UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
SANTIAGO - CHILE

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PLANIFICACIÓN DE ACTIVIDADES CÍCLICAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

SEBASTIÁN ANDRÉS CAMPOS BRIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA	:	SR. RODRIGO MENA
PROFESOR CORREFERENTE	:	SR. PABLO VIVEROS

ENERO 2020

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo imprescindible de todas las personas que me permitieron el desarrollo de este trabajo, en especial a mi familia.

A mi madre, por la infinita paciencia que me tuvo, en los momentos más difíciles que soporté para finalizar este proceso. Agradezco tu apoyo, energía y tu infinito cariño. Muchas veces deje de lado cosas importantes, pero siempre me guiaste, aconsejaste y fuiste mi maestra durante todo este proceso, y probablemente lo serás durante toda mi vida. Gracias madre.

A mi hermano, por darme siempre buenos ánimos, escucharme en los momentos que necesite y ayudarme en los errores ortográficos que tuve al escribir. Agradecerte también, por tenerme esa infinita paciencia que siempre has tenido, esa virtud de poder escuchar y siempre ser empático.

A mi padre, por preocuparse por mi bienestar y por brindarme siempre buenos ánimos, que muchas veces te costo expresar. Lo valoro mucho.

A mi amigo Jorge, que siempre me dio ánimos, energías y buenos momentos para terminar esta etapa. Gracias por acompañarme durante todo este proceso, no sabes cuantas veces me ayudaste a olvidar los momentos tristes sacándome siempre una sonrisa.

A mi querida y amada Celeste, quien siempre estuvo en los momentos más difíciles de este proceso, entregándome siempre tus más sinceros cariños, energías y emociones. Tu apoyo incondicional fue imprescindible para el término de este trabajo. De la misma manera, doy gracias al apoyo de toda tu familia.

Agradecer a mis profesores, Rodrigo Mena y Pablo Viveros, que me ayudaron y me permitieron finalizar este proceso.

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un modelo de optimización para la planificación de actividades cíclicas de mantenimiento preventivo ejecutadas sobre un activo físico. El modelo toma como entrada la información proveniente de la aplicación de alguna metodología como lo es RCM, es decir, frecuencias de ejecución de cada actividad de mantenimiento, costos de ejecución de cada actividad, incluyéndoles una determinada tolerancia, de manera de aprovechar la oportunidad de agrupar actividades, y así minimizar la posible ineficiencia asociada. El problema es de alta complejidad computacional por lo que el modelo propuesto es a tiempo continuo de tal manera de disminuir su eficiencia, siendo formulado a través de programación lineal entera mixta, además para hacerlo abordable, fueron considerados dos supuestos:

- No existen duraciones de las actividades (la reparación es instantánea).
- Se cuenta con los recursos suficientes para ejecutar las actividades.

Estos supuestos son incorporados en un posterior análisis.

Para evaluar los potenciales beneficios de la utilización del modelo para la planificación de actividades cíclicas de mantenimiento preventivo, en términos de ineficiencia, se construyen tres casos de análisis, sensibilizando el nivel de tolerancia en cada caso. Los tres casos de análisis, son:

- Caso I: Las frecuencias len la ejecución de las actividades son múltiplos entre sí.
- Caso II: Las frecuencias en la ejecución de las actividades no son múltiplos entre sí.
- Caso III: La combinación de los casos anteriores.

El modelo de optimización desarrollado se programó en el lenguaje *Python* y fueron resueltas diversas instancias según los casos propuestos utilizando el solver *Gurobi* mediante la librería *Pyomo*. Para poder cuantificar y comparar la ineficiencia entre las distintas tolerancias, se construye un indicador (KPI), obteniéndose los siguientes resultados:

- Caso I: No se obtiene una disminución de ineficiencia por la incorporación de tolerancias.
- Caso II: La ineficiencia puede ser disminuida hasta en un tercio, al incorporar las tolerancias.
- Caso III: Se disminuye la ineficiencia aproximadamente en un 18 %.

La disminución de ineficiencia fue calculada a través de la situación base, en la que no existe una tolerancia asociada a las actividades.

En base a los resultados obtenidos, se realiza un análisis a posteriori incluyendo la duración de las actividades y los recursos disponibles, de tal manera de ver el comportamiento del modelo frente a las planificaciones generadas, las agrupaciones formadas y los distintos ámbitos de la gestión.

De esta manera, se llega a la conclusión de la utilidad del modelo bajo los diferentes escenarios propuestos, logrando resolver el problema de la planificación y generando resultados positivos frente a la ineficiencia por detenciones para ejecutar las actividades de mantenimiento.

La herramienta puede llegar a ser una herramienta muy útil si se implementa de manera adecuada, puesto que amplía el potencial que entrega RCM, ampliando su valor y permitiendo crear planes de mantenimiento óptimos. Se recomienda implementar en conjunto con otras herramientas de manera de tener una herramienta sólida para la toma de decisiones.

Índice de Contenidos

1. Introducción **1**
1.1. Antecedentes . . . 1
1.2. Problema de Investigación . . . 2

2. Objetivos **4**
2.1. Objetivo General . . . 4
2.2. Objetivos Específicos . . . 4

3. Marco Teórico **5**
3.1. Revisión Bibliográfica . . . 5
3.1.1. Antecedentes . . . 5
3.1.2. Modelos de Optimización para la Planificación de Actividades . . . 7
3.2. Conceptos Técnicos . . . 9
3.2.1. Mantenimiento . . . 9
3.2.1.1. Gestión del Mantenimiento . . . 11
3.2.1.2. Plan de Mantenimiento . . . 11
3.2.1.3. Pauta de Mantenimiento . . . 12
3.2.1.4. Hoja de Ruta . . . 13
3.2.1.5. Ingeniería del Mantenimiento . . . 13
3.2.1.6. RCM (Reliability-centered Maintenance) . . . 14
3.2.2. Optimización Matemática . . . 16
3.2.2.1. Programación Lineal . . . 16
3.2.2.2. Programación Entera Binaria . . . 17
3.2.2.3. Programación Lineal Entera Mixta . . . 18
3.2.2.4. Limitaciones . . . 18

4. Metodología **19**
4.1. Requerimientos del Modelo . . . 20
4.2. Formulación y Desarrollo del Modelo . . . 20
4.2.0.1. Parámetros . . . 20
4.2.0.2. Conjuntos . . . 20
4.2.0.3. Variables de Decisión . . . 22
4.2.0.4. Función Objetivo . . . 22
4.2.0.5. Restricciones . . . 22
4.2.0.6. Consideraciones . . . 23
4.3. Experimentos Computacionales . . . 24
4.4. Análisis del Beneficio . . . 25
4.4.1. Análisis de Tiempos de Resolución del Modelo . . . 25

5. Resultados y Discusión **26**
5.1. Caso I . . . 26
5.1.1. Discusión . . . 29

5.2. Caso II 30
5.2.1. Discusión 34
5.3. Caso III 36
5.3.1. Discusión 40
5.4. Tiempos Computacionales del Modelo 42

6. Análisis **43**
6.1. Planificación de las Actividades 43
6.2. Agrupamientos 45
6.3. Duración de actividades 47
6.4. Externalización de Recursos 48
6.5. Gestión de Planificación 52
6.6. Gestión de Control 55

7. Conclusiones y Consideraciones **56**
7.1. Aspectos Destacables 56
7.2. Consideraciones 57

Bibliografía **58**

A. ANEXOS **60**
A.1. Pauta de Mantenimiento 60
A.2. Caso I 61
A.3. Caso II 75
A.4. Caso III 85

Índice de Figuras

3.1. Tipos de Mantenimiento. **Fuente**: Radical Management (EN 13306:2017) 10

4.1. Intervalos posibles de ejecución de cada actividad, pertenecientes al conjunto N_i. 21
4.2. Conjunto agrupaciones posibles de la actividad i con la actividad n 22

5.1. Plan óptimo de actividades del Caso I sin tolerancias. 27
5.2. Plan óptimo de actividades del Caso I con una tolerancia de ejecución del 10 % de sus periodicidades. 28
5.3. Disminución de la Ineficiencia del Caso I, generada por la inclusión de las tolerancias. . . . 29
5.4. Plan óptimo de actividades del Caso II sin tolerancias. 31
5.5. Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 5 % de sus periodicidades. 32
5.6. Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 10 % de sus periodicidades. 33
5.7. Disminución de Ineficiencia del Caso II, generada por la inclusión de las tolerancias 35
5.8. Plan óptimo de actividades del Caso III sin tolerancias. 37
5.9. Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia del 5 % de sus periodicidades. . . 38
5.10. Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia del 10 % de sus periodicidades. . 39
5.11. Disminución de la Ineficiencia del Caso III, generada por la inclusión de las tolerancias . . . 40
5.12. Tiempos computacionales del modelo para distintas actividades y número de ejecuciones de la actividad de menor periodicidad, dada una tolerancia del 10 % de sus periodicidades. . . . 42

6.1. Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 10 % de sus periodicidades. 43
6.2. Plan óptimo de actividades del Caso II, con una tolerancia equivalente a la mitad de sus periodicidades. 45
6.3. Plan óptimo de actividades del Caso III, con una tolerancia equivalente a la mitad de sus periodicidades. 46
6.4. Plan óptimo de actividades del Caso II, ejecutadas en un intervalo de tiempo fijo. 53
6.5. Plan óptimo de las actividades del Caso III, en un intervalo de tiempo fijo. 54

A.1. Pauta de mantenimiento de Metro de Santiago. **Fuente**: Metro de Santiago 60
A.2. Plan óptimo de actividades del Caso I sin tolerancias. 68
A.3. Plan óptimo de actividades del Caso I con una tolerancia de ejecución del 5 % de sus periodicidades. 69
A.4. Plan óptimo de actividades del Caso I con una tolerancia de ejecución del 6 % de sus periodicidades. 70
A.5. Plan óptimo de actividades del Caso I con una tolerancia de ejecución del 7 % de sus periodicidades. 71
A.6. Plan óptimo de actividades del Caso I con una tolerancia de ejecución del 8 % de sus periodicidades. 72

A.7. Plan óptimo de actividades del Caso I con una tolerancia de ejecución del 9 % de sus periodicidades. 73
A.8. Plan óptimo de actividades del Caso I con una tolerancia de ejecución del 10 % de sus periodicidades. 74
A.9. Plan óptimo de actividades del Caso II sin tolerancias. 78
A.10. Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 5 % de sus periodicidades. 79
A.11. Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 6 % de sus periodicidades. 80
A.12. Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 7 % de sus periodicidades. 81
A.13. Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 8 % de sus periodicidades. 82
A.14. Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 9 % de sus periodicidades. 83
A.15. Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 10 % de sus periodicidades. 84
A.16. Plan óptimo de actividades del Caso III sin tolerancias. 88
A.17. Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia de ejecución del 5 % de sus periodicidades. 89
A.18. Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia de ejecución del 6 % de sus periodicidades. 90
A.19. Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia de ejecución del 7 % de sus periodicidades. 91
A.20. Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia de ejecución del 8 % de sus periodicidades. 92
A.21. Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia de ejecución del 9 % de sus periodicidades. 93
A.22. Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia de ejecución del 10 % de sus periodicidades. 94

Índice de Tablas

3.1. Ejemplo de actividades con periodicidades que son múltiplos entre sí, con las posibles agrupaciones formadas y el valor del mínimo común múltiplo de dichas agrupaciones. . . . 15
3.2. Ejemplo de actividades con periodicidades que no son múltiplos entre sí, con las posibles agrupaciones formadas y el valor del mínimo común múltiplo de dichas agrupaciones. . . . 15

4.1. Ejemplo de información de salida de RCM. Fuente: Afefy (2010) 19

5.1. Actividades del Caso I con sus respectivas periodicidades. Fuente: Elaboración Propia 26
5.2. Disminución de ineficiencia del Caso I, para cada nivel de tolerancia dado. 29
5.3. Número de intervenciones y duración total del plan de mantenimiento del caso I, bajo distintos niveles de tolerancia. 30
5.4. Actividades del Caso II con sus respectivas periodicidades. Fuente: Elaboración Propia . . . 31
5.5. Disminución de ineficiencia del Caso II, para cada nivel de tolerancia dado. 34
5.6. Número de intervenciones y duración total del plan de mantenimiento del Caso II, bajo distintos niveles de tolerancia. 35
5.7. Actividades del Caso III con sus respectivas periodicidades. Fuente: Elaboración Propia . . . 36
5.8. Disminución de ineficiencia del Caso III, para cada nivel de tolerancia dado. 40
5.9. Número de intervenciones y duración total del plan de mantenimiento del Caso III, bajo distintos niveles de tolerancia. 41

6.1. Actividades del Caso II ejecutadas en los distintos instantes de tiempo, dada una tolerancia del 10 % de su periodicidad. 44
6.2. Actividades del Caso II con sus respectivas periodicidades y duraciones. Fuente: Elaboración Propia 47
6.3. Ineficiencia del equipo para el Caso II con sus respectivas tolerancias. Fuente: Elaboración Propia 48
6.4. Actividades no agrupadas del Caso III con sus respectivas periodicidades y duraciones, dada una tolerancia del 8 %. Fuente: Elaboración Propia 49
6.5. Actividades ejecutadas en los distintos instantes de tiempo del Caso III, dada una tolerancia del 8 % de su periodicidad, con sus respectivos costos. 50
6.6. Número de intervenciones y disminución de ineficiencia para el Caso II y III. 54

A.1. Instantes de ejecución de las actividades del Caso I sin tolerancias. 61
A.2. Instantes de ejecución de las actividades del Caso I dada una tolerancia del 5 % de sus periodicidades. 62
A.3. Instantes de ejecución de las actividades del Caso I dada una tolerancia del 6 % de sus periodicidades. 63
A.4. Instantes de ejecución de las actividades del Caso I dada una tolerancia del 7 % de sus periodicidades. 64
A.5. Instantes de ejecución de las actividades del Caso I dada una tolerancia del 8 % de sus periodicidades. 65

A.6. Instantes de ejecución de las actividades del Caso I dada una tolerancia del 9 % de sus periodicidades. 66
A.7. Instantes de ejecución de las actividades del Caso I dada una tolerancia del 10 % de sus periodicidades. 67
A.8. Disminución de ineficiencia del Caso I, para cada nivel de tolerancia dado. 74
A.9. Instantes de ejecución de las actividades del Caso II sin tolerancias. 75
A.10. Instantes de ejecución de las actividades del Caso II dada una tolerancia del 5 % sus periodicidades. 75
A.11. Instantes de ejecución de las actividades del Caso II dada una tolerancia del 6 % de sus periodicidades. 76
A.12. Instantes de ejecución de las actividades del Caso II dada una tolerancia del 7 % de sus periodicidades. 76
A.13. Instantes de ejecución de las actividades del Caso II dada una tolerancia del 8 % de sus periodicidades. 77
A.14. Instantes de ejecución de las actividades del Caso II dada una tolerancia del 9 % de sus periodicidades. 77
A.15. Instantes de ejecución de las actividades del Caso II dada una tolerancia del 10 % de sus periodicidades. 77
A.16. Disminución de ineficiencia del Caso II, para cada nivel de tolerancia dado. 84
A.17. Instantes de ejecución de las actividades del Caso III sin tolerancias 85
A.18. Instantes de ejecución de las actividades del Caso III dada una tolerancia del 5 % de sus periodicidades. 85
A.19. Instantes de ejecución de las actividades del Caso III dada una tolerancia del 6 % de sus periodicidades. 86
A.20. Instantes de ejecución de las actividades del Caso III dada una tolerancia del 7 % de sus periodicidades. 86
A.21. Instantes de ejecución de las actividades del Caso III dada una tolerancia del 8 % de sus periodicidades. 86
A.22. Instantes de ejecución de las actividades del Caso III dada una tolerancia del 9 % de sus periodicidades. 87
A.23. Instantes de ejecución de las actividades del Caso III dada una tolerancia del 10 % de sus periodicidades. 87
A.24. Disminución de ineficiencia del Caso III, para cada nivel de tolerancia dado. 94
A.25. Instantes de ejecución de las actividades del Caso II dada una tolerancia rígida 95
A.26. Tolerancias rígidas óptimas según las actividades del Caso II. 95
A.27. Instantes de ejecución de las actividades del Caso III dada una tolerancia rígida. 95
A.28. Tolerancias rígidas óptimas según las actividades del Caso III. 96
A.29. Indicador y disminución de ineficiencia para el Caso II y III. 96

1 | Introducción

1.1. Antecedentes

Un plan de mantenimiento es una de las principales herramientas de gestión para llevar a cabo el proceso de mantenimiento, describiendo de forma detallada cómo ejecutarlo.

La conformación de un plan de mantenimiento preventivo considera actividades cuya ejecución se repiten con cierta ciclicidad. En este proceso, se define la programación de actividades de mantenimiento, la cuál busca ejecutar simultáneamente el mayor número de actividades posibles en determinados instantes de tiempo, para reducir eventuales costos de ineficiencia por tiempos de parada (improductividad).

La posibilidad de agrupar un conjunto de actividades de mantenimiento, dependerá de la flexibilidad de poder atrasar o adelantar el instante de ejecución de cada actividad, es decir, de determinada "tolerancia" asociada a sus frecuencias de ejecución. La agrupación del conjunto de actividades dependerá principalmente de la capacidad de programar simultáneamente la ejecución de las actividades, es decir, la factibilidad de ser realizadas y la disponibilidad de recursos.

Existen diversas metodologías para resolver y analizar este tipo de problemas, siendo la programación matemática una de las más versátiles, ya que bajo restricciones impuestas por la flexibilidad de atrasar o adelantar una actividad específica, se puede formular un modelo de optimización para el agrupamiento de actividades de mantenimiento.

Una de las herramientas más utilizadas para definir un plan de mantenimiento, es el Realiability Centered-Maintenance (RCM), el cuál se basa en el análisis de falla de los equipos, contestando 7 preguntas claves. Al aplicar la metodología RCM sobre un equipo, se obtiene como información de salida una lista detallada de actividades de mantenimiento de distinta naturaleza (e.g. preventiva, correctiva, mejorativa) , las cuales contienen asociadas distintos atributos, tales como:

- Descripción de la actividad de mantenimiento.
- Criticidad de la falla del activo.

- Frecuencia de ejecución de la actividad de mantenimiento.
- Duración de ejecución de la actividad de mantenimiento.
- Tolerancia de atrasar o adelantar la ejecución de la actividad de mantenimiento.
- Recursos a utilizar durante la ejecución de la actividad mantenimiento.
- Encargado de realizar la actividad mantenimiento.

Esta información debe ser gestionada para su posterior planificación, programación y calendarización, conformando así, el plan de mantenimiento. No obstante, RCM no define de qué manera gestionar esta información, quedando en manos del planificador buscar y programar cuándo ejecutar cada actividad de mantenimiento, conformado así el programa. Es así, que surge el cuestionamiento acerca de cómo gestionar la información que entrega RCM, de tal manera de poder generar un plan de mantenimiento óptimo que aproveche la oportunidad de ejecutar actividades agrupadas para disminuir los costos de ineficiencia.

1.2. Problema de Investigación

Dentro del campo de estudio, existen distintos modelos de optimización para resolver el problema de la planificación de actividades de mantenimiento, siendo estos modelos desarrollados por estadísticos y académicos, los cuales poseen un conocimiento limitado en el contexto práctico. En su mayoría, los modelos presentan un lenguaje complejo para los profesionales del mantenimiento (Rausand, 1998). Por ello, es importante que exista un *Trade-off* acerca de la complejidad de los modelos y su utilidad como herramientas, de manera que puedan asistir la toma de decisiones.

"Muchos profesionales han encontrado este problema tan abrumante, que intentan no utilizar modelos para optimizar los intervalos de tiempo en que se ejecuta cada actividad de mantenimiento. Ellos dependen de las recomendaciones de los fabricantes y la experiencia del personal, por lo que, terminan realizando un mantenimiento demasiado frecuente" (Rausand, 1998)

De esta manera, guiarse por las recomendaciones de los fabricantes y y la experiencia del personal conlleva probablemente un sobrecosto del mantenimiento, por lo que formular un plan de mantenimiento en base a estas recomendaciones, es conservador y costo inicialmente.

Puesto que las empresas buscan maximizar sus beneficios e.g. minimizar los costos (Emerson Process Management, 2003), el plan de mantenimiento deberá ser programado de tal manera de interrumpir lo menos posible,el funcionamiento de los equipos. Para ello, las actividades de mantenimiento deberán ser organizadas de la mejor manera, teniendo en cuenta la ciclicidad y la capacidad de poder atrasar o adelantar la actividad (tolerancia).

La metodología RCM, permite obtener información valiosa acerca de las actividades de mantenimiento, teniendo entre sus principales objetivos mejorar el funcionamiento operacional de los equipos, dar mayor vida útil a los componentes costosos y aumentar el costo-eficacia del mantenimiento (Moubray, 2004), sin embargo, RCM no aborda la problemática del proceso de programación pues se limita a entregar una recomendación respecto a la frecuencias de ejecuciones, no obstante, no promueve la optimización del tiempo fuera de servicio (objetivo implícito).

El problema abordado en esta memoria tiene un alcance sobre la planificación de actividades cíclicas de mantenimiento preventivo, provenientes de RCM, considerando tolerancia en la frecuencia de ejecución de las actividades para así aprovechar la oportunidad de ejecutar actividades de manera simultanea (agrupadas) y en consecuencia, disminuir los costos de ineficiencia. Además, asume que existen recursos disponibles para su ejecución.

2 | Objetivos

2.1. Objetivo General

Desarrollar un modelo de optimización para la planificación de actividades cíclicas de mantenimiento preventivo, considerando las frecuencias recomendadas por RCM y cierta tolerancia definida en base a sus frecuencias, con el objetivo de obtener un plan óptimo para minimizar el tiempo de parada por concepto de ineficiencia.

2.2. Objetivos Específicos

- Investigar modelos de planificación de actividades cíclicas de mantenimiento preventivo.
- Desarrollar un modelo de programación mixta a tiempo continuo, de manera de encontrar solo los instantes de tiempo en los cuales se ejecutan las actividades, evitando así explorar cada instante de tiempo.
- Evaluar, en un análisis posterior a los resultados, el impacto generado por la inclusión de las restricciones que el modelo no considera.
- Determinar el máximo valor a pagar por externalizar las actividades, considerando la disponibilidad de recursos.
- Realizar un análisis de sensibilidad, frente a diferentes niveles de tolerancia para la ejecución de las actividades de mantenimiento.

3 | Marco Teórico

3.1. Revisión Bibliográfica

3.1.1. Antecedentes

Dentro de la literatura, existen diversas metodologías para realizar una planificación del mantenimiento, puesto que depende de los criterios y políticas de cada organización. A pesar de ello, existen diversos autores que discuten algunos criterios para conformar planes de mantenimiento.

Crespo Marquéz (2011) comenta algunos enfoques para realizar esta tarea, como por ejemplo:

- Adoptar las recomendaciones de los fabricantes en los manuales de operaciones, documentos similares, etc.
- Confiar en la experiencia que se tiene con ese tipo de equipos o con equipos similares.
- Estudiar y analizar documentación técnica de cada equipo, tales como diagramas, procedimientos técnicos, etc., con el fin de mejorar y adaptar las recomendaciones provenientes del fabricante a las condiciones de trabajo o determinadas necesidades del mantenimiento.
- Usar técnicas de ingeniería del mantenimiento, tales como Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) basado en el análisis de fallo u otros métodos con este propósito.
- Teniendo en cuenta los requisitos reglamentarios y/o obligatorios, como las condiciones de seguridad de la operación del equipo, regulaciones medio-ambientales.
- Otros.

Dhillon (2002) explica que para conformar un plan de mantenimiento es necesario disponer de una serie de datos y procedimientos, tales como:

- Registros históricos y detallados de los equipos.
- Recomendaciones del fabricante.

- Manuales de servicio.
- Identificar a cada equipo de forma única.
- Instrumentos y soporte administrativo.
- Cooperación del usuario al momento de dar detalles de información de fallas por algún problema en el equipo.
- Repuestos.
- Instrucciones escritas para ser ejecutadas y verificadas.

Además menciona que existen 6 pasos para el desarrollo para la conformación de un plan de mantenimiento:

1. Identificar y escoger las áreas para realizar el mantenimiento.
2. Identificar las necesidades del plan (requerimientos).
3. Establecer las frecuencias de asignación.
4. Preparar el asignamiento para las actividades de mantenimiento.
5. Calendarizar los asignamientos para las actividades de mantenimiento sobre una base anual.
6. Expandir el plan de mantenimiento tanto como sea necesario.

Rausand (1998) argumenta que los planes de mantenimiento tradicionales están basadas en una combinación de recomendación de los fabricantes, legislación y normas de la empresa, y, en menor medida, modelos y datos de mantenimiento. Pero discute que la recomendación de los fabricantes puede estar sesgada hacia la maximización de las ventas de los repuestos, en lugar de maximizar el potencial del equipo.

Raussand destaca además, que determinar el intervalo óptimo para realizar las tareas de mantenimiento y así, realizar una buena planificación, es una tarea compleja, puesto que mucho de los modelos de optimización presentados en la literatura están desarrollados por académicos con limitado conocimiento en el contexto práctico, además, los datos necesarios para utilizar los modelos rara vez están disponibles, y cuando lo están, pocas veces se encuentran en el formato requerido.

Existen distintos enfoques y supuestos acerca de como llevar a cabo una planificación óptima. Thomas (1986) presenta en su trabajo una clasificación de estrategias de mantenimiento óptimas para sistemas de multicomponentes. Se centra en los modelos que se basan en tres tipos de dependencia que ocurre entre los elementos del sistema:

- Dependencia económica: Implica la ejecución de un grupo de ciertas actividades, tiene un menor costo que la ejecución individual de las mismas.

- Dependencia estructural: Implica que se debe ejecutar un grupo de actividades de mantenimiento a un grupo de elementos, cuando solo existe un elemento afectado.
- Dependencia a la falla: Implica como la condición de los elementos influencian en el ciclo de vida de otros componentes del equipo.

3.1.2. Modelos de Optimización para la Planificación de Actividades

Dentro de la literatura, se encuentran algunos modelos de optimización que detallan distintos enfoques para llevar a cabo una planificación de las actividades de mantenimiento. Muchos de estos modelos se basan en análisis de riesgo y falla de los equipos.

Kobbacy y Murthy (2008) destacan, como Raussannd & Vatn, desarrollan en conjunto una herramienta computacional llamada *OptiRCM* el cuál es utilizado por el sistema ferroviario Noruego para la planificación de actividades. Los autores proponen un modelo a tiempo continuo basado en los datos entregados por la metodología RCM, el cuál busca a través de simulación, minimizar el costo total del mantenimiento. Este costo está compuesto por:

- Costos de indisponibilidad.
- Costos de restricción ambiente, material dañado,etc.
- Costos de la consecuencia de una falla.
- Costos de ejecutar el mantenimiento preventivo.
- Costos de ejecutar el mantenimiento correctivo.

El modelo incorpora bastantes parámetros, acercándose bastante a la realidad, además, no presenta formulas y cálculos complejos. A pesar de ello, el modelo solo permite saber los intervalos de mantenimientos óptimos de una actividad.

Laggoune et al. (2010) desarrollan un modelo de optimización para la planificación de actividades de tipo preventivas/correctivas de un sistema de multi-componentes basado en altas pérdidas productivas y una interacción de dependencia económica. Los autores proponen un modelo a tiempo discreto, basado en las tasas de fallas de los componentes, de forma de minimizar los costos de ejecución de las actividades, utilizando el método Monte Carlo para dar solución al problema. El modelo permite generar un plan de mantenimiento a través de la minimización de costos, no obstante, resolver el problema para un número considerable de actividades conlleva a obtener altos tiempos computacionales.

Zhou et al. (2007) discute cómo, en general, las actividades de mantenimiento son calendarizadas periódicamente sobre la base de la experiencia de los técnicos, sin embargo, el mantenimiento suele ser imperfecto y generalmente no logra que el equipo funcione de la misma manera luego del mantenimiento. Es

por ello que proponen un modelo de optimización para la planificación de actividades a tiempo continuo, basado en la función de falla de un equipo o sistema, de forma de minimizar los costos del sistema, aplicando un factor que incorpora la imperfección en el mantenimiento. El modelo considera factores relevantes como la duración de actividades, confiabilidad del sistema, costos, entre otros, pero se vuelve muy compleja su resolución por lo que el autor muestra sus resultados a través de simulaciones.

Tambe et al. (2013) comenta como las detenciones no planificadas de los equipos resulta en una alta perdida de producción, por lo que, las paradas no planificadas pueden ser consideradas como una oportunidad para realizar las actividades de mantenimientos sobre otros componentes. Los autores desarrollan un modelo de optimización lineal mixto, a tiempo continuo, basado en la confiabilidad de los componentes, de tal manera de minimizar los costos compuestos por las actividades preventivas/correctivas y por los costos de ineficiencia, proponiendo tres formas de solucionar el problema:

- Utilizando una heurística.
- A través de un algoritmo.
- Usando simulación.

El modelo es bastante completo para obtener una planificación de actividades, pero es bastante complejo de solucionar mediante métodos triviales, por lo que el autor utiliza tres métodos distintos para obtener una solución aproximada, obteniendo tiempos de resolución aceptables para 26 componentes.

Duarte et al. (2006) plantean un modelo de optimización basado en el criterio de la confiabilidad, teniendo 2 supuestos claves:

- Los equipos se encuentran conectados en una lógica en serie.
- En cada equipo se ejecuta solo una actividad de mantenimiento.

Los autores proponen un modelo, a tiempo continuo, basado en programación matemática, que busca la minimización de los costos de mantenimiento de tipo preventivo/correctivo sujeto a una determinada disponibilidad del sistema, considerando la duración de las actividades de mantenimiento. El modelo permite generar una planificación de las actividades a través de un modelo menos complejo, no obstante, los supuestos utilizados son muy fuertes y por lo tanto, es poco realista.

Besnard et al. (2017) menciona el problema que existe al gestionar el mantenimiento en generadores eólicos, pues existen elevados costos y además, una baja disponibilidad, provocando gran incertidumbre sobre la rentabilidad de los proyectos. Es por ello, que los autores formulan un modelo de optimización lineal, de tiempo discreto, para generar una planificación de las actividades de mantenimiento preventivas/correctivas considerando la duración de las actividades, de tal forma de minimizar los costos de mantenimiento, costos de transporte de repuestos y costos de horas extra. El modelo permite crear un plan de mantenimiento considerando además otro tipo de parámetros como lo son los costos de horas extras o de transporte, no así el

modelo es a tiempo discreto lo que provoca que se pierda efectividad, debiendo ser resuelto por el autor a través de simulación.

Gunn y Diallo (2015) plantea un modelo de optimización, de tiempo discreto, para la planificación de actividades de mantenimiento de tipo correctivo/preventivo, donde se aprovecha la oportunidad de agrupar bajo una ventana de tiempo. Puesto que el problema es tan complejo, los autores construyen un árbol con todas las soluciones posibles, para luego solucionarlo a través del algoritmo *shortest path*, por lo que su solución es poco eficiente, debiendo recorrer cada posible solución para hallar el óptimo.

Puesto que la problemática posee una gran complejidad, en la literatura se intenta buscar supuestos y simplificaciones para lograr hacerlo abordable. Una de las principales deficiencias que se encuentra en la literatura, es la gran cantidad de pasos y cálculos engorrosos que deben ser realizados para poder hallar una solución. Es por ello por lo que en esta memoria se propone desarrollar un modelo de programación lineal entera mixta, de tiempo continuo, para la planificación de actividades de mantenimiento preventivas cíclicas, incorporando una tolerancia en su posibilidad de ejecución.

