del período de inspección. Un periodo demasiado largo conlleva el peligro de la aparición de fallos entre dos inspecciones consecutivas, en tanto que un período demasiado corto puede encarecer considerablemente el proceso productivo.

De las definiciones anteriores, se puede señalar que el mantenimiento de tipo preventivo es aquel que ayuda a mantener el funcionamiento de los equipos evitando las fallas que se pudieran producir, a través de inspecciones realizadas periódicamente o en el momento que se observa alguna anomalía en el funcionamiento de el o los equipos.

- Mantenimiento Correctivo: Márquez (2007) indica que el mantenimiento correctivo es el mantenimiento llevado a cabo tras el reconocimiento de fallos y la intención de poner el equipo a un estado en el que se puede realizar una función requerida. El mantenimiento correctivo puede ser inmediato o diferido:

- **Mantenimiento Inmediato:** el mantenimiento que se lleva a cabo inmediatamente después de que un fallo se ha detectado para evitar consecuencias inaceptables.
- **Mantenimiento Diferido:** es el mantenimiento correctivo que no se realiza inmediatamente después de una detección de fallos, pero se retrasó según la normativa de mantenimiento dado.

Gómez de León (1998) define el tipo de mantenimiento correctivo solo se interviene en los equipos cuando el fallo ya se ha producido. Se trata, por tanto de una actitud pasiva, frente a la evolución del estado de los equipos, a la espera de la avería o fallo.

Existen los casos donde los componentes afectados representan un bajo costo y donde los equipos son de naturaleza auxiliar y no directamente relacionada con la producción. En otros casos, cuando el fallo no supone la interrupción de la producción, ni siquiera afecta la capacidad productiva de forma instantánea, las reparaciones pueden ser llevadas a cabo sin perjuicio de ésta.

En este sentido conviene indicar que, incluso en aquellas instalaciones industriales que disponen de sofisticados planes de mantenimiento, existe generalmente un porcentaje de equipos en los que se realiza exclusivamente este tipo de mantenimiento.

Esta filosofía de mantenimiento no requiere ninguna planificación sistemática. Sin embargo, adoptar esta forma de mantenimiento supone asumir algunos inconvenientes respecto de las máquinas y equipos afectados, entre los que pueden citarse:

- Las averías se producen generalmente de forma imprevista, lo que puede ocasionar trastornos de producción, que pueden ir desde ligeras pérdidas hasta la parada de la producción.
- Las averías, al ser imprevistas, suelen ser grave para el equipo, con lo que su reparación puede ser costosa.
- Las averías son siempre inoportunas, por lo que la reparación de los equipos averiados puede llevar más tiempo del previsto.
- Por tratarse de averías inesperadas, el fallo podría venir acompañado de algún siniestro, lo que puede tener consecuencias muy negativas para la seguridad del personal o de las instalaciones.

De las definiciones anteriores, se puede señalar que el mantenimiento de tipo correctivo corresponde a las labores de trabajo destinadas a reparar las averías o fallas de los equipos que no pudieron ser evitadas, independientemente de las inspecciones periódicas o trabajos previos realizados para evitarlos. Es decir, el mantenimiento de tipo correctivo es aquel que debe desarrollarse cuando el mantenimiento preventivo no pudo evitarlo.

## **2.4 Costos asociados al Mantenimiento**

Niebel (1994) indica que los costos de mantenimiento son muy controlables. Esto debido a:

- 1) Para la mayor parte, el mantenimiento es subjetivo. Una gran cantidad de mantenimiento o una cantidad mínima de mantenimiento se puede realizar sin dejar de operar.

- 2) Los trabajos de mantenimiento son muy laboriosos y se pueden controlar con una intensa labor de mano de obra.

Existen cuatro costos fundamentales asociados a los trabajos de mantenimiento.

Estos son:

- 1) *Costos directos*: Los costos directos son aquellos costos requeridos para mantener el equipo operativo. Éstos incluyen la inspección periódica y mantenimiento preventivo, los costos del servicio, los costes de reparación y los costos de reacondicionamiento general.
- 2) *Costos de espera*: El costo total de operación y mantenimiento de equipos en espera, necesarios para poner en funcionamiento las instalaciones principales que están experimentando ya sea una actividad de mantenimiento o son inoperable por alguna razón.
- 3) *Costos de pérdida de producción*: Se denomina costo debido a la pérdida de producción producida porque el equipo principal está suspendido y no hay equipo de reserva disponible.
- 4) *Costos de degradación*: Son aquellos costos que se producen en el deterioro de la vida útil de los equipos como resultado de insuficiencia y/o mantenimiento inferior.

Se debe entender que más mantenimiento no significa necesariamente mejor mantenimiento. Demasiado mantenimiento puede dejar fuera de servicio instalaciones necesarias para la producción hasta el punto de que el mantenimiento rentable haya sido sumergido.

El control de los costos de mantenimiento permite obtener una razonable disminución de los cuatro costos fundamentales que se relacionan con el trabajo de mantenimiento. Esto se logra mediante una planificación minuciosa realizada por técnicos de mantenimiento

competentes. Esta planificación tiene dos funciones anteriores a la toma real de las reparaciones de mantenimiento, mantenimiento preventivo, y los trabajos de construcción, por lo que la calidad del trabajo se puede hacer en el momento adecuado y al menor costo. Estas dos funciones son denominadas como “*método de determinación*” y “*método de detección*”.

- *Método de determinación*: implica la selección de la mejor alternativa en cuanto a cómo se debe hacer la reparación o revisión. Incluye la determinación del alcance del trabajo solicitado y la preparación de una lista de materiales necesarios para realizar el trabajo. También se requiere la preparación de una lista de herramientas especiales o instalaciones que puedan ser necesarios para completar el trabajo y cualquier especialista en la mano de obra.
- *Método de detección*: es el proceso cuando el planificador debe decidir primero, "¿Es el trabajo realmente necesario?". Y, si lo es, debe decidir, "¿Dónde debe llevarse a cabo?". El trabajo puede ser mejor realizado por un contratista o puede ser rentable tener una parte de los trabajos realizados por un contratista y la otra parte por el departamento de mantenimiento. O puede ser mejor llevar a cabo todo el trabajo de mantenimiento por trabajos de internos.

La Figura II.2, ilustra la relación entre la Cantidad de mantenimiento y los diferentes Costos asociados a los trabajos de mantenimiento mencionados anteriormente. En la parte inferior izquierda de la Figura II.2, se observa que el Costo de degradación el cual disminuye a medida que aumenta la cantidad de mantenimiento que se le realiza. Mientras que en las otras tres graficas que se muestran en la Figura II.2, donde se observa el comportamiento de los Costos del tiempo de inactividad (superior izquierda), del equipo en espera (superior derecha) y el Costo Total (inferior derecha), con respecto a la cantidad de mantenimiento, los que encuentran su menor valor en un punto de inflexión que corresponde a la cantidad ideal de mantenimiento que debe realizarse.

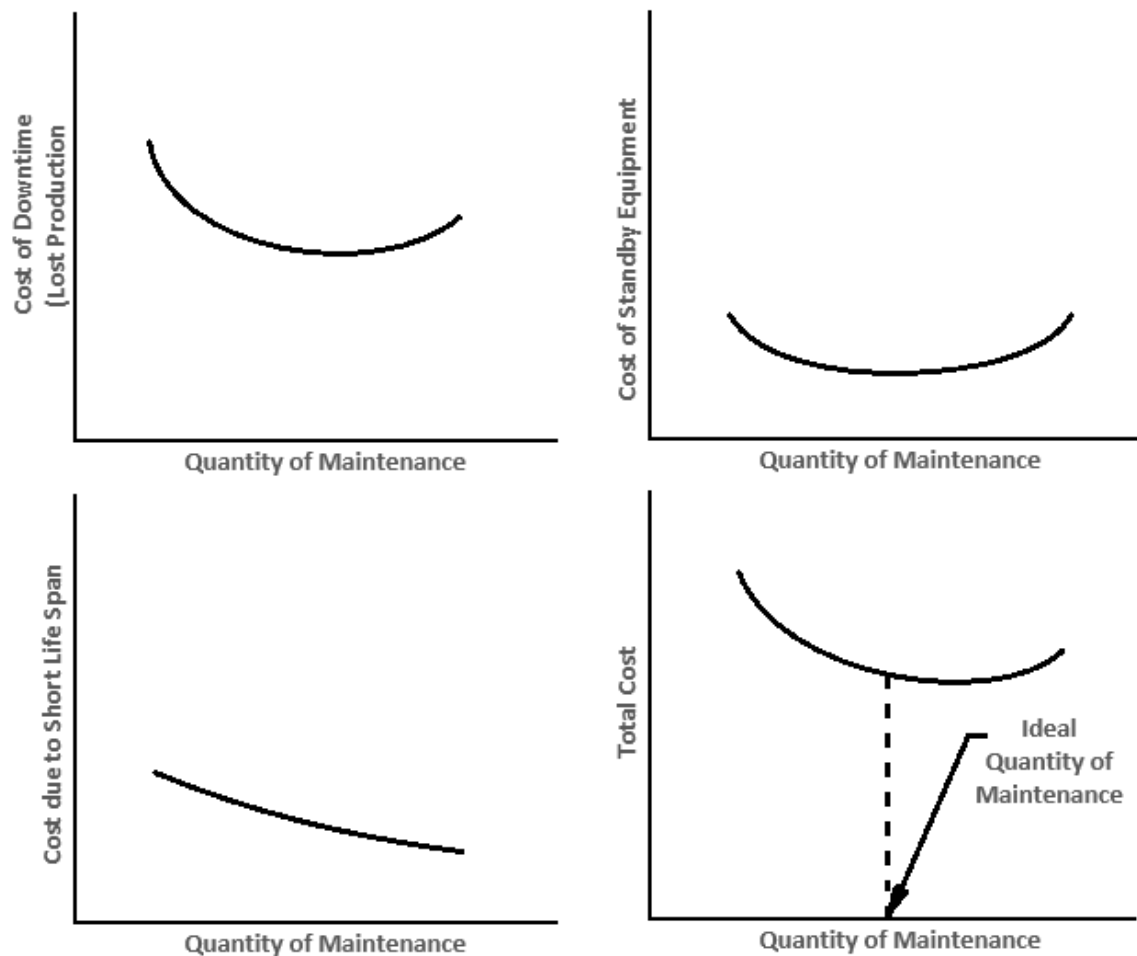


Figura II.2. Relación entre la cantidad de Mantenimiento y diferentes costos. Fuente: Niebel (1994).

Eti, Ogaji, & Probert (2006), en su enfoque, se refieren al costo de mantenimiento como un costo extremadamente alto que se puede evitar si es que se toman los resguardos y medidas necesarias. Por ejemplo, en la Industria química, los procesos de mantenimiento de mejor desempeño en el mundo cada año cuestan un 1,8% a 2,0% del valor de reposición de la planta. En operaciones mal administradas, los costos de mantenimiento por año podrían exceder el 5% del valor de los activos de sustitución, es decir, un despilfarro de US\$50.000 al año es típico por cada US\$1.000.000 de valor de los activos. Para agravar el costo de mantenimiento, tomado del ejercicio anterior, el valor de despilfarro de US\$50.000 anuales, durante una vida de veinte años a una tasa promedio anual de negocios de 12% para realizar

el cálculo, el costo de oportunidad perdido sería de US\$2.162.000, debido a un mal diseño o construcción de los equipos y un funcionamiento ineficaz de las prácticas de mantenimiento.

En el ejemplo citado, por cada 1% del valor de los activos de sustitución gastados anualmente en el mantenimiento durante un período de 20 años, US\$75.000 por cada US\$1.000.000 del capital original invertido no dará lugar a ningún beneficio económico. El costo de oportunidad perdido será entonces evaluado tal como se observa en la Tabla II.2:

<b>Características que deben tenerse en cuenta al evaluar el costo de oportunidad perdido</b>					
Costo de mantenimiento anual como % del valor de reposición de los activos	Valor de reposición de los activos (\$)	Duración de la vida del activo (años)	Coste medio ponderado del capital (%)	Valor acumulado de 20 años de mantenimiento del costo de oportunidad en el costo promedio de la tasa de capital	Valor actual de capital
					Año de mantenimiento
					Costo de oportunidad como un costo promedio ponderado de capital sin inflación

Tabla II.2. Características que deben tenerse en cuenta al evaluar el costo de oportunidad perdido. Fuente: Eti, Ogaji, & Probert (2006).

Por otra parte, en los últimos años, algunas industrias han mostrado gradualmente crecientes preocupaciones, ya sea en los mayores costos de mantenimiento y la productividad del mantenimiento.

El mantenimiento es a menudo el mayor gasto de gestión en plantas de muchas industrias, llegando a superar el beneficio neto anual. Aunque las estrategias tales como Mantenimiento Preventivo (PM) y Mantenimiento Predictivo (PDM) han producido ahorros de hasta el 25%, algunos estudios han sugerido que más de un tercio de los costos de mantenimiento se puede ahorrar sin reducir el tiempo de actividad. Por lo tanto, es importante que las organizaciones maximicen su eficacia del mantenimiento y por lo tanto el tiempo de actividad del equipo. En un estudio llevado a cabo en las industrias Nigerianas (Eti, Ogaji, & Probert, 2006), la mayoría de los Departamentos de Mantenimiento mostraron productividades de alrededor de 25% a 35% de la productividad ideal. Sin embargo, la

planificación y programación de las actividades de mantenimiento podrían mejorar de manera significativa en este sentido. Para ello, los objetivos del Departamento de Mantenimiento debiesen ser:

- Aumentar la eficacia y eficiencia de la planta y de los equipos.
- Impulsar el beneficio obtenido.
- Reducir los costos de mantenimiento y explotación.
- Mejorar la disponibilidad y la fiabilidad.
- Elevar el rendimiento financiero de la inversión en activos.
- Aplicar un paradigma de mejora continua.
- Introducir una cultura corporativa inspiradora entre el personal de mantenimiento.

El objetivo general es aumentar al máximo el valor alcanzado por las inversiones de mantenimiento, es decir, la optimización de beneficios con la excelencia de mantenimiento.

Por lo tanto, con los antecedentes observados anteriormente, se puede señalar que se deben desarrollar planes de trabajo de mantenimiento que ayuden a controlar los Costos asociados al Mantenimiento. Puesto que dichos costos pueden llegar a producir una gran pérdida monetaria y productiva, puesto que dentro de los Costos de Mantenimiento están los Costos de pérdida de producción, que se produce cuando el proceso productivo es interrumpido por una avería en la línea de producción. Así también, es importante fijar correctamente los objetivos de los Departamentos de Mantenimiento de manera que desarrollen una planificación y programación de las actividades de mantenimiento en función de dichos objetivos.

## **2.5 Planes de Mantenimiento**

Cada equipo ocupa una posición distinta en el proceso industrial, y tiene unas características que lo hacen diferente del resto, incluso de otros equipos similares. Esto quiere

decir que una bomba o un motor pueden necesitar de unas tareas de mantenimiento, mientras que otra bomba y otro motor similares pueden necesitar de otro tipo de tareas muy distintas. Si queremos optimizar, ya no es suficiente con pensar en el tipo de instalación o en las características del equipo. Es necesario tener en cuenta toda una serie de factores, como el coste de una parada, su influencia en la seguridad, el coste de una reparación, etc., que van a determinar las tareas de mantenimiento más convenientes para cada equipo.

De esta forma García Garrido (2010) plantea que el Plan de Mantenimiento corresponde a un conjunto de tareas de mantenimiento programadas, agrupadas o no, que siguen algún tipo de criterio en común.

El plan de mantenimiento engloba tres tipos de actividades:

- Las actividades rutinarias que se realizan a diario, y que normalmente las lleva a cabo el equipo de operación.
- Las actividades programadas que se realizan a lo largo del año.
- Las actividades que se realizan durante las paradas programadas.

Además, se deben determinar informaciones específicas de los planes de mantenimiento tales como: frecuencia, especialidad, duración, necesidad de permiso de trabajo especial, necesidad de parar la máquina para efectuarla, entre otros.

Duarte, Craveiro, y Trigo (2006) presentan en su periódico un Plan de Mantenimiento Preventivo de un sistema de componentes en serie, donde las operaciones que componen al Plan de Mantenimiento presentan diferentes frecuencias de mantenimiento tal como muestra la Figura II.3.

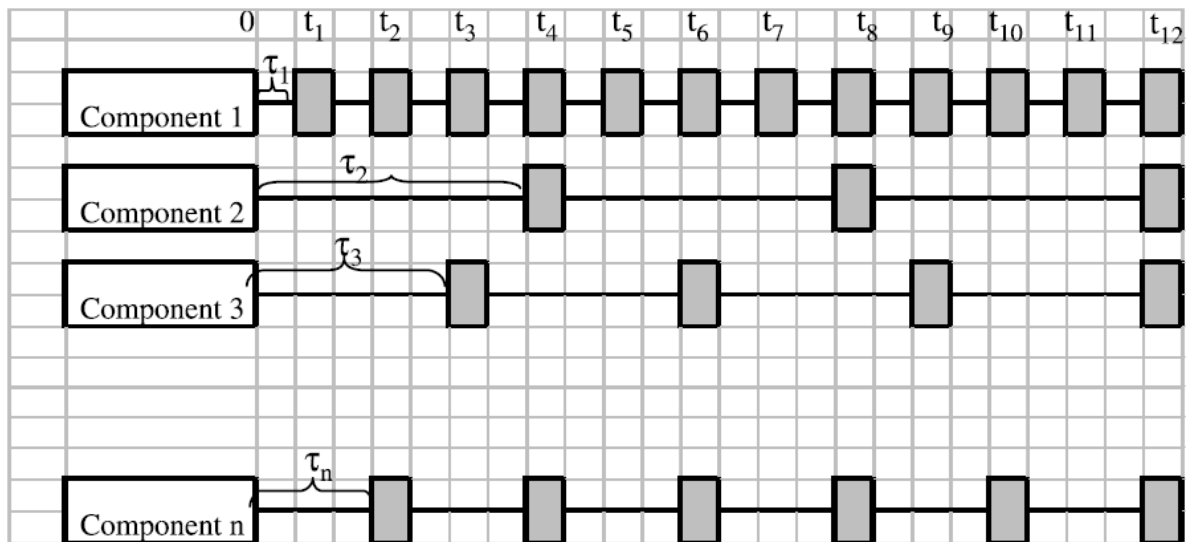


Figura II.3. Un plan de mantenimiento preventivo. Fuente: Duarte, Craveiro, y Trigo (2006).

En la Figura II.3, se representa a un Plan de Mantenimiento con “n” cantidad de componentes, de las cuales se pueden observar sus respectivas frecuencias de mantenimiento y la programación de ejecución de cada componente dada por el tiempo entre mantenimiento preventivo dado por la frecuencia asociada a cada componente, lo que es denominado un sistema en serie.

