

Proyecto Fin de Grado

Ingeniería de Organización Industrial

Planificación óptima de entrenamientos en una ciudad deportiva de fútbol

Autor: Belén Navarro Carmona

Tutor: José David Canca Ortiz

Dep. Organización Industrial y Gestión de Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Grado
Ingeniería de Organización Industrial

fútbol

Autor:

Belén Navarro Carmona

Tutor:

José David Canca Ortiz

Catedrático de Universidad

Dep. Organización y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Grado: fútbol

Autor: Belén Navarro Carmona

Tutor: José David Canca Ortiz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Resumen

Este proyecto aborda la planificación del calendario de entrenamientos de una escuela o cantera de fútbol base de modo que se optimicen tanto los resultados deportivos de los diferentes equipos y deportistas como el aprovechamiento de las instalaciones de las que disponga el club específico.

El proyecto se encuentra desarrollado en dos partes fácilmente diferenciables. La primera es una etapa teórica en la cual se hace una descripción genérica, en la medida de lo posible, del problema y se desarrollan los modelos de programación lineal a través de los cuales se resolverá un problema concreto en la segunda etapa. Este problema es la programación de los entrenamientos de los equipos que componen la cantera del Sevilla Fútbol Club.

Índice

Resumen	ix
Índice	x
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xiv
Notación	xv
1 Objeto del proyecto	1
2 Estado del arte	3
2.1 “Sports timetabling”	3
2.2 “Education timetabling”	4
3 Definición del problema general	7
3.1 Recursos disponibles	7
3.2 Utilización de los recursos	9
3.3 Decisiones técnicas	10
4 Método de resolución seleccionado	11
5 Modelo simple	13
5.1 Definición de conjuntos	13
5.1.1 Equipos	13
5.1.2 Tiempo	13
5.1.3 Campos	14
5.2 Definición de parámetros	14
5.2.1 Equipos	14
5.2.2 Tiempo	14
5.3 Variables	15
5.4 Restricciones	15
5.4.1 Incompatibilidad de entrenamiento sencillo y completo	15
5.4.2 Asignación de un equipo a un único turno en un día	15
5.4.3 Entrenamiento en campo completo	15
5.4.4 Número de entrenamientos	15
5.4.5 Capacidad	16
5.4.6 Entrenamientos viernes	16
5.4.7 Entrenamientos en la tarde/noche	16
5.4.8 Equipos con transporte	16
5.4.9 Fútbol siete (7) en el primer turno	16

5.5	<i>Función objetivo I</i>	17
5.6	<i>Función objetivo II</i>	17
5.7	<i>Función objetivo III</i>	17
5.8	<i>Desarrollo modelo simple</i>	17
5.9	<i>Limitaciones del modelo</i>	18
6	Modelo complejo fase I	19
6.1	<i>Conjuntos</i>	19
6.1.1	Tiempo	19
6.2	<i>Modificación de parámetros</i>	19
6.2.1	Equipos	19
6.3	<i>Variables</i>	19
6.4	<i>Restricciones</i>	20
6.4.1	Campo sencillo o completo.	20
6.4.2	Entrenamiento en campo completo.	20
6.4.3	Número de entrenamientos semanales	21
6.4.4	Capacidad	21
6.4.5	Entrenamientos fútbol siete (7) los viernes	21
6.4.6	Entrenamientos fútbol siete (7) tarde/noche	21
6.4.7	Equipos con jugadores en ruta	22
6.4.8	Un tipo de entrenamiento diario.	22
6.4.9	Turno de inicio del entrenamiento.	22
6.4.10	Número de turnos diario.	22
6.4.11	Ocupación de turnos.	22
6.4.12	Un tipo de ocupación por turno.	23
6.4.13	Tecnificación en campo sencillo.	23
6.5	<i>Función objetivo I</i>	23
6.6	<i>Función objetivo II</i>	23
6.7	<i>Función objetivo III</i>	24
6.8	<i>Modelo versión compleja fase I</i>	24
6.9	<i>Solución que se obtiene</i>	25
7	Modelo complejo fase II	27
7.1	<i>Definición de conjuntos</i>	27
7.1.1	Equipos	27
7.1.2	Tiempo	27
7.1.3	Campos	27
7.2	<i>Definición de parámetros</i>	27
7.2.1	Equipos	28
7.2.2	Equipos y campos	28
7.2.3	Equipos y turnos	28
7.2.4	Campos	28
7.3	<i>Variables</i>	28
7.4	<i>Restricciones</i>	29
7.4.1	Un único campo	29
7.4.2	Número de cuadrantes diario	29
7.4.3	Número de cuadrantes por turno	29
7.4.4	Capacidad del campo	29
7.4.5	Un único equipo	29
7.4.6	Número de turnos	30
7.4.7	Césped natural	30
7.4.8	Césped artificial	30
7.5	<i>Función objetivo I</i>	30
7.6	<i>Función objetivo II</i>	30