El modelo es propuesto a tiempo continúo debido a qué se sólo se busca los posibles instantes de ejecución de las actividades mantenimiento, en consecuencia, al ser los instantes de ejecución una variable de decisión, se facilita la forma de abordar el problema, ya que no es necesario crear un conjunto que contenga el horizonte tiempo.

3.2. Conceptos Técnicos

3.2.1. Mantenimiento

El mantenimiento describe todas las actividades o labores necesarias para mantener en buen estado un equipo, entendiendo como equipo, un objeto físico sobre el cual hay que realizar y gestionar distintas actividades de mantenimiento (Matas, 2018). Estas actividades utilizan distintos recursos para poder ejecutarlas, como por ejemplo, monetarios, humanos, repuestos, herramientas, etc.

"El mantenimiento se define como el conjunto de técnicas destinadas a sostener la funcionalidad de los equipos y el buen estado de las máquinas a través del tiempo" (Mora Gutiérrez, 2009).

El mantenimiento no sólo busca conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible (disponibilidad), sino también busca el mejor rendimiento y desempeño de los mismos (García Garrido, 2003).

Según la Norma Europea EN 13306:2017, se distinguen principalmente 3 tipos de mantenimiento:

- Mantenimiento Preventivo: Buscar mantener el buen funcionamiento del equipo antes que se produzca alguna falla o avería.
- Mantenimiento Correctivo: Busca restaurar el funcionamiento del equipo luego de ocurrida alguna falla o avería técnica.
- Mantenimiento Mejorativo: Busca cambiar las condiciones de los equipos, de tal forma de mejorar su eficiencia e incrementar su mantenibilidad intrínseca.

En la Figura 3.1 se detalla el esquema del mantenimiento. En esta memoria se enfocará en el mantenimiento preventivo cíclico.

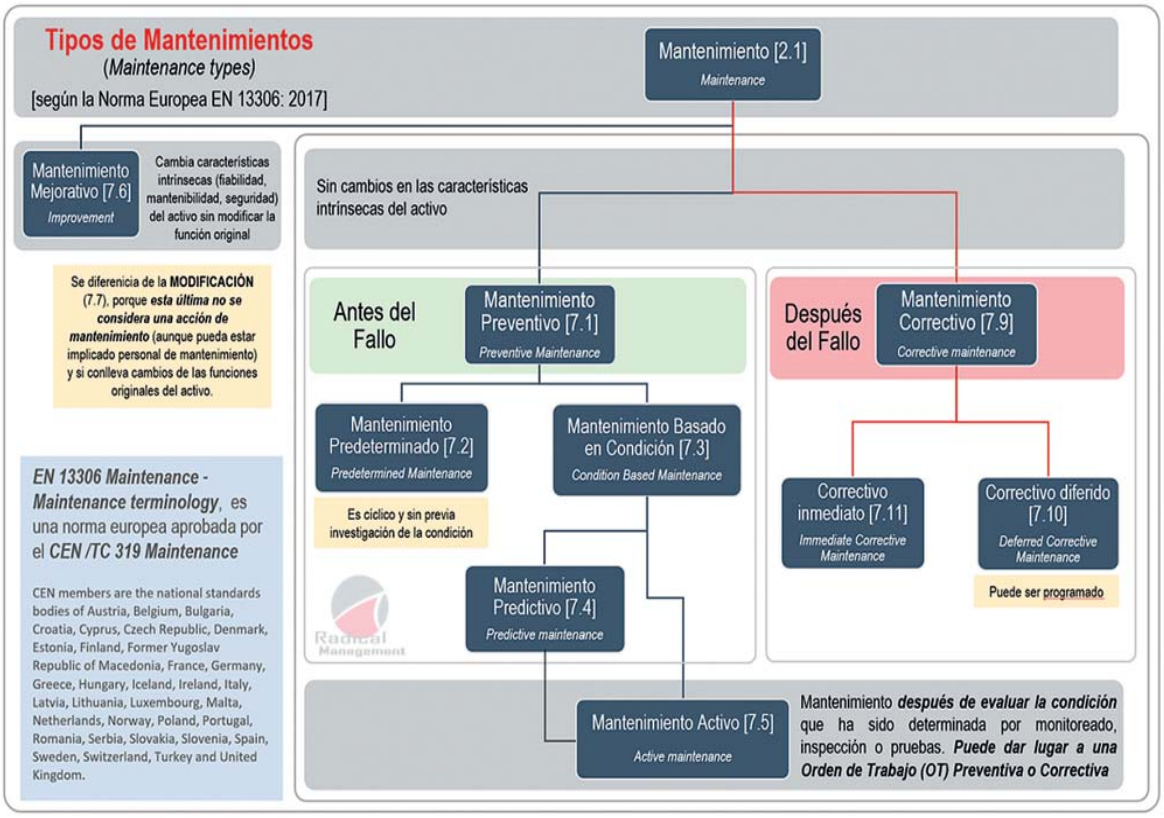

Figura 3.1: Tipos de Mantenimiento. **Fuente**: Radical Management (EN 13306:2017)

A comienzos de siglo, se creía que mientras existiera un mantenimiento de mayor frecuencia, los equipos presentarían menores averías y fallas, y por tanto, mejores resultados. Poco a poco, esta mentalidad fue cambiando a medida que nace el concepto de "riesgo" al momento de llevar a cabo el mantenimiento, pues ya no sólo se enfoca en reparar los equipos, si no que existe toda una planificación estratégica enfocada en las directrices de la organización.

3.2.1.1. Gestión del Mantenimiento

La planificación de una actividad mantenimiento puede ser trivial, pero planificar un conjunto de actividades no es tan sencillo, puesto que existen diversas formas de realizar dicha planificación. Es por ello que nace el siguiente cuestionamiento: ¿De qué manera se puede planificar un conjunto de actividades de mantenimiento de la mejor forma, de manera de aprovechar eficientemente los recursos disponibles? Es así como nace el incentivo de llevar a cabo una buena gestión, naciendo el concepto de Gestión del Mantenimiento.

La planeación y gestión del mantenimiento es una de las herramientas utilizadas a nivel estratégico que utilizan la mayoría de las empresas para administrar de manera óptima los recursos disponibles a utilizar en el área del mantenimiento. Por lo tanto, debe seguir las directrices pertinentes y siendo acorde con los objetivos que busca la empresa (García Garrido, 2003).

"Todo ello (gestión del mantenimiento) facilita la planificación, programación y control de la ejecución del mantenimiento, buscando siempre una mejora continua y teniendo en cuenta aspectos económicos relevantes para la organización" (Viveros et al., 2013).

Una de las herramientas fundamentales para llevar una adecuada gestión del mantenimiento, es el Plan de Mantenimiento, el cual da soporte a la planificación y programación de las actividades de mantenimiento.

3.2.1.2. Plan de Mantenimiento

"Un plan de mantenimiento es un documento que lista un grupo de tareas de mantenimiento que debe realizar una persona con un nivel de conocimientos específico en un activo especificado y con una frecuencia especificada" (Moubray, 2004)

Un plan de mantenimiento es un documento que detalla la programación de la ejecución de actividades de mantenimiento que detallan información clave para ejecutar el mantenimiento. Es por tanto, la principal guía utilizada para ejecutar el mantenimiento. La información del plan de mantenimiento, puede resumirse en:

- Nombre del equipo el cual va a ser intervenido.
- Nombre de la actividad a ejecutar.
- Frecuencia de ejecución de la actividad.
- Encargado de realizar la actividad.
- Fecha de inicio y termino de la ejecución del plan de mantenimiento.

- Hoja de ruta asociada al equipo.
- Recursos utilizados en la ejecución de la actividad.
- Observaciones del encargado de realizar la actividad.

Durante la planificación y programación de las actividades de mantenimiento, no necesariamente existirá la factibilidad de que dichas actividades sean ejecutadas simultáneamente, debido a que sus frecuencias pueden no ser las mismas o no ser múltiplos entre sí. Para solucionar esto, se pueden agrupar actividades bajo algún criterio en específico, con el fin de aprovechar los recursos disponibles e intervenir el equipo la menor cantidad de veces y así, ejecutar la mayor cantidad de actividades posibles en un determinado instante de tiempo, provocando la disminución de la improductividad de la detención y un aumento en la disponibilidad de recursos.

Existen distintos criterios para agrupar actividades de mantenimiento, tales como:

- Forzar la agrupación de las actividades de mantenimiento, de manera que sus frecuencias sean múltiplos entre sí.
- Agrupar las actividades de mantenimiento de manera de minimizar el tiempo total de ejecución de la agrupación, es decir, minimizar el costo de ineficiencia (improductividad).
- Agrupar las actividades basándose en la experiencia de los técnicos que deben elaborar el plan.
- Seguir la recomendación de los manuales de los equipos.
- Agruparlas debido algún requisito legal o del entorno de la empresa.

Un elemento importante que compone el plan de mantenimiento son las *pautas de mantenimiento*, las cuales describen de manera más detallada las actividades de mantenimiento.

3.2.1.3. Pauta de Mantenimiento

Una pauta de mantenimiento es un documento descriptivo que contiene información más detallada de una determinada actividad de mantenimiento, como por ejemplo:

- Nombre de la actividad a realizar.
- Naturaleza de la actividad (e.g. preventiva) a ejecutar.
- Descripción de la actividad a ejecutar.
- Duración de la ejecución de la actividad.
- Frecuencia de ejecución de la actividad.
- Recursos utilizados en la ejecución de la actividad.

La Figura A.1 (ver Anexos) muestra un ejemplo de una pauta de mantenimiento de Metro de Santiago, en ella se especifica la descripción de la actividad de mantenimiento, su periodicidad, antecedentes relevantes y su descripción. Por lo tanto, una pauta de mantenimiento es una estructura más simple que forma parte del plan de mantenimiento.

Un equipo puede estar asociado a más de una pauta de mantenimiento siempre y cuando las actividades de mantenimiento sean de carácter diferente.

Distintos equipos pueden tener asociadas las mismas actividades de mantenimiento o pueden encontrarse dentro de una misma ubicación dentro de la empresa, por lo que para no definir una pauta para cada equipo y evitar la redundancia, se define la *hoja de ruta*.

3.2.1.4. Hoja de Ruta

Una hoja de ruta describe la secuencia de actividades que se realiza en cada equipo dentro de la empresa de acuerdo a los recursos disponibles. Cada pauta de mantenimiento tiene asociada una hoja de ruta. Por lo tanto, la hoja de ruta es el elemento más básico dentro del plan de mantenimiento, pues describe y formaliza en detalle las instrucciones que deben ejecutarse en el mantenimiento.

Las hojas de ruta permiten reducir el tiempo de creación de órdenes de trabajo para cada actividad de mantenimiento, pues permite asignar a distintos equipos la misma secuencia de operaciones de mantenimiento (Mora Gutiérrez, 2009).

3.2.1.5. Ingeniería del Mantenimiento

Dentro del área de la gestión del mantenimiento existe lo que se conoce como ingeniería del mantenimiento, siendo una rama enfocada a desarrollar conceptos, criterios y requerimientos técnicos en las fases de creación y adquisición de equipos, así como en equipos que se utilicen y mantengan un buen estado durante la fase de operación, con el fin de asegurar un soporte de mantenimiento efectivo (Dhillon, 2002). La ingeniería del mantenimiento plantea técnicas que pueden ser cuantificadas de tal forma de saber qué tipo de operaciones es necesario realizar sobre los equipos, cuándo realizarlas, etc. Como resultado de la aplicación de esta herramienta, se puede obtener:

- Un historial de registro de los equipos.
- Aumento de eficiencia en el uso de recursos en las ejecuciones de las distintas actividades de mantenimiento, a través de un seguimiento y control de las actividades.
- La reducción de costos globales y por ende, una mayor productividad dentro de la empresa, utilizando distintos indicadores y guiándose por la planificación y programación desarrollada.

Por lo tanto, la ingeniería del mantenimiento permite aplicar las técnicas de ingeniería sobre el mantenimiento, de manera de tener un sólido respaldo a la hora de realizar la gestión.

En la ingeniería del mantenimiento se han desarrollado distintas metodologías con el fin de lograr una mejor gestión y planificación del mantenimiento. Una de las metodologías más famosas y conocidas es RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad), pues tiene como principal objetivo mejorar la confiabilidad de la planta o instalación, es decir, mejorar la improductividad.

3.2.1.6. RCM (Reliability-centered Maintenance)

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), es un proceso desarrollado entre los años 1960 y 1970, la cual dio inicio en la industria aeronáutica y fue documentada por los ingenieros Howard Heap y Stanley Nowlan. Esta documentación fue formalizada en el libro *Reliability-centered Maintenance* (RCM) y explica la investigación y experimentación de la industria aeronáutica en EE. UU.

RCM es una de las herramientas más utilizadas para definir un listado de actividades de mantenimiento de forma de poder programar y planificar dichas actividades. RCM se basa en el análisis de fallos, pues busca que el sistema, compuesto por distintos equipos, continúen realizando lo requerido en el contexto operativo. El objetivo de RCM es mantener la confiabilidad propia del equipo y, al mismo tiempo, reconocer que en el mejor de los casos, el mantenimiento solo lograra mantenerla (Dhillon, 2002)

RCM es una metodología que busca principalmente reducir costos de mantenimiento, centrándose en el sistema y evitando realizar operaciones de mantenimiento innecesarias. RCM busca contestar principalmente a 7 preguntas claves durante el análisis de fallo (Moubray, 2004) :

- ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?
- ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
- ¿Cuál es la causa de cada falla función?
- ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
- ¿En qué sentido es importante cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

La herramienta RCM entrega como salida, un listado de actividades de mantenimiento, pudiendo ser preventivas (cíclicas o acíclicas), correctivas, mejorativas. Este listado específica:

- Tiempo de duración de la actividad de mantenimiento.

- Costos directos, asociados al reemplazo de algún componente.
- Costos indirectos, asociados a la detención de los equipos.
- Frecuencias de las actividades de mantenimiento de cada equipo. Cabe destacar que la periodicidad de ejecución de la actividad es equivalente al inverso de la frecuencia.
- Costos fijos, asociados al personal empleado para realizar el mantenimiento.
- La cantidad del personal involucrado en el mantenimiento.
- Descripción y listado de equipos.
- Descripción de repuestos y herramientas utilizados en las distintas actividades.
- Análisis de fallas: Tipos, causas, criticidad.
- Estrategia de mantenimiento recomendada para los distintos equipos.

La metodología RCM propone una forma eficaz para resolver el problema de detenciones no planeadas, provocando una disminución de costos y facilitando la planificación de las actividades. A pesar de ello, RCM solo entrega esta información y no resuelve el problema de cómo generar dicha planificación, quedando en manos del programador, tomar esta información y programar de manera óptima cuándo ejecutar el listado de actividades.

Tabla 3.1: Ejemplo de actividades con periodicidades que son múltiplos entre sí, con las posibles agrupaciones formadas y el valor del mínimo común múltiplo de dichas agrupaciones.

Actividad	Periodicidad [*días*]
A	3
B	6
C	12

Grupo	Instante de ejecución [*día*]
A - B	6
A - C	12
B - C	12
A - B - C	12

Tabla 3.2: Ejemplo de actividades con periodicidades que no son múltiplos entre sí, con las posibles agrupaciones formadas y el valor del mínimo común múltiplo de dichas agrupaciones.

Actividad	Periodicidad [*días*]
A	2
B	3
C	5

Grupo	Instante de ejecución [*día*]
A - B	6
A - C	10
B - C	15
A - B - C	30

Cuando las frecuencias entregadas por RCM son múltiplos entre sí, la planificación de actividades no parece ser una tarea compleja, puesto que las actividades de mantenimiento siempre serán agrupadas en el

mínimo común múltiplo de su periodicidad. ¿Pero qué sucede cuando las frecuencias no son múltiplos entre sí? En este caso, las actividades también serán agrupadas en el mínimo común múltiplo, pero la cantidad de actividades agrupadas puede llegar a ser considerablemente menor. En la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 se observa que, para determinadas actividades con cierta periodicidad, la cantidad de grupos que pueden ser formados cuando existe multiplicidad, es mayor que cuando no existe. En la Tabla 3.1, todas las actividades pueden ser agrupadas para ser ejecutadas cada 12 días mientras que en la Tabla 3.2, las actividades solo se agrupan de a pares en diferentes instantes, existiendo solo una agrupación que engloba a todas las actividades que se repite cada 30 días.

Para solucionar este problema, pueden proponerse planes de mantenimiento que consideren una tolerancia en su ejecución, es decir, que consideren un atraso o adelanto en su ejecución. De esta forma, se pueden agrupar una mayor cantidad de actividades sin que sus frecuencias sean necesariamente múltiplos entre sí. Pero surge la interrogante: ¿Qué actividades atrasar o adelantar?

De esta manera, planificar este listado de actividades, teniendo en cuenta una tolerancia, no es una tarea simple. Una de las herramientas matemáticas más utilizadas para resolver problemas de esta naturaleza es la optimización matemática (Caballero y Grossmann, 2007)

3.2.2. Optimización Matemática

3.2.2.1. Programación Lineal

La programación lineal nace durante de la Segunda Guerra Mundial. En 1947 George B. Dantzig desarrolló el método *Simplex* para la resolución de distintos problemas de operación militar. Desde entonces, la programación lineal se ha utilizado extensamente en distintas áreas tales como militar, planificación urbana, gubernamental, industrial, etc. El desarrollo de este algoritmo significó un revolucionario avance en la resolución de problemas, de hecho, fue tal el impacto que provocó, que hace que se encuentre dentro de los 10 algoritmos más importantes del siglo XX (Cipra, 2000).

Un problema de programación lineal consiste en la minimización o maximización de una función lineal bajo la condición de restricciones lineales de tipo desigualdad, igualdad o ambas. Las variables de la función objetivo son denominadas variables de decisión, pues permiten tomar decisiones en base a los valores que se obtienen. Puesto que los recursos son limitados, siempre se buscará asignarlos de la mejor manera, es por ello por lo que la programación matemática es una potente herramienta al momento de tomar decisiones.

"La programación lineal es una técnica de optimización matemática. Por técnica de optimización, se concibe la idea de un método que intenta maximizar o minimizar un objetivo establecido, como por ejemplo la maximización de utilidades o la reducción de los costos" (Arya et al., 2009).

La formulación general de un problema de programación lineal es de la forma:

$$max\ Z\,(x_1, x_2, x_3, .., x_n) = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \ldots + a_nx_n$$

$$s.a$$

$$b_{11}x_1 + b_{12}x_2 + \ldots + b_{1n}x_n \leq c_1$$

$$b_{21}x_1 + b_{22}x_2 + \ldots + b_{2n}x_n \leq c_2$$

$$\vdots$$

$$b_{m1}x_1 + b_{m2}x_2 + \ldots + b_{mn}x_n \leq c_m$$

Siendo x_i las variables de decisión, c_j los términos independientes de las restricciones, a_{ij} los coeficientes de la función objetivo y b_{ij} los coeficientes de las restricciones.

Debido a las propiedades de los problemas de programación lineal, se tiene por definición, que todo problema es convexo y cóncavo, por lo tanto, no hay mínimos locales que no sean globales, ni máximos locales que no sean globales. Es por eso que cualquier problema de maximización puede convertirse en un problema de minimización, o viceversa.

3.2.2.2. Programación Entera Binaria

En muchos problemas, ciertas variables de decisión solo pueden tomar dos valores. Esta situación puede modelarse utilizando variables que tomen el valor 0 ó 1. Cada valor representa una de las posibilidades a elegir. Este tipo de problemas conforman parte de la *programación entera binaria*.

Este tipo de problemas suele tener una mayor complejidad, puesto que ya no es trivial encontrar soluciones con números binarios. Existen distintos algoritmos para resolución de este tipo de problemas, uno de los mas famosos y conocidos es el método *Branch and Bound*, el cual se basa en el principio de particionar el conjunto total de soluciones factibles en subconjuntos de soluciones más pequeños (Taylor, 2013).Estos pequeños subconjuntos pueden ser evaluado de forma sistemática hasta hallarse la mejor solución.

Tanto la programación lineal como la programación binaria pueden ocuparse simultáneamente para modelar y resolver problemas. Cuando esto ocurre recibe el nombre de *programación lineal entera mixta*

3.2.2.3. Programación Lineal Entera Mixta

La programación lineal entera mixta es una combinación de la programación lineal y la programación entera binaria. Esta combinación permite generar un tipo de programación más poderosa que de forma separada, puesto que generan una mezcla entre variables de decisión enteras, binarias y continuas. Gracias a esto se pueden modelar problemas que incluyen por ejemplo, restricciones de condiciones, restricciones de implicancias, etc; permitiendo abarcar de una nueva manera los problemas ya tratados con la programación lineal y/o binaria y además, modelar un nuevo conjunto de problemas.

A pesar de ello, los tiempos de resolución de problemas resueltos a través de la programación lineal entera mixta son, en muchas casos, considerablemente mayores a los tiempos de resolución de problemas resueltos a través de la programación lineal o la programación entera binaria.

3.2.2.4. Limitaciones

A pesar de los beneficios de utilizar la programación lineal entera mixta, el tiempo de resolución que requieren de estos problemas requiere mucho más tiempo debido a su complejidad. Por ello, se han desarrollado un sinfín de herramientas computacionales que usan distintos algoritmos para intentar resolverlos. Por esto, la solución de algún problema de programación lineal dependerá de qué tan bien este modelado el problema, esto es, cantidad de variables de decisión, número de restricciones, relación entre variables de decisión, etc.

De esta manera, un problema puede tener solución pero no necesariamente en un tiempo de resolución aceptable, por lo que una correcta formulación del problema es una variable importante a considerar.

4 | Metodología

En esta sección se presenta el modelo de optimización desarrollado. En general la tabla de salida con la información relevante para este problema proviene del RCM y tiene las siguientes características:

Tabla 4.1: Ejemplo de información de salida de RCM. Fuente: Afefy (2010)

Equipo	Descripción de falla	Causa de falla	Grupo	Tipo de actividad	Descripción	Frecuencia
Caldera	Excesiva temperatura de salida del vapor	Exceso de aire	D	Correctiva	-	-
		Quemador mal posicionado	B	Predictiva	Medir el diámetro de los orificios de apertura del combustible quemador interior	Mensual
				Preventiva	Sustitución de la manguera del combustible	Semestral
				Preventiva	Comprobar la posición del deflector	Semanal
		Fuga de combustible	A	Preventiva	Medir el diámetro de los orificios de apertura del combustible quemador interior	Mensual
		Suciedad sobre la superficie	B	Preventiva	Limpiar la superficie	Semestral

En la Tabla 4.1 observa un ejemplo de la información de RCM sobre un equipo, con la respectiva información de las actividades de mantenimiento a realizar, tipo de actividad, frecuencia, modo de falla, etc. Esta información es utilizada como entrada para el modelo propuesto.

El modelo se define a tiempo continuo, de manera de simplificar la resolución del problema, puesto que discretizando el tiempo se deben definir una mayor cantidad de variables que complejizan el problema. El objetivo del modelo es la maximización de agrupamientos de las diferentes actividades de mantenimiento realizadas sobre un equipo, con el objetivo de disminuir posibles costos de ineficiencia.

El modelo cuenta con tres supuestos importantes:

- La duración de las actividades no es considerada, es decir, el equipo se repara de manera instantánea. Esta suposición se aplica de manera de simplificar la complejidad del modelo, para luego incorporar en un análisis ex post la duración de las actividades.
- Se cuenta con los recursos necesarios para realizar las actividades, de esta manera, no existe un factor limitante para realizar alguna determinada agrupación de actividades. Esta limitante será analizada de posterior a la obtención de los resultados.
- Maximizar la cantidad de agrupamientos de las actividades de mantenimiento equivale a la minimización de la ineficiencia de la intervención del equipo, es decir, a su improductividad por concepto de detención.

4.1. Requerimientos del Modelo

El modelo debe ser capaz de realizar, por lo menos, una planificación semestral en un tiempo razonable de tiempo, definido arbitrariamente cómo menos de un día. Esto es supuesto ya que una vez obtenidos los resultados del modelo, se deben gestionar de qué manera se va a implementar el plan, los recursos que se van a utilizar, etc., lo que conlleva a considerar tiempo adicional.

4.2. Formulación y Desarrollo del Modelo

A continuación se detalla la formulación del modelo:

4.2.0.1. Parámetros

- T : Horizonte de planificación medido en días.
- f_i : Periodicidad o frecuencia de ejecución de la actividad $i \in I$.
- M : Valor grande.
- e_i : Tolerancia de ejecución de la actividad $i \in I$.

4.2.0.2. Conjuntos

- I: Conjunto de actividades de mantenimiento preventivo cíclico. El conjunto I representa todas las actividades de mantenimiento, pudiendo ser ordenadas en cualquier orden.

$$I = \{1, 2, 3, \ldots, |I|\}$$

- J_i: Conjunto de ejecuciones de las distintas actividades. El conjunto J_i es definido de esta forma para asegurar que todas las actividades se ejecuten las veces necesarias dentro del horizonte de tiempo. Puede suceder que la división entre los parámetros T y f_i no sea un numero entero, por lo que se utiliza la función parte entera para aproximar.

$$J_i = \left\{1, 2, 3, \ldots, \left[\frac{T}{f_i}\right]\right\} \; ; \forall i \in I.$$

- N_i: Conjunto de intervalos de tiempo para los posibles instantes de ejecución de las distintas actividades. El conjunto N_i representa todos los intervalos de tiempo para la posible agrupación de actividades. Este conjunto es utilizado para crear el conjunto N.

$$N_i = \{[(f_i - e_i), (f_i + e_i)], [2(f_i - e_i), 2(f_i + e_i)], \ldots, [\,|J_i|\,(f_i - e_i),\ |J_i|\,(f_i + e_i)]\} \; ; \forall i \in I.$$

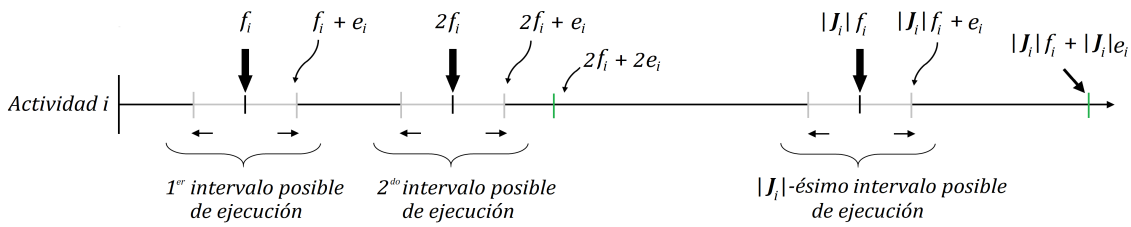

Figura 4.1: Intervalos posibles de ejecución de cada actividad, pertenecientes al conjunto N_i.

En la Figura 4.1, se detalla cada intervalo de ejecución, el cual tiene tiene como cota inferior y superior, el máximo adelanto y atraso posible, respectivamente.

- N: Conjunto de agrupaciones posibles de las distintas actividades:

$$N = \{(j, i, o, n); \forall j \in J_i,\ \forall o \in J_n,\ \forall i, n \in I,\ n > i : N_i \cap N_n\}$$

El conjunto N esta conformado por el par de actividades i, n en su *j-ésima* y *o-ésima* ejecución, respectivamente, en los cuales existe la posibilidad de agrupación. De esta forma, este conjunto evita comparar ejecuciones no factibles de ambas actividades.

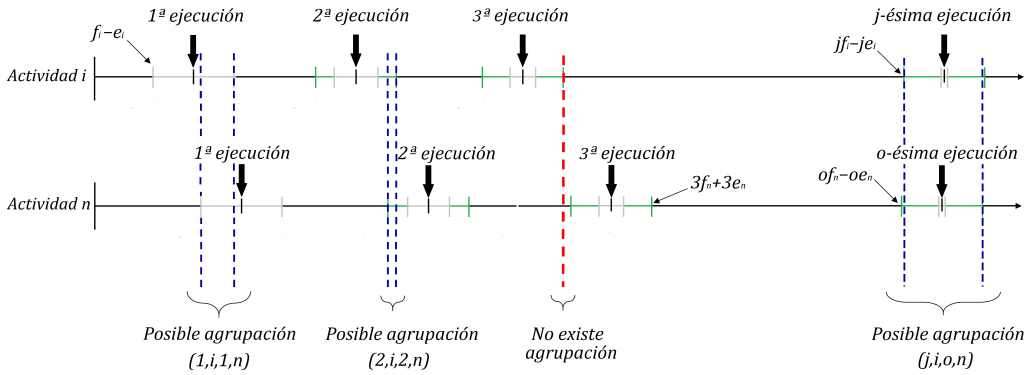

Figura 4.2: Conjunto agrupaciones posibles de la actividad i con la actividad n

En la Figura 4.2, puede observarse el par de puntos en las que existe la factibilidad de que sean agrupadas , es decir, que primera ejecución de la actividad i pueda ser agrupada con la primera ejecución de la actividad n). Además puede detallarse como en la tercera ejecución de la actividad i, no podrá ser agrupada con la actividad n.

4.2.0.3. Variables de Decisión

$t_{j,i}$: Instante de la $j - ésima$ ejecución de la actividad i ; $\forall j \in J_i \cup \{0\}$, $\forall i \in I$.

$$z_{j,i,o,n} = \begin{cases} 1\ ; & \text{Si existe una agrupación de la } j - ésima \text{ ejecución de la actividad } i \\ & \text{con la } o - ésima \text{ ejecución de la actividad } n\ ; \forall (j,i,o,n) \in N. \\ & 0\ ; \quad \text{Si no.} \end{cases}$$

4.2.0.4. Función Objetivo

$$Máx \sum_{(j,i,o,n) \in N} z_{j,i,o,n} \tag{4.1}$$

La función objetivo (4.1) tiene como objetivo la maximización de agrupaciones actividades, con el fin de disminuir posibles costos de ineficiencia.

4.2.0.5. Restricciones

$$t_{0,i} = 0 \qquad \forall i \in I \tag{4.2}$$

La restricción (4.2), es una restricción inicial o de borde, la cual indica que ninguna actividad ha sido ejecutada y por tanto, todas las actividades serán ejecutadas en el instante igual a 0.

$$t_{j,i} \leq t_{j-1,i} + f_i + M(\sum_{\substack{(a,b,o,n)\in N \\ (a,b)=(j,i)}} z_{j,i,o,n} + \sum_{\substack{(o,n,a,b)\in N \\ (a,b)=(j,i)}} z_{o,n,j,i}) \qquad \forall i \in I, \forall j \in J_i \tag{4.3}$$

$$t_{j,i} \geq t_{j-1,i} + f_i - M(\sum_{\substack{(a,b,o,n)\in N \\ (a,b)=(j,i)}} z_{j,i,o,n} + \sum_{\substack{(o,n,a,b)\in N \\ (a,b)=(j,i)}} z_{o,n,j,i}) \qquad \forall i \in I, \forall j \in J_i \tag{4.4}$$

$$t_{j,i} \leq t_{j-1,i} + f_i + e_i \qquad , \forall i \in I, \forall j \in J_i \tag{4.5}$$

$$t_{j,i} \geq t_{j-1,i} + f_i - e_i \qquad \forall i \in I, \forall j \in J_i \tag{4.6}$$

Las restricciones (4.3), (4.4), (4.5) y (4.6) detallan la movilidad de la ejecución de la actividad, es decir, en caso de no existir agrupación, la ejecución de la actividad dependerá solo de su frecuencia. En caso contrario, la actividad podrá moverse dentro de su tolerancia.

$$t_{j,i} \leq t_{o,n} + M(1 - z_{j,i,o,n}) \qquad \forall (j,i,o,n) \in N \tag{4.7}$$

$$t_{j,i} \geq t_{o,n} - M(1 - z_{j,i,o,n}) \qquad \forall (j,i,o,n) \in N \tag{4.8}$$

Las restricciones (4.7) y (4.8), son restricciones comparativas. Si ambos instantes de ejecuciones son iguales, entonces ocurre un agrupamiento entre ambas actividades.

$$t_{j,i} \in \mathbb{R}^+ \qquad \forall i \in I, \forall j \in J_i \tag{4.9}$$

$$z_{j,i,o,n} \in \{0,1\} \qquad \forall (j,i,o,n) \in N \tag{4.10}$$

Las ecuaciones (4.9) y (4.10) declaran la naturaleza de las variables decisión.