Por lo tanto, los Planes de Mantenimiento entregan una calendarización de las tareas de mantención que deben ser ejecutadas a los diferentes equipos, con la información necesaria para llevar a cabo cada operación. Además, ayudan a las grandes industrias a optimizar y controlar la ejecución de operaciones preventivas de todos los equipos para evitar o disminuir la probabilidad de que ocurra una falla.

## 2.6 Optimización de los Planes de Mantenimiento

Para desarrollar las operaciones de mantenimiento preventivo en una planta que posea cientos o miles de equipos es necesaria la utilización de los Planes de Mantenimiento, puesto que ayudan a estandarizar la ejecución de las tareas preventivas y generan la base del mantenimiento que se lleva a cabo en las diferentes áreas de trabajo de una planta.

Uno de los problemas más críticos de los Planes de mantenimiento es la determinación de la frecuencia óptima para llevar a cabo el mantenimiento preventivo en equipos, con el fin de asegurar su disponibilidad. Para dar solución a este problema, Duarte, Craveiro, y Trigo (2006) proponen un algoritmo para resolver el problema de la gestión de mantenimiento de un sistema en serie, sobre la base del mantenimiento preventivo en los diferentes componentes de un sistema.

### 2.6.1 Conceptos y resultados previos

Un Plan de Mantenimiento de un sistema en serie corresponde a la reactivación de las operaciones que componen a un Plan de Mantenimiento dadas por el tiempo entre mantenimiento preventivo correspondiente a la frecuencia asociada a cada Plan.

Se denomina disponibilidad puntual de un sistema en el tiempo,  $A(t)$ , a la probabilidad de que el sistema esté en un estado de trabajo (funcionando adecuadamente) en el tiempo  $t$ . Mientras que la indisponibilidad del sistema queda definida como  $Q(t)$ .

$$Q(t) = 1 - A(t) \quad \text{Ecuación II.1.}$$

Para obtener la disponibilidad puntual de un sistema, se considera una tasa de fracaso constante  $\lambda$  y una tasa de reparación constante  $\mu$ . Así, la disponibilidad puntual de un sistema se obtiene mediante:

$$A(t) = \frac{\mu}{\mu+\lambda} + \frac{\lambda}{\mu+\lambda} e^{-(\mu+\lambda)t} \quad \text{Ecuación II.2.}$$

Y la disponibilidad limitante es:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{\mu}{\mu+\lambda} \quad \text{Ecuación II.3.}$$

El segundo término en la Ecuación II.2, disminuye rápidamente a cero cuando  $t$  aumenta en el tiempo. Por lo tanto, se puede afirmar que:

$$A(t) \approx \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad \text{Ecuación II.4.}$$

Por lo tanto, se puede inferir que la disponibilidad de un sistema de este tipo es casi constante. En la Figura II.4, se muestra el comportamiento de la función de disponibilidad de un sistema con respecto al tiempo.

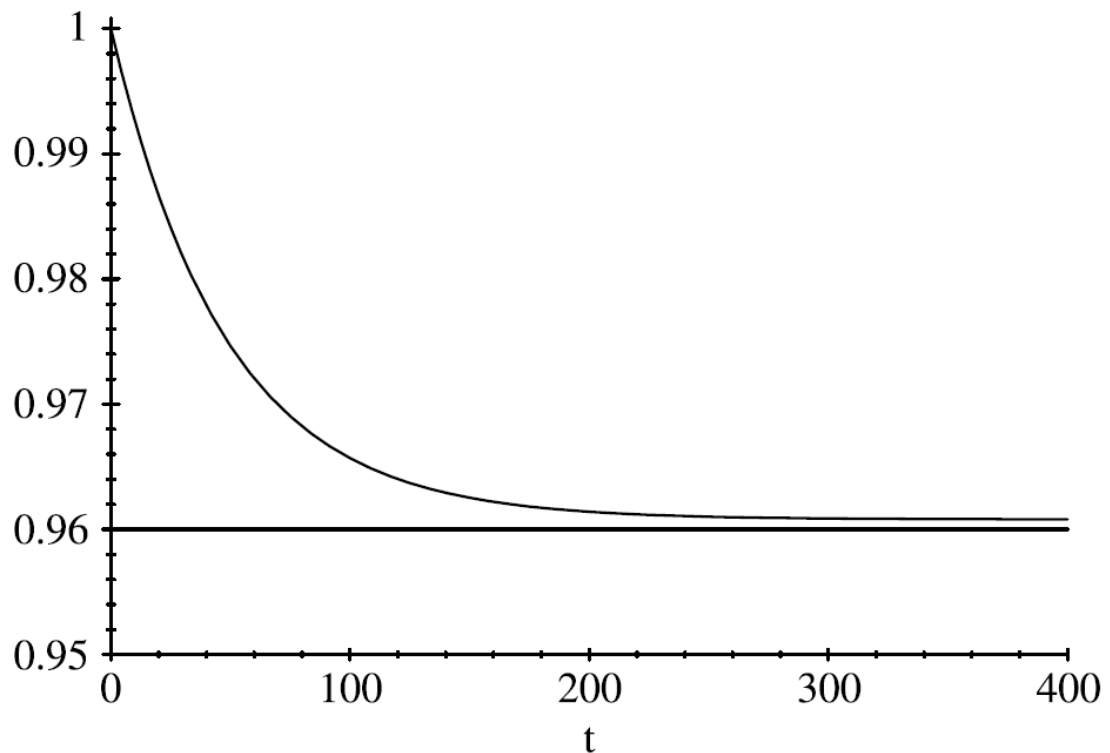


Figura II.4. Ejemplo de una función de disponibilidad de un sistema. Fuente: Duarte & Soares (2007).

Se puede observar de la Figura II.4, que la función de disponibilidad de un sistema alcanza un punto donde se estabiliza y luego se mantiene constante, para este caso cuando  $t$  es mayor a 200.

Por tanto, se puede concluir que, para garantizar un valor de disponibilidad  $A$ , conocida la tasa de reparación constante ( $\mu$ ) y el valor de la tasa de fracaso constante del sistema, se tendrá que satisfacer la siguiente relación:

$$A(t) \approx \frac{\mu}{\mu+\lambda} \leftrightarrow \lambda = \frac{\mu(1-A)}{A} \quad \text{Ecuación II.5.}$$

### 2.6.2 Modelo y supuestos

Para el siguiente caso, se supone que un sistema se encuentra con una tasa de riesgo creciente ( $h(t) = at; a > 0$ ) y una tasa de reparación constante ( $\mu$ ).

El objetivo es determinar el intervalo de tiempo entre las tareas de mantenimiento preventivo (se supone que el sistema se restaura a una condición tan buena “como nueva” después de cada operación de mantenimiento) de tal forma que la disponibilidad del sistema sea no menor que  $A$ .

La idea principal para la solución de este problema consiste en determinar el intervalo de tiempo durante el cual la tasa de riesgo creciente puede ser sustituida por una tasa de fracaso constante con el fin de garantizar un nivel de disponibilidad pre-determinado.

Aplicando el teorema del valor medio del cálculo integral a la función  $h(t) = at; a > 0$ , se obtiene:

$$\int_0^x at \, dt = \lambda x \rightarrow \left[ \frac{[at]^2}{2} \right]_0^x = \frac{ax^2}{2} = \lambda x \rightarrow x = 0 \vee x = \frac{2\lambda}{a} \quad \text{Ecuación II.6.}$$

Sustituyendo  $\lambda$  en la Ecuación II.6, por su valor aproximado dado en la Ecuación II.3, se tiene:

$$x = \frac{2}{a} \frac{\mu(1-A)}{A} \quad \text{Ecuación II.7.}$$

Por tanto, se puede concluir que, en el intervalo de tiempo:

$$\left[0, \frac{2\mu(1-A)}{a}\right]$$

Las funciones de riesgo,  $h(t) = at; a > 0$ , y  $h(t) = \frac{\mu(1-A)}{A}$ , garantizan aproximadamente el mismo valor de la disponibilidad. Lo que se acaba de demostrar formalmente puede afirmarse en la siguiente forma:

**Proposición:** *Sea  $S$  un sistema que presenta una tasa de riesgo creciente,  $h(t) = at; a > 0$ , y una tasa de reparación constante  $\mu$ . Para garantizar una disponibilidad para el sistema igual o mayor que  $A$ , el intervalo de tiempo entre dos tareas de mantenimiento preventivo consecutivos debe ser igual o menor que:*

$$\frac{2\mu(1-A)}{aA}$$

### 2.6.3 Optimización de los planes de mantenimiento de un sistema de componentes en serie

En esta sección, se presenta un modelo para la gestión de mantenimiento preventivo de un sistema de componentes<sup>12</sup> en serie.

El sistema se compone de un conjunto de  $n$  componentes en serie, como se observa en la Figura II.5.

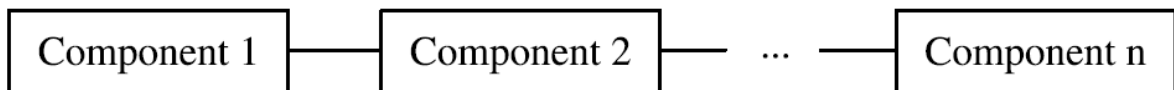


Figura II.5. Un sistema de  $n$  componentes en serie. Fuente: Duarte, Craveiro, & Trigo (2006).

<sup>12</sup> Para el caso del estudio realizado en Celulosa Nueva Aldea, se le denomina como “Operaciones”.

Deje  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  ser las unidades de tiempo entre las tareas de mantenimiento preventivo en los componentes  $1, 2, \dots, n$ , respectivamente (véase Figura II.3.), asumiendo que estas acciones restablecen periódicamente los componentes a la condición “como nueva”, que tendrán, por lo tanto, las consecuencias en los niveles de fiabilidad y disponibilidad del sistema.

El objetivo es calcular el vector:

$$[\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n]^T$$

De tal manera que el tiempo de inactividad total de un determinado período de tiempo no exceda un valor predeterminado, es decir, que garantice el nivel de servicio especificado y al mismo tiempo minimice los costos de mantenimiento.

Se supone que cada componente tiene una función de la tasa de riesgo que aumenta linealmente:

$$h_i(t) = a_i t; \quad a_i > 0 \quad \text{Ecuación II.8.}$$

Y una tasa constante reparación:

$$m_i(t) = \mu_i \quad \text{Ecuación II.9.}$$

El costo de cada tarea de mantenimiento preventivo es  $cmp_i$  y el costo de cada tarea de mantenimiento correctivo es  $cmc_i$ .

Dado que, la disponibilidad del sistema que consta de  $n$  componentes en serie requiere que todas las unidades deben estar disponibles (suponiendo que las fallas de componentes son independientes), la disponibilidad del sistema  $A$  es:

$$A = \prod_{i=1}^n A_i \quad \text{Ecuación II.10.}$$

Donde  $A_i$  es la disponibilidad de la componente  $i$ .

La aplicación de la propuesta presentada en la Sección “*Modelo y supuestos*”, se puede escribir que la disponibilidad de cada componente  $i$  es  $A_i$  durante el intervalo:

$$\left[0, \frac{2 \mu_i(1 - A_i)}{a_i A_i}\right]$$

Y su función de riesgo se puede aproximar por la función constante:

$$h_i(t) = \frac{\mu_i(1-A_i)}{A_i} \quad \text{Ecuación II.11.}$$

Entonces, el número esperado de fallos en ese intervalo de tiempo es:

$$\frac{2 \mu_i(1 - A_i)}{a_i A_i} \frac{\mu_i(1 - A_i)}{A_i} = \frac{2 \mu_i^2(1 - A_i)^2}{a_i A_i^2}$$

La función objetivo (definido como una función de costo por unidad de tiempo) es:

$$\text{Min } C(A_1, A_2, \dots, A_n) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{PMC_i}{\frac{2 \mu(1 - A_i)}{a_i A_i}} + \left( \frac{CMC_i}{\frac{2 \mu(1 - A_i)}{A_i}} * 2(1 - A_i)^2 \right) \right]$$

$$\text{Min } C(A_1, A_2, \dots, A_n) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{a_i A_i PMC_i}{2 \mu(1 - A_i)} + \left( \frac{CMC_i A_i(1 - A_i)}{\mu} \right) \right] \quad \text{Ecuación II.12.}$$

Sujeto a:

$$\begin{cases} \prod_{i=1}^n A_i \geq A, \\ 0 < A_i < 1, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad \text{Ecuación II.13.}$$

Por lo tanto, el modelo propuesto ayuda a optimizar las frecuencias de mantenimiento de las componentes de un Plan de Mantenimiento, que cuenten con una tasa de reparación constante y una tasa de riesgo creciente. Además, se debe considerar que el modelo optimiza minimizando el costo de ejecución de las componentes, cumpliendo con el requerimiento de una disponibilidad deseada.

## Capítulo III: Desarrollo de la Optimización de los Planes de Mantenimiento

---

Como se mencionó en el capítulo 1, el área de Fibra de Celulosa Nueva Aldea cuenta con 273 planes de mantenimiento programados “*En servicio*”, de los cuales 91 corresponden al puesto de trabajo Mecánico y 182 planes al puesto de Electrocontrol. En el caso de los planes de mantenimiento del puesto de trabajo Mecánico, se encuentran clasificados en tres tipos de mantenimiento: Rutas de Inspección, Rutas de Lubricación y Mantenimiento Programado. De los cuales, solo los planes de mantenimiento correspondientes a Rutas de Inspección pueden ser modificables, debido a que las frecuencias asociadas a estos planes de mantenimiento fueron determinadas mediante el criterio del personal del Departamento de Mantenimiento del área. Mientras que las frecuencias asociadas a las Rutas de Lubricación y Mantenimiento Programado fueron determinadas usando la información entregada por los proveedores o mediante el análisis del historial de fallas de los equipos.

La Tabla III.1, representa la cantidad de Planes clasificados por el tipo de mantenimiento y sus respectivos porcentajes.

<b>Tipo de Plan de Mantenimiento</b>	<b>Cantidad de Planes de Mantenimiento</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Rutas de Lubricación</b>	33	36%
<b>Rutas de Inspección</b>	35	38%
<b>Mantenimiento Programado</b>	23	25%
<b>Total</b>	91	100%

Tabla III.1. Cantidad de Planes de Mantenimiento clasificados por tipo de mantención. Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla III.1, se puede observar que de los Planes de Mantenimiento programados “*En Servicio*” del puesto de trabajo Mecánico, un 38% de los Planes corresponden a Rutas de Inspección. Lo que implica que este es el porcentaje de Planes de Mantenimiento para este puesto de trabajo que pueden modificar sus frecuencias asociadas.

En el caso de los Planes de Mantenimiento del puesto de trabajo de Electrocontrol, como se observa en la Figura I.2, es necesario realizar una modificación a todos sus Planes de Mantenimiento, puesto que la distribución de las cargas de trabajo del año 2015 presenta sobrecargas en varias semanas de trabajo. Es decir, se puede realizar una modificación a las frecuencias de los 182 Planes de Mantenimiento programados “*En Servicio*” del puesto de Electrocontrol.

Con el objetivo de encontrar una solución a los problemas de sobrecargas de trabajo que se producen en el área de Fibra, tanto en el puesto de trabajo Mecánico como en el de Electrocontrol, se utiliza el modelo de optimización propuesto en la sección 2.6 de este informe “*Optimización de los Planes de Mantenimiento*”, donde el objetivo es modificar las frecuencias asociadas a las operaciones o componentes de los diferente Planes de Mantenimiento, minimizando su Costo por unidad de tiempo y aumentando su disponibilidad.

Para poder usar el modelo, es necesario obtener ciertas variables en base a la información recopilada por el sistema SAP. El cálculo de estas variables y de los coeficientes requeridos se obtiene utilizando algunas de las ecuaciones mencionadas en el capítulo II sección 2.6, y otras mediante información obtenida por los autores del trabajo de investigación en el cual está basado este trabajo (Duarte, Craveiro, & Trigo, Optimization of the preventive maintenance plan of a series components system, 2006). Las ecuaciones utilizadas son:

$$h_i(t) = a_i t; a_i > 0 \quad \text{Ecuación II.8.}$$

$$m_i(t) = \mu_i \quad \text{Ecuación II.9.}$$

$$A = \prod_{i=1}^n A_i \quad \text{Ecuación II.10.}$$

$$h_i(t) = \frac{\mu_i(1-A_i)}{A_i} \quad \text{Ecuación II.11.}$$

$$\text{Min } C(A_1, A_2, \dots, A_n) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{a_i A_i P M C_i}{2\mu(1-A_i)} + \left( \frac{C M C_i A_i (1-A_i)}{\mu} \right) \right] \quad \text{Ecuación II.12.}$$

$$\begin{cases} \prod_{i=1}^n A_i \geq A, \\ 0 < A_i < 1, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad \text{Ecuación II.13.}$$

$$\mu_i = \frac{1}{TTP} \quad \text{Ecuación III.1.}$$

$$a_i = \frac{1}{\tau_i} \quad \text{Ecuación III.2.}$$

$$A_i = \frac{\mu_i}{\mu_i + a_i} \quad \text{Ecuación III.3.}$$

Cuya nomenclatura es explicada a continuación:

<b><math>a_i</math></b>	Coeficiente de función de riesgo de la componente $i$
<b><math>h_i(t)</math></b>	Función de tasa de riesgo de la componente $i$
<b><math>\mu_i</math></b>	Coeficiente de reparación de la componente $i$
<b><math>A_i</math></b>	Disponibilidad de la componente $i$
<b><math>TTP</math></b>	Tiempo en llevar a cabo una acción de mantenimiento preventivo
<b><math>PMC</math></b>	Costo de mantenimiento preventivo
<b><math>CMC</math></b>	Costo de mantenimiento correctivo
<b><math>\tau_i</math></b>	tiempo entre dos tareas de mantenimiento preventivo consecutivos de la componente $i$

Tabla III.2. Nomenclatura de variables utilizadas para al utilizar el algoritmo de optimización. Fuente: Duarte, Craveiro, & Trigo (2006).

Luego, teniendo en conocimiento las ecuaciones que deben ser utilizadas y la información requerida para obtener las variables a utilizar en el modelo, se tuvo que recopilar y tabular la información correspondiente a los Planes de Mantenimiento, para lo cual se debieron definir los parámetros que entregan la información que se quiere obtener, tales como los puestos de trabajo a consultar (códigos SAP 115 y 116 para el puesto Mecánico; 215 y 216 para Electrocontrol), las fechas de inicio extrema, clase de mantenimiento (E/S: En Servicio), entre otros. En la Figura III.1, se ilustra un ejemplo de los parámetros mencionados anteriormente.