7.7	<i>Modelo versión compleja fase II</i>	31
7.8	<i>Conclusiones</i>	31
8	Definición del problema concreto	33
8.1	<i>Equipos que componen la cantera del Sevilla Fútbol Club</i>	33
8.1.1	Prioridad de los equipos	34
8.2	<i>Instalaciones disponibles</i>	34
8.2.1	Entrenamientos a campo completo	36
8.2.2	Capacidad del gimnasio	36
8.2.3	Estadio Jesús Navas	36
8.2.4	Campo dos	36
8.2.5	Campo tres	36
8.2.6	Campo cuatro	36
8.2.7	Campo seis	37
8.2.8	Campos destinados a la Escuela de Fútbol Sevilla FC Antonio Puerta	37
8.2.9	Campos nueve y diez	37
8.2.10	Campo once	37
8.2.11	Campos destinados al entrenamiento de porteros	37
8.3	<i>Fundamento deportivo de las restricciones</i>	37
8.3.1	El número de entrenamientos	38
8.3.2	Tipología del campo	39
8.3.3	Día de descanso preferente	39
8.3.4	Duración de los entrenamientos	39
8.3.5	Planificación entrenamientos específicos	40
8.3.6	Planificación entrenamientos de fuerza	40
8.3.7	Entrenamientos de fuerza categoría “infantil”	40
8.3.8	Entrenamientos de fuerza equipos “Liga Nacional”, “Cadete A” e “Infantil A”	40
8.3.9	Días de partido	40
8.4	<i>Horarios prefijados</i>	40
8.5	<i>Restricciones relativas al factor humano</i>	41
8.5.1	Desplazamientos en autobús	41
8.5.2	Horarios del fútbol siete	42
8.5.3	Restricciones relacionadas con la disponibilidad del personal	42
9	Resolución modelo simple	43
9.1	<i>Maximización del descanso preferente</i>	43
9.2	<i>Conclusiones obtenidas</i>	43
10	Resolución modelo complejo fase I	45
10.1	<i>Maximización del descanso preferente</i>	45
10.1.1	Conclusiones de la maximización del descanso	50
10.2	<i>Maximización del entrenamiento en campo completo</i>	50
10.2.1	Conclusiones de la maximización del campo completo	56
10.3	<i>Maximización del inicio en el primer turno</i>	56
10.3.1	Conclusiones de la maximización del primer turno	61
11	Resolución modelo complejo fase II	63
11.1	<i>Distribución de campos sin equilibrio</i>	63
11.2	<i>Distribución de campos con equilibrio</i>	64
12	Conclusiones	67
	Referencias	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Equipos que componen la cantera	34
Tabla 2. Orden de prioridad de los equipos	34
Tabla 3. Número de entrenamientos básicos de los equipos masculinos	38
Tabla 4. Número de entrenamientos básicos de los equipos femeninos	38
Tabla 5. Número de entrenamientos específicos de los equipos masculinos	38
Tabla 6. Número de entrenamientos específicos de los equipos femeninos	39
Tabla 7. Horario actual de entrenamientos	41
Tabla 8. Pesos en función de la prioridad	43
Tabla 9. Primera resolución: horario	44
Tabla 10. Tipo de campo y entrenamiento del lunes: maximización descanso	46
Tabla 11. Tipo de campo y entrenamiento del martes: maximización descanso	47
Tabla 12. Tipo de campo y entrenamiento del miércoles: maximización descanso	48
Tabla 13. Tipo de campo y entrenamiento del jueves: maximización descanso	49
Tabla 14. Tipo de campo y entrenamiento del viernes: maximización descanso.	50
Tabla 15. Tipo de campo y entrenamiento del lunes: maximización campo completo	51
Tabla 16. Tipo de campo y entrenamiento del martes: maximización campo completo	52
Tabla 17. Tipo de campo y entrenamiento del miércoles: maximización campo completo	53
Tabla 18. Tipo de campo y entrenamiento del jueves: maximización campo completo	54
Tabla 19. Tipo de campo y entrenamiento del viernes: maximización campo completo	55
Tabla 20. Tipo de campo y entrenamiento del lunes: maximización primer turno	57
Tabla 21. Tipo de campo y entrenamiento del martes: maximización primer turno	58
Tabla 22. Tipo de campo y entrenamiento del miércoles: maximización primer turno	59
Tabla 23. Tipo de campo y entrenamiento del jueves: maximización primer turno	60
Tabla 24. Tipo de campo y entrenamiento del viernes: maximización primer turno	61
Tabla 25. Preferencias de campos	63
Tabla 26. Asignación de campos sin penalización I	63
Tabla 27. Asignación de campos sin penalización II	63
Tabla 28. Asignación de campos con penalización I	64
Tabla 29. Asignación de campos con penalización II	64
Tabla 31. Utilización de campos sin equilibrio	64
Tabla 32. Utilización de campos con equilibrio	65