4.2.0.6. Consideraciones

Existen una serie de consideraciones que se deben de tener en cuenta:

- El conjunto N es el conjunto de puntos creado para mejorar el tiempo de resolución del modelo, mostrando cuando existe la posibilidad de agrupar. De esta manera aumenta la eficiencia de comparación de las ecuaciones (4.7) y (4.8), ya que solo considera los puntos factibles agrupar.
- Las tolerancias son un parámetro fijo, pero el modelo admite tolerancias dinámicas, es decir, las tolerancias cambian de valor cada vez que se ejecuta alguna actividad.
- La comparación entre dos actividades siempre se realiza una vez, de manera que la resolución del problema sea más eficiente. Así, supongamos que se tienen que realizar 4 actividades: A, B, C y D. La actividad A se compararía con la actividad B, C y D, pero la actividad B no se volvería a comparar con la actividad A, sino que se compararía con la actividad C y D. De la misma manera, la actividad C solo se compara con la actividad D.

4.3. Experimentos Computacionales

Para poder analizar el modelo construido, se construyen tres casos con la finalidad de estudiar si existe o no, un beneficio al incorporar una tolerancia en la ejecución de las actividades luego de la aplicación de RCM. Los casos definidos se basan en el mejor escenario posible (Caso I), el peor de los escenarios (Caso II) y un escenario intermedio (Caso III) , para luego analizar distintos niveles de tolerancias basado en el caso base en el cuál, no existe tolerancia en las actividades.

A continuación, se detallan los casos construidos:

- Caso I: Las periodicidades de ejecución de las actividades son múltiplos entre sí, siendo una situación poco realista, puesto que la ocurrencia de esta situación es poco probable. En caso de ocurrir, presentaría el mejor de los escenarios ya que, al ser las frecuencias de ejecución múltiplos entre sí, se pueden pre-agrupar sin necesidad de tener que aplicar algún criterio adicional.
- Caso II: Las periodicidades de ejecución de las actividades no son múltiplos entre sí. En este caso, se detalla la peor situación posible, ya que no existe ninguna agrupación definida en la salida de RCM u otro mecanismo que facilite el proceso de conformación de un plan de mantenimiento.
- Caso III: La combinación de los casos anteriores, el cuál muestra un escenario más realista, debido a la alta probabilidad de qué, luego de aplicar RCM u otro, se posean actividades cuyas frecuencias de ejecución sean o no, múltiplos entre sí.

Estos casos simulan la lista de actividades cíclicas de mantenimiento preventivo que entrega RCM, de manera de que el modelo utilice estos datos como entrada, para generar una planificación óptima de las actividades.

4.4. Análisis del Beneficio

Para el análisis del beneficio generado por la incorporación de las tolerancias en cada plan de mantenimiento, se mide el número de veces que el equipo es intervenido durante la duración del plan, por lo tanto, mientras exista una menor cantidad de intervenciones en el equipo supondremos que su improductividad será reducida.

Además, para comparar el efecto que tiene las tolerancia de las actividades en el modelo, se utilizará como caso base una tolerancia del 0 %, agregando luego niveles de tolerancia del 5 % al 10 %. Se considera como máxima tolerancia un 10 % debido a la *"regla de oro en el mantenimiento"*(Smith y K. Mobley, 2008).

4.4.1. Análisis de Tiempos de Resolución del Modelo

El modelo es programado a través del lenguaje de programación *Python*, a través de la librería de de *Pyomo*. El modelo es ejecutado en un computador con un procesador Intel(R) Core(TM) i7-7500 @2.7 Ghz, 16 GB de RAM. Cabe destacar que los tiempos computacionales dependen de 3 factores ordenados de mayor a menor en cuanto a impacto:

1. El periodo de ejecución de la menor actividad.
2. La cantidad de actividades.
3. El horizonte de planificación.

5 | Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados para cada uno de los experimentos computacionales propuestos, de manera de sensibilizar respecto a distintos niveles de tolerancia para la ejecución de las actividades. Para cada caso se considerará un horizonte de planificación semestral (26 semanas).

5.1. Caso I

A continuación se presentan los datos del Caso I, compuesto por un conjunto de actividades con periodicidades de ejecución que son múltiplos entre sí.

Tabla 5.1: Actividades del Caso I con sus respectivas periodicidades. Fuente: Elaboración Propia

Actividad	Periodo [*semanas*]
1	1
2	2
3	4
4	8
5	12

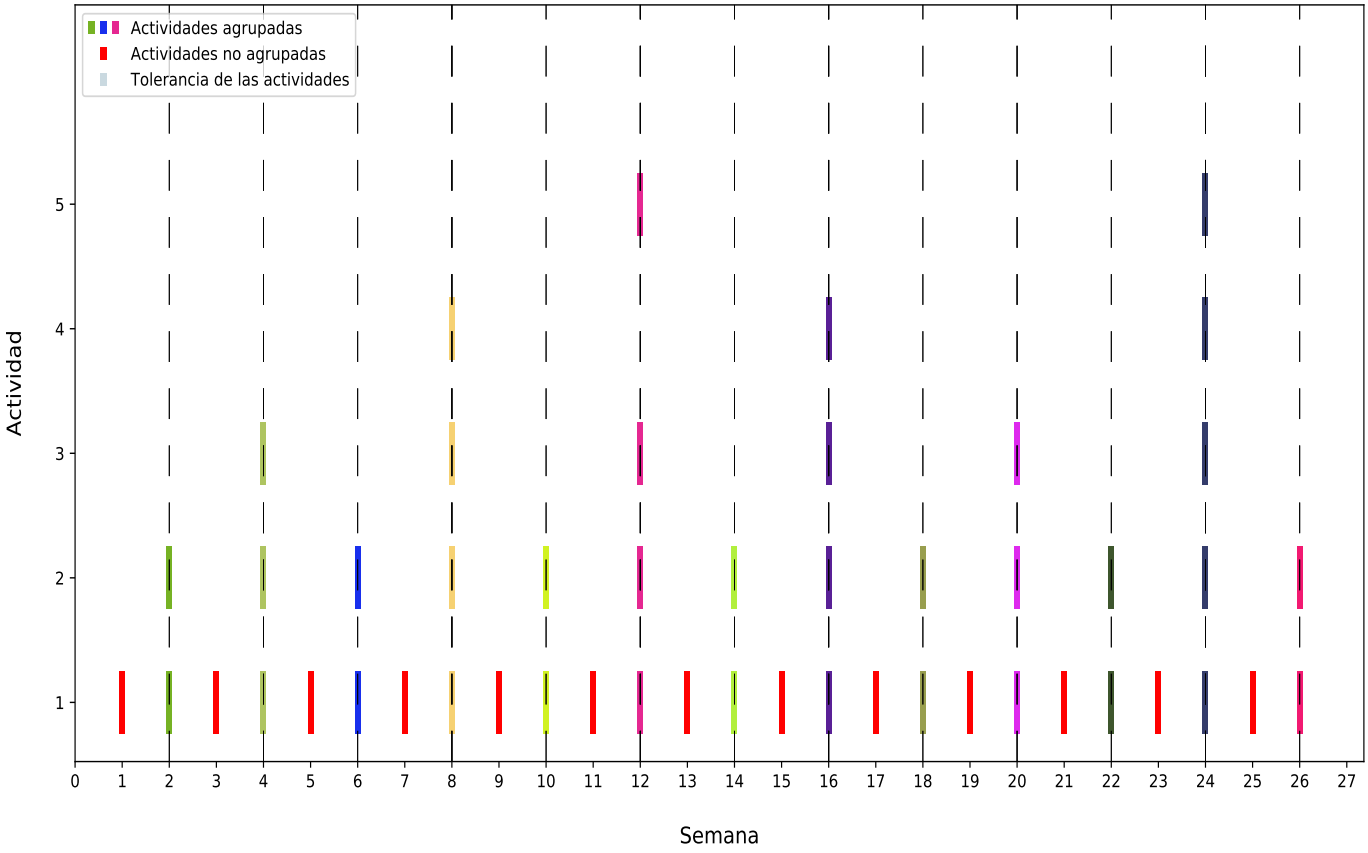

Figura 5.1: Plan óptimo de actividades del Caso I sin tolerancias.

En la Figura 5.1 se presenta el plan de mantenimiento óptimo del Caso I sin tolerancias, detallándose las actividades que están o no, agrupadas. Las actividades agrupadas son representadas a través de rectángulos del mismo color y por líneas punteadas, de forma contraría, las actividades que no lo están, son representadas por rectángulos rojos.

Se observa cómo las actividades son agrupadas por el modelo en el mínimo común múltiplo de sus periodicidades, ejecutándose todas las actividades simultáneas en la semana 24. En este caso, las actividades pueden ser agrupadas de manera trivial en la salida de RCM (u otra herramienta), gracias a esta multiplicidad. En la realidad es poco probable que esto ocurra, ya que muchas de las actividades pueden ser de distinta naturaleza, por lo que no necesariamente las periodicidades de ejecución serán múltiplos entre sí.

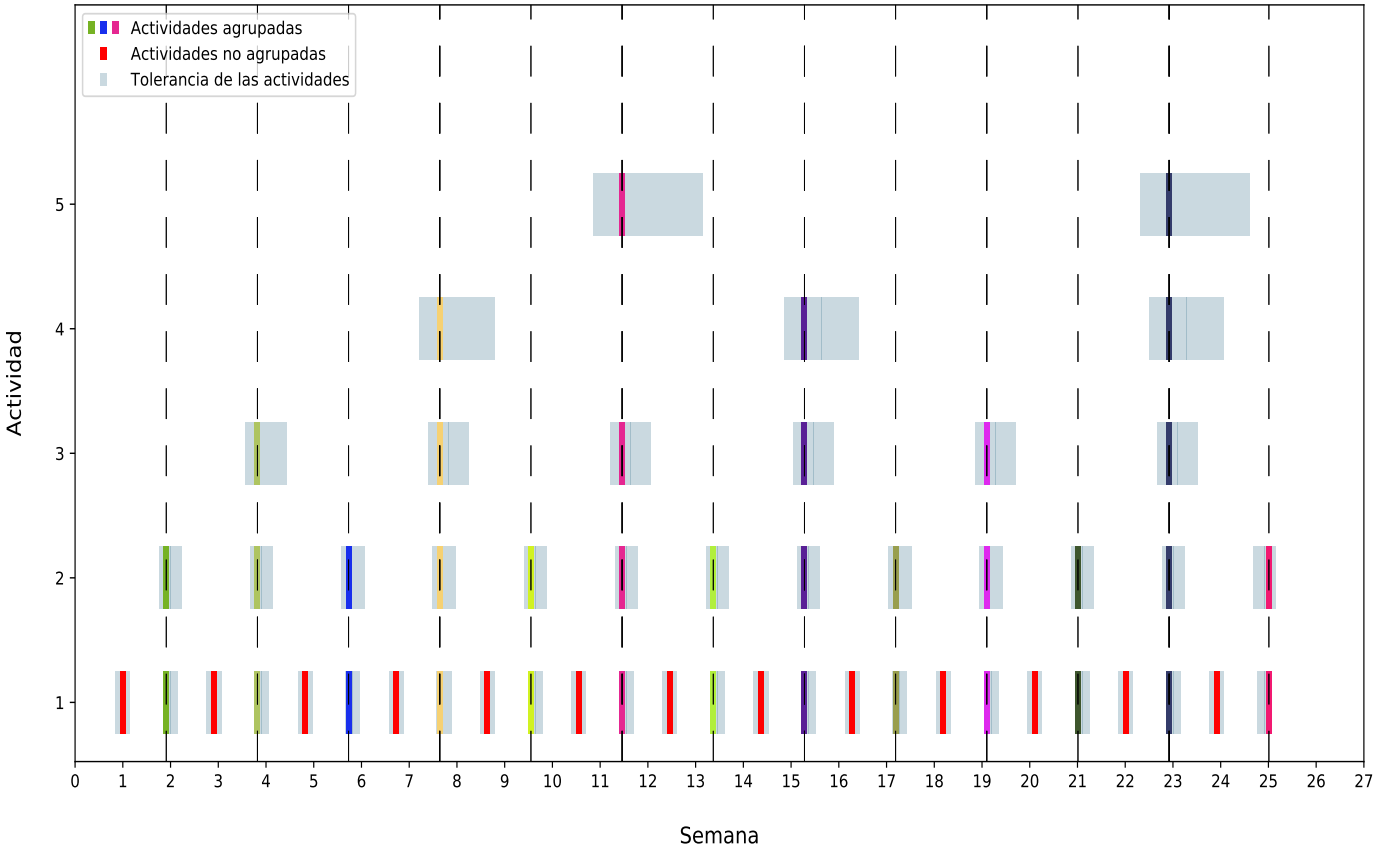

Figura 5.2: Plan óptimo de actividades del Caso I con una tolerancia de ejecución del 10 % de sus periodicidades.

En la Figura 5.2 se muestra que al existir una tolerancia equivalente al 10 % de su periodicidad, el modelo agrupa las actividades de la misma manera que en el caso sin considerar tolerancia, es decir, el modelo confirma que cuando las periodicidades de las actividades son múltiplos entre sí, las agrupaciones están óptimizadas.

5.1.1. Discusión

Tabla 5.2: Disminución de ineficiencia del Caso I, para cada nivel de tolerancia dado.

Tolerancia [%]	Disminución de Ineficiencia [%]
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0

En la Tabla 5.2, se observa el porcentaje de disminución de la ineficiencia, respecto al caso en el que no se considera tolerancia, calculado a través del número de intervenciones.

En el Caso I, se presenta el mejor de los casos para la información de salida de RCM (u otra herramienta), en el cuál las actividades se pueden agrupar directamente. Esto ocurre debido a que las periodicidades de las actividades son múltiplos entre sí, verificándose que al incorporar una tolerancia en el modelo, los resultados del caso base (0 % tolerancia) no varían.

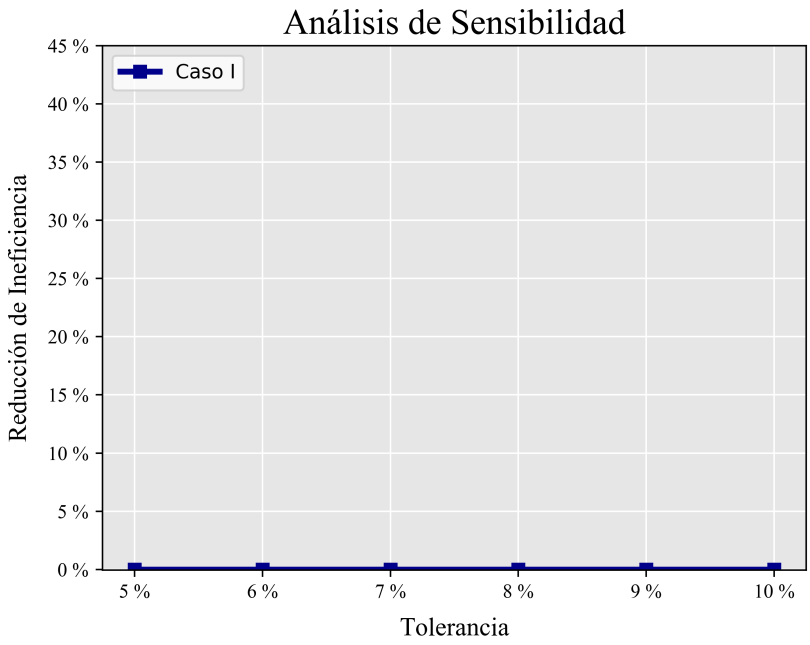

Figura 5.3: Disminución de la Ineficiencia del Caso I, generada por la inclusión de las tolerancias.

En la Figura 5.3 se detallan de forma gráfica los resultados de la Tabla 5.2. De esta forma, puede

observarse que no existe un mejora de infeciencia en el Caso I por la incorporación de las tolerancias. Esto ocurre debido a que el Caso I, representa el mejor de los casos posibles, en el que las actividades se encuentran agrupadas sin tener que aplicar algún criterio, por ende, el caso base no puede mejorarse más a través del modelo.

Tabla 5.3: Número de intervenciones y duración total del plan de mantenimiento del caso I, bajo distintos niveles de tolerancia.

Tolerancia [%]	Número de intervenciones	Duración del plan [*semanas*]
0	26	26
5	26	26,55
6	26	26,54
7	26	25,93
8	26	26,88
9	26	25,01
10	26	27,1

Sin embargo, los instantes de ejecuciones de las actividades cambian al considerar las tolerancias, como puede deducirse de la Tabla 5.3. Esto ocurre debido a que en el modelo no se incorpora un criterio de adelanto o atraso en las actividades, agrupándose únicamente en los instantes de tiempo permitidos, causando que el modelo sea indiferente al tener que atrasar o adelantar la ejecución del conjunto de actividades.

Lo anterior produce una extensión respecto a la duración del plan, puesto que muchas actividades son adelantadas cuando no es estrictamente necesario hacerlo, por lo que una posible solución sería atrasar la ejecución de cada actividad lo máximo permitido para así, extender cada ejecución de las actividades, no obstante, este atraso conlleva posibles riesgos de fallos.

5.2. Caso II

En este caso se presenta el peor escenario, ya que todas las periodicidades de las actividades son diferentes, pudiendo ser agrupadas solo en el mínimo común múltiplo de sus periodicidades.

Tabla 5.4: Actividades del Caso II con sus respectivas periodicidades. Fuente: Elaboración Propia

Actividad	Periodicidad [*semanas*]
1	3
2	5
3	7
4	11
5	13

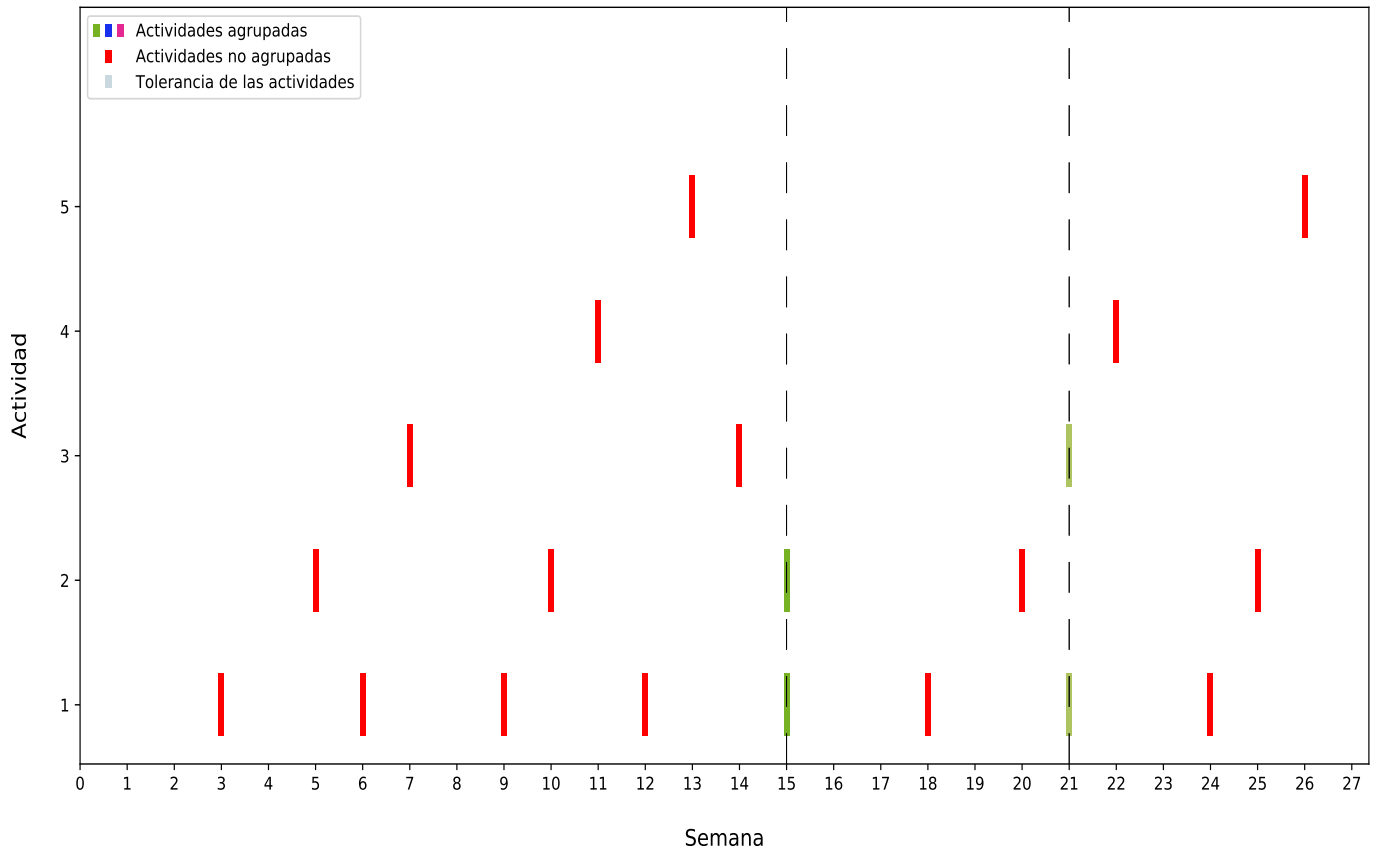

Figura 5.4: Plan óptimo de actividades del Caso II sin tolerancias.

En la Figura 5.4 se observa que el número de agrupaciones formadas en la ejecución de las actividades disminuye notablemente en el caso de no existir multiplicidad entre las periodicidades. El instante de ejecución de cada agrupación será la semana del mínimo común múltiplo entre las periodicidades, es decir, la agrupación 1-2 se ejecutara en la semana del $m.c.m.\{3, 5\} = 15$, la agrupación 1-3 en la semana $m.c.m.\{3, 7\} = 21$, la agrupación 1-4 en la semana $m.c.m.\{3, 11\} = 33$, y así sucesivamente.

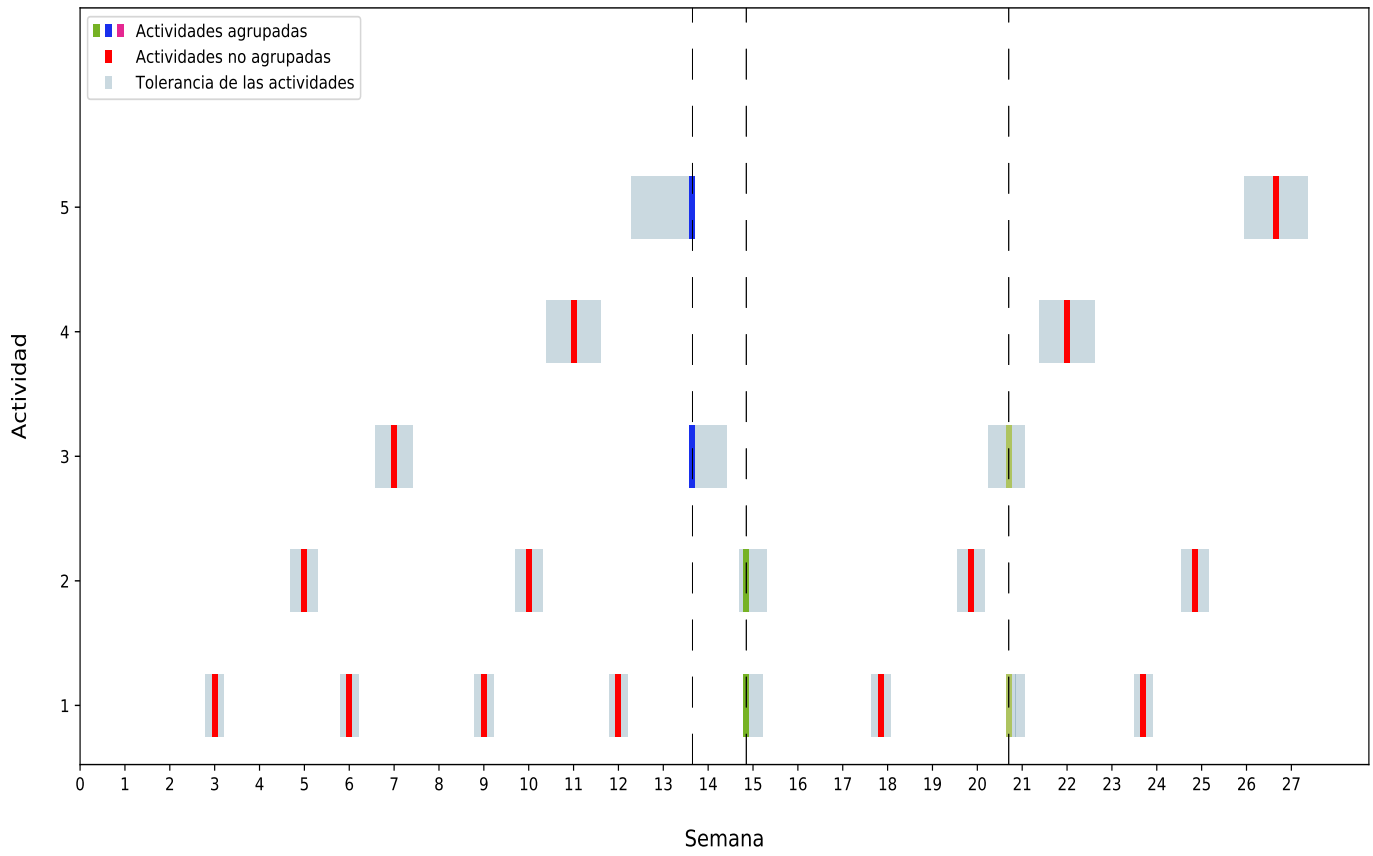

Figura 5.5: Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 5 % de sus periodicidades.

En la figura 5.5 se detalla que al existir la posibilidad de poder atrasar o adelantar la ejecución de las actividades, el numero de agrupamientos aumenta respecto al caso sin considerar tolerancias. Por lo tanto, al considerar las tolerancias en la ejecución de las actividades para generar el plan óptimo, permitió generar una disminución en la ineficiencia.

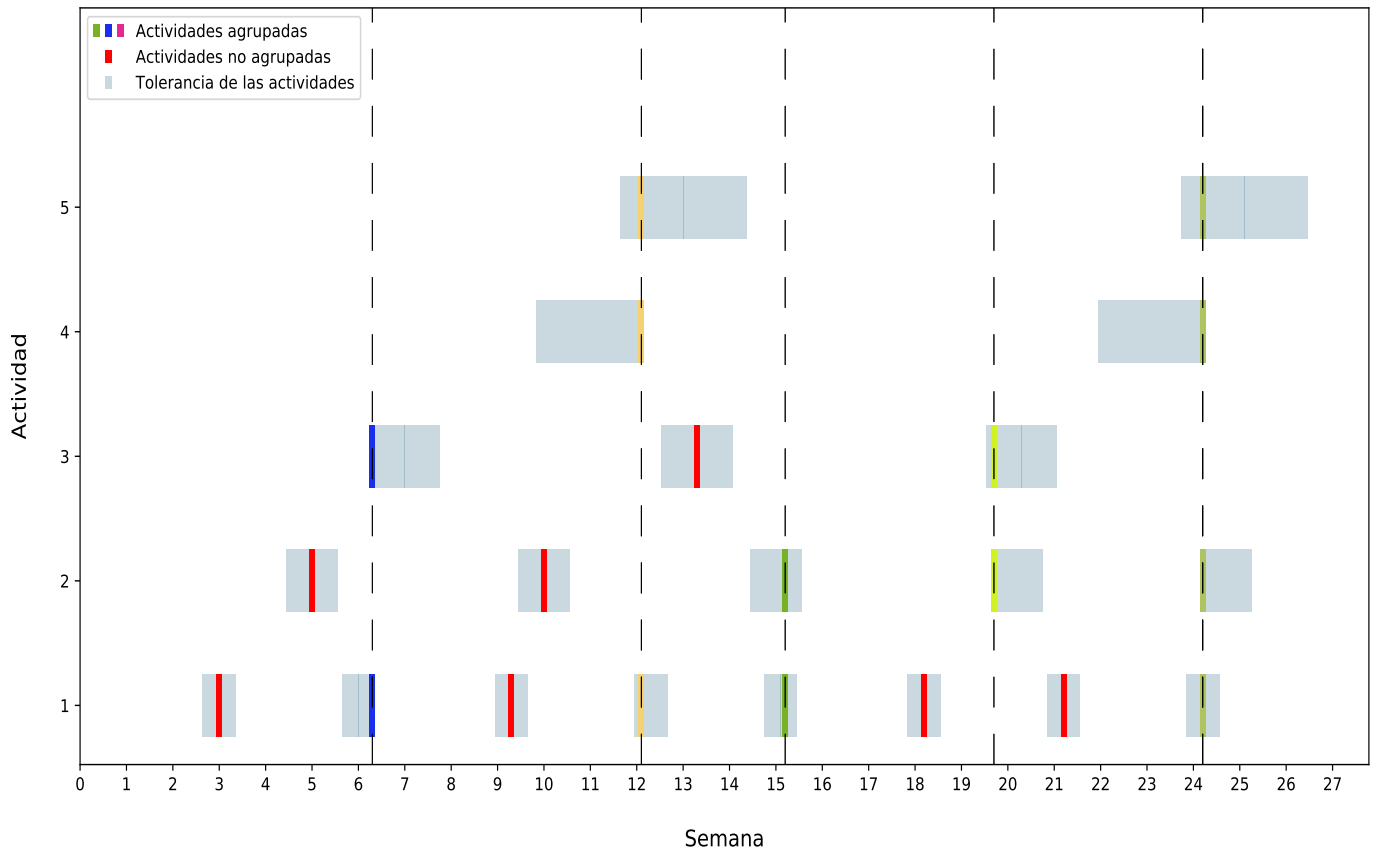

Figura 5.6: Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 10 % de sus periodicidades.

En la Figura 5.6 se observan 3 agrupamientos adicionales en las ejecuciones de las actividades al aumentar el nivel de tolerancia en un 1 %. Este aumento permite generar tres agrupaciones adicionales al caso base.

5.2.1. Discusión

Tabla 5.5: Disminución de ineficiencia del Caso II, para cada nivel de tolerancia dado.

Tolerancia [%]	Disminución de Ineficiencia [%]
5	5,56
6	11,11
7	22,22
8	22,22
9	22,22
10	33,33

En la Tabla 5.5 se observa como la inclusión de la tolerancia en los distintos casos provoca una disminución de ineficiencia obtenida en el caso base, llegando a obtener una mejora de hasta un 50 % (Fig. 5.4).

Las periodicidades presentadas en el Caso II, representan el peor escenario posible de periodicidades como entrada para el modelo, puesto que no existen actividades que puedan ser agrupadas directamente, por lo que, de ocurrir este caso, se pueden tomar dos alternativas:

- Utilizar algún criterio para ejecutar las actividades, de forma de adelantar o atrasarlas.
- Ejecutar las actividades de manera rígida, de manera de agruparlas en los instantes en los cuales se encuentra el mínimo común múltiplo entre sus periodicidades.