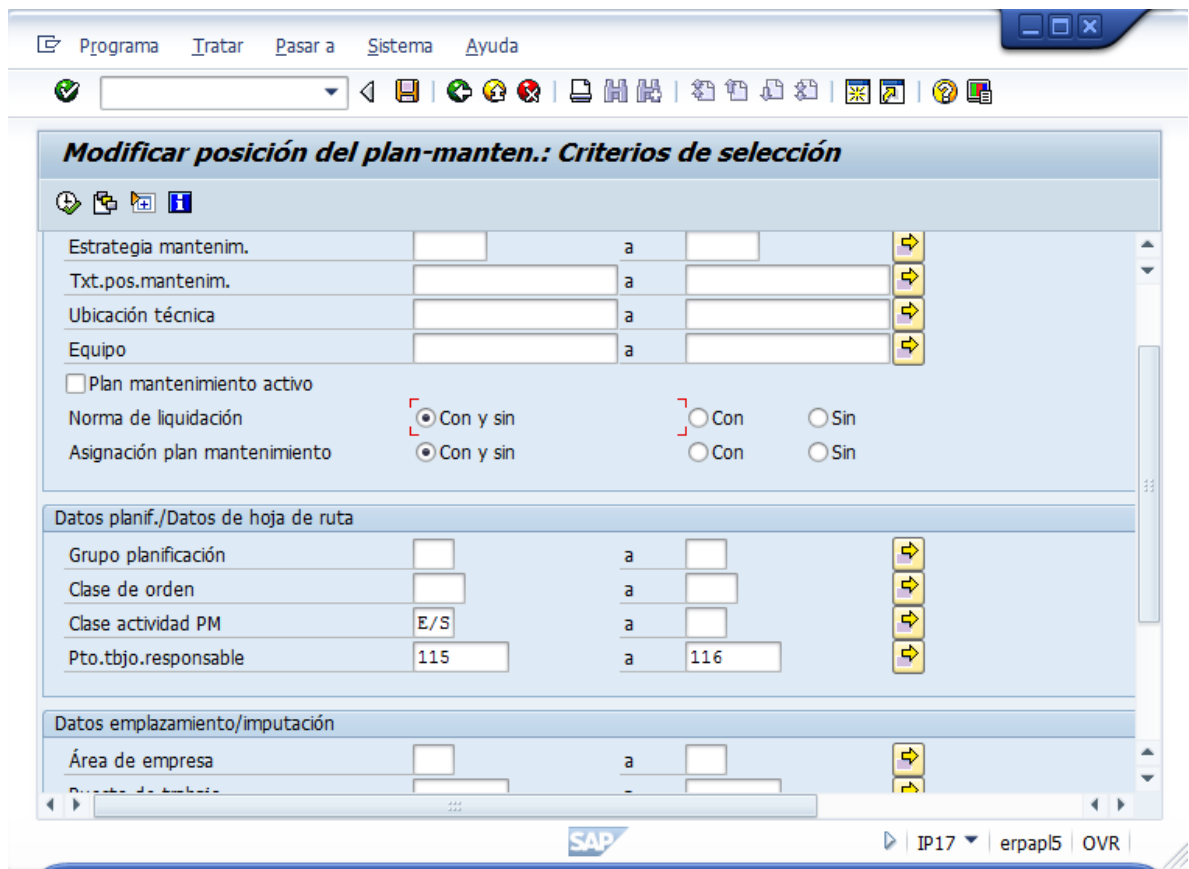


Figura III.1. Ejemplo de parámetros requeridos para obtención de información. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez obtenida la información requerida de los Planes de Mantenimiento del área de Fibra, se exporta a una planilla de Excel donde se seleccionan aquellos campos que contengan los datos necesarios para poder obtener las variables requeridas para utilizar el modelo de optimización. Adicionalmente para el puesto de trabajo Mecánico, se filtraron los datos para obtener los Planes de Mantenimiento que corresponden a Rutas de Inspección, como se mencionó anteriormente, solo esta clasificación puede modificar sus frecuencias de ejecución para este puesto de trabajo. Mientras que para Electrocontrol, todos los Planes de Mantenimiento pueden modificar sus frecuencias y fechas de inicio extrema.

En la Figura III.2, se muestra una captura de la planilla Excel que contiene información de los Planes de Mantenimiento del puesto Mecánico y las variables requeridas para utilizar el algoritmo de optimización.

PLAN	Nº OP	DESC.OPER	PAQ.MANTEN	FRECUENCIA	TTP	a (i)	u (i)	A(i)	PMC	CMC	C(A(i))
32800	40	MIE IDE.BBA AREA 546 1504 / PtoMae:25045	1-semana	168	2	0,005952381	0,5	0,988235294	12	60	0,017804304
32800	50	VIE IDE.BBA AREA 546 1504 / PtoMae:25045	1-semana	168	2	0,005952381	0,5	0,988235294	12	60	0,017804304
32800	60	LUN IDE.BBA AREA 546 1504 / PtoMae:25045	1-semana	168	2	0,005952381	0,5	0,988235294	12	60	0,017804304
32829	40	MIE IDE BBA AREA555 1507 / PtoMae:25081	1-semana	168	2	0,005952381	0,5	0,988235294	12	60	0,017804304
32829	50	VIE IDE.BBA AREA555 1507 / PtoMae:25081	1-semana	168	2	0,005952381	0,5	0,988235294	12	60	0,017804304
32831	10	MIE INSP.SIST.DER.541 1511/PtoMae:25024	1-semana	168	1	0,005952381	1	0,99408284	6	30	0,017751517
32831	20	VIE INSP.SIST.DER.541 1511/PtoMae:25024	1-semana	168	1	0,005952381	1	0,99408284	6	30	0,017751517
32831	30	LUN INSP.SIST.DER.541 1511/PtoMae:25024	1-semana	168	1	0,005952381	1	0,99408284	6	30	0,017751517
32836	10	INSP.SIS.QUE.HOR.541F1 1518/PtoMae:25137	1-semana	168	1	0,005952381	1	0,99408284	6	30	0,017751517
32852	10	MIE INS.SIS.DER.546F1 1512/PtoMae:25025	1-semana	168	1	0,005952381	1	0,99408284	6	30	0,017751517
32852	20	VIE INS.SIS.DER.546F1 1512/PtoMae:25025	1-semana	168	1	0,005952381	1	0,99408284	6	30	0,017751517
32852	30	LUN INS.SIS.DER.546F1 1512/PtoMae:25025	1-semana	168	1	0,005952381	1	0,99408284	6	30	0,017751517
32939	10	MIE INSP.SIST.GAS 1536 541/PtoMae:25514	1-semana	168	1	0,005952381	1	0,99408284	6	30	0,017751517
32939	20	VIE INSP.SIST.GAS 1536 541/PtoMae:25514	1-semana	168	1	0,005952381	1	0,99408284	6	30	0,017751517
32939	30	LUN INSP.SIST.GAS 1536 541/PtoMae:25514	1-semana	168	1	0,005952381	1	0,99408284	6	30	0,017751517
33499	10	MIE IDE MEC. 547L1 1600 / PtoMaes:27063	1-semana	168	3,5	0,005952381	0,285714286	0,979591837	21	105	0,017827286
33499	20	VIE IDE MEC. 547L1 1600 / PtoMaes:27063	1-semana	168	3,5	0,005952381	0,285714286	0,979591837	21	105	0,017827286
33499	30	LUN IDE MEC. 547L1 1600 / PtoMaes:27063	1-semana	168	3,5	0,005952381	0,285714286	0,979591837	21	105	0,017827286
33506	10	MIE IDE MEC. 546L1 1599 / PtoMaes:26978	1-semana	168	3,5	0,005952381	0,285714286	0,979591837	21	105	0,017827286
33506	20	VIE IDE MEC. 546L1 1599 / PtoMaes:26978	1-semana	168	3,5	0,005952381	0,285714286	0,979591837	21	105	0,017827286
33506	30	LUN IDE MEC. 546L1 1599 / PtoMaes:26978	1-semana	168	3,5	0,005952381	0,285714286	0,979591837	21	105	0,017827286
33507	10	MIE IDE MEC. 541L1 1598 / PtoMaes:26928	1-semana	168	3	0,005952381	0,333333333	0,98245614	18	90	0,01782212
33507	20	VIE IDE MEC. 541L1 1598 / PtoMaes:26928	1-semana	168	3	0,005952381	0,333333333	0,98245614	18	90	0,01782212
33507	30	LUN IDE MEC. 541L1 1598 / PtoMaes:26928	1-semana	168	3	0,005952381	0,333333333	0,98245614	18	90	0,01782212
33529	10	MIE IDE MEC.1594 541L2 / PtoMaes:27224	1-semana	168	3,5	0,005952381	0,285714286	0,979591837	21	105	0,017827286
33529	20	VIE IDE MEC.1594 541L2 / PtoMaes:27224	1-semana	168	3,5	0,005952381	0,285714286	0,979591837	21	105	0,017827286
33535	10	MIE IDE MEC.1604 547L2 / PtoMaes:27333	1-semana	168	3,5	0,005952381	0,285714286	0,979591837	21	105	0,017827286
33535	30	LUN IDE MEC.1604 547L2 / PtoMaes:27333	1-semana	168	3,5	0,005952381	0,285714286	0,979591837	21	105	0,017827286
33604	10	MIE IDE MEC.1601 546L2 / PtoMaes:27264	1-semana	168	3,5	0,005952381	0,285714286	0,979591837	21	105	0,017827286

Figura III.2. Captura de Planes de Mantenimiento del puesto de trabajo Mecánico con cálculo de variables previas a optimización. Fuente: Elaboración Propia.

En el trabajo de investigación de Duarte, Craveiro, y Trigo (2006), mencionado en la sección 2.6, se indica que la función objetivo (Ecuación II.12) se modificó de tal manera que los resultados obtenidos incluyan el tiempo de ejecución de las operaciones de mantenimiento preventivo (TTP). Esta modificación no aparece en el artículo publicado y no es posible determinar cuales fueron las variables modificadas o las operaciones matemáticas que fueron agregadas a la función objetivo. Ante esta situación, se envió un mensaje mediante correo electrónico a los tres autores del artículo, de los que José Caldeira Duarte<sup>13</sup> y Tomás Pedro Trigo<sup>14</sup> accedieron a responder las dudas expuestas en el mensaje.

De los comentarios entregados por los autores, se pudo establecer la modificación realizada a la función objetivo del modelo, en la que se le adiciona el tiempo de ejecución de las operaciones (TTP) al intervalo de tiempo entre dos acciones de mantenimiento preventivo consecutivos. De esta manera, la función objetivo queda definida de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Min } c(A_1, A_2, \dots, A_n) &= \sum_{i=1}^n \left[ \frac{PMC_i}{\frac{2}{a_i} \frac{\mu(1-A_i)}{A_i} + TTP} + \left( \frac{CMC_i * 2(1-A_i)^2}{\frac{2\mu(1-A_i)}{A_i} + TTP} \right) \right] \\ \text{Min } c(A_1, A_2, \dots, A_n) &= \sum_{i=1}^n \left[ \frac{PMC_i}{\frac{2(1-A_i)}{a_i A_i} + TTP} + \left( \frac{2 * CMC_i * (1-A_i)^2}{2\mu \frac{(1-A_i)}{A_i} + TTP} \right) \right] \end{aligned} \quad \text{Ecuación IV.4.}$$

Con la utilización del modelo propuesto, se busca encontrar la cantidad de trabajo de mantenimiento ideal que se genera cuando se minimiza el costo total de mantenimiento (Eti, Ogaji, & Probert, 2006) y al mismo tiempo aumente la disponibilidad de los equipos.

<sup>13</sup> José Caldeira Duarte: Coautor del trabajo de investigación “Optimization of the preventive maintenance plan of a series components system” (2006).

<sup>14</sup> Tomás Pedro Trigo: Coautor del trabajo de investigación “Optimization of the preventive maintenance plan of a series components system” (2006).

### 3.1 Primera Optimización

Con el fin de determinar los efectos producidos de las Rutas de Inspección de toda el área de Fibra, la primera optimización se realizó a los Planes de Mantenimiento de ambos puestos de trabajo correspondientes a Rutas de Inspección. En la Tabla III.3, se resume la cantidad de Planes correspondientes a esta clasificación y su porcentaje correspondiente.

	<b>Planes programados En Servicio</b>	<b>Planes correspondientes a Rutas de Inspección</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Mecánico</b>	91	35	38%
<b>Electrocontrol</b>	182	96	53%

Tabla III.3. Cantidad de Planes programados “En Servicio” y clasificados como Rutas de Inspección. Fuente: Elaboración Propia.

Para determinar la Disponibilidad deseada para los Planes de Mantenimiento de cada puesto de trabajo, se determinó la Disponibilidad promedio del total de Planes clasificados como Rutas de Inspección, de esta manera se logra determinar los Planes que presentan Disponibilidad superior o inferior a la media, siendo estos últimos a los que se le pueden modificar su frecuencia aumentando su Disponibilidad y minimizando su Costo por unidad de tiempo.

	<b>Disponibilidad media</b>	<b>Disponibilidad mínima deseada</b>	<b>Planes por debajo de la media</b>	<b>Planes por sobre de la media</b>
<b>Mecánico</b>	0,982712837	0,98	12	23
<b>Electrocontrol</b>	0,993334843	0,99	34	62

Tabla III.4. Disponibilidad promedio de los Planes de Mantenimiento por puesto de trabajo del área de Fibra. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez seleccionados y tabulados las operaciones de los Planes de Mantenimiento a optimizar mediante el modelo junto a sus respectivas variables y determinada la disponibilidad deseada para cada puesto de trabajo, se utilizó la herramienta de MS Excel, Solver, utilizando el método de resolución GRG Nonlinear, para optimizar los Planes de Mantenimiento modificando sus frecuencias, de tal manera que aumente la disponibilidad y minimice los costos por unidad de tiempo.

				Frecuencia Actual	Frecuencia Optimizada	Costo por unidad de tiempo actual	Costo por unidad de tiempo optimizada	Disponibilidad actual	Disponibilidad optimizada	Variación de Costo por unidad de tiempo	Variación de Disponibilidad
PLAN	Nº OP	DESC.OPER	PAQ.MANTEN	FRECUENCIA	FRECUENCIA *	C(A(i))	C(A(i)) *	A(i)	A(i) *	Δ C(A(i))	Δ A(i)
35949	10	MIE.IDE DUCHAS EMERG.1982/ Pto	1-semana	168	247,0010249	0,014792931	0,01008061	0,99408284	0,995967759	0,00471232	0,001884918
35949	30	JUE.IDE DUCHAS EMERG.1982/ Pto	1-semana	168	247,0010249	0,014792931	0,01008061	0,99408284	0,995967759	0,00471232	0,001884918
35949	40	VIE.IDE DUCHAS EMERG.1982/ Pto	1-semana	168	247,0010249	0,014792931	0,01008061	0,99408284	0,995967759	0,00471232	0,001884918
35949	50	SAB.DUCHAS EMERG.1982 555 / Pto	1-semana	168	247,0010249	0,014792931	0,01008061	0,99408284	0,995967759	0,00471232	0,001884918
35949	60	MAR.IDE DUCHAS EMERG.1982/ Pto	1-semana	168	247,0010249	0,014792931	0,01008061	0,99408284	0,995967759	0,00471232	0,001884918

Figura III.3. Comparación de los resultados de la optimización y los valores originales del Plan de Mantenimiento código 35949 del puesto de trabajo Mecánico. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura III.3, se muestra a modo de ejemplo los resultados obtenidos al ejecutar el algoritmo de optimización en las operaciones que componen al Plan de Mantenimiento código 35949 del puesto Mecánico, donde se observa el cambio de la frecuencia original de 168 horas a 247 horas. Además, se observa la disminución del costo por unidad de tiempo de 0,00471232 CLP/hora y la disponibilidad aumentó a 0,995967759 en cada operación permitiendo obtener la Disponibilidad del Sistema (Ecuación II.10.) deseada.

Operación	Disponibilidad actual	Disponibilidad optimizada
10	0,99408284	0,995967759
30	0,99408284	0,995967759
40	0,99408284	0,995967759
50	0,99408284	0,995967759
60	0,99408284	0,995967759
<b>Total Plan</b>	<b>0,970762263</b>	<b>0,980000728</b>

Tabla III.5. Comparación de la Disponibilidad del Sistema Actual y la optimizada mediante el algoritmo, del Plan de Mantenimiento código 35949. Fuente: Elaboración Propia.

				Frecuencia Actual	Frecuencia Optimizada	Costo por unidad de tiempo actual	Costo por unidad de tiempo optimizada	Disponibilidad actual	Disponibilidad optimizada	Variacion de Costo por unidad de tiempo	Variacion de Disponibilidad
PLAN	Nº OP	DESC.OPER	PAQ.MANTEN	FRECUENCIA	FRECUENCIA *	C(A(i))	C(A(i)) *	A(i)	A(i) *	Δ C(A(i))	Δ A(i)
36153	10	MIE IDE ELE/CTRL 1917 546L1/PtoM	3-semanas	504	745,5577567	0,005944519	0,004020239	0,997032641	0,997992123	0,00192428	0,000959482
36153	20	JUE IDE ELE/CTRL 1918 546L1/PtoM	3-semanas	504	745,5577567	0,005944519	0,004020239	0,997032641	0,997992123	0,00192428	0,000959482
36153	30	VIE IDE ELE/CTRL 1919 546L1/PtoM	3-semanas	504	745,5577567	0,005944519	0,004020239	0,997032641	0,997992123	0,00192428	0,000959482
36153	40	LUN IDE ELE/CTRL 1925 546L1/PtoM	3-semanas	504	745,5577567	0,005944519	0,004020239	0,997032641	0,997992123	0,00192428	0,000959482
36153	50	MAR IDE ELE/CTRL 1926 546L1/PtoM	3-semanas	504	745,5577567	0,005944519	0,004020239	0,997032641	0,997992123	0,00192428	0,000959482

Figura III.4. Comparación de los resultados de la optimización y los valores originales del Plan de Mantenimiento código 36153 del puesto de trabajo Electrocontrol. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura III.4, se muestra a modo de ejemplo los resultados obtenidos al ejecutar el algoritmo de optimización en las operaciones que componen al Plan de Mantenimiento código 36153 del puesto Electrocontrol, donde se observa el cambio de la frecuencia original de 504 horas a 745,56 horas. Además, se observa la disminución del costo por unidad de tiempo de 0,00192428 CLP/hora y la disponibilidad aumentó a 0,997992123 en cada operación permitiendo obtener la Disponibilidad del Sistema (Ecuación II.10.) deseada.