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Relación campos fútbol 7 y fútbol 11	7
2. División en cuadrantes	9
3. Localización Ciudad Deportiva J.R. Cisneros Palacios	35
4. Campos de la Ciudad Deportiva J. R. Cisneros Palacios	35
5. Horario del lunes: maximización descanso	45
6. Horario del martes: maximización descanso	46
7. Horario del miércoles: maximización descanso	47
8. Horario del jueves: maximización descanso	48
9. Horario del viernes: maximización descanso	49
10. Horario del lunes: maximización campo completo	51
11. Horario del martes: maximización campo completo	52
12. Horario del miércoles: maximización campo completo	53
13. Horario del jueves: maximización campo completo	54
18. Horario del viernes: maximización campo completo	55
20. Horario del lunes: maximización primer turno	56
22. Horario del martes: maximización primer turno	57
24. Horario del miércoles: maximización primer turno	58
26. Horario del jueves: maximización primer turno	59
28. Horario del viernes: maximización primer turno	60

NOTACIÓN

PA	Prebenjamín A
PB	Prebenjamín B
BA	Benjamín A
BB	Benjamín B
BC	Benjamín C
BD	Benjamín D
AA	Alevín A
AB	Alevín B
AC	Alevín C
AD	Alevín D
AE	Alevín E
IA	Infantil A
IB	Infantil B
IC	Infantil C
CA	Cadete A
CB	Cadete B
CC	Cadete C
JC	Juvenil C
LN	Liga Nacional
FB	Femenino B
FC	Femenino C
FD	Femenino D

1 OBJETO DEL PROYECTO

El trabajo que se desarrolla a lo largo de los capítulos siguientes parte de la necesidad de organizar el funcionamiento de las ciudades deportivas de los diferentes clubes de fútbol que se encuentran repartidas por todo el mundo.

El concepto de ciudad deportiva hace referencia a una extensión de terreno en la cual un club deportivo construye sus instalaciones de entrenamiento y, en muchas ocasiones, sus oficinas. El objeto de este proyecto es abordar la planificación de entrenamientos de los diferentes equipos que entrenan en una ciudad deportiva de fútbol, aunque el núcleo del modelo podría abstraerse y ser aplicado a numerosos deportes, añadiendo y o modificando algunas de sus restricciones para adaptarlo a otro deporte concreto.