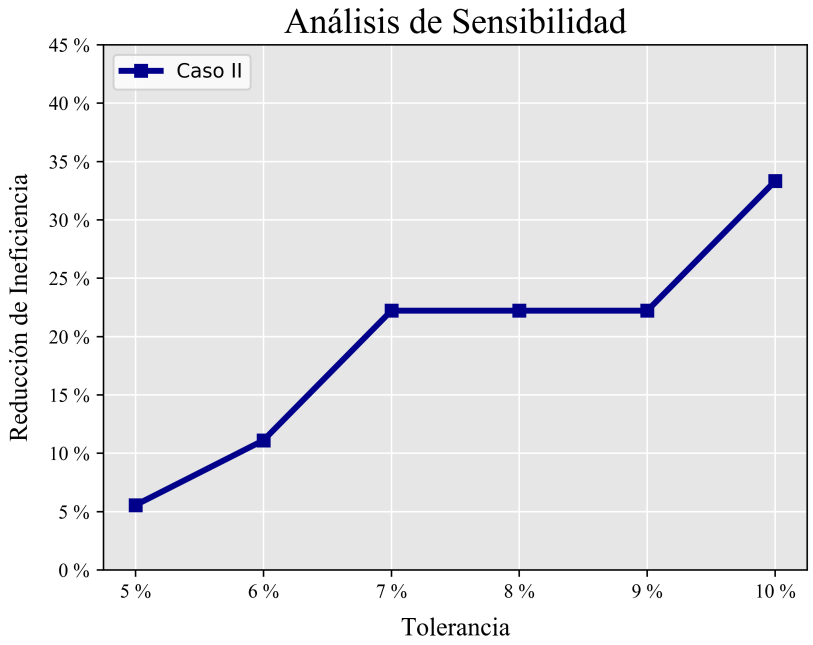

Figura 5.7: Disminución de Ineficiencia del Caso II, generada por la inclusión de las tolerancias

En la Figura 5.7 se observa como la incorporación de una tolerancia en la ejecución de las actividades, es altamente beneficiosa, llegando a tener una disminución de ineficiencia de hasta un 33 %, no obstante, la disminución de ineficiencia generada no es estrictamente creciente, es decir, entre las tolerancias 7 % y 9 %, la disminución de ineficiencia no aumenta. Esto se significa que el aumento de las tolerancias entre ese rango, no es capaz de agrupar una mayor cantidad de actividades.

A pesar de lo anterior, realizar cualquier tipo de agrupación mejorará la situación en la que no existe tolerancias en sus ejecuciones, por ende, la incorporación de la tolerancia en la ejecución de las actividades, genera en este caso, la mejor disminución de ineficiencia.

Tolerancia [%]	Número de intervenciones	Duración del plan [*semanas*]
0	18	24
5	17	23,07
6	16	24,34
7	14	24,49
8	14	23,76
9	14	23,66
10	12	24,2

Tabla 5.6: Número de intervenciones y duración total del plan de mantenimiento del Caso II, bajo distintos niveles de tolerancia.

En la Tabla 5.9 se detalla el número de intervenciones y la duración del plan para cada nivel de tolerancia. Se destaca el aumento de intervenciones en el equipo a medida que aumenta el nivel de tolerancia. A pesar de ello y al igual que en el Caso I, la duración del plan es variable y no sigue algún patrón de adelanto o atraso, lo cuál conlleva a que en algunas oportunidades se adelante o atrase la ejecución de alguna actividad sin ningún criterio especificado.

5.3. Caso III

En este caso se presentan combinaciones de periodicidades de ejecuciones de las actividades que pueden o no, ser múltiplos entre sí. Cabe señalar que este caso se detallan valores más realistas debido a su diversidad.

Tabla 5.7: Actividades del Caso III con sus respectivas periodicidades. Fuente: Elaboración Propia

Actividad	Periodicidad [*semanas*]
1	2
2	4
3	9
4	11
5	13

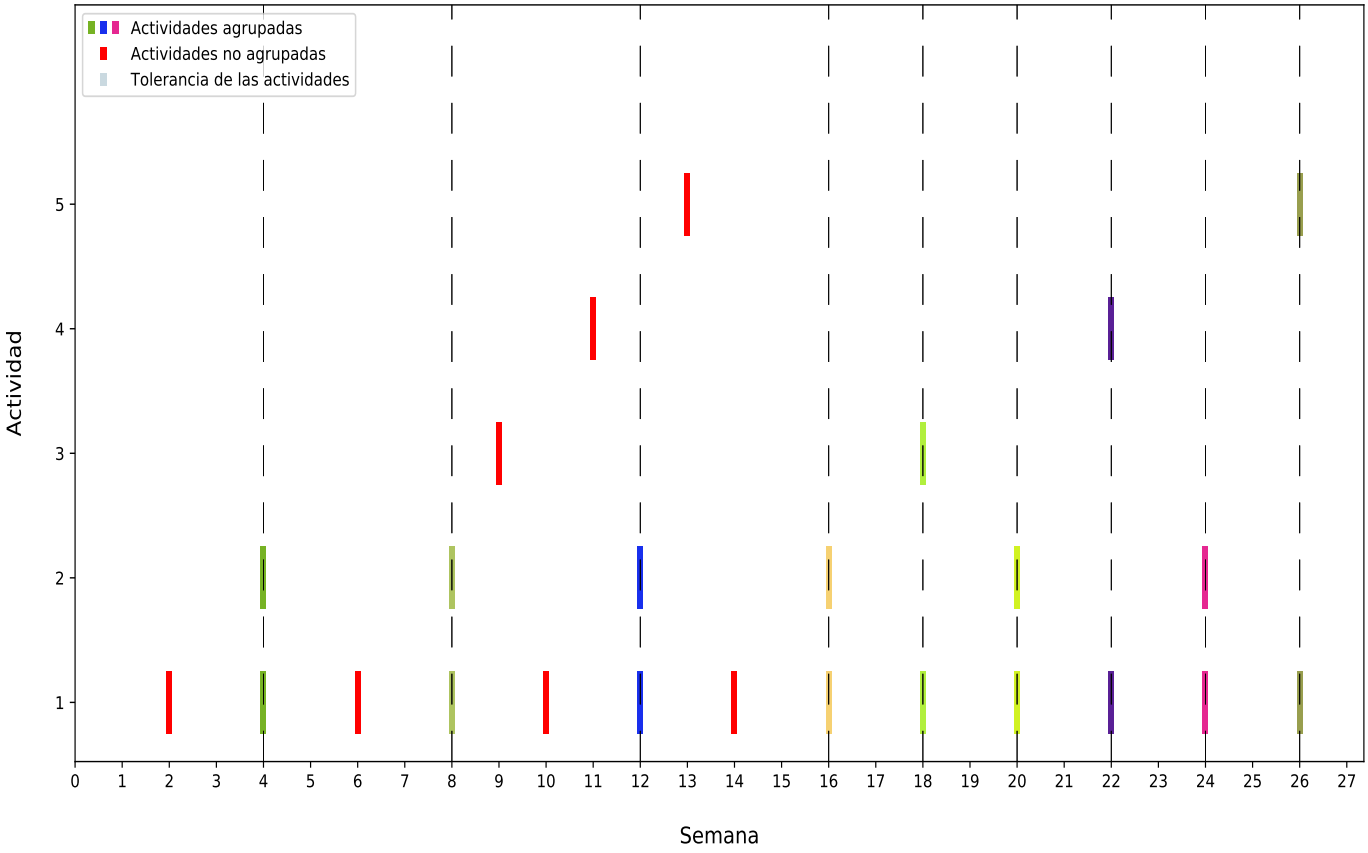

Figura 5.8: Plan óptimo de actividades del Caso III sin tolerancias.

En este caso, la Figura 5.8 muestra la existencia de una mayor cantidad de agrupamientos que el caso II. Este caso se asemeja más a la realidad, puesto que es más probable en la lista de salida de RCM (u otra herramienta), contenga una combinación de periodicidades de ejecución, pudiendo existir actividades con multiplicidad en su periodicidad. De esta forma, las actividades son agrupadas en el mínimo común múltiplo entre ellas.

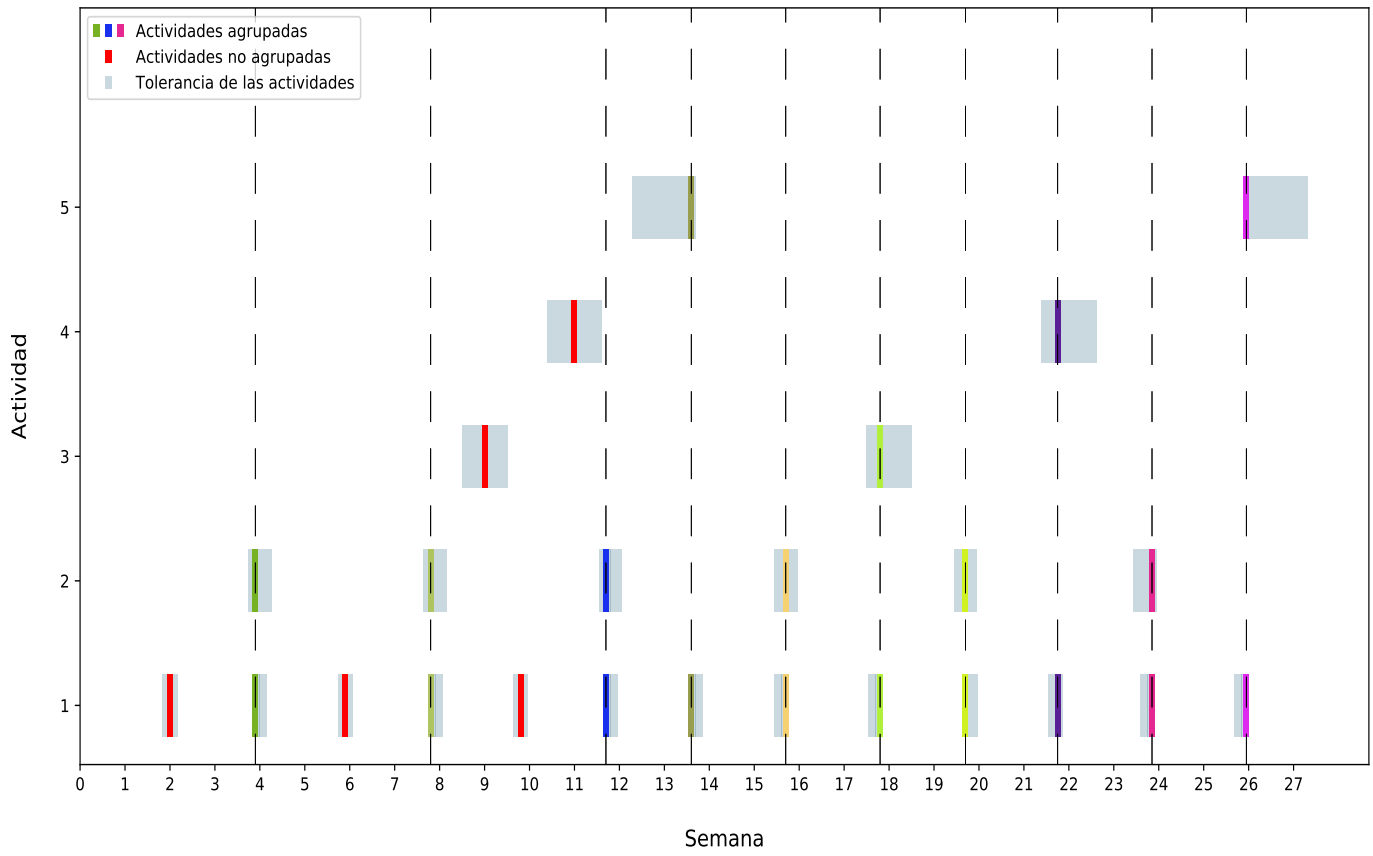

Figura 5.9: Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia del 5 % de sus periodicidades.

Para una tolerancia del 5 %, se observa como en la Figura 5.9 el modelo permite generar un agrupamiento extra, manteniendo los ya agrupados en el caso base (0 %). Para ello la actividad 5 debió ser atrasada lo máximo posible y la actividad 1 ser adelantada durante la semana 13.

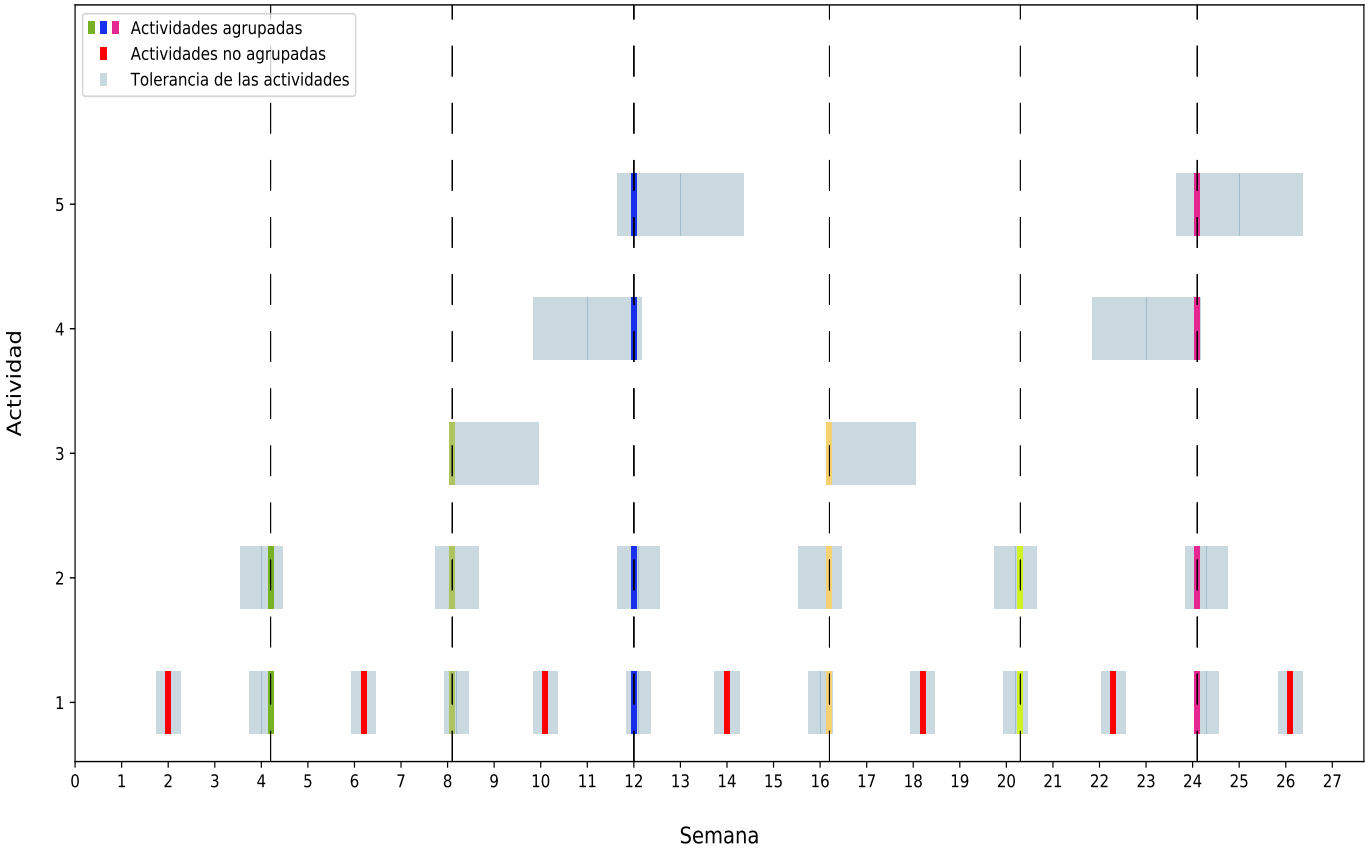

Figura 5.10: Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia del 10 % de sus periodicidades.

Con una tolerancia del 10 %, se muestra como en la Figura 5.10, existe un mayor número de actividades ejecutadas en conjunto, debido a que existe una mayor flexibilidad para atrasarlas y/o adelantarlas. Además se puede detallar como el número de las actividades no agrupadas se redujo de 7 a 5, mejorando positivamente la eficiencia de la ejecución del mantenimiento.

5.3.1. Discusión

Tabla 5.8: Disminución de ineficiencia del Caso III, para cada nivel de tolerancia dado.

Tolerancia [%]	Disminución de Ineficiencia [%]
5	6,25
6	6,25
7	12,5
8	18,75
9	18,75
10	18,75

Al igual que el Caso II, la incorporación de las tolerancias en la ejecución de las actividades fue positiva, obteniéndose una aumento en la disminución de ineficiencia detallado en la Tabla 5.8. A pesar de ello, la disminución de ineficiencia solo llega a un 18 % debido a que, a diferencia del Caso II en el cuál existe la peor situación posible (Caso III), representa algo más realista, causando que los valores de las periodicidades de las actividades sean o no, múltiplos entre sí.

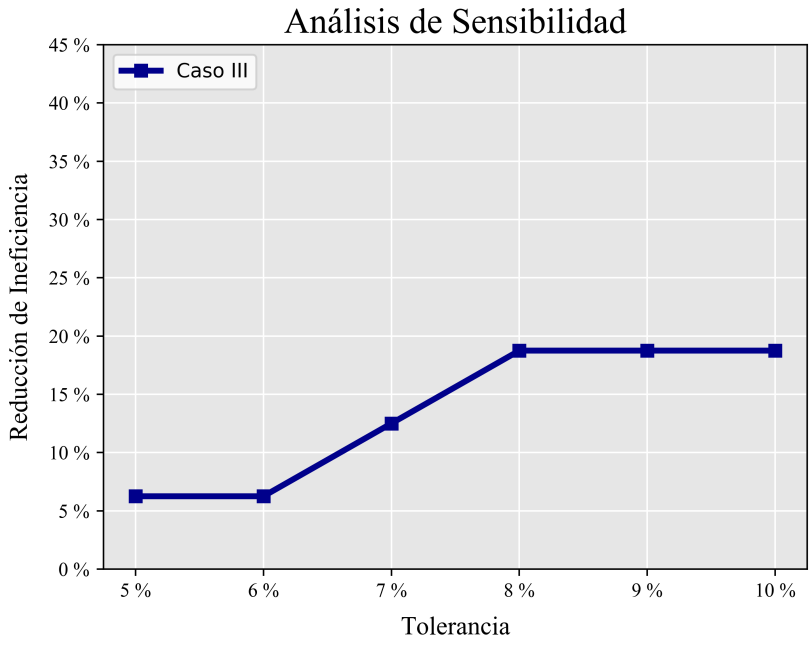

Figura 5.11: Disminución de la Ineficiencia del Caso III, generada por la inclusión de las tolerancias

En la Figura 5.11 se observa gráficamente la disminución de ineficiencia presentado en la Tabla 5.8. Al igual que en el Caso II, la disminución de ineficiencia no es estrictamente creciente debido a que, a

pesar de aumentar las tolerancias de las actividades, no siempre existe la posibilidad de conformar un mayor número de agrupaciones, debido a que la tolerancia no posee un valor elevado, pues se calcula a través de un cierto porcentaje de la periodicidad de determinada actividad.

Tolerancia [%]	Número de intervenciones	Duración del plan [*semanas*]
0	16	26
5	15	25,95
6	15	26,68
7	14	25,4
8	13	26,8
9	13	25,66
10	13	26,1

Tabla 5.9: Número de intervenciones y duración total del plan de mantenimiento del Caso III, bajo distintos niveles de tolerancia.

En la Tabla 5.9, se observa el número de intervenciones, el cuál es creciente a medida que aumenta el nivel de tolerancia. Además, se detalla que cada plan de mantenimiento tiene una duración distinta, debido a la no inclusión del criterio de atraso o adelanto en el modelo.

5.4. Tiempos Computacionales del Modelo

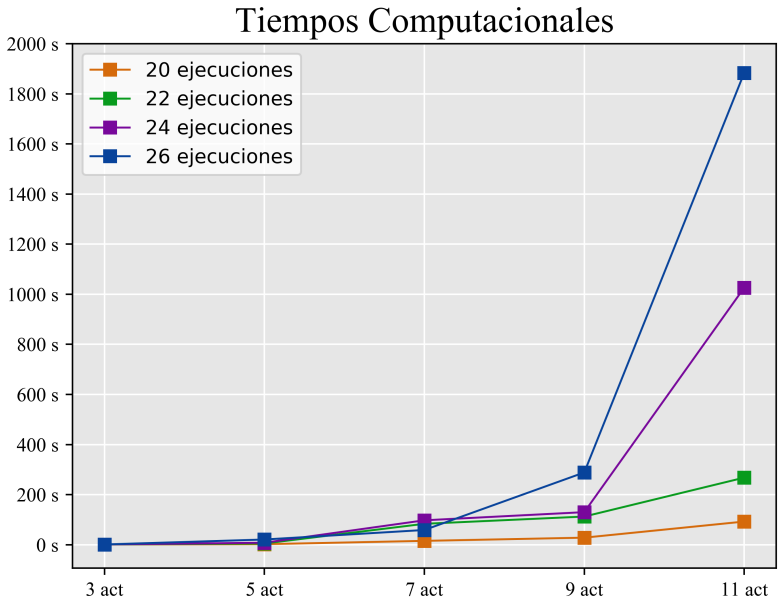

Figura 5.12: Tiempos computacionales del modelo para distintas actividades y número de ejecuciones de la actividad de menor periodicidad, dada una tolerancia del 10 % de sus periodicidades.

En la Figura 5.12, se observa como los tiempos computacionales aumentan exponencialmente a medida que aumenta el número de actividades y el número de ejecuciones de la actividad de menor periodicidad. Puesto que la actividad de menor periodicidad es la más crítica en el modelo, se utiliza una periodicidad de 1 unidad de tiempo (día, semana, etc.) para el cálculo de los experimentos computacionales. La criticidad de los tiempos computacionales es dada por las restricciones de comparación (4.7) y (4.8).

De la misma manera, el horizonte de planificación juega un papel importante en la criticidad de los tiempos de computo, por lo que existe un *Trade-off* entre las actividades que se desee aumentar y el horizonte que deba disminuir, o viceversa. Así, aumentar el número de actividades impacta fuertemente a los tiempos de cómputo, provocando que el problema quede indeterminado debido a los altos tiempos de resolución.

6 | Análisis

6.1. Planificación de las Actividades

Un aspecto importante a destacar en la planificación generada por el modelo, es el dinamismo que realiza para conformar agrupaciones de actividades, es decir, cada agrupación depende de lo realizado anteriormente, por lo que no necesariamente las agrupaciones serán siempre las mismas.

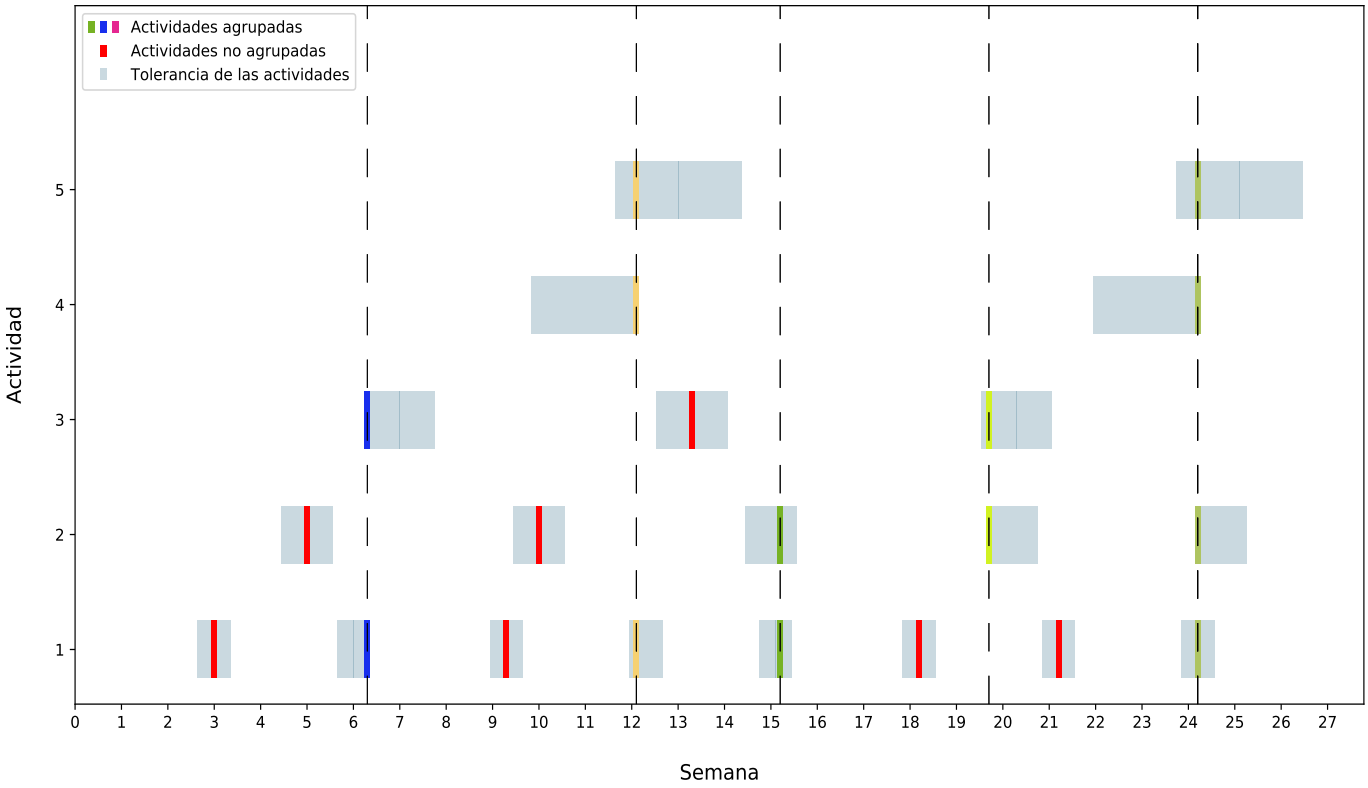

Figura 6.1: Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 10 % de sus periodicidades.

Un ejemplo de lo anterior es la Figura 6.1, en la que se detalla la inexistencia de agrupamientos de determinadas ejecuciones de la actividad 3, mientras que las que sí, son agrupadas con distintas actividades en cada instante de ejecución de alguna actividad. A pesar de lo anterior, puede existir un patrón repetitivo según el valor que tome el horizonte de planificación, por ejemplo, en la agrupación 1-4-5, parece existir un patrón repetitivo en el tiempo, por lo que el programador debe decidir si le es favorable tener una planificación dinámica o prefiere tener una planificación rígida. En caso de exigir cierta rigidez en la planificación, el programador puede:

- No utilizar el modelo.
- Adecuar el modelo, de tal forma de elegir algunas actividades a agrupar y forzarlas a ejecutarlas de forma repetitiva (pauta).

Un detalle a tener en cuenta son los instantes en que se ejecutan las actividades de mantenimiento (ver sección Anexos), los cuales tienen la característica de pertenecer al conjunto de los números reales no negativos, teniendo como consecuencia, la existencia de instantes de tiempo los cuales sean de naturaleza no entera.

Tabla 6.1: Actividades del Caso II ejecutadas en los distintos instantes de tiempo, dada una tolerancia del 10 % de su periodicidad.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	3
2	5
1 - 3	6,3
1	9,3
2	10
1 - 4 - 5	12,1
3	13,3
1 - 2	15,2
1	18,2
2 - 3	19,7
1	21,2
1 - 2 - 4 - 5	24,2

En la Tabla 6.1, se detalla en resumen los instantes de ejecución de las actividades de la Figura 6.1. Muchos instantes en que se ejecutan las actividades poseen valores decimales por ejemplo, el instante de ejecución de la agrupación 1-4-5 es en la semana 12,1. Esto no significa que en la realidad las actividades se ejecuten en la semana 12 y 0,7 días ($7 \times 0,1$), sino que la ejecución será realizada durante la semana 12, quedando el programador encargado de realizar un posterior análisis y buscar el mejor momento de dicha

semana para llevar a cabo el conjunto de actividades, teniendo en cuenta los recursos disponibles.

La planificación obtenida en cada caso permitió adelantar o atrasar algunas actividades, permitiendo de esta manera, generar una mayor cantidad de agrupamientos. Por ejemplo, la primera ejecución de la actividad 4 de la Figura 6.1 (semana 12, 1) se encuentra atrasada al máximo, lo cual puede contraer problemas si es que por algún motivo ocurriera algún problema en términos de gestionar recursos, como por ejemplo, la indisponibilidad de algún repuesto o la falla del equipo antes de realizar la actividad.

6.2. Agrupamientos

El objetivo del modelo es la maximización de agrupaciones posibles para lo cuál usa la tolerancia para moverse a través de ella para así adelantar o atrasar la ejecución de alguna actividad, por lo que ésta "intenta" generar una pauta de mantenimiento, como se detalla en el Caso I. Esto no siempre será posible, pero mientras mayor sea la tolerancia entregada a cada actividad, mayor será la probabilidad de que suceda.

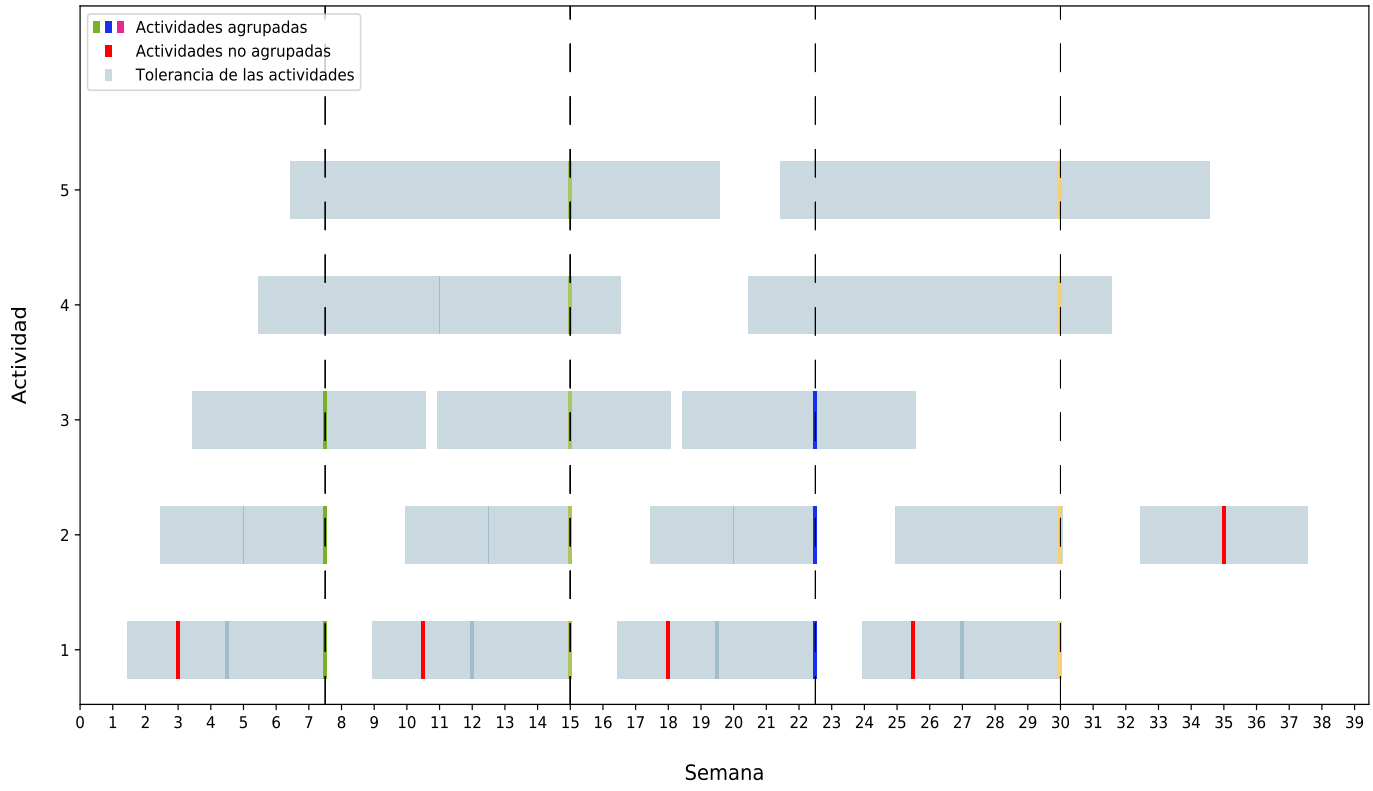

Figura 6.2: Plan óptimo de actividades del Caso II, con una tolerancia equivalente a la mitad de sus periodicidades.