Operación	Disponibilidad actual	Disponibilidad optimizada
10	0,997032641	0,997992123
20	0,997032641	0,997992123
30	0,997032641	0,997992123
40	0,997032641	0,997992123
50	0,997032641	0,997992123
<b>Total Plan</b>	<b>0,985250996</b>	<b>0,99000085</b>

Tabla III.6. Comparación de la Disponibilidad del Sistema Actual y la optimizada mediante el algoritmo, del Plan de Mantenimiento código 36153. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez aplicado el modelo de optimización a los Planes de Mantenimiento correspondientes a Rutas de Inspección que están por debajo de la media, se obtiene una nueva distribución de las cargas de trabajo para las 52 semanas del año 2015, debido a las modificaciones realizadas a sus frecuencias, tanto para el puesto de trabajo Mecánico<sup>15</sup> y de Electrocontrol<sup>16</sup>.

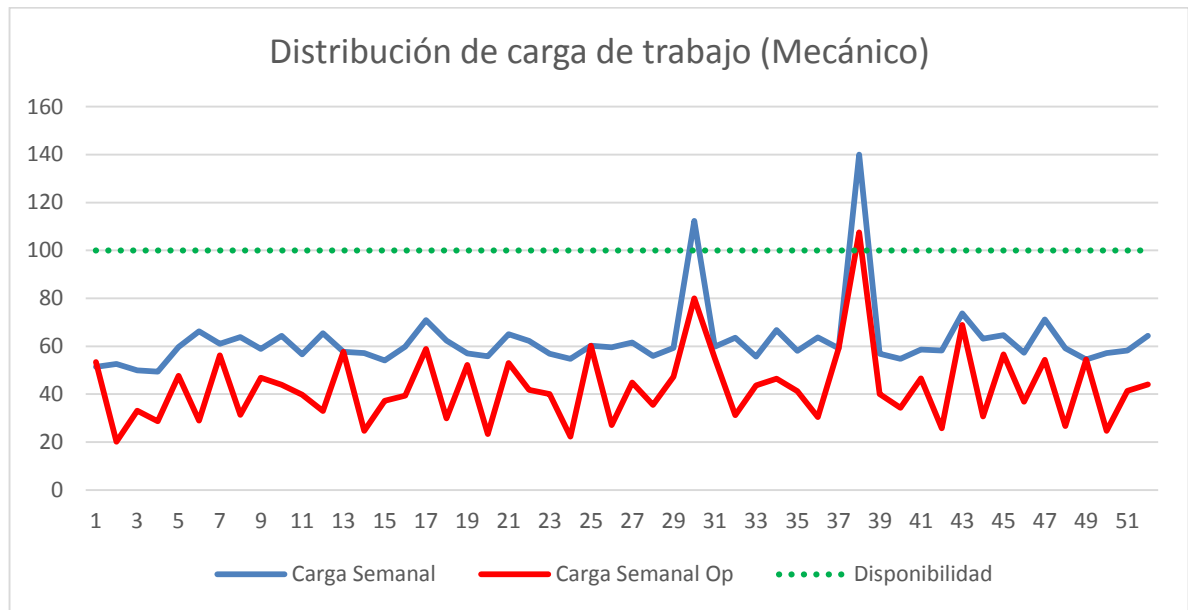


Figura III.5. Representación gráfica de las distribuciones de trabajo actuales (color azul) y después de la primera optimización (color rojo) para el puesto de trabajo Mecánico. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura III.5, se puede observar la distribución de carga de trabajo obtenida (color rojo) al aplicar el modelo de optimización a los Planes de Mantenimiento correspondientes a Rutas de Inspección y que tenían una Disponibilidad inferior a la deseada. En comparación a la distribución obtenida antes de la optimización (color azul), se puede observar que la carga de trabajo disminuyó casi es la totalidad del año 2015, inclusive la carga de trabajo total del año disminuyó desde un 62,32% a un 43,02% equivalente a una disminución de 2.502 HH de trabajo planificado (Ver Anexo 3). Pero a pesar de ser un resultado favorable desde el punto de vista anual, aún se mantiene una sobrecarga de trabajo

<sup>15</sup> Para mayor comprensión de la densificación resultante de la primera optimización para el puesto de trabajo Mecánico, revisar Anexo 3.

<sup>16</sup> Para mayor comprensión de la densificación resultante de la primera optimización para el puesto de trabajo Electrocontrol, revisar Anexo 4.

en la semana 38, producido en mayoritariamente por las operaciones de los Planes de mantenimiento que no corresponden a la clasificación de Rutas de Inspección y que no pueden ser modificar sus frecuencias.

	<b>Actual</b>	<b>Optimizado</b>
<b>Costo por unidad de tiempo</b>	251,7375481	251,472839692257
<b>Disponibilidad promedio</b>	0,98928603	0,993737150959478

Tabla III.7. Tabla comparativa de Costos y Disponibilidad antes y después de la primera optimización para el puesto de trabajo Mecánico. Fuente: Elaboración Propia.

De la Tabla III.7, se puede observar como aumentó la Disponibilidad promedio de los Planes de Mantenimiento correspondientes a Rutas de Inspección desde 0,98928603 a 0,993737150959478, lo que implica una mejora en la disponibilidad de los equipos que son revisados en las Rutas de Inspección del puesto de trabajo.

El costo asociado a la ejecución de los Planes de Mantenimiento, disminuyó de \$251,7 (CLP/Hora) a \$251,5 (CLP/Hora), lo que corresponde a una disminución de \$2.318,8 (CLP/Año). Al ser tan ínfimos los costos asociados a las acciones de mantenimiento preventivo, la disminución obtenida con este resultado no es relevante para el Área de Fibra, pues lo importante para el Departamento de Mantenimiento es encontrar la frecuencia de mantenimiento que aumente la disponibilidad de los equipos.

$$\begin{aligned}
 &(\$251,7375481 - \$251,472839692257) \left( \frac{CLP}{Hora} \right) * 24 \left( \frac{Hora}{Día} \right) * 365 \left( \frac{Día}{Año} \right) \\
 &= \$2.318,84565182868 \left( \frac{CLP}{Año} \right)
 \end{aligned}$$

**Nota:** *En los costos operacionales de las componentes de los Planes de Mantenimiento no se consideran los costos correspondientes al pago de los trabajadores (sueldo, horas extras, etc.), en estos solo se consideran los costos asociados a los materiales utilizados o al equivalente de la fracción del material usado (ejemplo: 2¼ Litros de*

lubricantes de un tambor de 10 Litros) y los costos correspondientes al contrato de un servicio externo (andamios, grúas, etc.). Para el caso de los trabajos preventivos programados “En Servicio”, estos conllevan bajos costos puesto que por lo general corresponden a inspecciones rutinarias que solo requieren una inspección visual, es decir, un consumo de Horas Hombre que no es considerado como un costo operacional por el sistema. En la Figura III.6, se puede observar una captura de algunos Planes de Mantenimiento con sus Costos Planificados (columna Total Plan.) y los Costos Reales al ejecutar la acción de mantenimiento (columna Cst.tot.reales), donde se evidencian los bajos costos considerados en el sistema SAP.

Plan mant.prev.	Cst.tot.reales	Total Plan.	Orden	Cl.act PM	Texto breve2
33529	18	36	93662129	E/S	Insp.Sem.Mec.- Area 541 L2 (1594)
33535	18	36	93662130	E/S	Insp.Sem.Mec.- Area 547 L2 (Fibra 2)
33604	18	36	93662140	E/S	Insp.Sem.Mec.- Area 546 L2 (Fibra2)
33702	15	30	93662144	E/S	Insp.Sem.Mec.- Area 556 L2 (Fibra 2)
35949	15	20	93662202	E/S	Insp.Mec. Duchas Emerg.555 // ( 1982 )
33703	20	30	93663436	E/S	Insp.Sem.Mec.- Area 555 L2 (Fibra 2)
34359	30	30	93663438	E/S	Insp.Mec.Ctrl Hid. 547 L1 (1792)
76177	0	65	93665526	E/S	Limpieza Preventiva Filtro autolimp 5376
76179	51	35	93665527	E/S	Limpieza Preventiva Filtro autolimp 5377
32852	10	15	93666198	E/S	Insp.Sem.Mec.- Sist.Rec.Derr. Area546L1
33499	36	54	93666337	E/S	Insp.Sem.Mec.- Area 547 L1
33506	36	54	93666342	E/S	Insp.Sem.Mec.- Area 546 L1
33507	30	45	93666348	E/S	Insp.Sem.Mec.- Area 541 L1 (1598)
62529	0	5	93666581	E/S	RUTA 3957,F1S,INSP ALERT TEMP PRENSAS
62773	0	5	93666582	E/S	Ruta 3967,F1S,Insp.Mec.Torres Enf Blanqu
49919	0	10	93667050	E/S	CAMBIO ELEM. FILTRANTE NASO4 98% N2
62721	5	5	93667662	E/S	RUTA 3963,F1S,INSP ALERT TEMP PRENSAS
32829	0	20	93668703	E/S	Insp.Sem.Mec.- Sist.Bba.Critica Area555
32836	0	5	93668738	E/S	Insp.Sem.Mec.-Sist.Quem.Comb.CAL -541
32939	10	15	93668772	E/S	Insp.Sem.Mec.- Sist.DNCG y CNCG Area54
33529	0	36	93668780	E/S	Insp.Sem.Mec.- Area 541 L2 (1594)
33535	0	36	93668783	E/S	Insp.Sem.Mec.- Area 547 L2 (Fibra 2)
33604	0	36	93668784	E/S	Insp.Sem.Mec.- Area 546 L2 (Fibra2)
33702	0	30	93668802	E/S	Insp.Sem.Mec.- Area 556 L2 (Fibra 2)
35808	0	15	93668814	E/S	Insp.Mec. Duchas Emerg.541L1 // ( 1970 )
35860	0	5	93668817	E/S	Insp.Mec. Duchas Emerg.546L1 // ( 1974 )
35949	0	10	93669931	E/S	Insp.Mec. Duchas Emerg.547L1 // (1975)

Figura III.6. Captura de planilla con información de costos planificados y reales para Planes de Mantenimiento del área de Fibra. Fuente: Elaboración Propia.

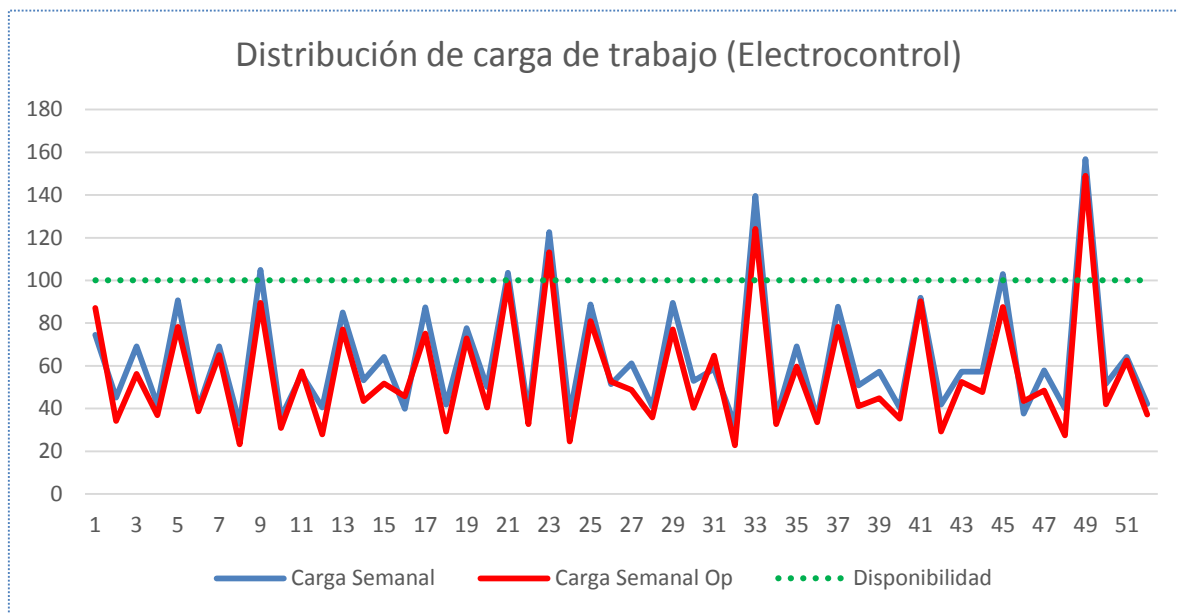


Figura III.7. Representación gráfica de las distribuciones de trabajo actuales (color azul) y después de la primera optimización (color rojo) para el puesto de trabajo Electrocontrol. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura III.7, se puede observar la distribución de carga de trabajo obtenida (color rojo) al aplicar el algoritmo de optimización a los Planes de Mantenimiento correspondientes a Rutas de Inspección y que tenían una Disponibilidad inferior a la deseada. En comparación a la distribución obtenida antes de la optimización (color azul), se puede observar que la carga de trabajo no disminuyó considerablemente como en el caso del puesto de trabajo Mecánico. La carga de trabajo total del año disminuyó desde un 63,37% a un 56,17% equivalente a una disminución de 934 HH de trabajo planificado (Ver Anexo 4).

En el caso de las sobrecargas de trabajo, de las 6 semanas que presentaban cargas de trabajo superiores a la capacidad disponible por el puesto de trabajo, 3 de ellas disminuyeron su carga de trabajo planificado (semanas 9, 21 y 45) mientras que las 3 restantes, a pesar de disminuir sus cargas de trabajo, mantienen una sobrecarga de trabajo planificado (semanas 23, 33 y 49). Ante esta disyuntiva, se decide aplicar el algoritmo a todos los Planes de Mantenimiento de este puesto de trabajo en una segunda optimización.

	<b>Actual</b>	<b>Optimizado</b>
<b>Costo por unidad de tiempo</b>	12,90540104	10,65128795
<b>Disponibilidad promedio</b>	0,998101734	0,998504486

Tabla III.8. Tabla comparativa de Costos y Disponibilidad antes y después de la primera optimización para el puesto de trabajo Electrocontrol. Fuente: Elaboración Propia.

De la Tabla III.8, se puede observar como aumentó la Disponibilidad promedio de los Planes de Mantenimiento correspondientes a Rutas de Inspección desde 0,998101734 a 0,998504486. Lo que implica una mejora en la disponibilidad de los equipos que son revisados en las Rutas de Inspección del puesto de trabajo.

El costo asociado a la ejecución de los Planes de Mantenimiento, disminuyó de \$12,9 (CLP/Hora) a \$10,7 (CLP/Hora), lo que corresponde a una disminución de \$19.746,03 (CLP/Año).

$$\begin{aligned}
 &(\$12,90540104 - \$10,65128795) \left( \frac{CLP}{Hora} \right) * 24 \left( \frac{Hora}{Día} \right) * 365 \left( \frac{Día}{Año} \right) \\
 &= \$19.746,0306684 \left( \frac{CLP}{Año} \right)
 \end{aligned}$$

### 3.2 Segunda Optimización

Con el fin de obtener una mejora a los resultados obtenidos en la primera optimización realizada para el puesto de trabajo de Electrocontrol, en la cual se optimizaron solo los Planes de Mantenimiento correspondientes a Rutas de Inspección. Se decide realizar una nueva optimización, en esta ocasión, a todos los Planes de Mantenimiento de este puesto de trabajo.

De igual manera que la primera optimización, la Disponibilidad deseada se determinó utilizando la Disponibilidad promedio del total de Planes de Mantenimiento del puesto de trabajo Electrocontrol, de esta manera se logró determinar los planes que presentan Disponibilidad superior o inferior a la media, siendo estos últimos a los que se le puede

modificar su frecuencia aumentando su Disponibilidad y minimizando su Costo por unidad de tiempo, puesto que ya están dentro de los rangos de disponibilidad deseada.

	Disponibilidad Promedio	Disponibilidad deseada	Planes por debajo de la media	Planes por sobre de la media
<b>Electrocontrol</b>	0,993334843	0,99	40	142

Tabla III.9. Disponibilidad promedio de los Planes de Mantenimiento del puesto de trabajo Electrocontrol. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez seleccionados y tabulados las operaciones de los Planes de Mantenimiento a optimizar mediante el modelo junto a sus respectivas variables y determinada la disponibilidad deseada para el puesto de trabajo, se utilizó la herramienta de MS Excel, Solver, utilizando el método de resolución GRG Nonlinear, para optimizar los Planes de Mantenimiento modificando sus frecuencias, de tal manera que aumente la disponibilidad y minimice los costos por unidad de tiempo.

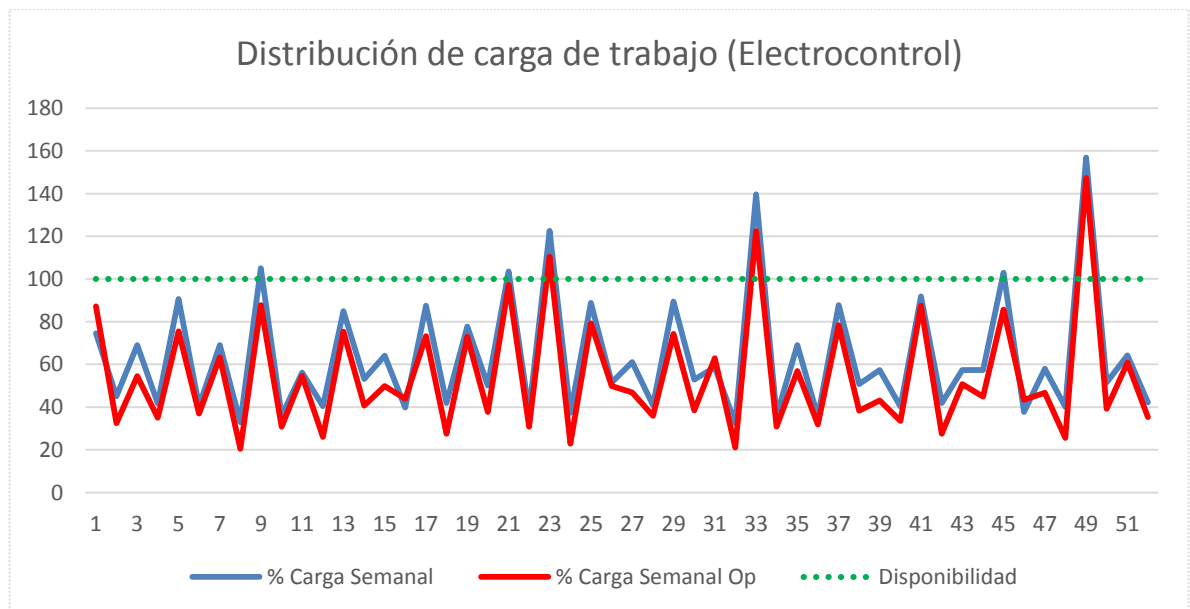


Figura III.8. Representación gráfica de las distribuciones de trabajo antes (color azul) y después de la segunda optimización (color rojo) para el puesto de trabajo Electrocontrol. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura III.8, se puede observar la distribución de carga de trabajo obtenida (color rojo) al aplicar el algoritmo de optimización a los Planes de Mantenimiento que tenían

una Disponibilidad inferior a la deseada del puesto de trabajo Electrocontrol. En comparación a la distribución obtenida antes de la primera optimización (color azul), nuevamente se puede observar que hubo una disminución de la carga de trabajo pero esta no es significativa, con respecto a los resultados obtenidos en el puesto de trabajo Mecánico. La carga de trabajo total del año disminuyó desde un 63,37% (carga de trabajo original) a un 54,33% equivalente a una disminución de 1.173,5 HH de trabajo planificado (Ver Anexo 5).