Al establecer una organización eficaz y eficiente de las instalaciones de las cuales dispone el club, se pretende por una parte mejorar el rendimiento deportivo de los diferentes equipos que realizan allí sus entrenamientos y por otra parte optimizar el uso que se da a las diferentes zonas de entrenamiento de las que se dispone, de forma que se minimice su desgaste, se maximice su aprovechamiento y de esta forma se saque el máximo partido de los recursos con los que cuenta cada club.

Para abordar la resolución de este problema se ha optado por la resolución de un modelo de programación lineal mixta-entera, basado en un conjunto de problemas que se encuentran frecuentemente en la literatura bajo el nombre de "Educational Timetabling". En este proyecto se elabora en primer lugar un modelo sencillo que sirve como aproximación al problema y como base para la elaboración de un modelo posterior mucho más complejo que se resuelve en dos fases, una primera en la que únicamente se elabora un horario de entrenamientos determinado y una segunda fase en la cual se asigna una instalación específica a cada entrenamiento.

Tras definir los diferentes modelos, éstos han sido aplicados a un problema concreto en el que se ha tratado de optimizar el funcionamiento de la ciudad deportiva del Sevilla Fútbol Club. Para ello, se ha realizado en primer lugar un trabajo de campo con el que se han obtenido los datos necesarios para la resolución, a continuación se han resuelto los diferentes modelos y se han presentado los resultados al club, quienes han dado su opinión al respecto y han colaborado en una búsqueda interactiva de la solución que más se adapta a sus preferencias.

2 ESTADO DEL ARTE

Uno de los problemas que con mayor frecuencia se encuentra en la literatura referente a la Investigación de Operaciones es el problema de asignación de horarios o secuenciación. Esta tipología abarca numerosas subcategorías, todas ellas con la intención de asignar unas tareas determinadas a un intervalo temporal. Las tareas tienen una duración determinada y en un elevado número de ocasiones necesitan de la utilización de algunos recursos para su desarrollo.

Entre las aplicaciones que más se han estudiado a lo largo de los años podemos destacar la determinación de los horarios de trabajo de las enfermeras, la planificación del uso de los diferentes quirófanos de un hospital, la asignación de los turnos de diálisis de un conjunto de pacientes, el establecimiento de los exámenes de una universidad, la planificación de los horarios de las clases de un centro educativo, la secuenciación de salidas y llegadas de los aviones de un aeropuerto, etc.

En el ámbito deportivo, que es el que nos atañe en este proyecto, podemos encontrar numerosos estudios sobre la organización de la liga profesional de fútbol de diferentes países y sobre la organización de cuantiosos torneos dispares, pero no se han encontrado estudios que aborden el problema concreto que se desea resolver en este proyecto.

Cada una de estas subcategorías de problemas tiene características propias que la hacen única y diferente al resto. Tras hacer un estudio de las subcategorías más frecuentes y que a priori más similitudes podían tener con nuestro problema, se ha decidido tomar como referencia el amplio conjunto de estudios que tratan sobre la planificación de los horarios en las escuelas y universidades.

2.1 “Sports timetabling”

Si nos adentramos en el estudio de los problemas de secuenciación o planificación que se aplican al ámbito deportivo es frecuente que nos encontremos con estudios que tratan de establecer un calendario óptimo a una liga determinada, ya sea de fútbol profesional, fútbol base, baloncesto e incluso cricket. Entre esta serie de artículos podemos destacar por una parte, la planificación de la liga de fútbol profesional de Australia (Kynghäus et al., 2017), de la liga de fútbol profesional de Bélgica (Goossens & Spieksma, 2009) y de la liga profesional de Chile (Alarcón et al., 2017), entre otros muchos que comparten una serie de características comunes. Entre estas similitudes destacaremos en primer lugar que los problemas tratan de equilibrar los desplazamientos de los diferentes equipos, de forma que los clubes que se encuentren más dispersos por la geografía del país y más alejados de la zona donde se agrupa el mayor número de equipos no se vean claramente perjudicados. Otro de los aspectos que se tienen en cuenta está relacionado con la climatología del país en cuestión, así, en zonas donde las condiciones meteorológicas son adversas en alguna época del año, quedan restringidos los enfrentamientos para evitar una posible cancelación del mismo. Además, los problemas que abordan la planificación de ligas de interés en las cuales hay un grueso de partidos, o incluso el total de ellos, que son televisados recogen una serie de restricciones impuestas por las cadenas de televisión como por ejemplo que no tengan lugar partidos que se solapen en horario para que la audiencia no quede repartida en ningún caso. Otra característica común a estos problemas es la consideración de la belleza o el interés de los encuentros. Todos ellos de alguna forma incluyen