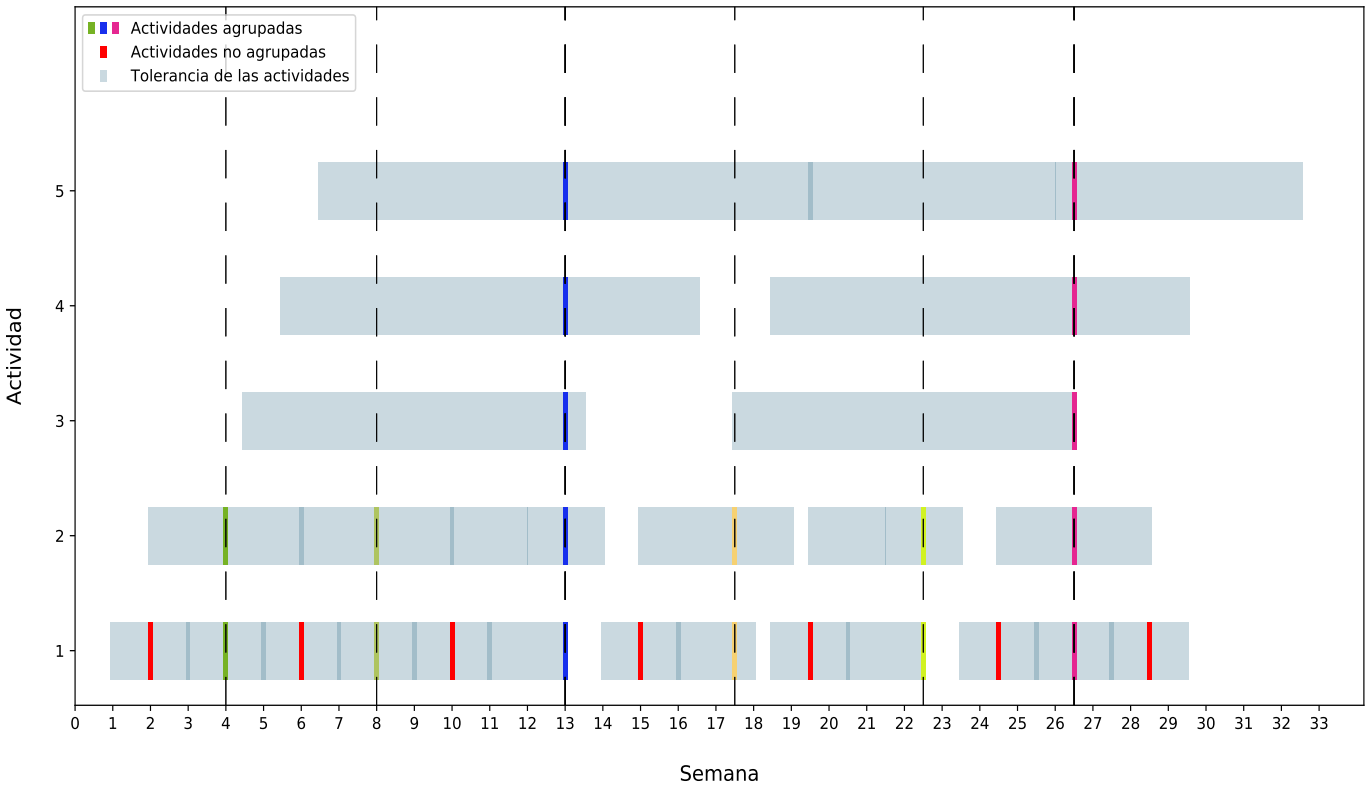

Figura 6.3: Plan óptimo de actividades del Caso III, con una tolerancia equivalente a la mitad de sus periodicidades.

En la Figura 6.2 y la Figura 6.3, se observa como para los Casos II y III, respectivamente, el modelo agrupa la ejecución de las actividades por la multiplicidad de las mismas, aumentando el rango de las tolerancias. Así, los Casos II y III, intentan alcanzar el caso simulado por el Caso I. De esta manera se observa como el modelo logra conformar una pauta de mantenimiento ejecutada cada 13 semanas.

Las actividades ejecutadas con amplia tolerancia no son realistas en éste análisis, pues la tolerancia esta sujeta a restricciones del contexto del mantenimiento, no obstante, permite entender de mejor forma el funcionamiento del modelo.

Cabe destacar que el hecho de agrupar en la realidad, no siempre conlleva beneficios pues el modelo supone que las actividades son ejecutadas de manera instantánea, y por ende, debe ser modificado para incluir estos parámetros. A pesar de ello, agrupar nunca empeora la situación base, por lo que se puede añadir una duración de actividades para analizar el comportamiento del modelo.

6.3. Duración de actividades

Las actividades de mantenimiento, tienen asociada una información procedente de la aplicación de RCM u otra herramienta. Utilizando esta información y las agrupaciones generadas con distintos niveles de tolerancia, se puede cuantificar si existe o no, un beneficio al agrupar actividades. Para ello, se debe tener en consideración que para ejecutar las actividades sobre un determinado equipo, éste debe detener sus funciones, por lo que, se genera un costo asociado a esta detención (costo de ineficiencia)

De esta manera, los costos totales asociados a la ejecución de cada actividad, pueden clasificarse como:

- Costos directos de ejecutar el mantenimiento: Asociados a todo el material necesario para la ejecución de cada actividad, como por ejemplo, repuestos, herramientas, personal, etc.
- Costo de ineficiencia: Asociados a la detención del equipo en un determinado instante de tiempo, afectando el proceso productivo.

Así, una agrupación de actividades ejecutadas en un mismo instante de tiempo genera solo una detención del equipo, lo cual puede generar posibles ahorros por concepto de ineficiencia. Esta detención tiene una duración equivalente a la duración de mayor valor de ejecución de las actividades. A pesar de lo anterior, no necesariamente puede existir un ahorro de costos debido a que pueden formarse agrupaciones las cuales pueden tener alguna actividad, con una duración muy extensa en relación al resto.

En el Caso I, se logró analizar en detalle como las agrupaciones no cambiaron, independiente de su tolerancia, debido a que ya se encuentran optimizados, por lo que la ineficiencia se mantuvo constante.

Es importante destacar que modelo no considera la duración de las actividades al momento de realizar la optimización, pues considera que las actividades se ejecutan de manera “instantánea”. Esta consideración es fundamental en el desempeño del modelo, puesto que al incluir las duraciones, la ineficiencia se ve alterada.

Tabla 6.2: Actividades del Caso II con sus respectivas periodicidades y duraciones. Fuente: Elaboración Propia

Actividad	Periodo [*semanas*]	Duración [h]
1	3	3
2	5	2
3	7	1
4	11	0.5
5	13	5

En la Tabla 6.2 se muestran las duraciones de las actividades del Caso II, las cuales serán analizadas a

través de la indisponibilidad del equipo (ineficiencia).

Tabla 6.3: Ineficiencia del equipo para el Caso II con sus respectivas tolerancias. Fuente: Elaboración Propia

Tolerancia	Ineficiencia del equipo [h]
0	45
5	44
6	42,5
7	39
8	**41**
9	38
10	35

De esta manera, en la Tabla 6.2 se detalla como al incorporar las duraciones de las actividades, la disminución de la ineficiencia no es creciente, mostrado en el punto de inflexión remarcado. A pesar de ello, se puede observar como la ineficiencia siempre es menor al caso en el que no existe tolerancia, en consecuencia, la agrupación de actividades siempre conlleva una mejoría asociada.

6.4. Externalización de Recursos

Existe la posibilidad de que sea infactible realizar determinadas ejecuciones de ciertas actividades agrupadas debido a las limitaciones de recursos que se posee en cada intervención. Esto es un aspecto importante a tener en cuenta, puesto que la limitante de recursos puede afectar la manera que modelo realiza agrupaciones en las ejecuciones de las actividades.

En este caso, se pueden tomar dos alternativas:

1. Incluir la limitante de recursos en el modelo, así el modelo puede tomar en cuenta qué agrupaciones son infactibles por la disponibilidad de recursos.

2. Externalizar la ejecución de las actividades, de manera de contar con los recursos necesarios para poder generar las agrupaciones óptimas, conllevando así una compensación entre lo generado por concepto de ahorro de costos indirectos y por el costo generado por la externalización de las ejecuciones de las actividades.

La alternativa 1, se encuentra fuera del alcance de este trabajo, pero se propone un desarrollo futuro del modelo, el incluir esta limitación, lo que en consecuencia hará que las ejecuciones de las actividades se agrupen de acuerdo a la disponibilidad de recursos y su importancia de ejecución.

La alternativa 2 es una alternativa factible para evaluar, ya que la falta de recursos puede ser compensada en el caso de existir un ahorro de costos por concepto de ineficiencia por las agrupaciones de ejecuciones de actividades. La falta de recursos podría ser de distinta índole como por ejemplo: recurso humano (horas-hombre), herramientas, repuestos, etc.

Así, se crea el supuesto en el que existen un pool de 3 hombres encargados de realizar el mantenimiento (horas-hombre) para ejecutar las actividades. Además, existe la posibilidad de externalizar la actividad a un costo equivalente de un 30 % adicional al personal disponible, en el caso de no poseer suficiente personal para dar abasto a las actividades.

Tabla 6.4: Actividades no agrupadas del Caso III con sus respectivas periodicidades y duraciones, dada una tolerancia del 8 %. Fuente: Elaboración Propia

Actividad	Periodicidad [*semanas*]	Duración [*h*]
1	2	3
2	4	2
3	9	1
4	11	0,5
5	13	5

En la Tabla 6.4, se detalla la periodicidad y duración de las actividades del Caso III dada una tolerancia del 8 %. Dado que existe una limitante de recursos, existirán actividades que no podrán ser ejecutadas, por lo que se debe evaluar si es necesario la externalización de actividades dado la disminución de ineficiencia.

Tabla 6.5: Actividades ejecutadas en los distintos instantes de tiempo del Caso III, dada una tolerancia del 8 % de su periodicidad, con sus respectivos costos.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]	Duración [*h*]
1	2	3
1 - 2	4,16	3
1	6,16	3
1 - 2 - 3	8,32	3
1 - 4	10,48	3
1 - 2 - 5	**12,64**	**5**
1	14,64	3
1 - 2 - 3	16,8	3
1	18,8	3
1 - 2 - 4	20,96	3
1	22,96	3
1 - 2 - 5	**24,8**	**5**
1	26,8	3

Como se detalla en la Tabla 6.5, las distintas agrupaciones generan distintas duraciones, siendo calculadas a través de la actividad que posee la duración de máximo valor en la agrupación. Se destaca en negrito las actividades que no pueden ser ejecutadas debido a la falta de personal técnico.

De esta manera, se puede conocer el máximo valor a pagar por externalizar la ejecución de cada actividad, siendo determinado por:

$$\text{Beneficio total de agrupar} = \text{Costo total de externalizar}$$

$$CI^0 - CI^i = \sum_i h_i \times c_i$$

$$\Rightarrow \; c_i = \frac{CI^0 - CI^i}{\sum_i h_i} \tag{6.1}$$

En donde CI^i representa el costo de ineficiencia a estudiar con un i % de tolerancia, CI^0 es el costo de ineficiencia del caso base de análisis (0 %)), h_i son las horas a externalizar de la actividad i y c_i el costo máximo por hora para aceptar externalizar la actividad i.

De esta manera se puede resumir:

Datos	Valores
Pool de operarios disponible	4 hh
Ineficiencia caso 8 %	43 h
Ineficiencia caso base	47,5 h
Horas a externalizar	4 hh
Costo por externalizar	30 % adicional

Así, el pool de personas encargadas de realizar el mantenimiento, no podrán encargarse de ejecutar las todas las actividades de la Tabla 6.5, evaluando la posibilidad de externalizar 4 horas-hombre. Así, utilizando la ecuación (6.1) se tiene:

$$c \leq \frac{CI^0 - CI^8}{\sum_i h_i}$$

$$c \leq \frac{Ineficiencia^0 - Ineficiencia^8}{\sum_i h_i} \times c^*$$

$$c \leq \frac{47,5 - 43}{4} \times c$$

$$c \leq 1,125c^*$$

En donde c^*, refleja el costo de ineficiencia por la ejecución de las actividades. Cabe destacar que se ha supuesto que $c_i = c$, por lo que el costo es el mismo para cada actividad externalizada.

Puesto que el costo por externalizar es un 30 % adicional, finalmente se evalúa:

$$c \leq 1,125c^*$$

$$1,3c^* \nleq 1,125c^*$$

Por lo tanto, el beneficio de agrupar no compensa el costo de externalizar y es preferible no agrupar las actividades del caso en el que existe 8 % de tolerancia.

Puede suceder que la ecuación (6.1) posea un mayor valor que el costo por hora a pagar por la externalización de actividades. En este caso, se debe sensibilizar cada nivel de tolerancia y buscar cual de ellas permite externalizar las ejecuciones de las actividades al mínimo costo, pudiendo suceder que se deban ejecutar tal cual lo indiquen sus periodicidades, debido a que los beneficios por agrupar no compensan la falta de recursos.

Es importante destacar que los costos asociados por concepto de ineficiencia deben ser lo suficientemente altos para pagar una posible externalización, puesto que de forma contraria, se producirán costos que

no compensen el beneficio de agrupar como por ejemplo, costos asociados principalmente a la gestión de recursos y planificación.

6.5. Gestión de Planificación

A pesar de que el modelo permite generar una calendarización de manera de reducir costos de ineficiencia, la planificación conformada puede ser muy variable debido a su naturaleza dinámica causada por las tolerancias. Esto puede traer problemas a la hora de gestionar una adecuada programación, puesto que cada cierto periodo las distintas actividades de mantenimientos deben ser re-programadas según el modelo, lo cual trae dificultades a la hora de gestionar los recursos disponibles, es decir, complica la gestión del mantenimiento.

Re-programar la ejecución de las actividades, conlleva un costo de horas-hombre asociado al programador, pues debe administrar y reorganizar los recursos de manera de planificar una nueva calendarización. Estos costos deben ser considerados dentro de los costos globales en caso de que las agrupaciones tengan una tendencia dinámica y vayan cambiando en cada nuevo horizonte de planificación. Por otro lado, es posible que exista un patrón de agrupamientos y no exista la necesidad de re-programar, lo que dependerá exclusivamente de las periodicidades de las actividades y el horizonte de tiempo en el cual se desee planificar.

Por lo tanto, el dinamismo de la planificación se puede “castigar”, debido a la re-programación de actividades en cada nueva planificación. Así, la disminución de ineficiencia se verá opacado por el costo hora-hombre que se deberá incurrir en re-programación de las actividades, por lo tanto este factor dependerá la importancia de la ineficiencia para el proceso productivo de la organización.

A pesar del dinamismo de la planificación, se puede forzar que la planificación sea estática, buscando optimizar en que momento es mejor ejecutar determinada actividad, generando una pauta de mantenimiento para cada actividad.

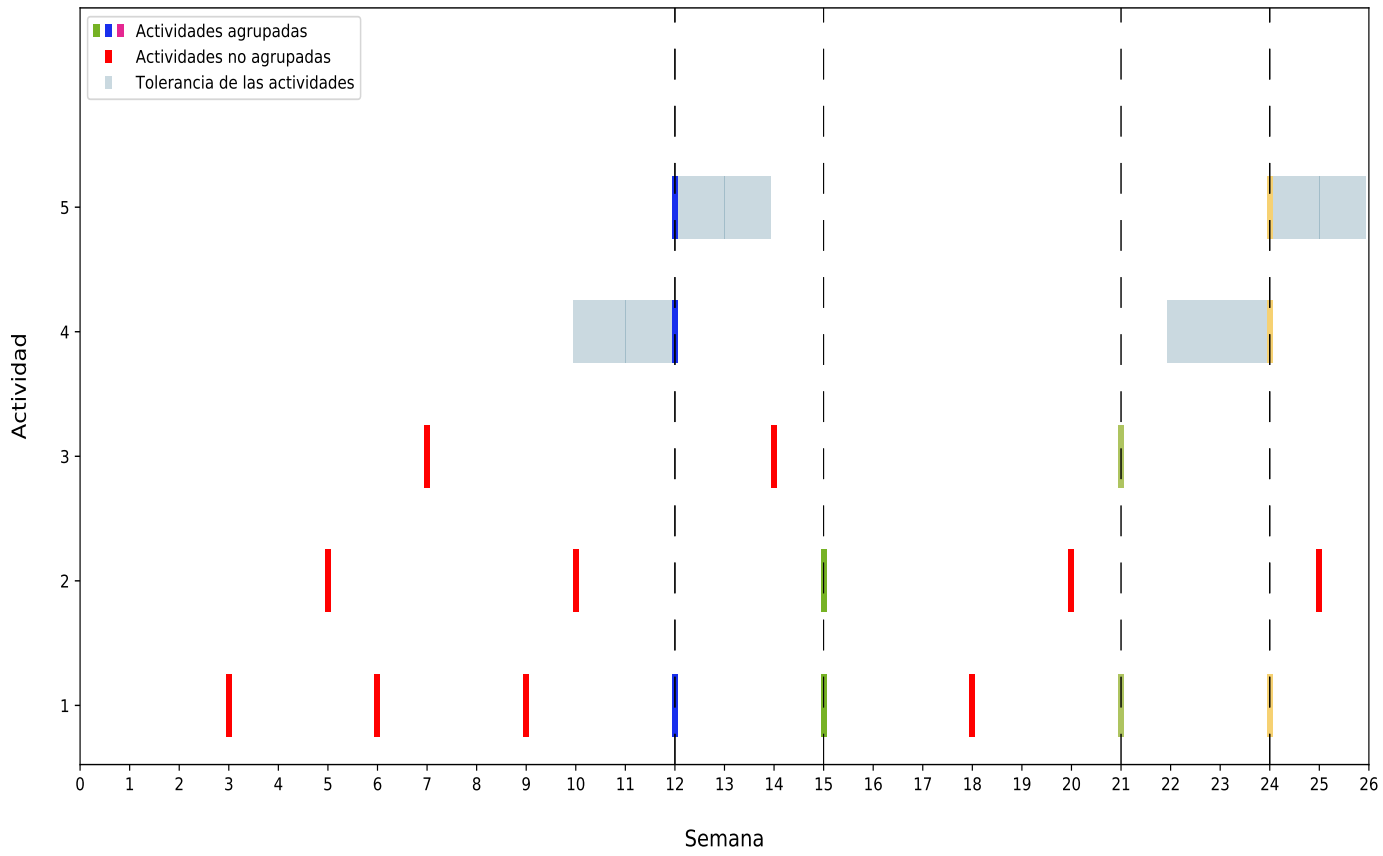

Figura 6.4: Plan óptimo de actividades del Caso II, ejecutadas en un intervalo de tiempo fijo.

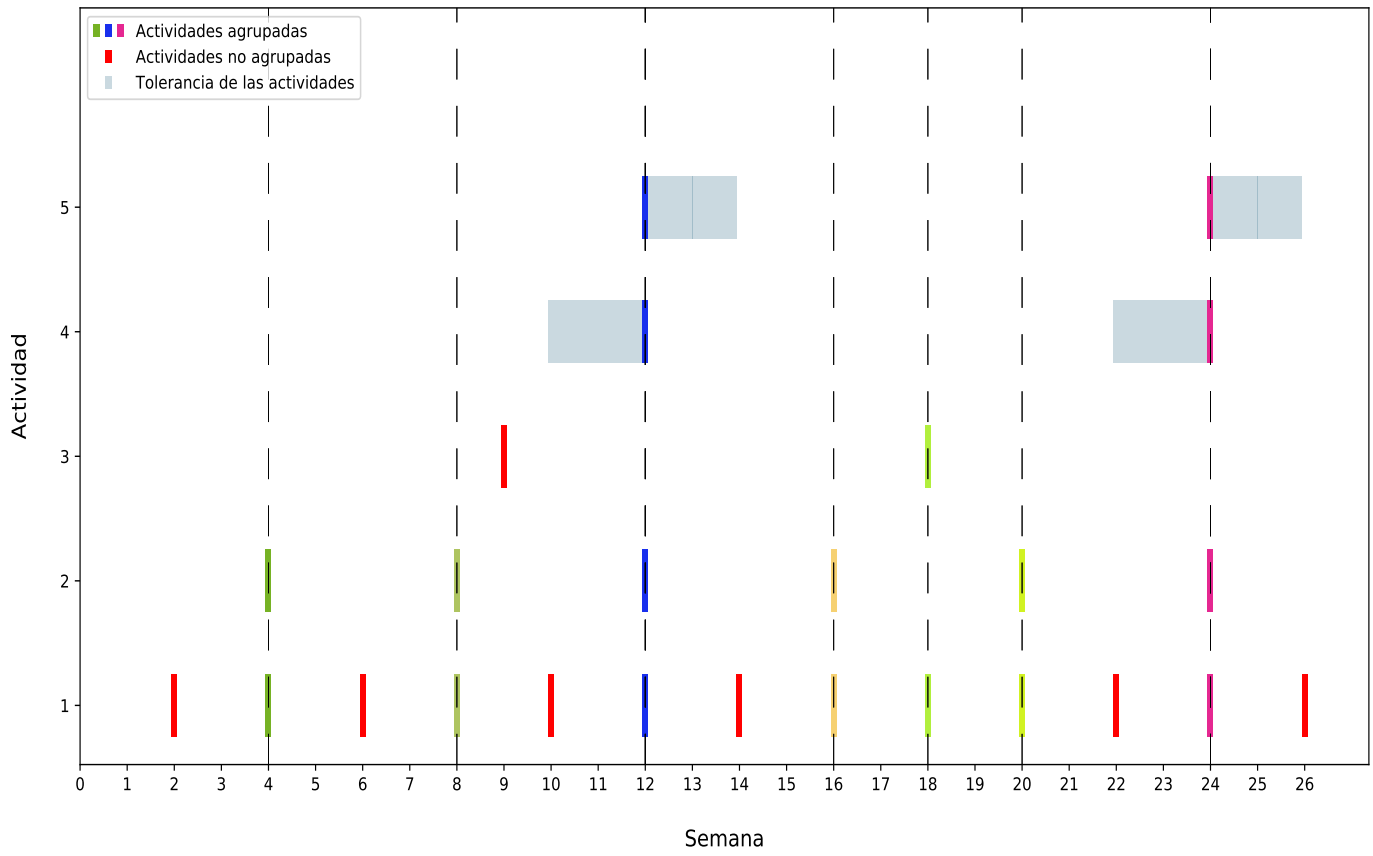

Figura 6.5: Plan óptimo de las actividades del Caso III, en un intervalo de tiempo fijo.

En la Figura 6.4 y la Figura 6.5, se observa como es posible determinar de manera óptima, tanto en el Caso II como el Caso III, una pauta de mantenimiento para un determinado grupo de actividades dentro del plan, provocando que exista una mayor rigidez en la ejecución de ciertas actividades, produciéndose una disminución de actividades agrupadas. De esta manera, la planificación de determinadas actividades se transforma en la creación de una pauta de mantenimiento, facilitando así su elaboración.

Tabla 6.6: Número de intervenciones y disminución de ineficiencia para el Caso II y III.

Caso	Número de intervenciones	Disminución de Ineficiencia [%]
II	14	28,57 %
III	14	14,29 %

Si bien, los planes conformados poseen una mayor rigidez, se puede observar como existe de igual manera una disminución de la ineficiencia, mostrados en la Tabla 6.6. Cabe destacar que el Caso I no es

analizado, puesto a que no puede ser siendo mejorado a través de la utilización del modelo.

De esta forma, se puede sopesar si vale la pena, formar pautas rígidas a cambio de disminuir la sobre-gestión o si es preferible, tener una mayor flexibilidad y generar un mayor numero de actividades agrupadas. Así el valor máximo a pagar o "castigar" por sobre-gestión o por no seguir lo planificado (debido al dinamismo), puede ser calculado como:

$$U = CG^R - CG^* \tag{6.2}$$

En donde U es el costo de "castigar" por sobre-gestión o por no seguir lo planificado, CG^R el costo de generar una pauta rígida y CG^* el costo óptimo de los distintos niveles de tolerancia.

La ecuación (6.2), representan el máximo valor que se puede castigar a la planificación óptima en caso de no ser seguida, ya sea por algún inconveniente o por término de sobre-gestionar la programación.

6.6. Gestión de Control

Uno de los medidas relevantes de control, es la duración de los distintos planes, detallado en la sección Anexos. A pesar de que el objetivo del modelo es la planificación semestral, los planes difieren de este horizonte debido al atraso y adelanto en la ejecución de las actividades. Puesto que no existe un criterio para el atrasar o adelantar en el modelo, éste decide qué instantes atrasar o adelantar la ejecución de las actividades de forma aleatoria, en consecuencia, muchos planes pueden ser adelantados o atrasados algunas semanas. Esto puede contraer un posible impacto en la ineficiencia, debido al número de detenciones causadas por dichos adelantos o atrasos, ya que para un mismo horizonte a evaluar, pueden existir una mayor cantidad de adelanto de actividades, y por ende, un mayor número de detenciones.

7 | Conclusiones y Consideraciones

7.1. Aspectos Destacables

En el presente trabajo se desarrolló un modelo de optimización lineal para la conformación de un plan de actividades cíclicas de mantenimiento preventivo, incorporando una tolerancia en la ejecución de las actividades. A partir de esta formulación, se construyeron 3 casos distintos para comparar su comportamiento frente a distintas periodicidades, asociando una tolerancia para cada actividad basada en porcentaje de su periodicidad. A partir de esto, se buscó la maximización de los agrupamientos, de manera de ahorrar los costos de ineficiencia en un determinado horizonte de planificación.

Es importante ver la relevancia que tiene el modelo como herramienta junto con alguna metodología como lo es RCM, puesto que ésta solo entrega la información acerca de las actividades que deben ser ejecutadas, pero no detalla cuando deben ser ejecutadas ni cuales actividades pueden ser ejecutadas en conjunto. Por lo tanto, el modelo completa la pieza faltante del mecanismo, logrando generar una planificación de acuerdo a un cierto criterio (maximizar agrupaciones) y permitiendo una cierta flexibilidad añadiendo las tolerancias. Además, a través de un análisis a posterior se puede cuantificar el beneficio de generar estos agrupamientos y eliminar las suposiciones que el modelo toma como entrada, siendo mucho más realista al momento de utilizarse como herramienta decisiva. A pesar de lo anterior, la no inclusión del modelo no permite la optimización de estas variables de manera directa, no obstante, puede complementarse con otras herramientas de manera de dar un respaldo a la dirección estratégica del mantenimiento.

Cabe destacar los beneficios que genera la utilización del modelo como herramienta de creación de pautas y diseño de un plan de mantenimiento, pues si bien no fueron cuantificados,, representan una herramienta altamente versátil, teniendo la ventaja de no necesariamente tener que recibir los datos de salida de alguna metodología.

7.2. Consideraciones

Si bien, el modelo agrupa las actividades de manera eficiente y en algunos casos puede ser muy útil tenerlo como base, existen ciertas consideraciones a tener en cuenta:

- La confiabilidad del equipo puede verse alterada al incorporar una tolerancia en la ejecución de las actividades, puesto que esta periodicidades recomendadas por la aplicación de alguna metodología, toma en cuenta la confiabilidad. Así, atrasar la ejecución de alguna actividad, puede provocar el fallo inesperado del equipo, en consecuencia, se debe analizar en un futuro trabajo el impacto de los atrasos en las ejecuciones de las actividades.
- El modelo no incorpora la duración de ejecución de las actividades ni el uso de recursos. Esto puede ser solucionado, buscando herramientas que se complementen junto al modelo tales como: Microsoft Project, TaskJuggler, entre otros.
- El modelo conlleva como resultado una disminución de la ineficiencia cuando las periodicidades no son múltiplos entre sí. Esto es debido a que cuando las periodicidades son múltiplos entre sí, ya se encuentran optimizadas y se agrupan siempre en el mínimo común múltiplo de cada actividad. A pesar de ello, pueden formarse planes que contengan periodicidades que sean múltiplos entre sí, siendo planes más evidentes y simples de conformar.
- El modelo tiene tiempos de resolución aceptables hasta 14 actividades de diferentes periodicidades, luego se vuelve complejo y extenso computacionalmente. A pesar de ello, se pueden formar packs de actividades cuando existen actividades con la misma frecuencia pero de distinta naturaleza. De esta manera, se puede generar una planificación con muchas más actividades.
- En algunos casos el modelo puede contener más de una solución óptima, debiendo buscar la que posee un mayor número de grupos. Esto sucede debido a que se tiene como objetivo agrupar la mayor cantidad de actividades posibles.