Similar al caso de la primera optimización, de las 6 semanas que presentaban cargas de trabajo superiores a la capacidad disponible por el puesto de trabajo, 3 de ellas disminuyeron su carga de trabajo planificado (semanas 9, 21 y 45) mientras que las 3 restantes, a pesar de disminuir sus cargas de trabajo, mantienen una sobrecarga de trabajo planificado (semanas 23, 33 y 49).

	<b>Actual</b>	<b>2<sup>da</sup> Optimización</b>
<b>Costo por unidad de tiempo (\$/hr)</b>	11619,1106	11570,13253
<b>Disponibilidad promedio</b>	0,99871505	0,998985436

Tabla III.10. Tabla comparativa de Costos y Disponibilidad antes de la primera optimización y después de la segunda optimización para el puesto de trabajo Electrocontrol. Fuente: Elaboración Propia.

De la Tabla III.10, se puede observar como aumentó la Disponibilidad promedio de los Planes de Mantenimiento de este puesto de trabajo desde 0,99871505 a 0,998985436, lo que implica una mejora en la fiabilidad de los equipos que son revisados en las Rutas de Inspección del puesto de trabajo.

El costo asociado a la ejecución de los Planes de Mantenimiento, disminuyó de \$11.619,1106 (CLP/Hora) a \$11.570,13253 (CLP/Hora), lo que corresponde a una disminución de \$429.047,5423 (CLP/Año).

$$\begin{aligned}
& (\$11.619,1106 - \$11.570,13253) \left( \frac{CLP}{Hora} \right) * 24 \left( \frac{Hora}{Día} \right) * 365 \left( \frac{Día}{Año} \right) \\
& = \$429.047,5423 \left( \frac{CLP}{Año} \right)
\end{aligned}$$

Ambos resultados obtenidos por el modelo para este puesto de trabajo, tanto en la primera como en la segunda optimización, no entregan resultados satisfactorios desde el punto de vista de las sobrecargas de trabajo, puesto que estas aún se mantienen en algunas semanas de trabajo.

No obstante, los resultados obtenidos de las optimizaciones realizadas dejan en evidencia que los efectos actuales no son consecuencia de una determinación errónea de las frecuencias de ejecución de los Planes de Mantenimiento, sino más bien por un factor de programación entregada por la Fecha de Inicio de los Planes de Mantenimiento. De esta manera, en conjunto con el Departamento de Mantenimiento del área de Fibra de Celulosa Nueva Aldea, se decidió modificar las Fechas de Inicio de los Planes de Mantenimientos que estimen conveniente para realizar este tipo de acción, puesto que esto no modifica las frecuencias de mantenimiento optimizadas ni la cantidad de trabajo en HH programado es decir, no representa una amenaza a las disponibilidades de los equipos.

### **3.3 Primera Recalendarización**

Como se mencionó al final de la sección 3.2. “Segunda Optimización”, en conjunto con el Departamento de Mantenimiento del área de Fibra de Celulosa Nueva Aldea, se realizó una selección de Planes de Mantenimientos para modificar sus Fechas de Inicio, con el fin de suprimir las sobrecargas de trabajo que se generan en los puestos de trabajo del Área sin modificar las frecuencias optimizadas previamente.

Para seleccionar los Planes de Mantenimiento elegidos para modificar su Fecha de Inicio, se indagó en las semanas de trabajo en las que se generan las sobrecargas de trabajo una vez aplicado el algoritmo de optimización, es decir, la distribución obtenida en la sección

3.1. “Primera Optimización” para el puesto de trabajo Mecánico y la distribución obtenida en la sección 3.2. “Segunda Optimización” para el puesto de Electrocontrol. De esta manera, se mantiene la disminución de la carga de trabajo obtenida para los puestos de trabajo después de la optimización y así también sus disponibilidades aumentadas.

Plan	Frecuencia	Fecha de Inicio	Fecha de Inicio Propuesta
82283	52 semanas	21-09-2015	05-10-2015

Tabla III.11. Plan de Mantenimiento del puesto de trabajo Mecánico elegido para modificar su Fecha de Inicio. Fuente: Elaboración Propia.

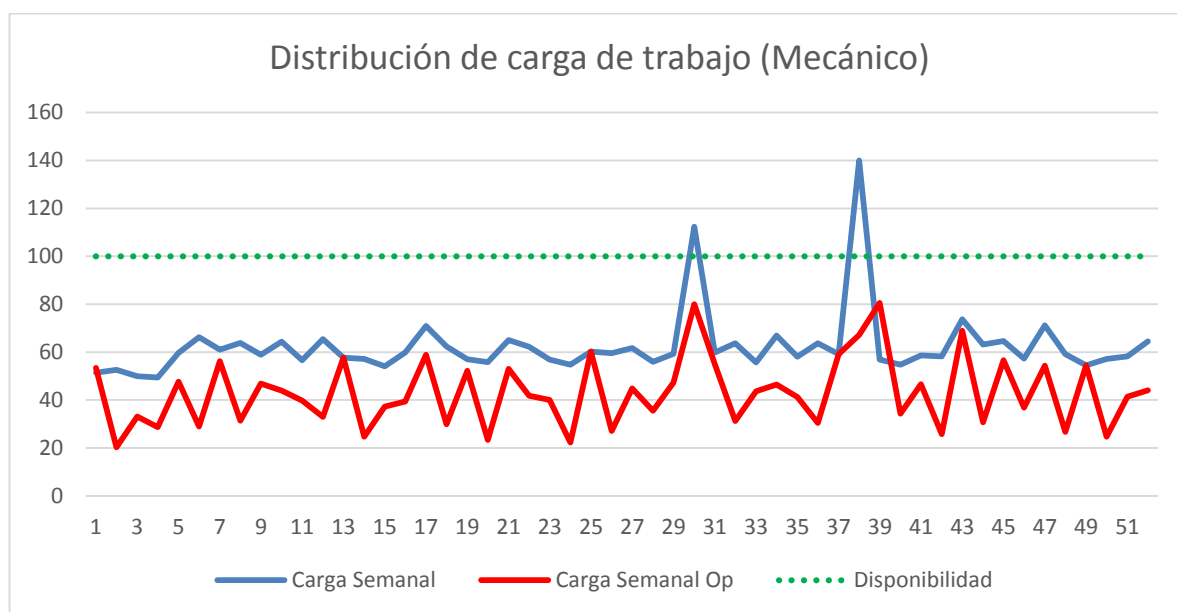


Figura III.9. Representación gráfica de las distribuciones de trabajo antes de la primera optimización (color azul) y después de la primera recalendarización (color rojo) para el puesto de trabajo Mecánico. Fuente: Elaboración Propia.

Considerando la modificación de la Fecha de Inicio del Plan de Mantenimiento expuesto en la Tabla III.11, se obtiene como resultado una nueva distribución de las cargas de trabajo contenidas en las 52 semanas del año 2015. En la Figura III.9, se pueden observar las cargas de trabajo por semana del año 2015 iniciales (color azul) y las obtenidas después de la primera recalendarización (color rojo), donde no se generan sobrecargas de trabajo y donde la carga máxima de trabajo no supera el 81% de la capacidad de HH del puesto de trabajo Mecánico (ver Anexo 6).

Con el fin de garantizar el resultado obtenido en el futuro, se realiza una proyección de la programación de carga de trabajo para las 52 semanas del año 2016, para corroborar que la sobrecarga de trabajo no se generará nuevamente en el futuro.

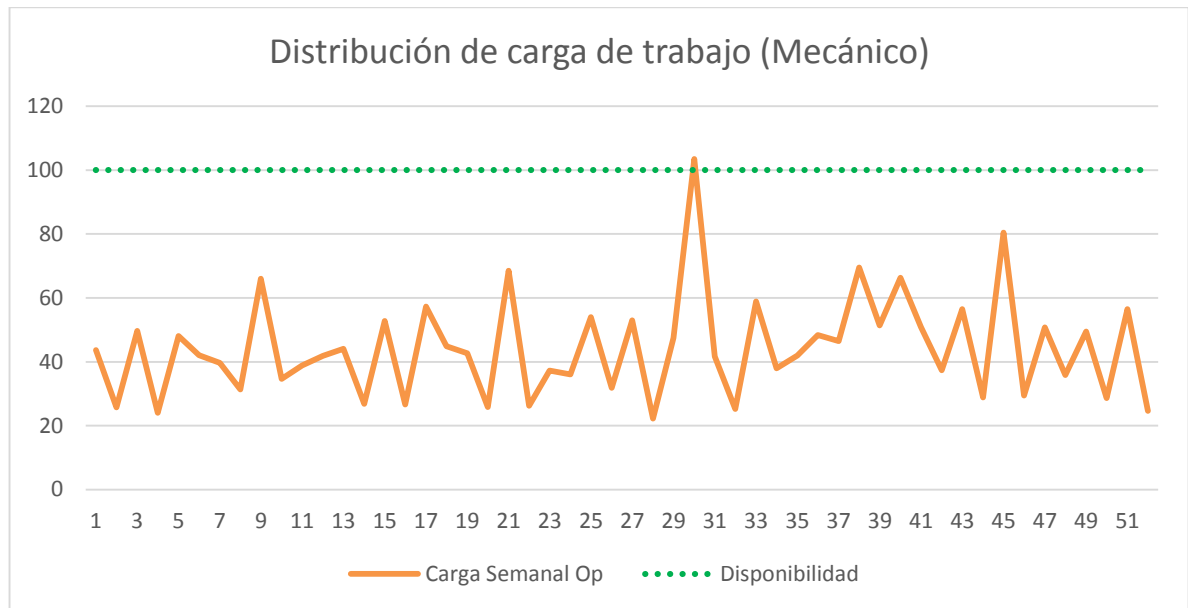


Figura III.10. Representación gráfica de la proyección de las cargas de trabajo para el año 2016 del puesto de trabajo Mecánico. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura III.10, se puede observar la distribución de la carga de trabajo para las 52 semanas del año 2016, obtenidas mediante la proyección de la programación de los Planes de Mantenimiento, utilizando las frecuencias de ejecución obtenidas de la primera recalendarización. Se puede observar una sobrecarga de trabajo programada para la semana 30, por lo que se debió analizar nuevamente el motivo de la sobrecarga proyectada y su posible solución.

El motivo de la sobrecarga es un Plan de Mantenimiento que contiene 2 operaciones con alta carga de trabajo cada una, por lo que el problema persistirá en el tiempo debido a que el Plan genera una sobrecarga de trabajo en todas las semanas del año. Ante esta disyuntiva, se propone realizar una modificación y recalendarización a este Plan de Mantenimiento de tal manera que se pueda obtener una solución.

<b>Plan</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Fecha de Inicio</b>	<b>Fecha de Inicio Propuesta</b>
76461	12 semanas	26-02-2015	19-02-2015
82737	12 semanas	26-02-2015	05-03-2015
82738	12 semanas	26-02-2015	05-03-2015
58185	26 semanas	04-06-2015	28-05-2015
58186	26 semanas	04-06-2015	28-05-2015
58187	26 semanas	04-06-2015	28-05-2015
58567	26 semanas	04-06-2015	28-05-2015
58812	26 semanas	04-06-2015	28-05-2015
58813	26 semanas	04-06-2015	28-05-2015
58877	26 semanas	04-06-2015	11-06-2015
82867	26 semanas	04-06-2015	11-06-2015
82870	26 semanas	04-06-2015	11-06-2015
82871	26 semanas	04-06-2015	11-06-2015
82879	26 semanas	04-06-2015	11-06-2015
82883	26 semanas	04-06-2015	28-05-2015
82884	26 semanas	04-06-2015	28-05-2015
81726	52 semanas	17-08-2015	10-08-2015
81727	52 semanas	17-08-2015	10-08-2015

Tabla III.12. Planes de Mantenimiento del puesto de trabajo de Electrocontrol elegidos para modificar su Fecha de Inicio. Fuente: Elaboración Propia.

Para el caso de los Planes de Mantenimiento a modificar en el puesto de trabajo Electrocontrol, la cantidad de planes a modificar sus Fechas de Inicio es mayor con respecto a las realizadas en el puesto Mecánico. Esto debido a que los Planes del puesto Electrocontrol son más en cantidad pero poseen una carga de trabajo muy baja en sus componentes, por lo que se requiere modificar una mayor cantidad de planes para obtener efectos significativos.

Considerando la modificación realizada a las Fechas de Inicio de los Planes de Mantenimiento expuestos en la Tabla III.12, se obtiene como resultado una nueva distribución de las cargas de trabajo contenidas en las 52 semanas del año 2015. En la Figura III.11, se pueden observar las cargas de trabajo por semana del año 2015 iniciales (color azul) y las obtenidas después de la primera recalendarización (color rojo), donde no se generan sobrecargas de trabajo y donde la carga máxima de trabajo no supera el 90% de la capacidad de HH del puesto de trabajo de Electrocontrol (ver Anexo 7).

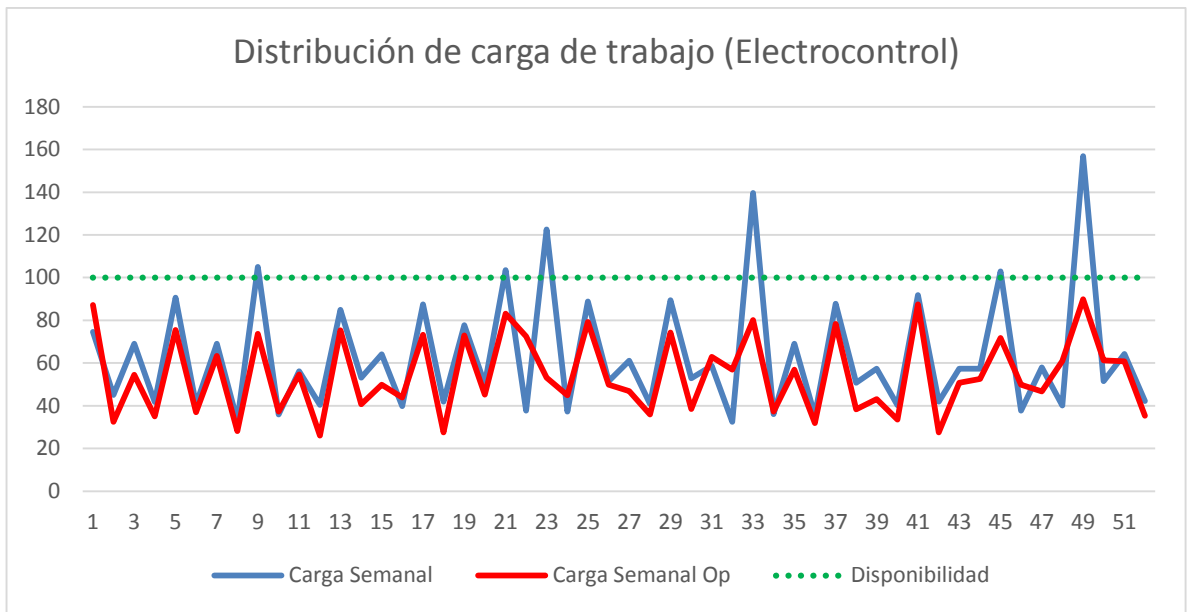


Figura III.11. Representación gráfica de las distribuciones de trabajo antes de la primera optimización (color azul) y después de la primera recalendarización (color rojo) para el puesto de trabajo Electrocontrol. Fuente: Elaboración Propia.

Con el fin de garantizar el resultado obtenido en el futuro, se realiza una proyección de la programación de carga de trabajo para las 52 semanas del año 2016, para corroborar que la sobrecarga de trabajo no se generará nuevamente en el futuro.

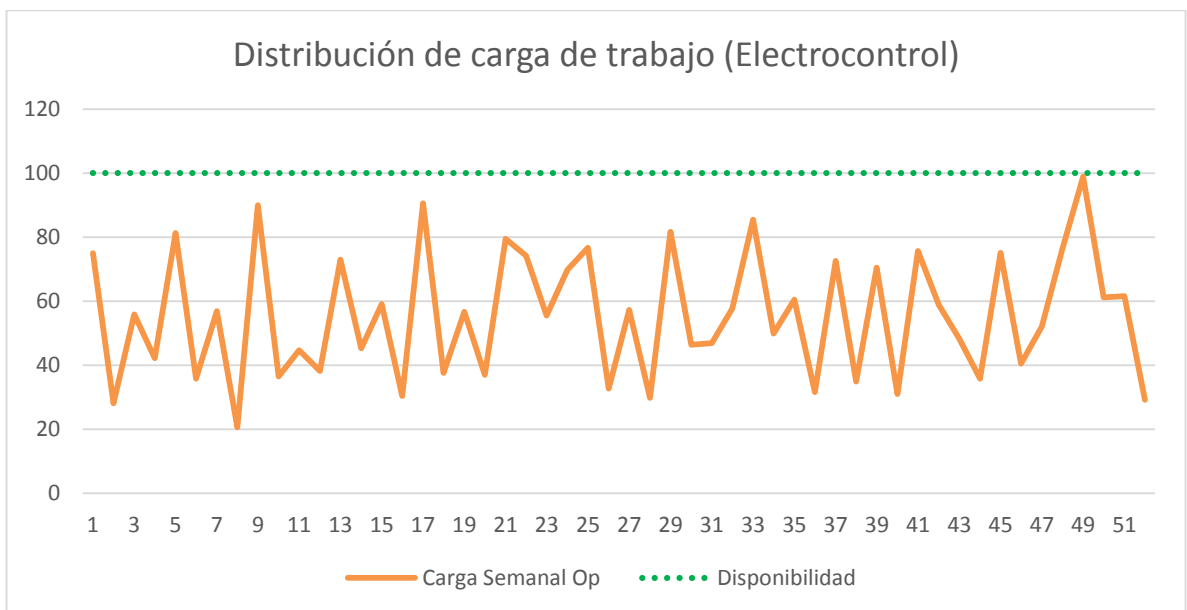


Figura III.12. Representación gráfica de la proyección de las cargas de trabajo para el año 2016 del puesto de trabajo Electrocontrol. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura III.12, se puede observar la distribución de la carga de trabajo para las 52 semanas del año 2016, obtenidas mediante la proyección de la programación de los Planes de Mantenimiento, utilizando las frecuencias de ejecución obtenidas de la primera recalendarización. No se observan sobrecargas de trabajo de trabajo programado. Sin embargo, en la semana 49 se puede observar una alta carga de trabajo próxima al 99% de la capacidad del puesto de Electrocontrol, por lo que se debió analizar nuevamente el motivo de la alta carga de trabajo proyectada y su posible solución.