en su modelo restricciones que están relacionadas con aumentar la importancia de los partidos, imponiendo, por ejemplo, que determinados partidos tengan lugar en las últimas jornadas para que se encuentre en juego algún título o clasificación. También hay que señalar que para las ligas que se juegan a doble partido es importante que el número de rupturas sea mínimo, esto significa que se respete el máximo número de veces que sea posible que cada equipo siga la secuencia de partidos: en casa, fuera, en casa, fuera, etc. En último lugar mencionaremos que en el desarrollo del problema, se suele establecer una diferenciación entre los equipos “top” y el resto que trae consigo una serie de restricciones asociada. Estos equipos corresponden a un número determinado de clubes que en la temporada anterior, y generalmente en el histórico de la liga, han quedado en las posiciones más altas de la clasificación. Las restricciones que se relacionan con este conjunto de equipos suelen buscar la justicia de la liga, tratando que cada equipo se enfrente a los equipos “top” de una forma espaciada en el tiempo y alternando jugar en casa y fuera, para poder beneficiarse de la ventaja que implica disputar el encuentro en el propio estadio.

Otra tipo de problemas mencionado pretende desarrollar un calendario para una liga de fútbol amateur, con las consiguientes diferencias que estos tienen respecto a la planificación de una liga que, si bien es del mismo deporte, no comparte generalmente muchas características con las anteriores desarrolladas. Este tema no se encuentra muy estudiado en la literatura revisada pero creemos que merece la pena su mención. Para abordarlo, nos basaremos en el estudio realizado por (Van Bulck, Goossens, & Spieksma, 2018) sobre una liga de fútbol indoor amateur y mencionaremos algunas de sus características principales que hacen que sea diferente a las ligas profesionales. En primer lugar, los jugadores de estas ligas no son profesionales sino que deben compaginar los encuentros con sus trabajos y su conciliación familiar, de modo que una restricción fuerte de este tipo de problemas es que los partidos se desarrollen en períodos de tiempo en los que para los jugadores de ambos equipos encontrados sea posible asistir. Otra de las diferencias se encuentra en los partidos jugados dentro de casa. En este problema éstos no son una incógnita como ocurría en los anteriores sino que aquí cada equipo propicia una lista de los períodos de tiempo en los que puede tener lugar un partido local y el modelo solo se encarga de determinar los equipos rivales. La última particularidad que mencionaremos es la posibilidad de que un equipo A juegue contra otro equipo B más de una vez antes de que el equipo A se haya enfrentado al resto de equipos.

Otras ligas que son objeto de estudio son la liga Devon de cricket de Inglaterra (Wright, 2007) y la liga de cricket de Nueva Zelanda.

2.2 “Education timetabling”

En el ámbito de la educación es sencillo encontrar numerosos estudios que abordan diversos problemas que frecuentemente se encuentran agrupados en tres (3) subcategorías que comparten características comunes. El primer subgrupo recoge aquellos problemas que tratan de establecer el horario de las universidades, en el segundo se encuentran agrupados los problemas que establecen un calendario de exámenes y el último de ellos incluye a los que fijan el horario de algún centro escolar.

Entre las características que se pueden señalar sobre la primera subcategoría de problemas se encuentra que su horizonte temporal es semestral y, por tanto, el modelo que se plantee deberá resolverse en dos (2) ocasiones para otorgar una solución óptima global del problema. Otra característica es que los alumnos en la universidad tienen flexibilidad de elección de asignaturas y el calendario estará principalmente condicionado por el número de alumnos que seleccionen las diferentes asignaturas propuestas y por las diversas combinaciones de asignaturas que elijan, ya que el calendario deberá procurar que los alumnos tengan la posibilidad de asistir al total de asignaturas en las cuales se encuentren matriculados y que no se produzca, por el contrario, solapamiento entre clases.