Bibliografía

Afefy, Islam H. (2010). Reliability-Centered Maintenance Methodology and Application: A Case Study. *Engineering*, 02(11), 863–873. (document), 4.1

Arya, Jagdish C.; Lardner, Robin W.; y Ibarra Mercado, Victor (2009). *Matemáticas aplicadas a la Administración y a la Economía*. Prentice Hall, 5ta edición. 3.2.2.1

Besnard, F; Patricksson, M; Strombergt, A-B; Wojciechowskit, A; y Bertling, L (2017). An optimization framework for opportunistic maintenance of offshore wind power system An Optimization Framework for Opportunistic Maintenance of Offshore Wind Power System. (August 2009), 1–7. 3.1.2

Caballero, José A y Grossmann, Ignacio E (2007). Una revisión del estado del arte en optimización. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 4(1), 5–23. 3.2.1.6

Cipra, Barry A. (2000). The best of the 20th century: editors name top 10 algorithms. *SIAM News*, 33(4), 05–00. 3.2.2.1

Crespo Marquéz, Adolfo (2011). *The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems Maintenance*. Springer, 2 edición. 3.1.1

Dhillon, B. S. (2002). *Engineering Maintenance: A modern Approach*. CRC PRESS. 3.1.1, 3.2.1.5, 3.2.1.6

Duarte, José A.Caldeira; Craveiro, João C.Taborda A.; y Trigo, Tomás Pedro (2006). Optimization of the preventive maintenance plan of a series components system. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83(4), 244–248. 3.1.2

Emerson Process Management (2003). Reducción de costos de operación y de mantenimiento. (pp. 1–21). 1.2

García Garrido, Santiago (2003). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Diaz de Santos. 3.2.1, 3.2.1.1

Gunn, Eldon A. y Diallo, Claver (2015). Optimal opportunistic indirect grouping of preventive replacements in multicomponent systems. *Computers and Industrial Engineering*, 90, 281–291. 3.1.2

Kobbacy, Khairy Ahmed Helmy y Murthy, D. N. Prabhakar (2008). *Complex System Maintenance Handbook*. Springer. 3.1.2

Laggoune, Radouane; Chateauneuf, Alaa; y Aissani, Djamil (2010). Impact of few failure data on the opportunistic replacement policy for multi-component systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 95(2), 108–119. 3.1.2

Matas, Antonio (2018). Desarrollo y puesta en marcha del mantenimiento preventivo, mediante SAP PM, en una empresa de distribución de productos farmacéuticos. 3.2.1

Mora Gutiérrez, Alberto (2009). *Mantenimiento: Planeación, ejecución y control*. Alfaomega, 1a edición. 3.2.1, 3.2.1.4

Moubray, John (2004). *Reliability-centered Maintenance*. Industrial Press, Inc, 2da edición. 1.2, 3.2.1.2, 3.2.1.6

Rausand, Marvin (1998). Reliability centered maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 60(2), 121–132. 1.2, 3.1.1

Smith, R y K. Mobley, R (2008). *Rules of Thumb for Maintenance and Realibility Engineers*. Butterworth-Heinemann, 1st edición. 4.4

Tambe, Pravin P.; Mohite, Satish; y Kulkarni, Makarand S. (2013). Optimisation of opportunistic maintenance of a multi-component system considering the effect of failures on quality and production schedule: A case study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(5-8), 1743–1756. 3.1.2

Taylor, Bernard W. (2013). *Introduction to Management Science*, volume 58. Pearson, 11a edición. 3.2.2.2

Thomas, L. C. (1986). A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems. *Reliability Engineering*, 16(4), 297–309. 3.1.1

Viveros, Pablo; Stegmaier, Raúl; Kristjanpoller, Fredy; Barbera, Luis; y Crespo, Adolfo (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 21(1), 125–138. 3.2.1.1

Zhou, Xiaojun; Xi, Lifeng; y Lee, Jay (2007). Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. *Reliability Engineering and System Safety*, 92(4), 530–534. 3.1.2

A | ANEXOS

A.1. Pauta de Mantenimiento

Pauta de Actividad de Mantenimiento

Revisión	**1º y 2º piso de los edificios de Gerencia General**
Periodicidad	**A diario, días hábiles**

Antecedentes

Revisión y reparación de los elementos de Fácil Acceso de las oficinas del edifico de Gerencia General. El horario de intervención es entre las 07:00 a 08:00 hrs. todos los días hábiles.

Descripción

• Revisión de todos los elementos que componen la instalación, luminarias, enchufes de alimentación, canalizaciones, sujeciones, controles, fotoceldas, etc.
• Se debe realizar la reparación inmediata de todos los elementos en mal estado encontrados durante la revisión.
• Limpieza de los elementos intervenidos.
canalizaciones, sujeciones, controles, fotoceldas, etc.
• Se debe realizar la reparación inmediata de todos los elementos en mal estado encontrados durante la revisión.
• Limpieza de los elementos intervenidos.
• Cambio de elementos en mal estado, dañados o envejecidos y reposición de elementos faltantes.
• Revisión y reparación de enchufes normales, fuerza, computación y calefacción.
• Revisión y reparación de los interruptores.
• Revisión y normalización de la canalizaciones.
• Registro de los elementos en mal estado pertenecientes al plano de Difícil Acceso en la Gerencia General.

P 1/1

Figura A.1: Pauta de mantenimiento de Metro de Santiago. **Fuente**: Metro de Santiago

A.2. Caso I

Tabla A.1: Instantes de ejecución de las actividades del Caso I sin tolerancias.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	1
1 - 2	2
1	3
1 - 2 - 3	4
1	5
1 - 2	6
1	7
1 - 2 - 3 - 4	8
1	9
1 - 2	10
1	11
1 - 2 - 3 - 5	12
1	13
1 - 2	14
1	15
1 - 2 - 3 - 4	16
1	17
1 - 2	18
1	19
1 - 2 - 3	20
1	21
1 - 2	22
1	23
1 - 2 - 3 - 4 - 5	24
1	25
1 - 2	26

Tabla A.2: Instantes de ejecución de las actividades del Caso I dada una tolerancia del 5 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	1
1 - 2	2,05
1	3,05
1 - 2 - 3	4,1
1	5,1
1 - 2	6,15
1	7,15
1 - 2 - 3 - 4	8,2
1	9,2
1 - 2	10,25
1	11,25
1 - 2 - 3 - 5	12,3
1	13,3
1 - 2	14,35
1	15,35
1 - 2 - 3 - 4	16,4
1	17,4
1 - 2	18,45
1	19,45
1 - 2 - 3	20,5
1	21,5
1 - 2	22,55
1	23,55
1 - 2 - 3 - 4 - 5	24,6
1	25,6
1 - 2	26,55

Tabla A.3: Instantes de ejecución de las actividades del Caso I dada una tolerancia del 6 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	1
1 - 2	2,06
1	3,06
1 - 2 - 3	4,12
1	5,12
1 - 2	6,18
1	7,18
1 - 2 - 3 - 4	8,24
1	9,24
1 - 2	10,3
1	11,3
1 - 2 - 3 - 5	12,36
1	13,36
1 - 2	14,42
1	15,42
1 - 2 - 3 - 4	16,48
1	17,48
1 - 2	18,54
1	19,54
1 - 2 - 3	20,6
1	21,6
1 - 2	22,66
1	23,66
1 - 2 - 3 - 4 - 5	24,6
1	25,6
1 - 2	26,54

Tabla A.4: Instantes de ejecución de las actividades del Caso I dada una tolerancia del 7 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	1
1 - 2	2,07
1	3.07
1 - 2 - 3	4,14
1	5,14
1 - 2	6,07
1	7,07
1 - 2 - 3 - 4	8
1	9
1 - 2	9,93
1	10,93
1 - 2 - 3 - 5	12
1	13
1 - 2	13,93
1	14,93
1 - 2 - 3 - 4	15,86
1	16,86
1 - 2	17,93
1	18,93
1 - 2 - 3	20
1	21
1 - 2	22,07
1	23,07
1 - 2 - 3 - 4 - 5	24
1	25
1 - 2	25,93

Tabla A.5: Instantes de ejecución de las actividades del Caso I dada una tolerancia del 8 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	1
1 - 2	2,08
1	3,08
1 - 2 - 3	4,16
1	5,16
1 - 2	6,24
1	7,24
1 - 2 - 3 - 4	8,32
1	9,32
1 - 2	10,4
1	11,4
1 - 2 - 3 - 5	12,48
1	13,48
1 - 2	14,56
1	15,56
1 - 2 - 3 - 4	16,64
1	17,64
1 - 2	18,72
1	19,72
1 - 2 - 3	20,8
1	21,8
1 - 2	22,88
1	23,88
1 - 2 - 3 - 4 - 5	24,96
1	25,96
1 - 2	26,88

Tabla A.6: Instantes de ejecución de las actividades del Caso I dada una tolerancia del 9 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	1
1 - 2	1,91
1	2,91
1 - 2 - 3	3,82
1	4,82
1 - 2	5,73
1	6,73
1 - 2 - 3 - 4	7,64
1	8,64
1 - 2	9,55
1	10,55
1 - 2 - 3 - 5	11,46
1	12,46
1 - 2	13,37
1	14,37
1 - 2 - 3 - 4	15,28
1	16,28
1 - 2	17,19
1	18,19
1 - 2 - 3	19,1
1	20,1
1 - 2	21,01
1	22,01
1 - 2 - 3 - 4 - 5	22,92
1	23,92
1 - 2	25,01

Tabla A.7: Instantes de ejecución de las actividades del Caso I dada una tolerancia del 10 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	1
1 - 2	2,1
1	3,1
1 - 2 - 3	4,2
1	5,2
1 - 2	6,3
1	7,3
1 - 2 - 3 - 4	8,4
1	9,4
1 - 2	10,5
1	11,5
1 - 2 - 3 - 5	12,6
1	13,6
1 - 2	14,7
1	15,7
1 - 2 - 3 - 4	16,8
1	17,8
1 - 2	18,9
1	19,9
1 - 2 - 3	21
1	22
1 - 2	23,1
1	24,1
1 - 2 - 3 - 4 - 5	25,2
1	26,2
1 - 2	27,1

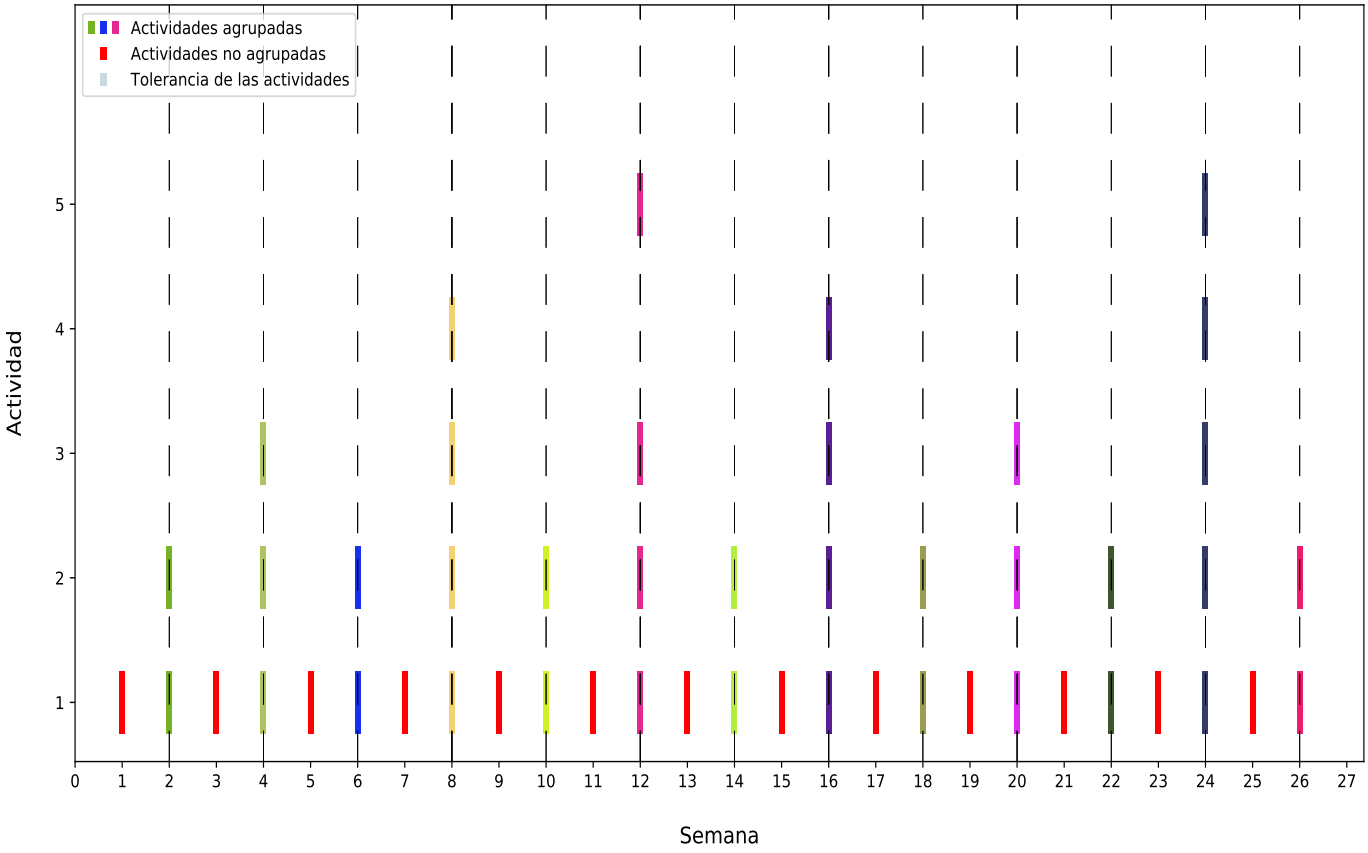

Figura A.2: Plan óptimo de actividades del Caso I sin tolerancias.

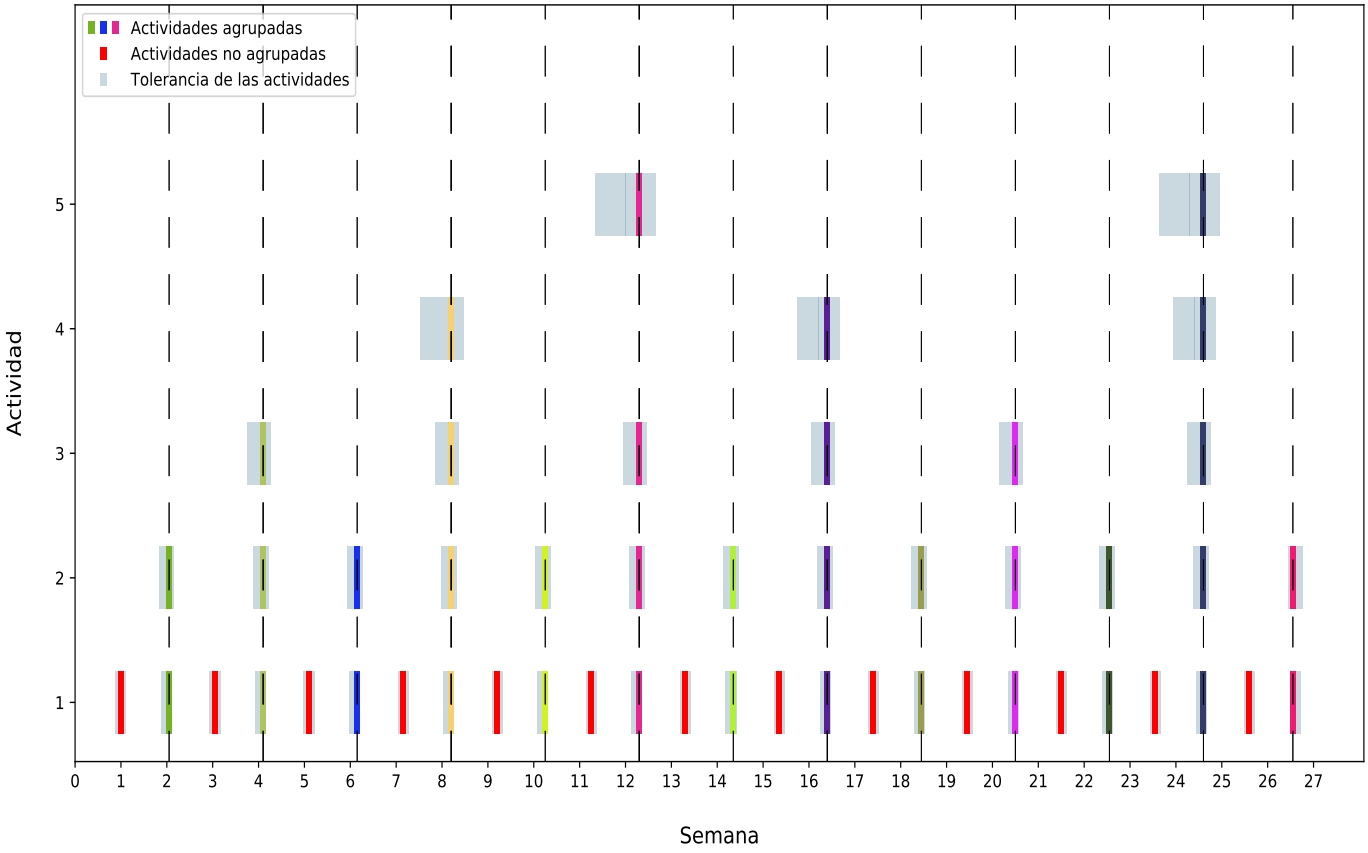

Figura A.3: Plan óptimo de actividades del Caso I con una tolerancia de ejecución del 5 % de sus periodicidades.

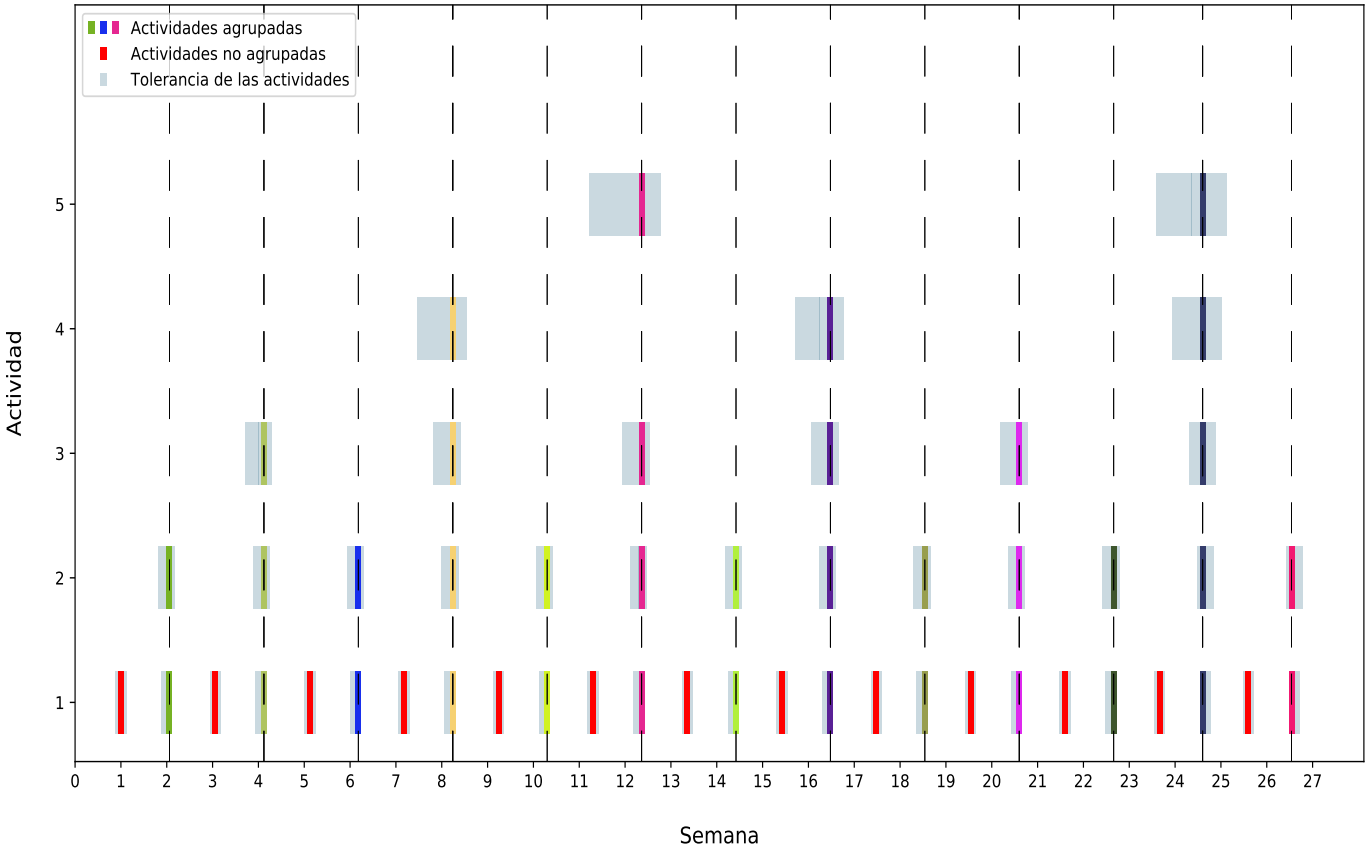

Figura A.4: Plan óptimo de actividades del Caso I con una tolerancia de ejecución del 6 % de sus periodicidades.

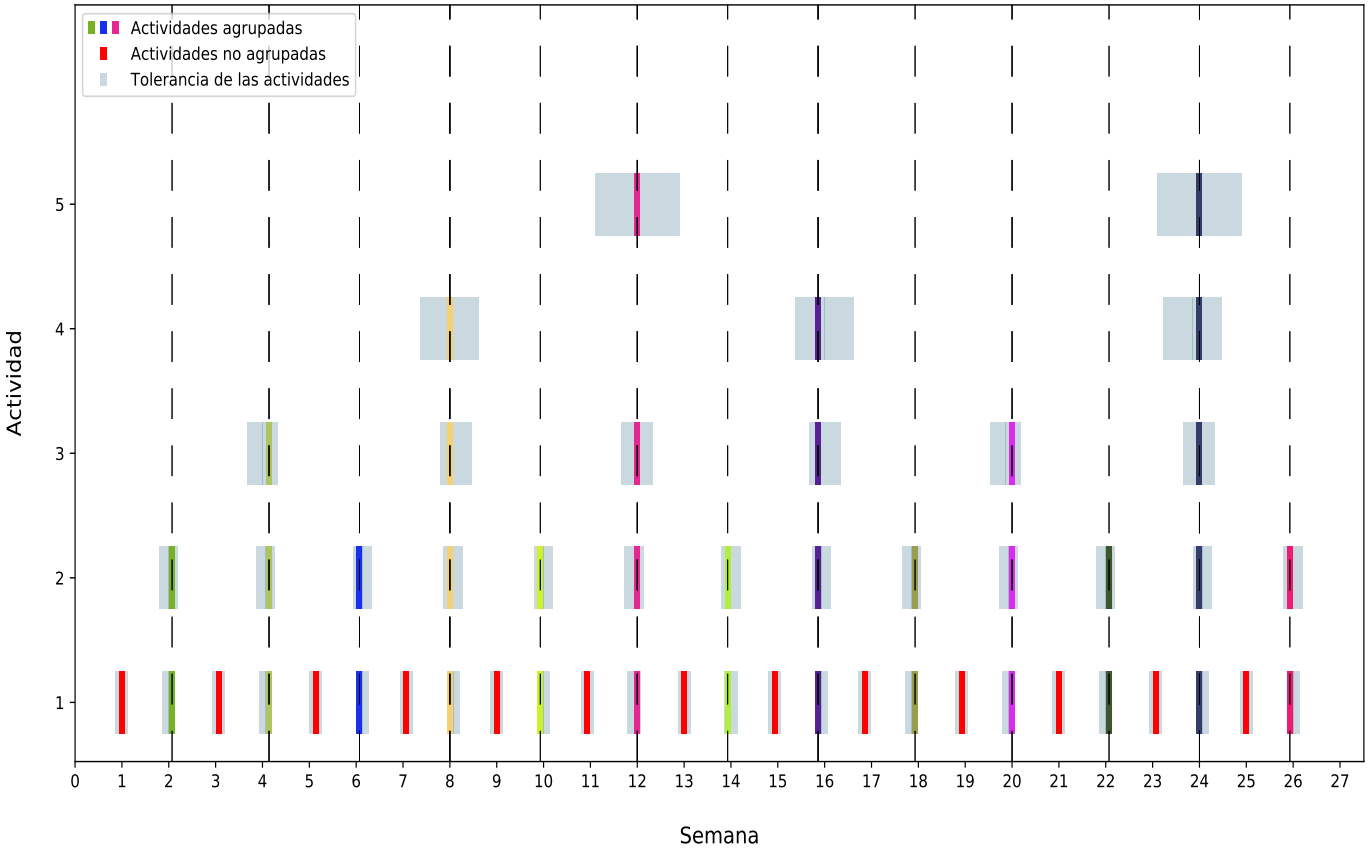

Figura A.5: Plan óptimo de actividades del Caso I con una tolerancia de ejecución del 7 % de sus periodicidades.

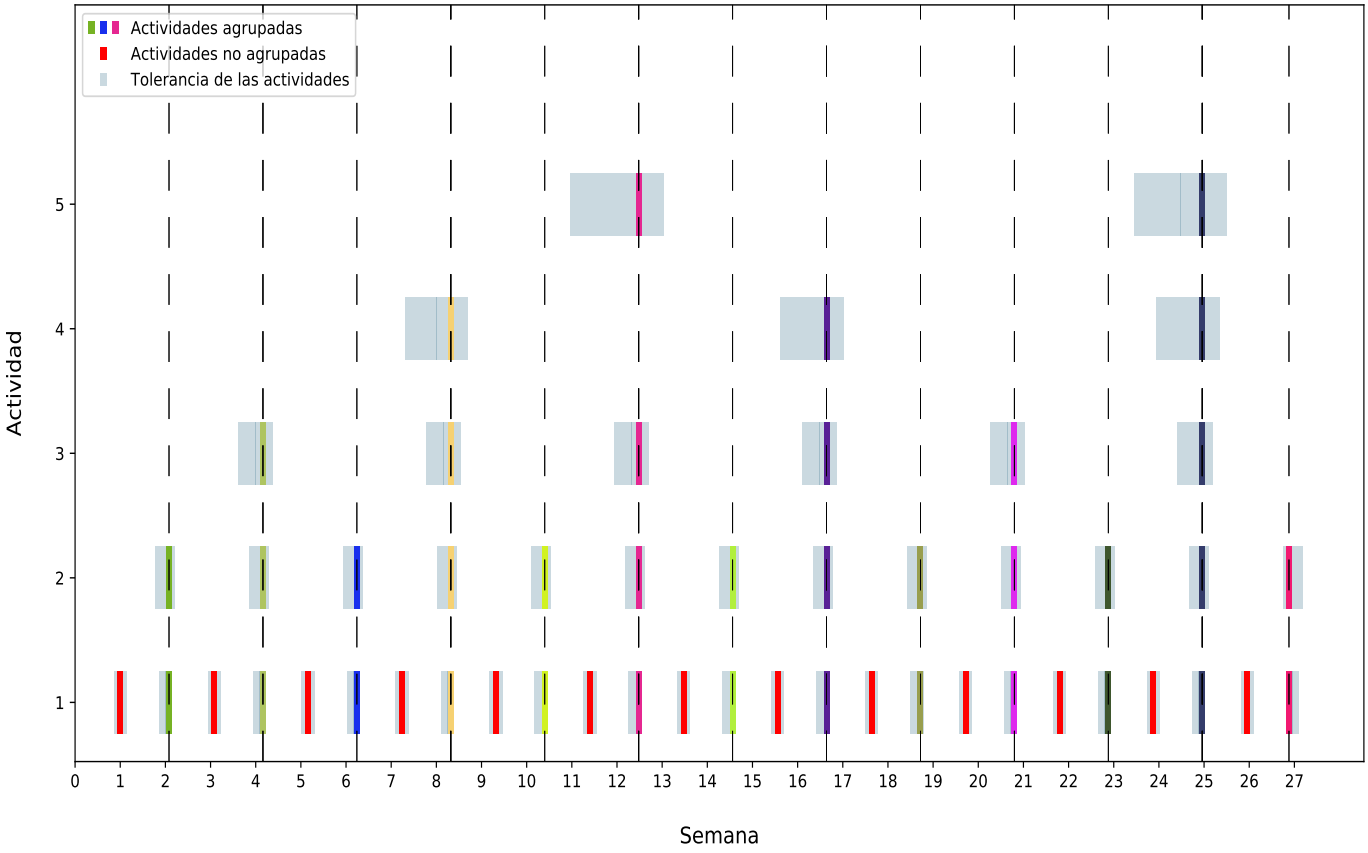

Figura A.6: Plan óptimo de actividades del Caso I con una tolerancia de ejecución del 8 % de sus periodicidades.

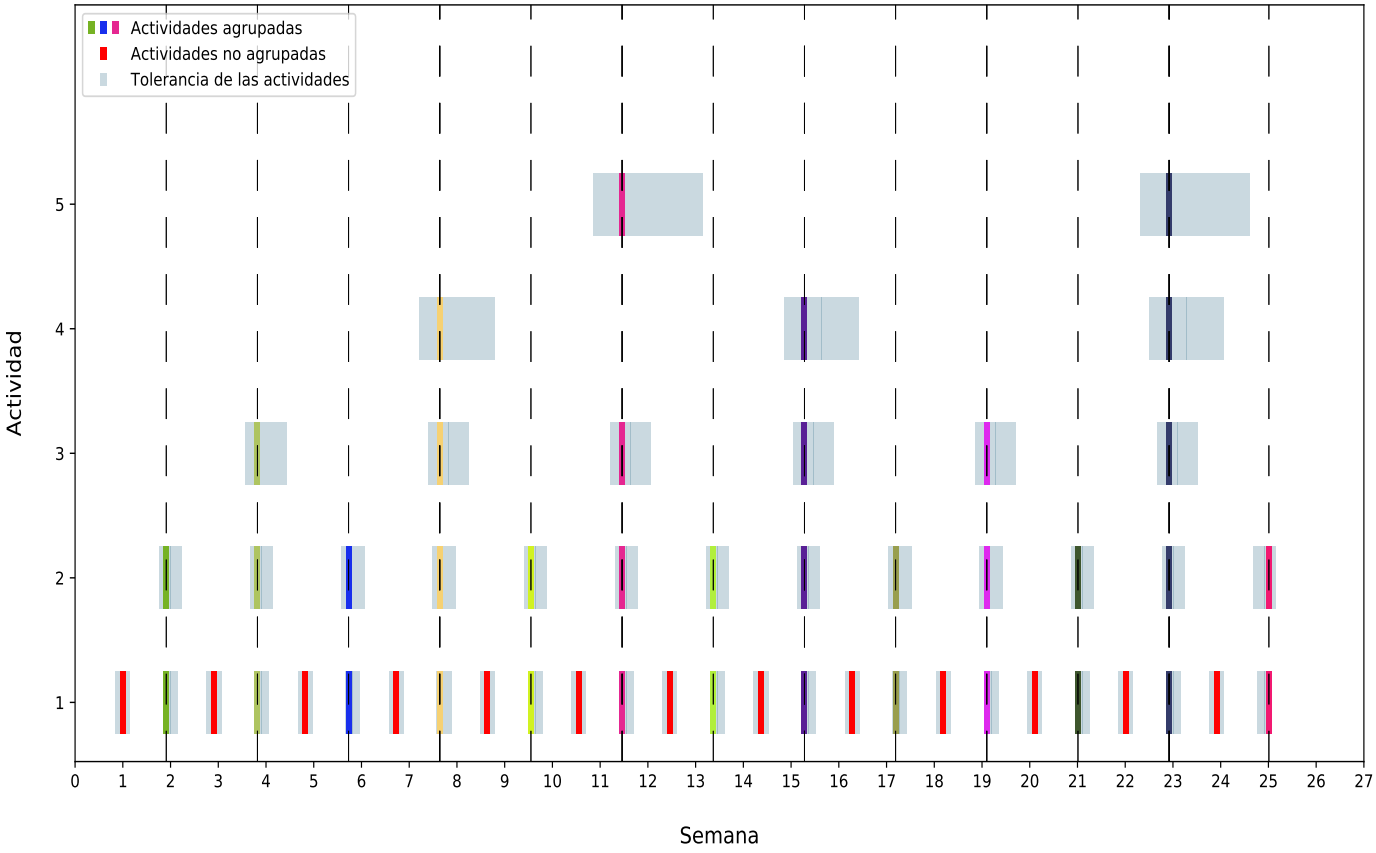

Figura A.7: Plan óptimo de actividades del Caso I con una tolerancia de ejecución del 9 % de sus periodicidades.