### **3.4 Segunda Recalendarización**

Analizando los resultados obtenidos para los puestos de trabajo del área de Fibra en la sección 3.3. “Primera Recalendarización”, se lograron encontrar soluciones que cumplieran con las expectativas al iniciar este trabajo para el año 2015. Pues, en ambos casos se lograron descomprimir las sobrecargas de trabajo de tal manera que se generaba una distribución de trabajo con cargas que producían una holgura en la capacidad de HH disponibles permitiendo poder programar trabajo de Mantenimiento Correctivo<sup>17</sup>.

El problema de estas soluciones, se encontraron en las distribuciones de trabajo proyectadas para el año 2016, en donde vuelven a generarse sobrecargas y altas cargas de trabajo, por lo que era necesario buscar una nueva solución que cumpla con las expectativas de distribuciones para el año 2015 y el 2016.

Para el caso del puesto de trabajo Mecánico, se logró determinar que el problema de su sobrecarga de trabajo proyectado, se debía exclusivamente a un Plan de Mantenimiento el cual posee una alta carga de trabajo en cada una de sus operaciones. Este se puede observar en la Figura III.13.

---

<sup>17</sup> Definición explicada en el Capítulo II, sección 2.3. “Tipos de Mantenimiento”.

SEMANA	PLAN	CAMPO_CLASIF	DESC.OPER	N°PERSONAS	DUR.ACT.HH	TRABAJO	PAQ.MANTEN
30	67061	CE05 CEL. NVA. ALDEA	MANT. CELDA N°1 547-58-5371TORRE ENFRIAM	3	24	72	52-semanas
30	67061	CE05 CEL. NVA. ALDEA	MANT. CELDA N°2 547-58-5372TORRE ENFRIAM	3	24	72	52-semanas

Figura III.13. Plan de Mantenimiento código 67061 con la información correspondiente de sus 2 operaciones. Fuente: Elaboración Propia.

Ante esta situación, en conjunto con el Departamento de Mantenimiento del área de Fibra se determinó dividir el Plan de Mantenimiento 67061 en dos Planes que contengan una operación cada uno. Pues este Plan de Mantenimiento se programa cada año en invierno y se programa de tal manera que se ejecuten en 1 mes sus 2 operaciones, de esta manera los Planes de Mantenimiento creados con cada operación del plan original se pueden recalendarizar individualmente dentro del mes en invierno programado.

Plan	Frecuencia	Fecha de Inicio	Fecha de Inicio Propuesta
*67062	52 semanas	24-07-2015	10-07-2015
67063	52 semanas	24-07-2015	24-07-2015

Tabla III.13. Planes de Mantenimiento del puesto de trabajo Mecánico elegidos para modificar su Fecha de Inicio. Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla III.13, se pueden observar los Planes de Mantenimiento 67062 y 67063 que corresponden a la división de las 2 operaciones de Plan 67061 (ver Figura III.12). El Plan 67062 contiene a la primera operación del Plan 67061 y se recalendariza su Fecha de Inicio, mientras que el Plan 67063 que contiene a la segunda operación del Plan 67061 se mantiene con su Fecha de Inicio original. La división del Plan 67061 se esquematiza a continuación:

$$67061 \begin{cases} 67062 & 1^{ra} \text{ Operación} \\ 67063 & 2^{da} \text{ Operación} \end{cases}$$

Considerando la modificación realizada al dividir el Plan 67061 y al cambio de la Fecha de Inicio de los Planes de Mantenimiento expuestos en la Tabla III.13, se obtiene como resultado una nueva distribución de las cargas de trabajo contenidas en las 52 semanas del año 2015. En la Figura III.14, se pueden observar las cargas de trabajo por semana del año 2015 iniciales (color azul) y las obtenidas después de la segunda recalendarización (color rojo), donde no se generan sobrecargas de trabajo y donde la carga máxima de trabajo no

supera el 75% de la capacidad de HH del puesto de trabajo Mecánico (ver Anexo 8). Obteniendo un mejor resultado que en la primera recalendarización, pues en ese caso la carga máxima se aproximaba al 81%.

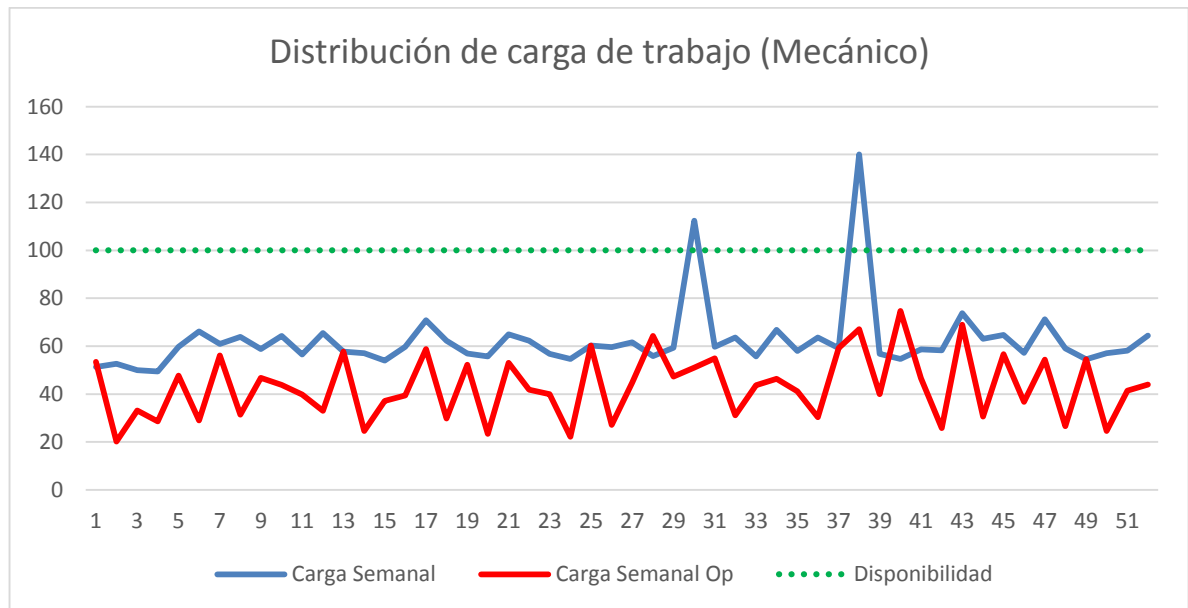


Figura III.14. Representación gráfica de las distribuciones de trabajo antes de la primera optimización (color azul) y después de la segunda recalendarización (color rojo) para el puesto de trabajo Mecánico. Fuente: Elaboración Propia.

Se puede evidenciar una mejora significativa en los resultados graficados en la Figura III.13 gracias al uso del modelo de optimización, donde se disminuyó considerablemente las distribuciones de HH de las diferentes semanas de trabajo del año 2015 (de 8088 HH a 5586,4 HH), y gracias a la recalendarización de las Fechas de Inicio de algunos Planes de Mantenimiento, donde se trasladaron los Planes que generaban sobrecargas de trabajo a semanas que requerían mayor densidad de HH.

En la Figura III.15, se puede observar la distribución de la carga de trabajo para las 52 semanas del año 2016, obtenidas mediante la proyección de la programación de los Planes de Mantenimiento, utilizando las frecuencias de ejecución obtenidas de la segunda recalendarización. No se proyectan sobrecargas de trabajo y la carga de trabajo máxima se

aproxima al 80%. Por lo que las modificaciones realizadas hasta la segunda recalendarización entregan una solución factible y que satisface las expectativas de este trabajo.

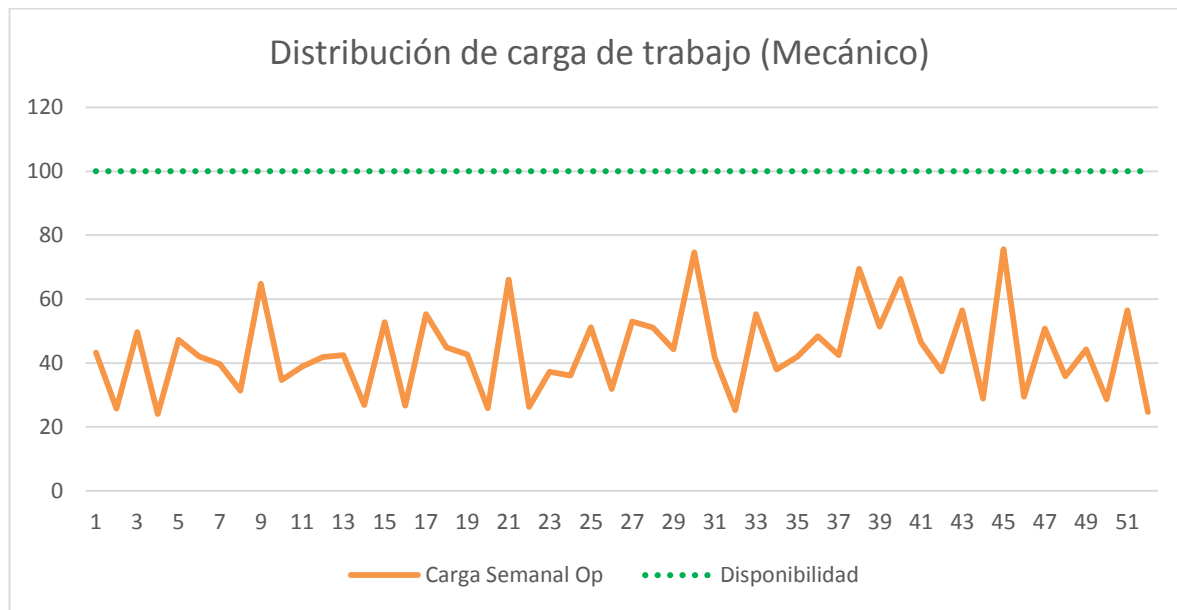


Figura III.15. Representación gráfica de la proyección de las cargas de trabajo para el año 2016 del puesto de trabajo Mecánico después de la segunda recalendarización. Fuente: Elaboración Propia.

En el caso del puesto de trabajo de Electrocontrol, se logró determinar que el problema de su alta carga de trabajo proyectado, se debía a la gran cantidad de planes programados a ejecutar. Ante esta disyuntiva, se decidió recalendarizar la Fecha de Inicio de algunos Planes de Mantenimiento que generan la alta carga de trabajo.

Plan	Frecuencia	Fecha de Inicio	Fecha de Inicio Propuesta
58384	52 semanas	03-12-2015	10-12-2015
58565	52 semanas	04-06-2015	11-06-2015

Tabla III.14. Planes de Mantenimiento del puesto de trabajo de Electrocontrol elegidos para modificar su Fecha de Inicio. Fuente: Elaboración Propia.

Considerando la modificación realizada a las Fechas de Inicio de los Planes de Mantenimiento expuestos en la Tabla III.14, se obtiene como resultado una nueva distribución de las cargas de trabajo contenidas en las 52 semanas del año 2015. En la Figura III.16, se pueden observar las cargas de trabajo por semana del año 2015 iniciales (color azul)

y las obtenidas después de la segunda recalendarización (color rojo), donde no se generan sobrecargas de trabajo y donde la carga máxima de trabajo no supera el 88% de la capacidad de HH del puesto de trabajo de Electrocontrol (ver Anexo 9). Obteniendo un mejor resultado que en la primera recalendarización, pues en ese caso la carga máxima se aproximaba al 90%.

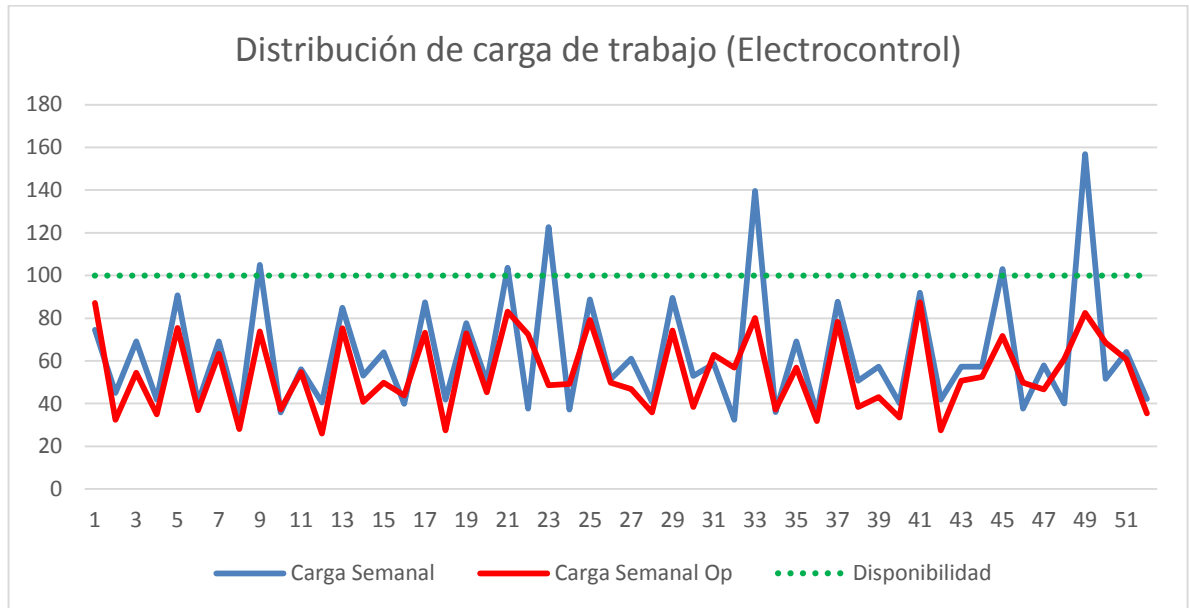


Figura III.16. Representación gráfica de las distribuciones de trabajo antes de la primera optimización (color azul) y después de la segunda recalendarización (color rojo) para el puesto de trabajo Electrocontrol. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura III.17, se puede observar la distribución de la carga de trabajo para las 52 semanas del año 2016, obtenidas mediante la proyección de la programación de los Planes de Mantenimiento del puesto de Electrocontrol, utilizando las frecuencias de ejecución obtenidas de la segunda recalendarización. No se proyectan sobrecargas de trabajo y la carga de trabajo máxima se aproxima al 91%.

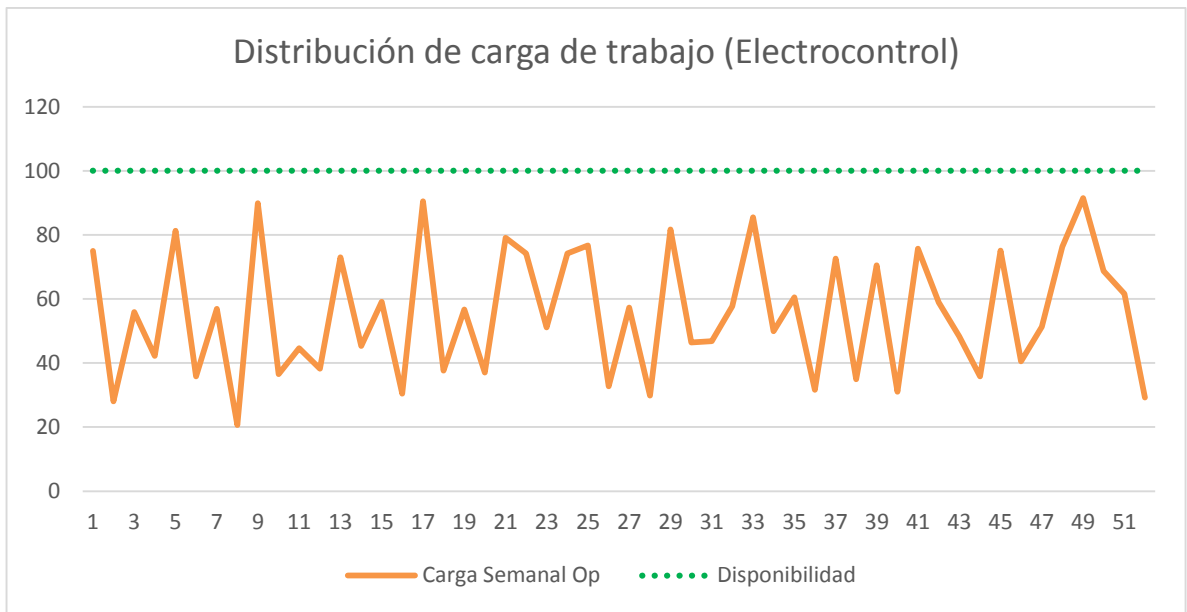


Figura III.17. Representación gráfica de la proyección de las cargas de trabajo para el año 2016 del puesto de trabajo de Electrocontrol después de la segunda recalendarización. Fuente: Elaboración Propia.

Por lo que las modificaciones realizadas hasta la segunda recalendarización entregan una solución factible y que satisface las expectativas de este trabajo.

## Capítulo V: Resultados y Conclusiones

---

Mediante el análisis de la programación de los Planes de Mantenimiento del área de Fibra, tanto para el puesto de trabajo Mecánico como en el de Electrocontrol, se lograron determinar los problemas asociados a las cargas de trabajo asociados a los trabajos preventivos que componen a los Planes y se encuentran calendarizados en el sistema SAP.

Se lograron identificar las semanas de trabajo en las que se generan sobrecargas de Horas Hombre (HH) programados, debido a la calendarización de las operaciones que componen a los Planes de Mantenimiento. Dicha calendarización distribuye las horas de trabajo de las operaciones siguiendo las frecuencias de ejecución asociadas a los Planes y generan las cargas de trabajo programado para los programas semanales de cada puesto de trabajo. Por lo que se identificó a las frecuencias de ejecución de los Planes de Mantenimiento como el principal causante de las sobrecargas de trabajo preventivo.

Para encontrar un procedimiento que modifique las frecuencias asociadas a los Planes de Mantenimiento, se encontró en la literatura un trabajo de investigación en el cual se propone un modelo de optimización que modifica las frecuencias de ejecución de los Planes, aumentando su Disponibilidad y minimizando su costo por unidad de tiempo asociado a su ejecución. Por lo que se decidió recopilar la información necesaria de los Planes y sus operaciones para obtener las variables requeridas para utilizar el algoritmo. También fue necesario contactar a los autores del trabajo de investigación para obtener información relevante a la función objetivo del algoritmo y a su uso.