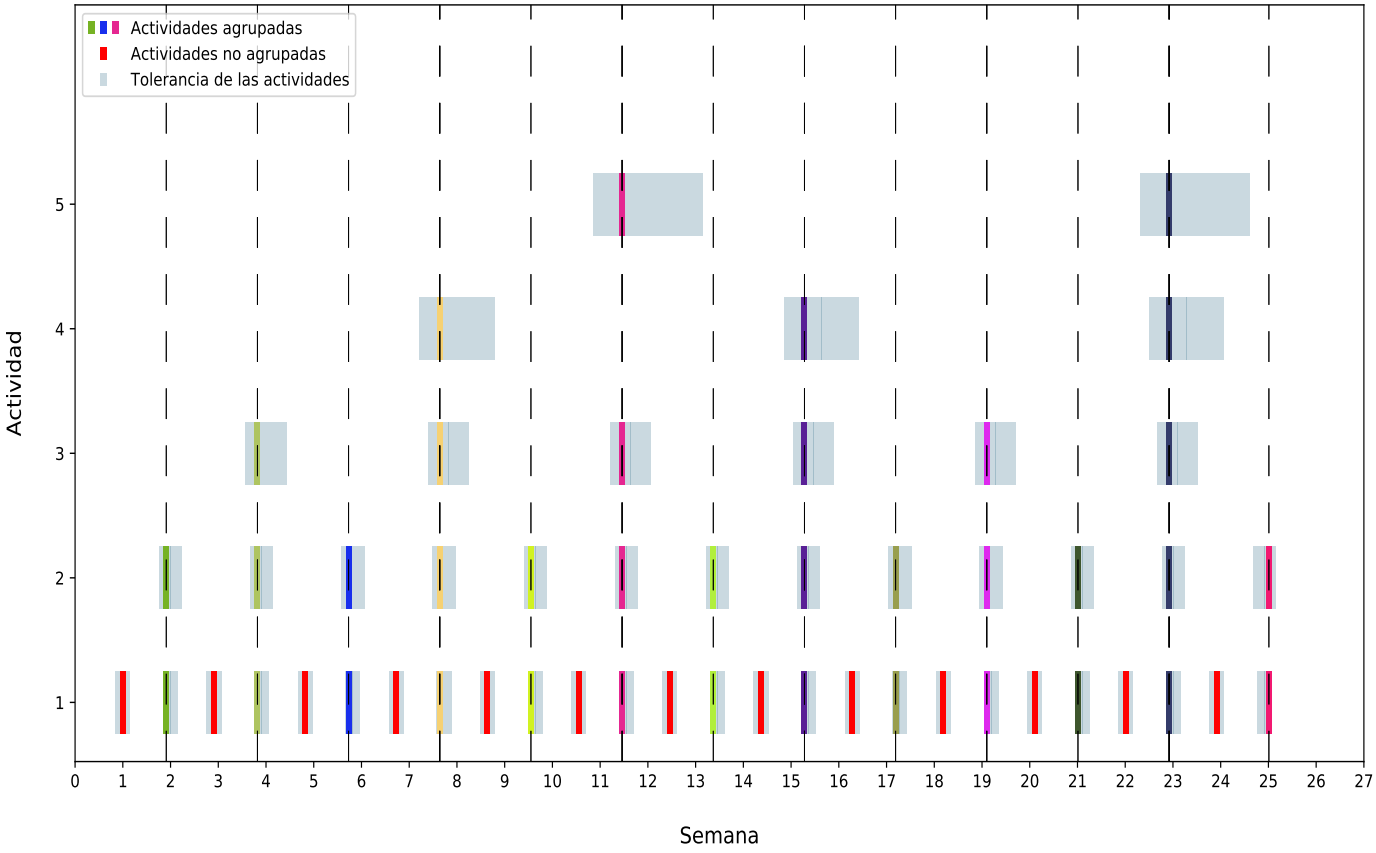

Figura A.8: Plan óptimo de actividades del Caso I con una tolerancia de ejecución del 10 % de sus periodicidades.

Tabla A.8: Disminución de ineficiencia del Caso I, para cada nivel de tolerancia dado.

Tolerancia [%]	Disminución de Ineficiencia [%]
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0

A.3. Caso II

Tabla A.9: Instantes de ejecución de las actividades del Caso II sin tolerancias.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	3
2	5
1	6
3	7
1	9
2	10
4	11
1	12
5	13
3	14
1 - 2	15
1	18
2	20
1 - 3	21
4	22
1	24
2	25
5	26

Tabla A.10: Instantes de ejecución de las actividades del Caso II dada una tolerancia del 5 % sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	3
2	5
1	6
3	7
1	9
2	10
4	11
1	12
3 - 5	13.65
1 - 2	14.85
1	17.85
2	19.85
1 - 3	20.7
4	22
1	23.7
2	24.85
5	26.65

Tabla A.11: Instantes de ejecución de las actividades del Caso II dada una tolerancia del 6 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	3
2	5
1	6
3	7
1	9
2	10
4	11
1	12
5	13
3	14
1 - 2	15.16
1	18.16
2	20.16
1 - 3 - 4	21.34
1	24.34
2 - 5	25.46

Tabla A.12: Instantes de ejecución de las actividades del Caso II dada una tolerancia del 7 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	3
2	5
1	6
3	7
1	9
2 - 4	10.35
1 - 5	12.21
3	14
1 - 2	15.28
1	18.28
2	20.28
1 - 3 - 4	21.49
1	24.49
2 - 5	24.93

Tabla A.13: Instantes de ejecución de las actividades del Caso II dada una tolerancia del 8 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	3
2	5
1	6
3	7
1	9
2 - 4	10.36
1	12
3 - 5	13.44
1	15
2	15.36
1	18
1 - 2 - 3 - 4	20.76
1	23.76
2 - 5	25.48

Tabla A.14: Instantes de ejecución de las actividades del Caso II dada una tolerancia del 9 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	3
2	5
1	6
3	7
1	9
2	10
1 - 4 - 5	11.83
1 - 2 - 3	14.63
1	17.63
2	19.63
1	20.63
3	21.63
1 - 4 - 5	23.66
2	24.63

Tabla A.15: Instantes de ejecución de las actividades del Caso II dada una tolerancia del 10 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	3
2	5
1 - 3	6.3
1	9.3
2	10
1 - 4 - 5	12.1
3	13.3
1 - 2	15.2
1	18.2
2 - 3	19.7
1	21.2
1 - 2 - 4 - 5	24.2

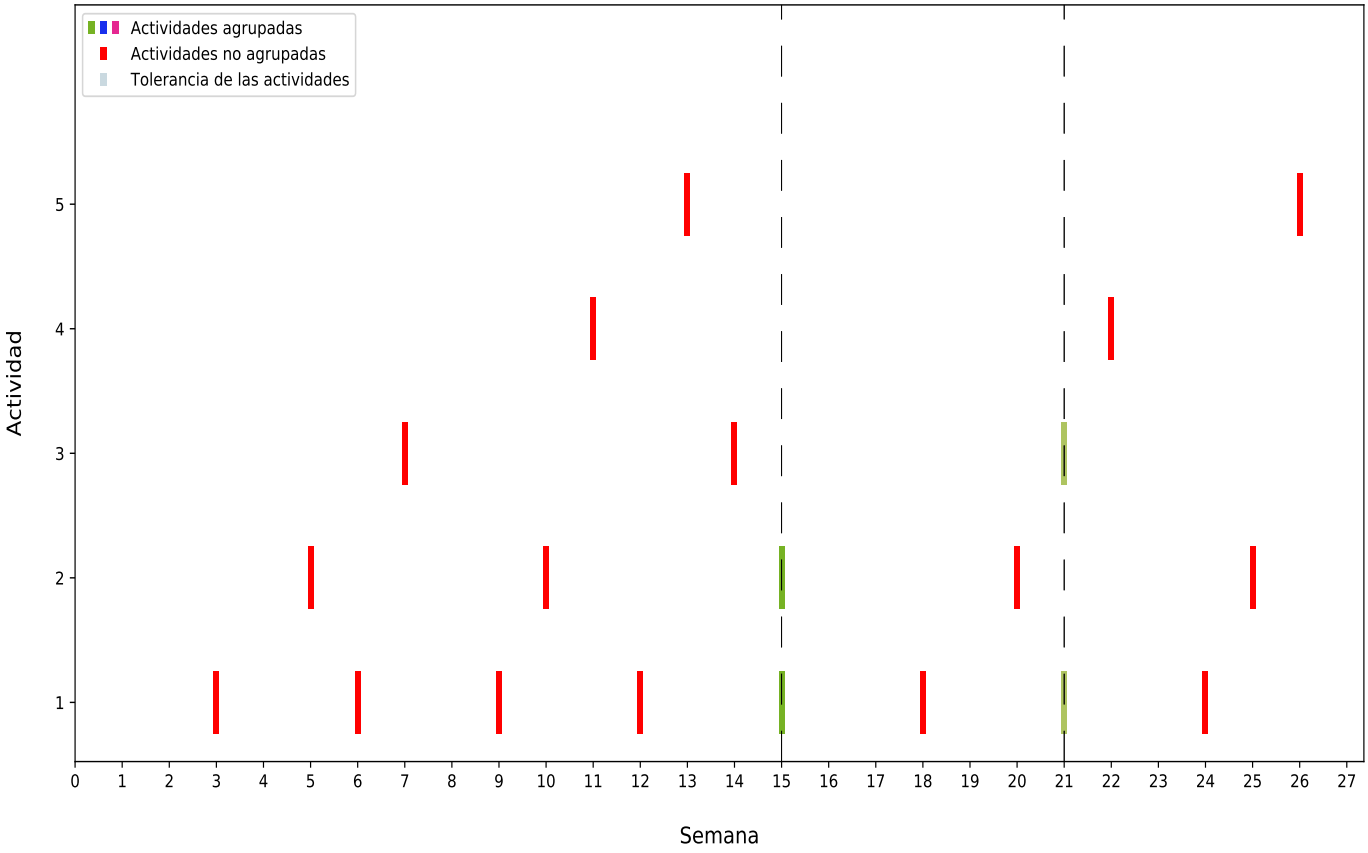

Figura A.9: Plan óptimo de actividades del Caso II sin tolerancias.

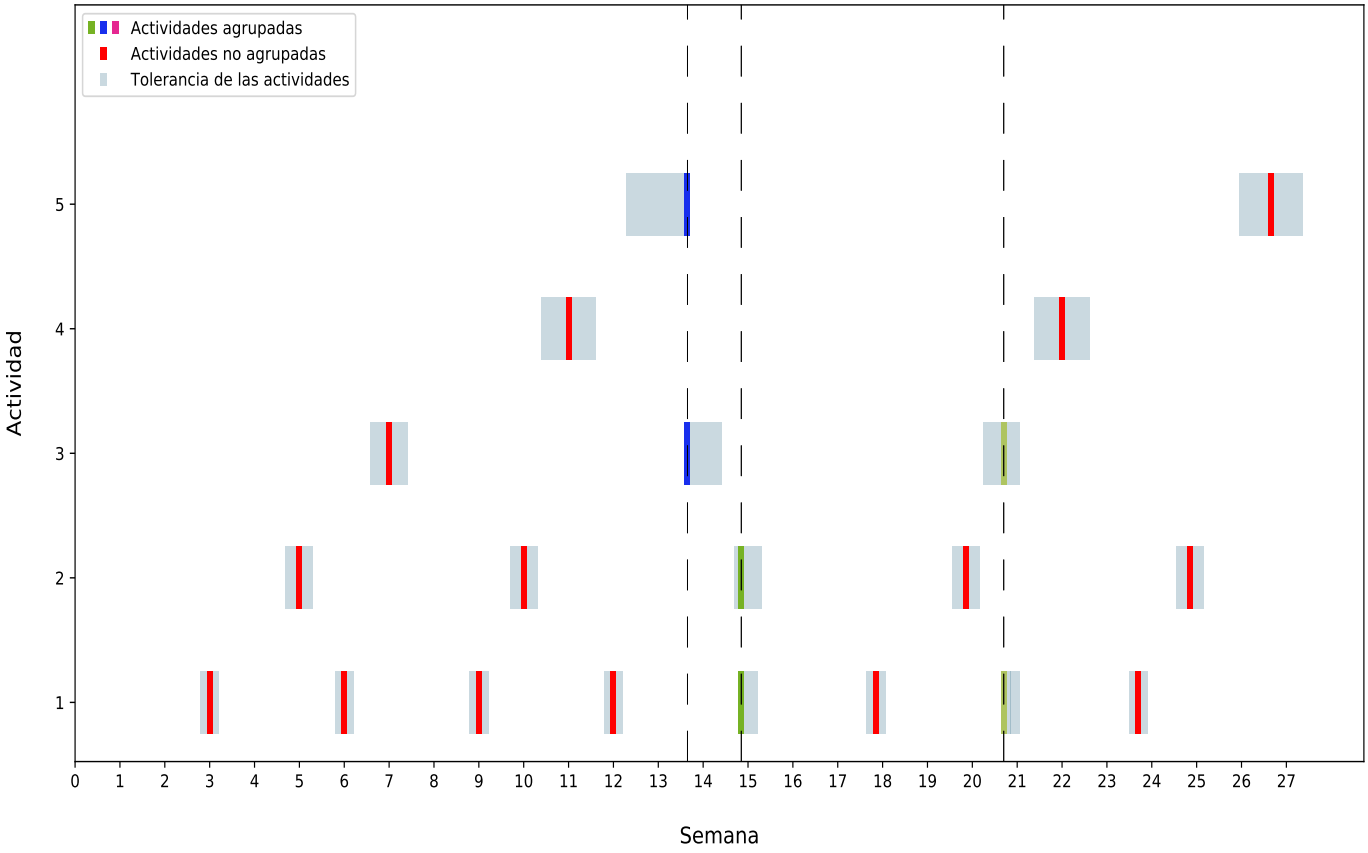

Figura A.10: Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 5 % de sus periodicidades.

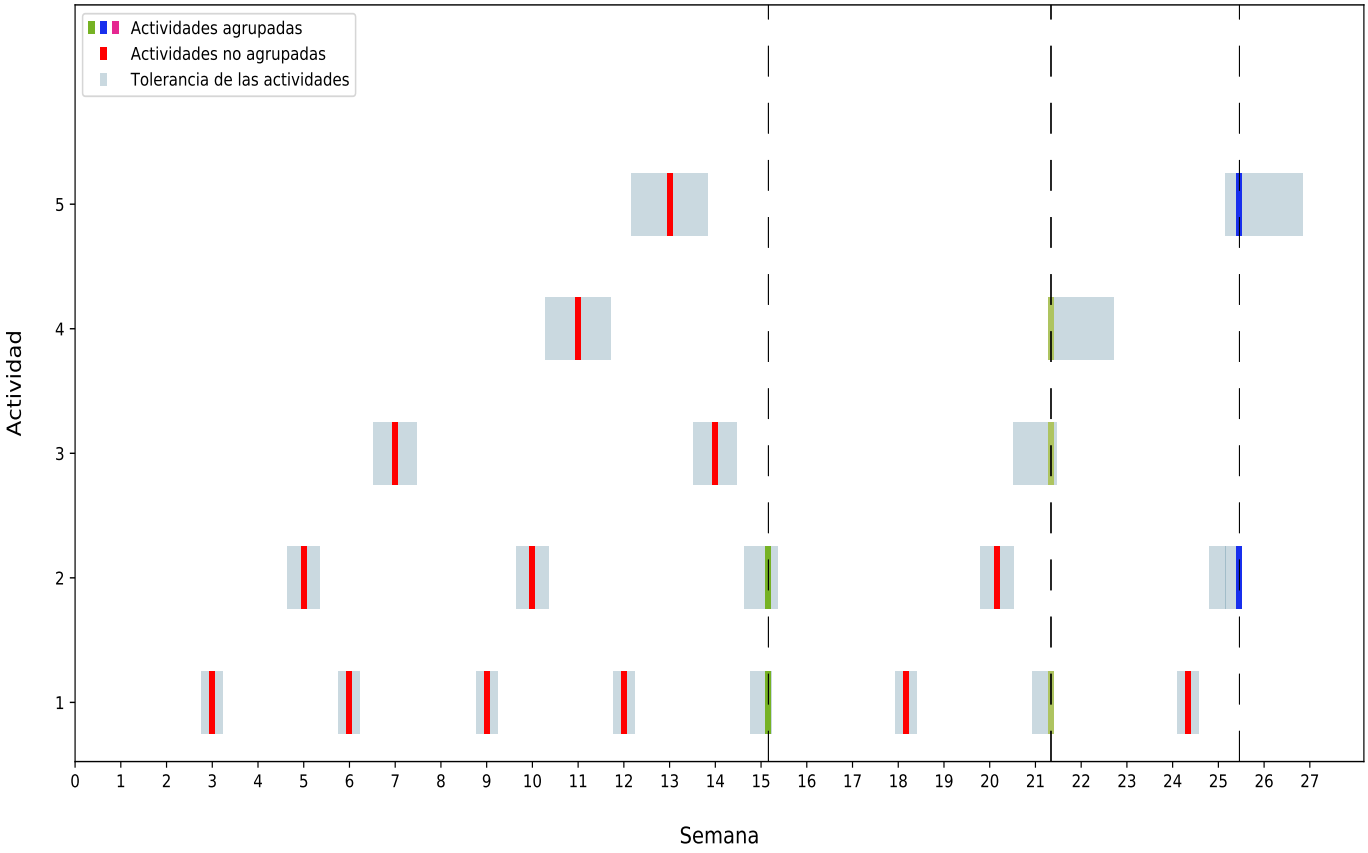

Figura A.11: Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 6 % de sus periodicidades.

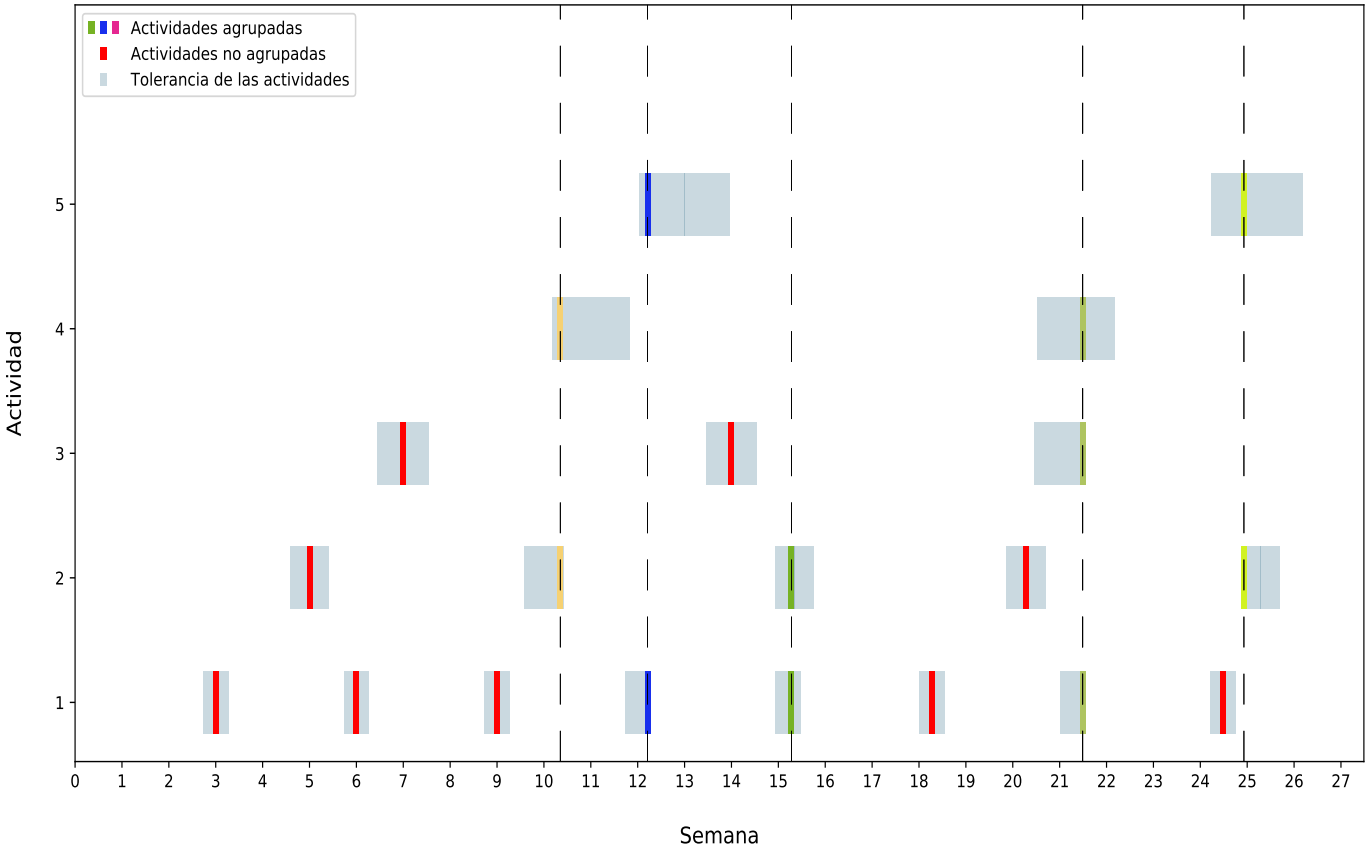

Figura A.12: Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 7 % de sus periodicidades.

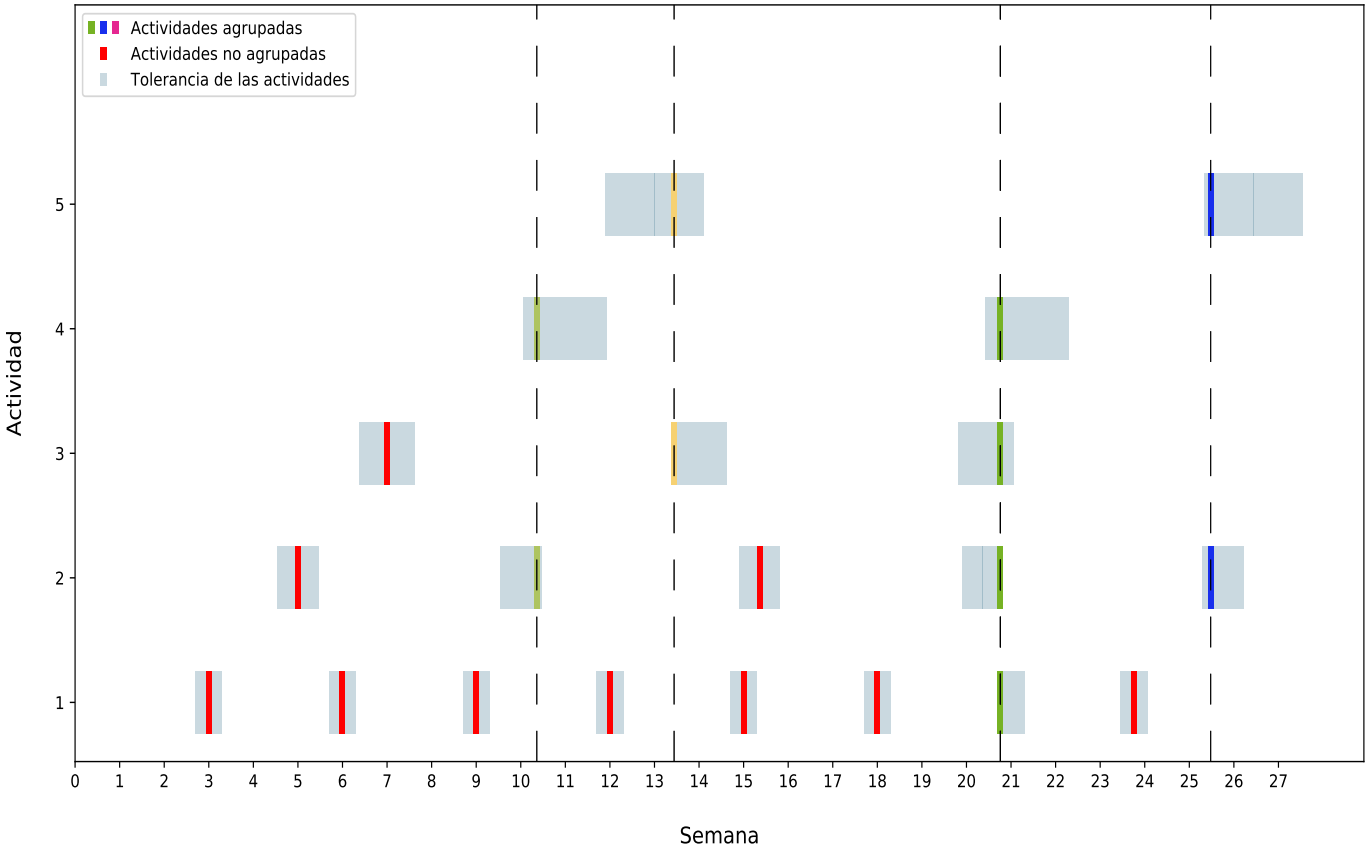

Figura A.13: Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 8 % de sus periodicidades.

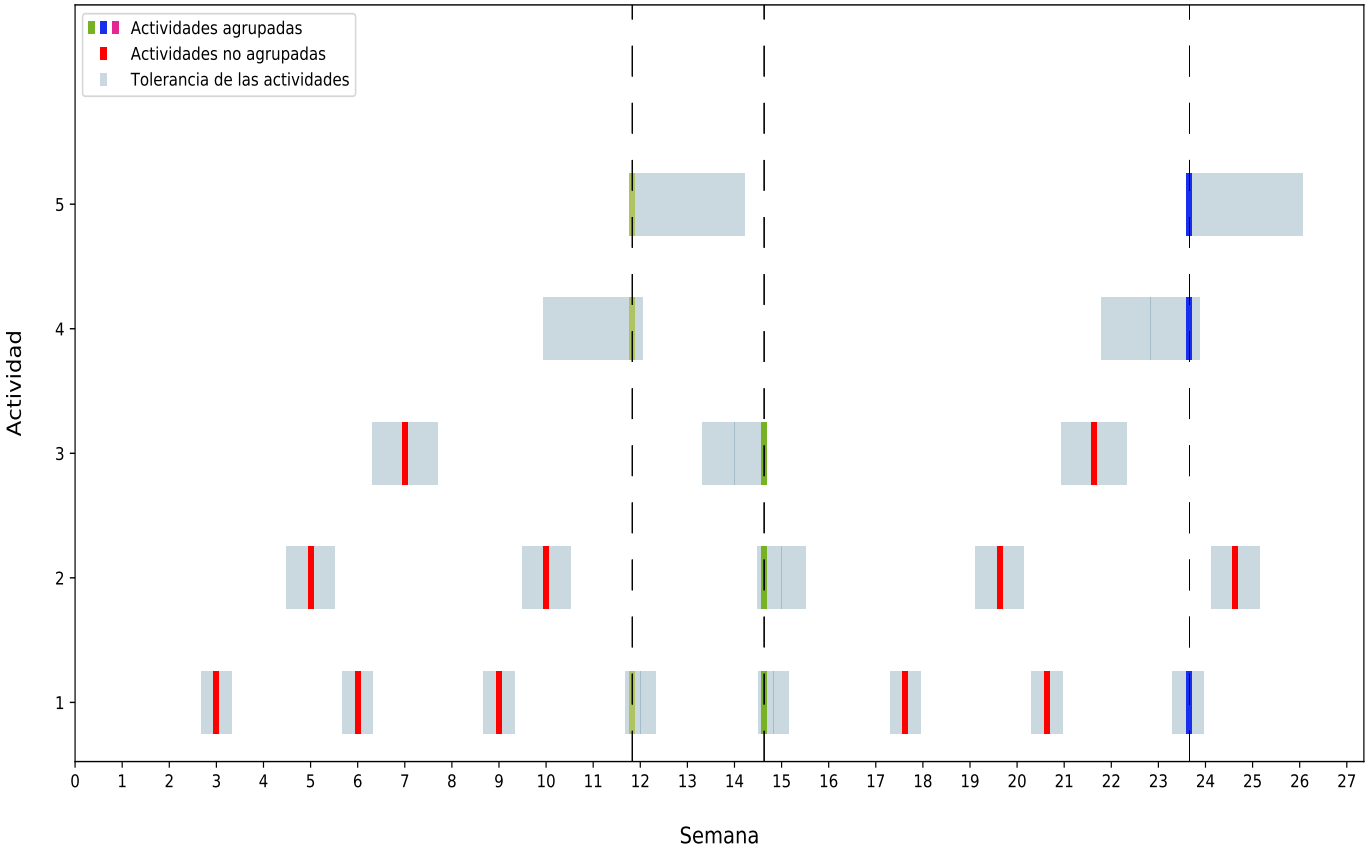

Figura A.14: Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 9 % de sus periodicidades.

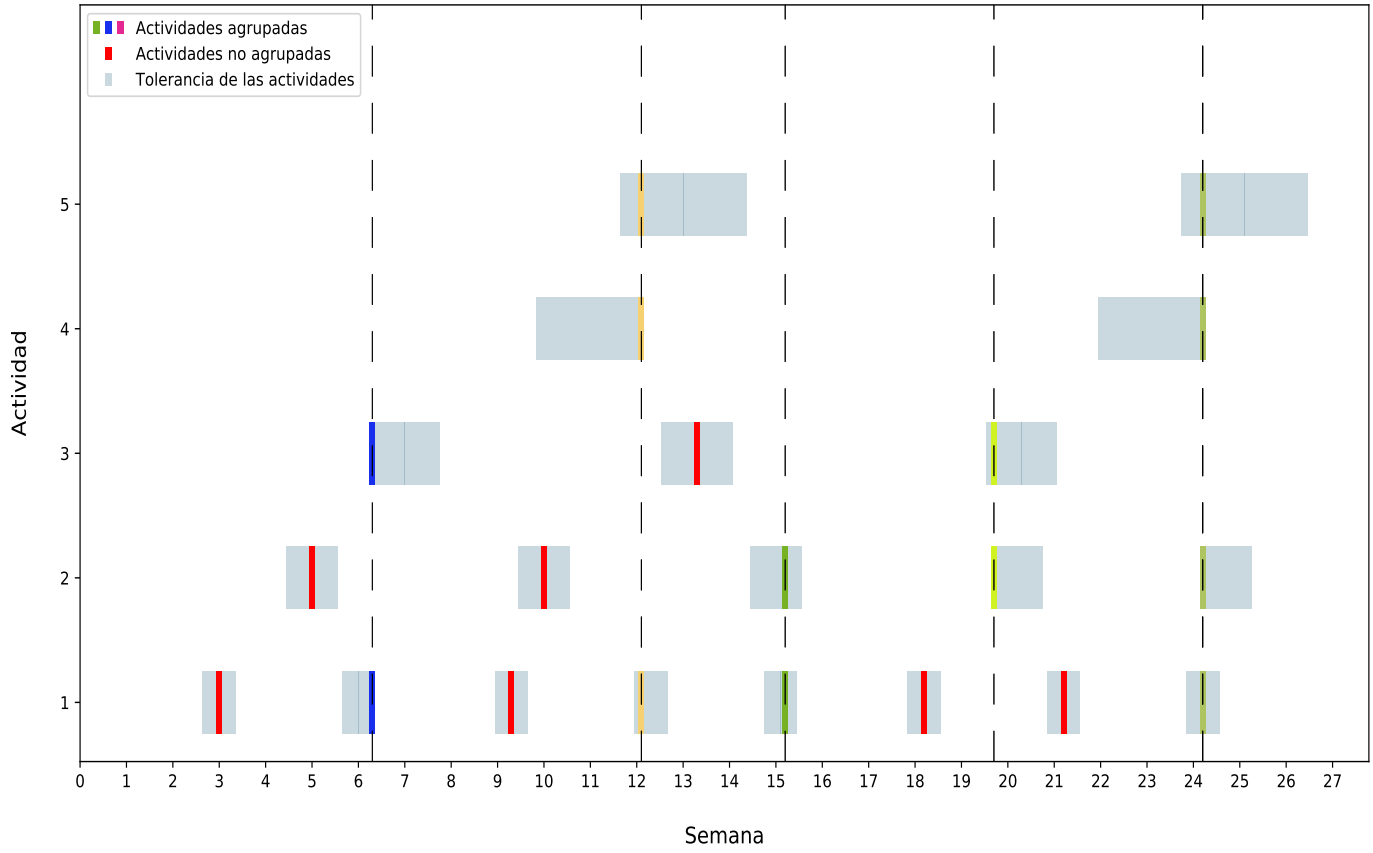

Figura A.15: Plan óptimo de actividades del Caso II con una tolerancia de ejecución del 10 % de sus periodicidades.