Una vez optimizadas las frecuencias de los Planes de Mantenimiento mediante la aplicación del modelo de optimización propuesto (Duarte, Craveiro, & Trigo, 2006), se analizó la distribución de las cargas de trabajo utilizando las frecuencias modificadas, ante lo que se determinaron las siguientes observaciones:

- El resultado obtenido, desde el punto de vista de programación Anual, genera un rendimiento favorable debido a que comprime la cantidad de Horas Hombre (HH) programados durante este periodo, disminuyendo los costos de ejecución y aumentando la disponibilidad de los equipos. No así desde el punto de vista de la programación semanal, pues en este sentido a pesar de disminuir la carga de trabajo, esta no es significativa en algunos casos y no logra suprimir la sobrecarga de trabajo.
- La optimización realizada por el modelo propuesto en el trabajo de investigación, modifica las frecuencias de los Planes de Mantenimiento individualmente como conjunto de Planes y grupalmente como conjunto de operaciones que conforman a un Plan.
- No todos los Planes de Mantenimiento son modificables usando el algoritmo de optimización, pues solo los Planes de Mantenimiento que poseen una Disponibilidad de sistema inferior a la Disponibilidad deseada (promedio del conjunto de Planes por puesto de trabajo) modifican sus frecuencias de ejecución.

Con el resultado obtenido una vez modificadas las frecuencias de ejecución de los Planes de Mantenimiento, se logró determinar que para mejorar el resultado obtenido y lograr eliminar las sobrecargas de trabajo, era necesario modificar las Fechas de Inicio asociadas a los Planes. De esta manera, en conjunto con el Departamento de Mantenimiento del área de Fibra de Celulosa Nueva Aldea, se elaboró un listado de Planes que pueden modificar sus Fechas de Inicio, de tal forma que no se generen sobrecargas de trabajo durante las 52 semanas de trabajo del año 2015 y 2016.

Una vez realizado el cambio de Fechas de inicio, utilizando las frecuencias de mantenimiento de los Planes que fueron modificados mediante el uso del algoritmo, se lograron obtener resultados favorables para los programas semanales del año 2015, pero no así con los del año 2016. Esto se producía principalmente por el diseño de un Plan de Mantenimiento, el que contenía una gran cantidad de horas de trabajo asociado y era

necesario modificar, por lo que el Plan fue dividido en Planes que contengan sus operaciones individualmente, con el fin de modificar sus Fechas de inicio y obtener los resultados esperados.

Finalmente, mediante el uso del modelo de optimización propuesto en el trabajo de investigación de Duarte, Craveiro, & Trigo (2006), se logró obtener una disminución en la cantidad de carga de trabajo programado, minimizando el costo de ejecución asociado a los Planes y aumentando la Disponibilidad de los equipos. Además, modificando las Fechas de Inicio de algunos Planes de Mantenimiento se logró obtener un resultado que suprime la sobrecarga de trabajo y genera disponibilidad para la programación de trabajos correctivos.

## Bibliografía Seleccionada

---

1. - British Standards Institution. (1984). *Glossary of maintenance terms in Terotechnology*. London.
2. - Celulosa Arauco y Constitución S.A. (2015). *Arauco*. Retrieved from [http://www.arauco.cl/informacion.asp?idq=647&parent=642&ca\\_submenu=642&idioma=21](http://www.arauco.cl/informacion.asp?idq=647&parent=642&ca_submenu=642&idioma=21)
3. - CMPC. (2011). *Papelnet*. Retrieved from [http://papelnet.cl/?page\\_id=3797](http://papelnet.cl/?page_id=3797)
4. - Dekker, R. (1996). Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 51, 229-240.
5. - Dhillon, B. (2002). *Engineering Maintenance: A Modern Approach*. CRC Press.
6. - Duarte, J. C., & Soares, C. G. (2007). Optimisation of the preventive maintenance plan of a series components system with Weibull hazard function. *Proc. of SSARS 2007 - European Safety and Reliability Conference*. Tri City, Poland.
7. - Duarte, J. C., Craveiro, J., & Trigo, T. (2006). Optimization of the preventive maintenance plan of a series components system. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83, 244-248.
8. - Eti, M., Ogaji, S., & Probert, S. (2006). Reducing the cost of preventive maintenance (PM) through adopting a proactive reliability-focused culture. *Applied Energy*, 83, 1235-1248.
9. - García Garrido, S. (2010). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Días de Santos.
10. - Gómez de León, F. C. (1998). *Tecnología del mantenimiento industrial*. Universidad de Murcia.
11. - González Fernández, F. J. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. FC Editorial.
12. - Márquez, A. C. (2007). *The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems Maintenance*. Springer Science & Business Media.
13. - Niebel, B. W. (1994). *Engineering Maintenance Management, Second Edition*. CRC Press.

14. - Papermarket. (2014). *Paper Market*. Retrieved from <http://www.papermarket.cl/nacional/>
15. - Rey Sacristán, F. (2001). *Manual del mantenimiento integral en la empresa*. FC Editorial.

## Anexos

---

## Anexo 1 – Distribución de carga de trabajo para el año 2015 del puesto de trabajo Mecánico

En los siguientes cuadros, se pueden observar la cantidad de Horas Hombre (HH) correspondientes a las operaciones de los Planes de Mantenimiento planificadas en los programas semanales del año 2015. También se observan las HH Disponibles correspondientes a las horas de trabajo otorgadas por una dotación de 6 técnicos por semana de trabajo y sus respectivas cargas de trabajo, obtenidas como porcentaje de las HH Disponibles utilizadas por las HH Planificadas.

MECANICO				
Semana	HH Planificadas	HH Disponibles		% Carga Semanal
1	128,2	249,60	●	51,36
2	131,4	249,60	●	52,64
3	124,7	249,60	●	49,96
4	123,3	249,60	●	49,40
5	149	249,60	●	59,70
6	165,3	249,60	●	66,23
7	152,2	249,60	●	60,98
8	159,4	249,60	●	63,86
9	146,8	249,60	●	58,81
10	160,5	249,60	●	64,30
11	141,3	249,60	●	56,61
12	163,4	249,60	●	65,46
13	144	249,60	●	57,69
14	142,5	249,60	●	57,09
15	134,9	249,60	●	54,05
16	149,3	249,60	●	59,82
17	176,9	249,60	●	70,87
18	155,5	249,60	●	62,30
19	142,3	249,60	●	57,01
20	139,3	249,60	●	55,81
21	162,3	249,60	●	65,02
22	155,4	249,60	●	62,26
23	141,9	249,60	●	56,85
24	136,5	249,60	●	54,69
25	150,4	249,60	●	60,26
26	148,7	249,60	●	59,58

27	153,8	249,60	●	61,62
28	139,5	249,60	●	55,89
29	148	249,60	●	59,29
30	280,5	249,60	●	112,38
31	149,3	249,60	●	59,82
32	158,8	249,60	●	63,62
33	139	249,60	●	55,69
34	166,8	249,60	●	66,83
35	144,9	249,60	●	58,05
36	158,9	249,60	●	63,66
37	147,7	249,60	●	59,17
38	349,5	249,60	●	140,02
39	141,9	249,60	●	56,85
40	136,5	249,60	●	54,69
41	146,4	249,60	●	58,65
42	145,4	249,60	●	58,25
43	184,1	249,60	●	73,76
44	157,5	249,60	●	63,10
45	161,4	249,60	●	64,66
46	142,9	249,60	●	57,25
47	177,7	249,60	●	71,19
48	147,5	249,60	●	59,09
49	136	249,60	●	54,49
50	142,5	249,60	●	57,09
51	145,3	249,60	●	58,21
52	160,8	249,60	●	64,42
				<b>62,32</b>

## Anexo 2 – Distribución de carga de trabajo para el año 2015 del puesto de trabajo Electrocontrol

En los siguientes cuadros, se pueden observar la cantidad de Horas Hombre (HH) correspondientes a las operaciones de los Planes de Mantenimiento planificadas en los programas semanales del año 2015. También se observan las HH Disponibles correspondientes a las horas de trabajo otorgadas por una dotación de 6 técnicos por semana de trabajo y sus respectivas cargas de trabajo, obtenidas como porcentaje de las HH Disponibles utilizadas por las HH Planificadas.

ELECTROCONTROL			
Semana	HH Planificadas	HH Disponibles	% Carga Semanal
1	186	249,6	74,52
2	112,5	249,6	45,07
3	172,5	249,6	69,11
4	104,4	249,6	41,83
5	226,3	249,6	90,67
6	101,1	249,6	40,50
7	172,5	249,6	69,11
8	82	249,6	32,85
9	262	249,6	104,97
10	89,5	249,6	35,86
11	140	249,6	56,09
12	101	249,6	40,46
13	212	249,6	84,94
14	132,7	249,6	53,17
15	160	249,6	64,10
16	99,5	249,6	39,86
17	218,3	249,6	87,46
18	104,6	249,6	41,91
19	194	249,6	77,72
20	125	249,6	50,08
21	258,5	249,6	103,57
22	94	249,6	37,66
23	306	249,6	122,60
24	93	249,6	37,26
25	221,7	249,6	88,82
26	128,5	249,6	51,48

27	152,5	249,6	61,10
28	102	249,6	40,87
29	223,3	249,6	89,46
30	132	249,6	52,88
31	146,5	249,6	58,69
32	81	249,6	32,45
33	348,5	249,6	139,62
34	90	249,6	36,06
35	172,5	249,6	69,11
36	88,5	249,6	35,46
37	219	249,6	87,74
38	126,7	249,6	50,76
39	143	249,6	57,29
40	100,5	249,6	40,26
41	223,3	249,6	91,87
42	104,6	249,6	41,91
43	143	249,6	57,29
44	143	249,6	57,29
45	257	249,6	102,96
46	94	249,6	37,66
47	144,5	249,6	57,89
48	100	249,6	40,06
49	391,5	249,6	156,85
50	128,7	249,6	51,56
51	160,2	249,6	64,18
52	105,3	249,6	42,19
			<b>63,37</b>

### Anexo 3 – Resultados primera optimización del puesto de trabajo Mecánico

En los siguientes cuadros, se pueden observar las cantidades de Horas Hombre (HH) correspondientes a la distribución de carga de trabajo actual y a la obtenida mediante la primera optimización. También se observan las HH Disponibles correspondientes a las horas de trabajo otorgadas por una dotación de 6 técnicos por semana de trabajo y sus respectivas cargas de trabajo, obtenidas como porcentaje de las HH Disponibles utilizadas por las HH Planificadas.

MECANICO					
Semana	HH Planificadas	HH Planificadas Optimizadas	HH Disponibles	% Carga Semanal	% Carga Semanal Op
1	128,2	133,4	249,6	51,36217949	53,44551282
2	131,4	50,4	249,6	52,64423077	20,19230769
3	124,7	82,7	249,6	49,9599359	33,13301282
4	123,3	71,5	249,6	49,39903846	28,64583333
5	149	119	249,6	59,69551282	47,67628205
6	165,3	72,3	249,6	66,22596154	28,96634615
7	152,2	140,2	249,6	60,9775641	56,16987179
8	159,4	78,4	249,6	63,86217949	31,41025641
9	146,8	116,8	249,6	58,81410256	46,79487179
10	160,5	109,5	249,6	64,30288462	43,87019231
11	141,3	99,3	249,6	56,61057692	39,78365385
12	163,4	82,4	249,6	65,46474359	33,01282051
13	144	144	249,6	57,69230769	57,69230769
14	142,5	61,5	249,6	57,09134615	24,63942308
15	134,9	92,9	249,6	54,04647436	37,21955128
16	149,3	98,3	249,6	59,81570513	39,38301282
17	176,9	146,9	249,6	70,87339744	58,85416667
18	155,5	74,5	249,6	62,29967949	29,84775641
19	142,3	130,3	249,6	57,01121795	52,20352564
20	139,3	58,3	249,6	55,80929487	23,35737179
21	162,3	132,3	249,6	65,02403846	53,00480769
22	155,4	104,4	249,6	62,25961538	41,82692308
23	141,9	99,9	249,6	56,85096154	40,02403846
24	136,5	55,5	249,6	54,6875	22,23557692
25	150,4	150,4	249,6	60,25641026	60,25641026

26	148,7	67,7	249,6	59,57532051	27,12339744
27	153,8	111,8	249,6	61,61858974	44,79166667
28	139,5	88,5	249,6	55,88942308	35,45673077
29	148	118	249,6	59,29487179	47,27564103
30	280,5	199,5	249,6	112,3798077	79,92788462
31	149,3	137,3	249,6	59,81570513	55,00801282
32	158,8	77,8	249,6	63,62179487	31,16987179
33	139	109	249,6	55,68910256	43,66987179
34	166,8	115,8	249,6	66,82692308	46,39423077
35	144,9	102,9	249,6	58,05288462	41,22596154
36	158,9	75,9	249,6	63,66185897	30,40865385
37	147,7	147,7	249,6	59,17467949	59,17467949
38	349,5	268,5	249,6	140,0240385	107,5721154
39	141,9	99,9	249,6	56,85096154	40,02403846
40	136,5	85,5	249,6	54,6875	34,25480769
41	146,4	116,4	249,6	58,65384615	46,63461538
42	145,4	64,4	249,6	58,25320513	25,80128205
43	184,1	172,1	249,6	73,75801282	68,95032051
44	157,5	76,5	249,6	63,10096154	30,64903846
45	161,4	141,4	249,6	64,66346154	56,65064103
46	142,9	91,9	249,6	57,25160256	36,81891026
47	177,7	135,7	249,6	71,19391026	54,36698718
48	147,5	66,5	249,6	59,09455128	26,64262821
49	136	136	249,6	54,48717949	54,48717949
50	142,5	61,5	249,6	57,09134615	24,63942308
51	145,3	103,3	249,6	58,21314103	41,38621795
52	160,8	109,8	249,6	64,42307692	43,99038462
<b>Total</b>	<b>8088</b>	<b>5586,4</b>		<b>62,31508876</b>	<b>43,04117357</b>

#### Anexo 4 – Resultados primera optimización del puesto de trabajo Electrocontrol

En los siguientes cuadros, se pueden observar las cantidades de Horas Hombre (HH) correspondientes a la distribución de carga de trabajo actual y a la obtenida mediante la primera optimización. También se observan las HH Disponibles correspondientes a las horas de trabajo otorgadas por una dotación de 6 técnicos por semana de trabajo y sus respectivas cargas de trabajo, obtenidas como porcentaje de las HH Disponibles utilizadas por las HH Planificadas.

ELECTROCONTROL					
Semana	HH Planificadas	HH Planificadas Optimizadas	HH Disponibles	% Carga Semanal	% Carga Semanal Op
1	186	217,5	249,6	74,51923077	87,13942308
2	112,5	85,5	249,6	45,07211538	34,25480769
3	172,5	140,5	249,6	69,11057692	56,2900641
4	104,4	91,9	249,6	41,82692308	36,81891026
5	226,3	195,3	249,6	90,6650641	78,24519231
6	101,1	96,6	249,6	40,50480769	38,70192308
7	172,5	162,5	249,6	69,11057692	65,10416667
8	82	58	249,6	32,8525641	23,23717949
9	262	223,5	249,6	104,9679487	89,54326923
10	89,5	77	249,6	35,85737179	30,84935897
11	140	143,5	249,6	56,08974359	57,49198718
12	101	69,5	249,6	40,46474359	27,84455128
13	212	192,5	249,6	84,93589744	77,12339744
14	132,7	108,7	249,6	53,1650641	43,54967949
15	160	129	249,6	64,1025641	51,68269231
16	99,5	114	249,6	39,86378205	45,67307692
17	218,3	187,3	249,6	87,4599359	75,0400641
18	104,6	73,1	249,6	41,90705128	29,28685897
19	194	182	249,6	77,72435897	72,91666667
20	125	101	249,6	50,08012821	40,46474359
21	258,5	247	249,6	103,5657051	98,95833333
22	94	81,5	249,6	37,66025641	32,65224359
23	306	282,5	249,6	122,5961538	113,1810897
24	93	61,5	249,6	37,25961538	24,63942308
25	221,7	202,2	249,6	88,82211538	81,00961538

26	128,5	131,5	249,6	51,48237179	52,68429487
27	152,5	121,5	249,6	61,09775641	48,67788462
28	102	89,5	249,6	40,86538462	35,85737179
29	223,3	192,3	249,6	89,46314103	77,04326923
30	132	100,5	249,6	52,88461538	40,26442308
31	146,5	161,5	249,6	58,69391026	64,70352564
32	81	57	249,6	32,45192308	22,83653846
33	348,5	310	249,6	139,6233974	124,1987179
34	90	81,5	249,6	36,05769231	32,65224359
35	172,5	149	249,6	69,11057692	59,69551282
36	88,5	84	249,6	35,45673077	33,65384615
37	219	195,5	249,6	87,74038462	78,32532051
38	126,7	102,7	249,6	50,76121795	41,14583333
39	143	112	249,6	57,29166667	44,87179487
40	100,5	88	249,6	40,26442308	35,25641026
41	229,3	225,3	249,6	91,86698718	90,26442308
42	104,6	73,1	249,6	41,90705128	29,28685897
43	143	131	249,6	57,29166667	52,48397436
44	143	119	249,6	57,29166667	47,67628205
45	257	218,5	249,6	102,9647436	87,5400641
46	94	108,5	249,6	37,66025641	43,46955128
47	144,5	121	249,6	57,89262821	48,4775641
48	100	68,5	249,6	40,06410256	27,44391026
49	391,5	372	249,6	156,8509615	149,0384615
50	128,7	104,7	249,6	51,5625	41,94711538
51	160,2	156,2	249,6	64,18269231	62,58012821
52	105,3	92,8	249,6	42,1875	37,17948718
<b>Total</b>	<b>8224,7</b>	<b>7290,7</b>		<b>63,36831238</b>	<b>56,17218319</b>

## Anexo 5 – Resultados segunda optimización del puesto de trabajo Electrocontrol

En los siguientes cuadros, se pueden observar las cantidades de Horas Hombre (HH) correspondientes a la distribución de carga de trabajo actual y a la obtenida mediante la segunda optimización. También se observan las HH Disponibles correspondientes a las horas de trabajo otorgadas por una dotación de 6 técnicos por semana de trabajo y sus respectivas cargas de trabajo, obtenidas como porcentaje de las HH Disponibles utilizadas por las HH Planificadas.

ELECTROCONTROL					
Semana	HH Planificadas	HH Planificadas Optimizadas	HH Disponibles	% Carga Semanal	% Carga Semanal Op
1	186	217,5	249,6	74,51923077	87,13942308
2	112,5	81	249,6	45,07211538	32,45192308
3	172,5	136	249,6	69,11057692	54,48717949
4	104,4	87,4	249,6	41,82692308	35,01602564
5	226,3	188,3	249,6	90,6650641	75,44070513
6	101,1	92,1	249,6	40,50480769	36,89903846
7	172,5	158	249,6	69,11057692	63,30128205
8	82	51	249,6	32,8525641	20,43269231
9	262	219	249,6	104,9679487	87,74038462
10	89,5	77	249,6	35,85737179	30,84935897
11	140	136,5	249,6	56,08974359	54,6875
12	101	65	249,6	40,46474359	26,04166667
13	212	188	249,6	84,93589744	75,32051282
14	132,7	101,7	249,6	53,1650641	40,74519231
15	160	124,5	249,6	64,1025641	49,87980769
16	99,5	109,5	249,6	39,86378205	43,87019231
17	218,3	182,8	249,6	87,4599359	73,23717949
18	104,6	68,6	249,6	41,90705128	27,48397436
19	194	182	249,6	77,72435897	72,91666667
20	125	94	249,6	50,08012821	37,66025641
21	258,5	242,5	249,6	103,5657051	97,15544872
22	94	77	249,6	37,66025641	30,84935897
23	306	275,5	249,6	122,5961538	110,3766026
24	93	57	249,6	37,25961538	22,83653846
25	221,7	197,7	249,6	88,82211538	79,20673077

26	128,5	124,5	249,6	51,48237179	49,87980769
27	152,5	117	249,6	61,09775641	46,875
28	102	89,5	249,6	40,86538462	35,85737179
29	223,3	185,3	249,6	89,46314103	74,23878205
30	132	96	249,6	52,88461538	38,46153846
31	146,5	157	249,6	58,69391026	62,90064103
32	81	52,5	249,6	32,45192308	21,03365385
33	348,5	305,5	249,6	139,6233974	122,3958333
34	90	77	249,6	36,05769231	30,84935897
35	172,5	142	249,6	69,11057692	56,89102564
36	88,5	79,5	249,6	35,45673077	31,85096154
37	219	195,5	249,6	87,74038462	78,32532051
38	126,7	95,7	249,6	50,76121795	38,34134615
39	143	107,5	249,6	57,29166667	43,06891026
40	100,5	83,5	249,6	40,26442308	33,45352564
41	229,3	218,3	249,6	91,86698718	87,4599359
42	104,6	68,6	249,6	41,90705128	27,48397436
43	143	126,5	249,6	57,29166667	50,68108974
44	143	112	249,6	57,29166667	44,87179487
45	257	214	249,6	102,9647436	85,73717949
46	94	108,5	249,6	37,66025641	43,46955128
47	144,5	116,5	249,6	57,89262821	46,67467949
48	100	64	249,6	40,06410256	25,64102564
49	391,5	367,5	249,6	156,8509615	147,2355769
50	128,7	97,7	249,6	51,5625	39,14262821
51	160,2	151,7	249,6	64,18269231	60,77724359
52	105,3	88,3	249,6	42,1875	35,37660256
<b>Total</b>	<b>8224,7</b>	<b>7051,2</b>		<b>63,36831238</b>	<b>54,32692308</b>

## Anexo 6 – Resultados primera recalendarización del puesto de trabajo Mecánico

En los siguientes cuadros, se pueden observar las cantidades de Horas Hombre (HH) correspondientes a la distribución de carga de trabajo actual y a la obtenida mediante la primera recalendarización. También se observan las HH Disponibles correspondientes a las horas de trabajo otorgadas por una dotación de 6 técnicos por semana de trabajo y sus respectivas cargas de trabajo, obtenidas como porcentaje de las HH Disponibles utilizadas por las HH Planificadas.

MECANICO					
Semana	HH	HH Planificadas	HH	% Carga	
	Planificadas	Optimizadas	Disponibles	Semanal	Semanal Op
1	128,2	133,4	249,6	51,36217949	53,44551282
2	131,4	50,4	249,6	52,64423077	20,19230769
3	124,7	82,7	249,6	49,9599359	33,13301282
4	123,3	71,5	249,6	49,39903846	28,64583333
5	149	119	249,6	59,69551282	47,67628205
6	165,3	72,3	249,6	66,22596154	28,96634615
7	152,2	140,2	249,6	60,9775641	56,16987179
8	159,4	78,4	249,6	63,86217949	31,41025641
9	146,8	116,8	249,6	58,81410256	46,79487179
10	160,5	109,5	249,6	64,30288462	43,87019231
11	141,3	99,3	249,6	56,61057692	39,78365385
12	163,4	82,4	249,6	65,46474359	33,01282051
13	144	144	249,6	57,69230769	57,69230769
14	142,5	61,5	249,6	57,09134615	24,63942308
15	134,9	92,9	249,6	54,04647436	37,21955128
16	149,3	98,3	249,6	59,81570513	39,38301282
17	176,9	146,9	249,6	70,87339744	58,85416667
18	155,5	74,5	249,6	62,29967949	29,84775641
19	142,3	130,3	249,6	57,01121795	52,20352564
20	139,3	58,3	249,6	55,80929487	23,35737179
21	162,3	132,3	249,6	65,02403846	53,00480769
22	155,4	104,4	249,6	62,25961538	41,82692308
23	141,9	99,9	249,6	56,85096154	40,02403846
24	136,5	55,5	249,6	54,6875	22,23557692
25	150,4	150,4	249,6	60,25641026	60,25641026

26	148,7	67,7	249,6	59,57532051	27,12339744
27	153,8	111,8	249,6	61,61858974	44,79166667
28	139,5	88,5	249,6	55,88942308	35,45673077
29	148	118	249,6	59,29487179	47,27564103
30	280,5	199,5	249,6	112,3798077	79,92788462
31	149,3	137,3	249,6	59,81570513	55,00801282
32	158,8	77,8	249,6	63,62179487	31,16987179
33	139	109	249,6	55,68910256	43,66987179
34	166,8	115,8	249,6	66,82692308	46,39423077
35	144,9	102,9	249,6	58,05288462	41,22596154
36	158,9	75,9	249,6	63,66185897	30,40865385
37	147,7	147,7	249,6	59,17467949	59,17467949
38	349,5	167,5	249,6	140,0240385	67,10737179
39	141,9	200,9	249,6	56,85096154	80,48878205
40	136,5	85,5	249,6	54,6875	34,25480769
41	146,4	116,4	249,6	58,65384615	46,63461538
42	145,4	64,4	249,6	58,25320513	25,80128205
43	184,1	172,1	249,6	73,75801282	68,95032051
44	157,5	76,5	249,6	63,10096154	30,64903846
45	161,4	141,4	249,6	64,66346154	56,65064103
46	142,9	91,9	249,6	57,25160256	36,81891026
47	177,7	135,7	249,6	71,19391026	54,36698718
48	147,5	66,5	249,6	59,09455128	26,64262821
49	136	136	249,6	54,48717949	54,48717949
50	142,5	61,5	249,6	57,09134615	24,63942308
51	145,3	103,3	249,6	58,21314103	41,38621795
52	160,8	109,8	249,6	64,42307692	43,99038462
<b>Total</b>	<b>8088</b>	<b>5586,4</b>		<b>62,31508876</b>	<b>43,04117357</b>

## Anexo 7 – Resultados primera recalendarización del puesto de trabajo Electrocontrol

En los siguientes cuadros, se pueden observar las cantidades de Horas Hombre (HH) correspondientes a la distribución de carga de trabajo actual y a la obtenida mediante la primera recalendarización. También se observan las HH Disponibles correspondientes a las horas de trabajo otorgadas por una dotación de 6 técnicos por semana de trabajo y sus respectivas cargas de trabajo, obtenidas como porcentaje de las HH Disponibles utilizadas por las HH Planificadas.

ELECTROCONTROL					
Semana	HH	HH Planificadas	HH	% Carga	
	Planificadas	Optimizadas	Disponibles	Semanal	Semanal Op
1	186	217,5	249,6	74,51923077	87,13942308
2	112,5	81	249,6	45,07211538	32,45192308
3	172,5	136	249,6	69,11057692	54,48717949
4	104,4	87,4	249,6	41,82692308	35,01602564
5	226,3	188,3	249,6	90,6650641	75,44070513
6	101,1	92,1	249,6	40,50480769	36,89903846
7	172,5	158	249,6	69,11057692	63,30128205
8	82	70	249,6	32,8525641	28,04487179
9	262	184	249,6	104,9679487	73,71794872
10	89,5	93	249,6	35,85737179	37,25961538
11	140	136,5	249,6	56,08974359	54,6875
12	101	65	249,6	40,46474359	26,04166667
13	212	188	249,6	84,93589744	75,32051282
14	132,7	101,7	249,6	53,1650641	40,74519231
15	160	124,5	249,6	64,1025641	49,87980769
16	99,5	109,5	249,6	39,86378205	43,87019231
17	218,3	182,8	249,6	87,4599359	73,23717949
18	104,6	68,6	249,6	41,90705128	27,48397436
19	194	182	249,6	77,72435897	72,91666667
20	125	113	249,6	50,08012821	45,2724359
21	258,5	207,5	249,6	103,5657051	83,13301282
22	94	181	249,6	37,66025641	72,51602564
23	306	132,5	249,6	122,5961538	53,0849359
24	93	112	249,6	37,25961538	44,87179487
25	221,7	197,7	249,6	88,82211538	79,20673077

26	128,5	124,5	249,6	51,48237179	49,87980769
27	152,5	117	249,6	61,09775641	46,875
28	102	89,5	249,6	40,86538462	35,85737179
29	223,3	185,3	249,6	89,46314103	74,23878205
30	132	96	249,6	52,88461538	38,46153846
31	146,5	157	249,6	58,69391026	62,90064103
32	81	142	249,6	32,45192308	56,89102564
33	348,5	200	249,6	139,6233974	80,12820513
34	90	93	249,6	36,05769231	37,25961538
35	172,5	142	249,6	69,11057692	56,89102564
36	88,5	79,5	249,6	35,45673077	31,85096154
37	219	195,5	249,6	87,74038462	78,32532051
38	126,7	95,7	249,6	50,76121795	38,34134615
39	143	107,5	249,6	57,29166667	43,06891026
40	100,5	83,5	249,6	40,26442308	33,45352564
41	229,3	218,3	249,6	91,86698718	87,4599359
42	104,6	68,6	249,6	41,90705128	27,48397436
43	143	126,5	249,6	57,29166667	50,68108974
44	143	131	249,6	57,29166667	52,48397436
45	257	179	249,6	102,9647436	71,71474359
46	94	124,5	249,6	37,66025641	49,87980769
47	144,5	116,5	249,6	57,89262821	46,67467949
48	100	152	249,6	40,06410256	60,8974359
49	391,5	224,5	249,6	156,8509615	89,94391026
50	128,7	152,7	249,6	51,5625	61,17788462
51	160,2	151,7	249,6	64,18269231	60,77724359
52	105,3	88,3	249,6	42,1875	35,37660256
<b>Total</b>	<b>8224,7</b>	<b>7051,2</b>		<b>63,36831238</b>	<b>54,32692308</b>

## Anexo 8 – Resultados segunda recalendarización del puesto de trabajo Mecánico

En los siguientes cuadros, se pueden observar las cantidades de Horas Hombre (HH) correspondientes a la distribución de carga de trabajo actual y a la obtenida mediante la segunda recalendarización. También se observan las HH Disponibles correspondientes a las horas de trabajo otorgadas por una dotación de 6 técnicos por semana de trabajo y sus respectivas cargas de trabajo, obtenidas como porcentaje de las HH Disponibles utilizadas por las HH Planificadas.

MECANICO					
Semana	HH	HH Planificadas	HH	% Carga	
	Planificadas	Optimizadas	Disponibles	Semanal	Semanal Op
1	128,2	133,4	249,6	51,36217949	53,44551282
2	131,4	50,4	249,6	52,64423077	20,19230769
3	124,7	82,7	249,6	49,9599359	33,13301282
4	123,3	71,5	249,6	49,39903846	28,64583333
5	149	119	249,6	59,69551282	47,67628205
6	165,3	72,3	249,6	66,22596154	28,96634615
7	152,2	140,2	249,6	60,9775641	56,16987179
8	159,4	78,4	249,6	63,86217949	31,41025641
9	146,8	116,8	249,6	58,81410256	46,79487179
10	160,5	109,5	249,6	64,30288462	43,87019231
11	141,3	99,3	249,6	56,61057692	39,78365385
12	163,4	82,4	249,6	65,46474359	33,01282051
13	144	144	249,6	57,69230769	57,69230769
14	142,5	61,5	249,6	57,09134615	24,63942308
15	134,9	92,9	249,6	54,04647436	37,21955128
16	149,3	98,3	249,6	59,81570513	39,38301282
17	176,9	146,9	249,6	70,87339744	58,85416667
18	155,5	74,5	249,6	62,29967949	29,84775641
19	142,3	130,3	249,6	57,01121795	52,20352564
20	139,3	58,3	249,6	55,80929487	23,35737179
21	162,3	132,3	249,6	65,02403846	53,00480769
22	155,4	104,4	249,6	62,25961538	41,82692308
23	141,9	99,9	249,6	56,85096154	40,02403846
24	136,5	55,5	249,6	54,6875	22,23557692
25	150,4	150,4	249,6	60,25641026	60,25641026

26	148,7	67,7	249,6	59,57532051	27,12339744
27	153,8	111,8	249,6	61,61858974	44,79166667
28	139,5	160,5	249,6	55,88942308	64,30288462
29	148	118	249,6	59,29487179	47,27564103
30	280,5	127,5	249,6	112,3798077	51,08173077
31	149,3	137,3	249,6	59,81570513	55,00801282
32	158,8	77,8	249,6	63,62179487	31,16987179
33	139	109	249,6	55,68910256	43,66987179
34	166,8	115,8	249,6	66,82692308	46,39423077
35	144,9	102,9	249,6	58,05288462	41,22596154
36	158,9	75,9	249,6	63,66185897	30,40865385
37	147,7	147,7	249,6	59,17467949	59,17467949
38	349,5	167,5	249,6	140,0240385	67,10737179
39	141,9	99,9	249,6	56,85096154	40,02403846
40	136,5	186,5	249,6	54,6875	74,71955128
41	146,4	116,4	249,6	58,65384615	46,63461538
42	145,4	64,4	249,6	58,25320513	25,80128205
43	184,1	172,1	249,6	73,75801282	68,95032051
44	157,5	76,5	249,6	63,10096154	30,64903846
45	161,4	141,4	249,6	64,66346154	56,65064103
46	142,9	91,9	249,6	57,25160256	36,81891026
47	177,7	135,7	249,6	71,19391026	54,36698718
48	147,5	66,5	249,6	59,09455128	26,64262821
49	136	136	249,6	54,48717949	54,48717949
50	142,5	61,5	249,6	57,09134615	24,63942308
51	145,3	103,3	249,6	58,21314103	41,38621795
52	160,8	109,8	249,6	64,42307692	43,99038462
<b>Total</b>	<b>8088</b>	<b>5586,4</b>		<b>62,31508876</b>	<b>43,04117357</b>

## Anexo 9 – Resultados segunda recalendarización del puesto de trabajo Electrocontrol

En los siguientes cuadros, se pueden observar las cantidades de Horas Hombre (HH) correspondientes a la distribución de carga de trabajo actual y a la obtenida mediante la segunda recalendarización. También se observan las HH Disponibles correspondientes a las horas de trabajo otorgadas por una dotación de 6 técnicos por semana de trabajo y sus respectivas cargas de trabajo, obtenidas como porcentaje de las HH Disponibles utilizadas por las HH Planificad

ELECTROCONTROL					
Semana	HH	HH Planificadas	HH	% Carga	% Carga
	Planificadas	Optimizadas	Disponibles	Semanal	Semanal Op
1	186	217,5	249,6	74,51923077	87,13942308
2	112,5	81	249,6	45,07211538	32,45192308
3	172,5	136	249,6	69,11057692	54,48717949
4	104,4	87,4	249,6	41,82692308	35,01602564
5	226,3	188,3	249,6	90,6650641	75,44070513
6	101,1	92,1	249,6	40,50480769	36,89903846
7	172,5	158	249,6	69,11057692	63,30128205
8	82	70	249,6	32,8525641	28,04487179
9	262	184	249,6	104,9679487	73,71794872
10	89,5	93	249,6	35,85737179	37,25961538
11	140	136,5	249,6	56,08974359	54,6875
12	101	65	249,6	40,46474359	26,04166667
13	212	188	249,6	84,93589744	75,32051282
14	132,7	101,7	249,6	53,1650641	40,74519231
15	160	124,5	249,6	64,1025641	49,87980769
16	99,5	109,5	249,6	39,86378205	43,87019231
17	218,3	182,8	249,6	87,4599359	73,23717949
18	104,6	68,6	249,6	41,90705128	27,48397436
19	194	182	249,6	77,72435897	72,91666667
20	125	113	249,6	50,08012821	45,2724359
21	258,5	207,5	249,6	103,5657051	83,13301282
22	94	181	249,6	37,66025641	72,51602564
23	306	121,5	249,6	122,5961538	48,67788462
24	93	123	249,6	37,25961538	49,27884615
25	221,7	197,7	249,6	88,82211538	79,20673077

26	128,5	124,5	249,6	51,48237179	49,87980769
27	152,5	117	249,6	61,09775641	46,875
28	102	89,5	249,6	40,86538462	35,85737179
29	223,3	185,3	249,6	89,46314103	74,23878205
30	132	96	249,6	52,88461538	38,46153846
31	146,5	157	249,6	58,69391026	62,90064103
32	81	142	249,6	32,45192308	56,89102564
33	348,5	200	249,6	139,6233974	80,12820513
34	90	93	249,6	36,05769231	37,25961538
35	172,5	142	249,6	69,11057692	56,89102564
36	88,5	79,5	249,6	35,45673077	31,85096154
37	219	195,5	249,6	87,74038462	78,32532051
38	126,7	95,7	249,6	50,76121795	38,34134615
39	143	107,5	249,6	57,29166667	43,06891026
40	100,5	83,5	249,6	40,26442308	33,45352564
41	229,3	218,3	249,6	91,86698718	87,4599359
42	104,6	68,6	249,6	41,90705128	27,48397436
43	143	126,5	249,6	57,29166667	50,68108974
44	143	131	249,6	57,29166667	52,48397436
45	257	179	249,6	102,9647436	71,71474359
46	94	124,5	249,6	37,66025641	49,87980769
47	144,5	116,5	249,6	57,89262821	46,67467949
48	100	152	249,6	40,06410256	60,8974359
49	391,5	206	249,6	156,8509615	82,53205128
50	128,7	171,2	249,6	51,5625	68,58974359
51	160,2	151,7	249,6	64,18269231	60,77724359
52	105,3	88,3	249,6	42,1875	35,37660256
<b>Total</b>	<b>8224,7</b>	<b>7051,2</b>		<b>63,36831238</b>	<b>54,32692308</b>