Tabla A.16: Disminución de ineficiencia del Caso II, para cada nivel de tolerancia dado.

Tolerancia [%]	Disminución de Ineficiencia [%]
5	5,56
6	11,11
7	22,22
8	22,22
9	22,22
10	33,33

A.4. Caso III

Tabla A.17: Instantes de ejecución de las actividades del Caso III sin tolerancias

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]]
1	2
1 - 2	4
1	6
1 - 2	8
3	9
1	10
4	11
1 - 2	12
5	13
1	14
1 - 2	16
1 - 3	18
1 - 2	20
1 - 4	22
1 - 2	24
1 - 5	26

Tabla A.18: Instantes de ejecución de las actividades del Caso III dada una tolerancia del 5 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	2
1 - 2	4
1	6
1 - 2	8
3	9
1	10
4	11
1 - 2	12
5	13
1	14
1 - 2	16
1 - 3	18
1 - 2	20
1 - 4	22
1 - 2	24
1 - 5	26

Tabla A.19: Instantes de ejecución de las actividades del Caso III dada una tolerancia del 6 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	2
1 - 2	4,1
1	6,1
1 - 2	8,22
3	9
1 - 4	10,34
1 - 2 - 5	12,46
1	14,46
1 - 2	16,58
3	18
1	18,58
1	22,68
1 - 2 - 5	24,68
1	26,68

Tabla A.20: Instantes de ejecución de las actividades del Caso III dada una tolerancia del 7 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	2
1 - 2	3,86
1	5,86
1 - 2	7,72
1 - 3	9,63
1 - 2 - 4	11,63
1 - 5	13,49
1 - 2	15,4
1	17,4
1 - 2 - 3	19,26
1	21,26
1 - 2 - 4	23,4
1	25,4
5	26,49

Tabla A.21: Instantes de ejecución de las actividades del Caso III dada una tolerancia del 8 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	2
1 - 2	4,16
1	6,16
1 - 2 - 3	8,32
1 - 4	10,48
1 - 2 - 5	12,64
1	14,64
1 - 2 - 3	16,8
1	18,8
1 - 2 - 4	20,96
1	22,96
1 - 2 - 5	24,8
1	26,8

Tabla A.22: Instantes de ejecución de las actividades del Caso III dada una tolerancia del 9 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	2
1 - 2	3,82
1	5,82
1 - 2	7,64
1 - 3	9,81
1 - 2 - 4 - 5	11,83
1	13,83
1 - 2	15,65
1	17,65
1 - 2 - 3	19,48
1	21,48
1 - 2 - 4 - 5	23,66
1	25,66

Tabla A.23: Instantes de ejecución de las actividades del Caso III dada una tolerancia del 10 % de sus periodicidades.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	2
1 - 2	4,2
1	6,2
1 - 2 - 3	8,1
1	10,1
1 - 2 - 4 - 5	12
1	14
1 - 2 - 3	16,2
1	18,2
1 - 2	20,3
1	22,3
1 - 2 - 4 - 5	24,1
1	26,1

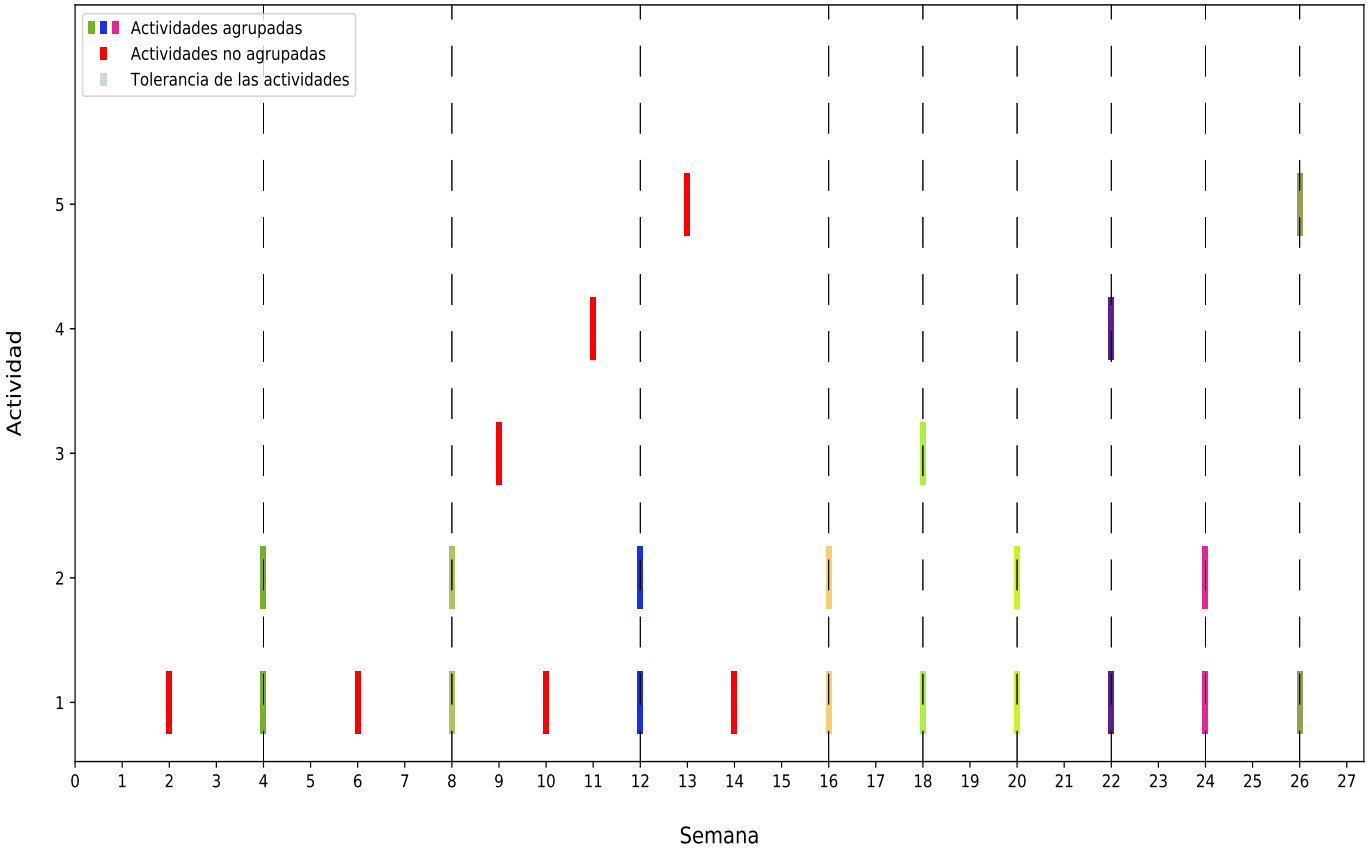

Figura A.16: Plan óptimo de actividades del Caso III sin tolerancias.

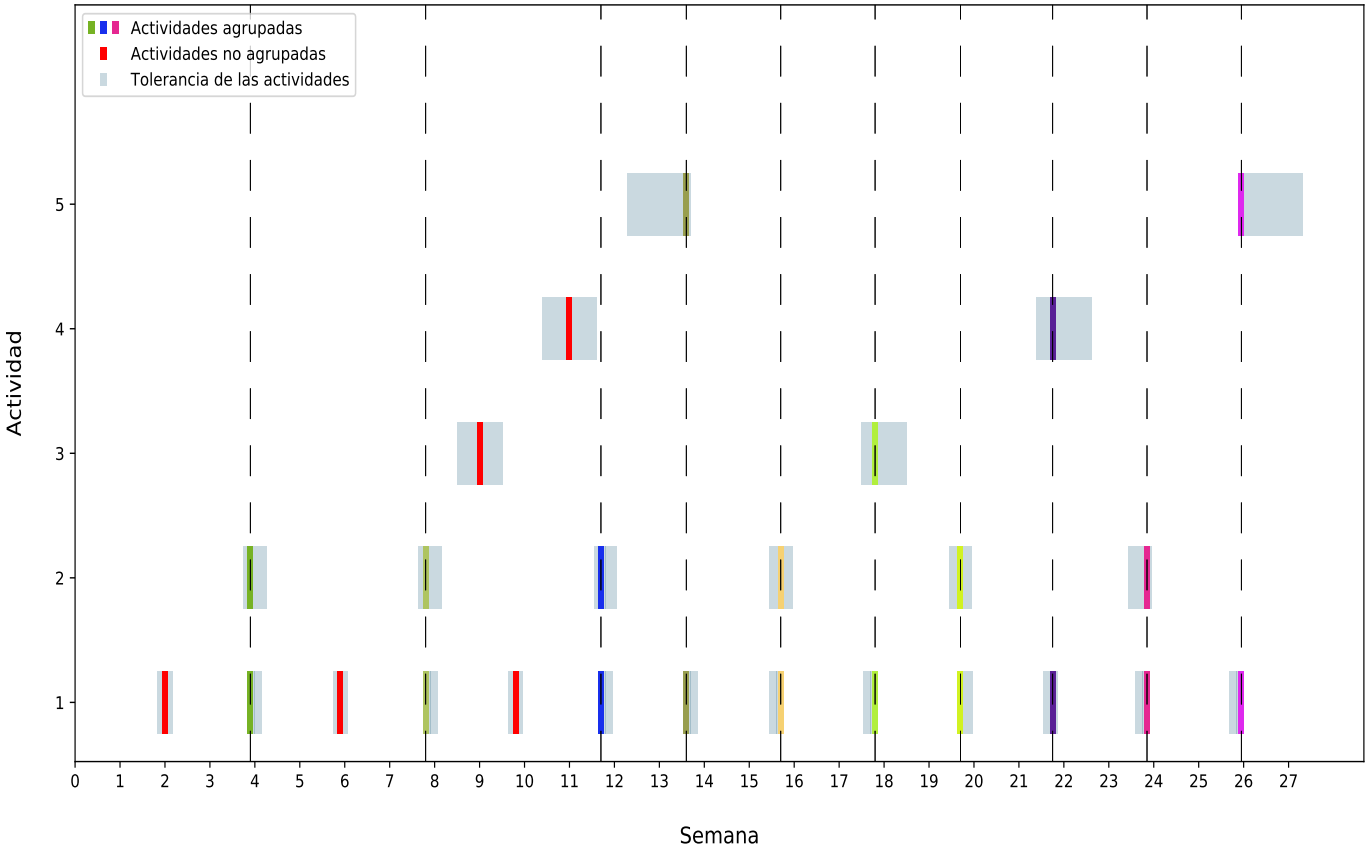

Figura A.17: Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia de ejecución del 5 % de sus periodicidades.

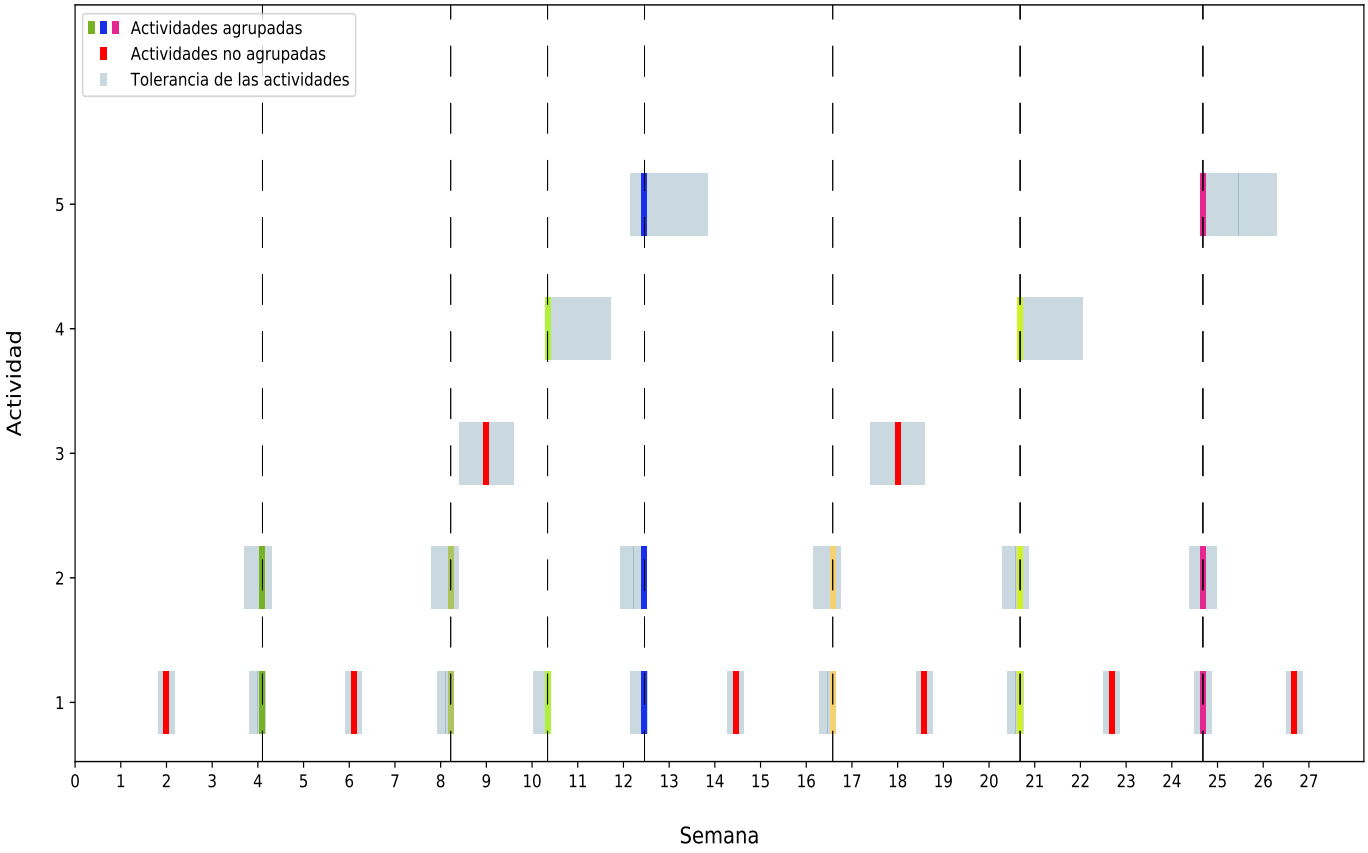

Figura A.18: Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia de ejecución del 6 % de sus periodicidades.

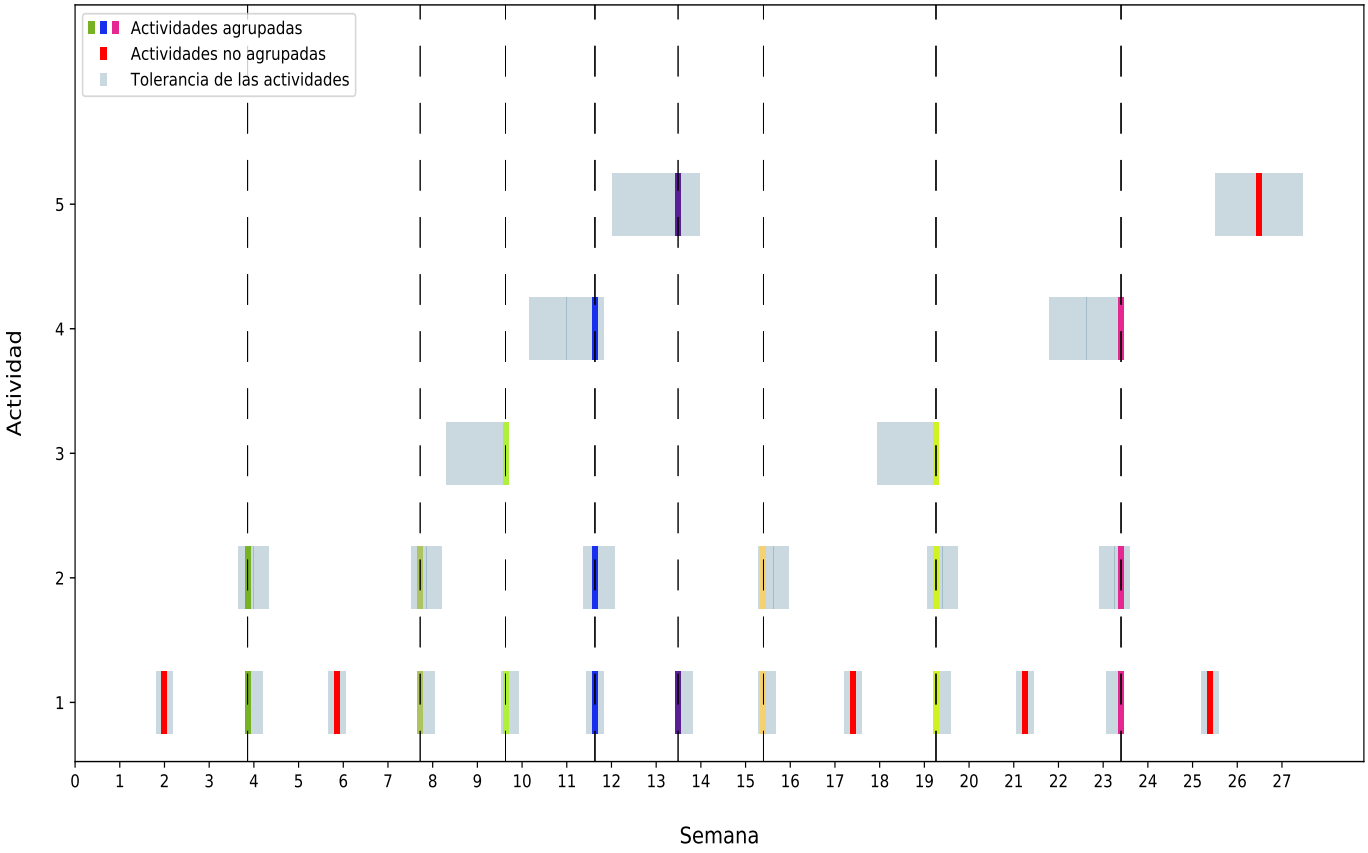

Figura A.19: Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia de ejecución del 7 % de sus periodicidades.

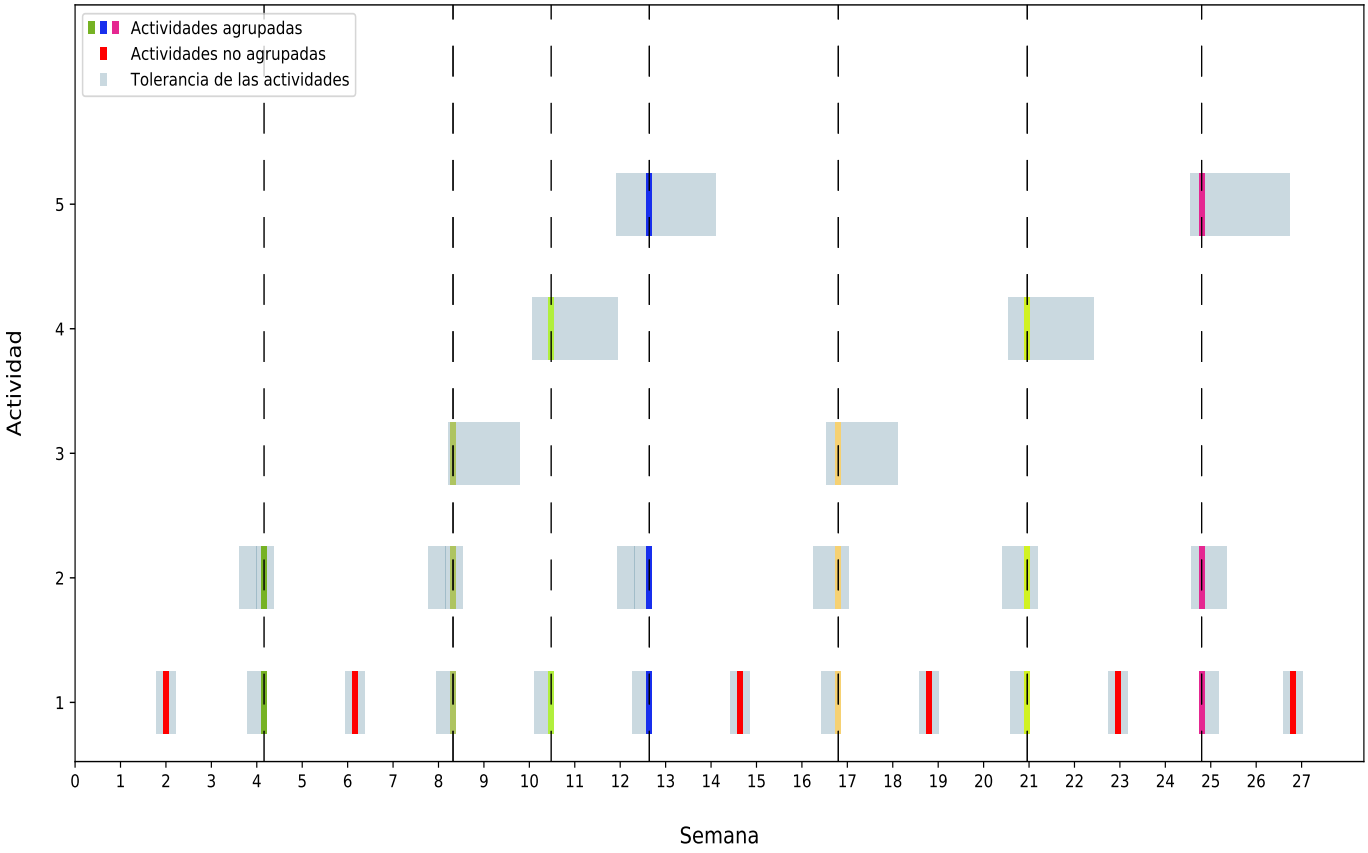

Figura A.20: Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia de ejecución del 8 % de sus periodicidades.

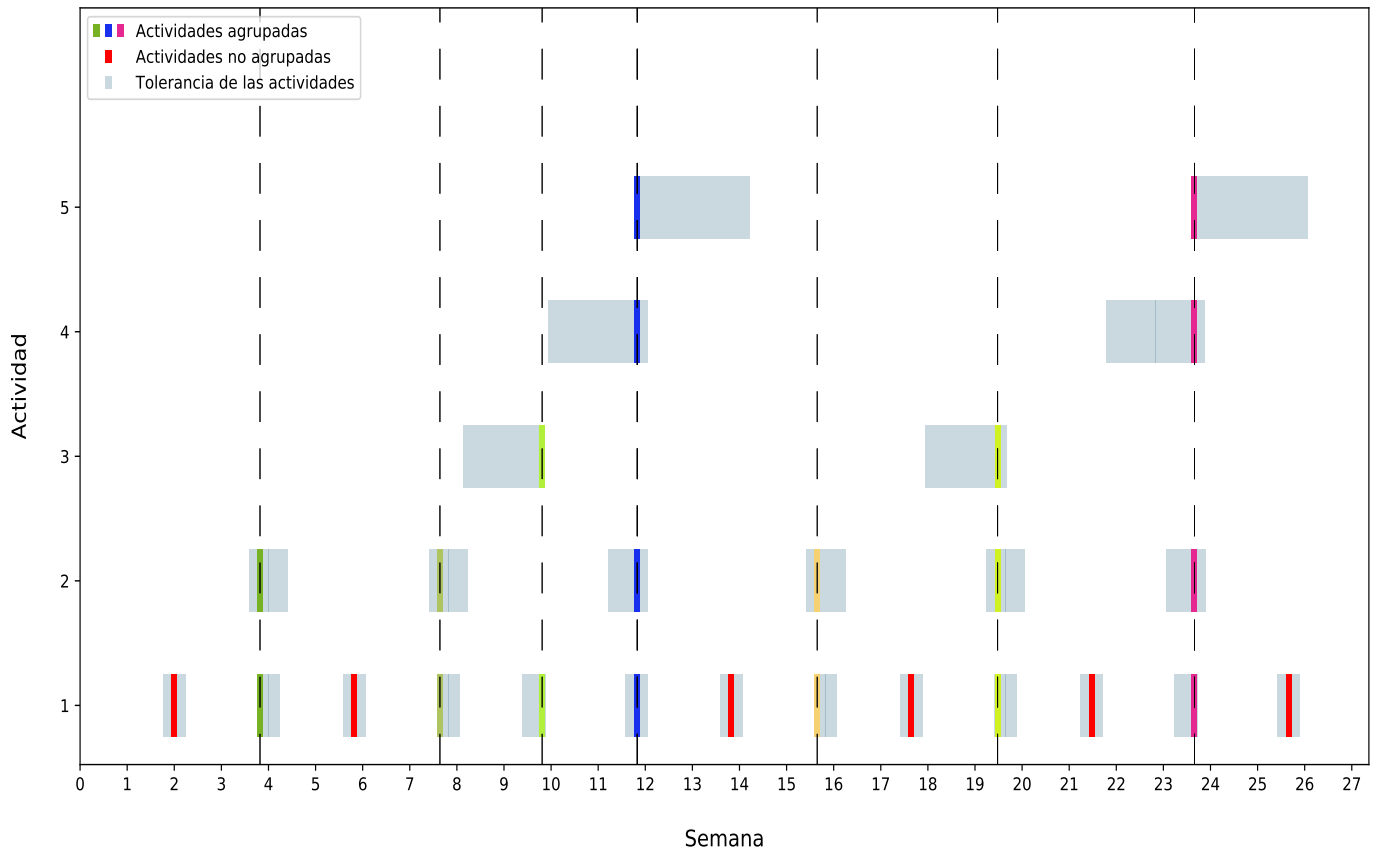

Figura A.21: Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia de ejecución del 9 % de sus periodicidades.

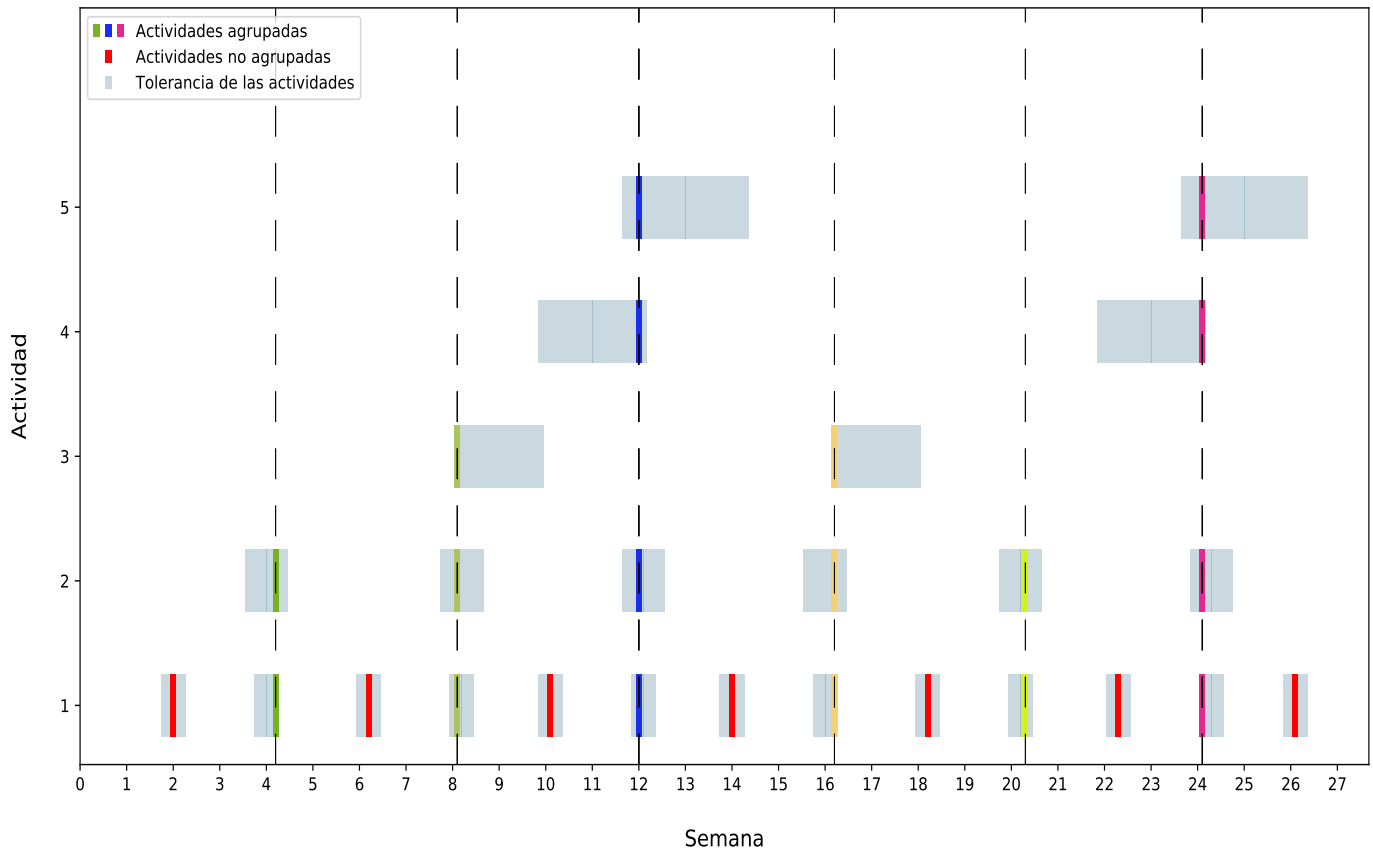

Figura A.22: Plan óptimo de actividades del Caso III con una tolerancia de ejecución del 10 % de sus periodicidades.

Tabla A.24: Disminución de ineficiencia del Caso III, para cada nivel de tolerancia dado.

Tolerancia [%]	Disminución de Ineficiencia [%]
5	6,25
6	6,25
7	12,5
8	18,75
9	18,75
10	18,75

Tabla A.25: Instantes de ejecución de las actividades del Caso II dada una tolerancia rígida

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	3
2	5
1	6
3	7
1	9
2	10
1 - 4 - 5	12
3	14
1 - 2	15
2	20
1 - 3	21
1 - 4 - 5	24
2	25

Tabla A.26: Tolerancias rígidas óptimas según las actividades del Caso II.

Actividad [%]	Tolerancia óptima [%]
1	0
2	0
3	0
4	9
5	8

Tabla A.27: Instantes de ejecución de las actividades del Caso III dada una tolerancia rígida.

Actividades ejecutadas	Instante de ejecución [*semana*]
1	2
1 - 2	4
1	6
1 - 2	8
3	9
1	10
1 - 2 - 4 - 5	12
1	14
1 - 2	16
1 - 3	18
1 - 2	20
1	22
1 - 2 - 4 - 5	24
1	26

Tabla A.28: Tolerancias rígidas óptimas según las actividades del Caso III.

Actividad [%]	Tolerancia óptima [%]
1	0
2	0
3	0
4	9
5	8

Tabla A.29: Indicador y disminución de ineficiencia para el Caso II y III.

Caso	Número de intervenciones	Disminución de Ineficiencia [%]
II	14	28,57 %
III	14	14,29 %