El conjunto de problemas que se recogen en la segunda subcategoría tratan de asignar exámenes a aulas concretas. Principalmente deben solventar el problema de la capacidad, es decir, el aula asignada debe ser apta para albergar al total de alumnos que deban hacer el examen. Habrá ocasiones en las que una misma aula pueda contener dos exámenes, hecho que no suele producirse con las clases, puesto que diferentes exámenes no interfieren entre ellos y diferentes clases si pueden hacerlo.

Por último, la categoría de problemas que trata de fijar el horario de algún centro escolar tiene una serie de características comunes que, como se explica a continuación, presentan numerosas analogías con el problema que se pretende resolver en este proyecto. Uno de los actores principales de este tipo de problemas son las

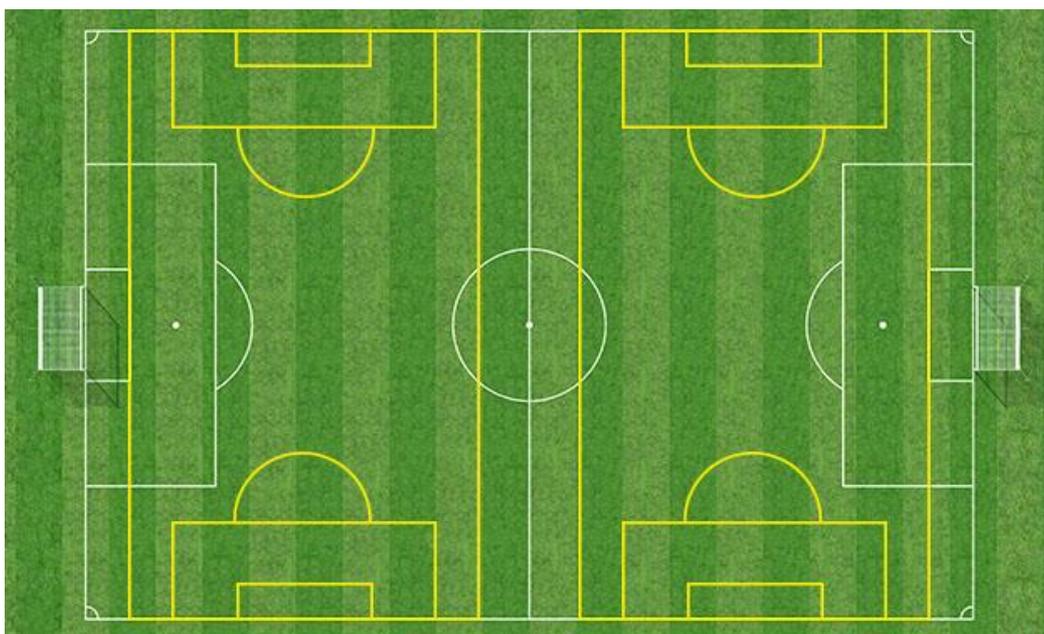
“clases”, entendidas como un grupo de estudiantes que reciben una asignatura concreta. Análogamente se definirá un “equipo” entendido como un grupo de jugadores que recibe un entrenamiento concreto. En ambos problemas se definen periodos de tiempo en los que en un caso se desarrolla la enseñanza de alguna asignatura y en el otro caso tiene lugar un entrenamiento. En esta tipología de problemas será necesario asignar en primer lugar las clases a unas materias unos días concretos y en segundo lugar asignarles un aula. En nuestro caso estableceremos un horario de entrenamientos y posteriormente asignaremos un campo. En cuanto a las restricciones también hay numerosas de ellas que se comparten, como por ejemplo el hecho de que no pueda asignarse más de una asignatura a una clase en un mismo periodo de tiempo, lo que se extrapola a nuestro problema como que no pueda asignarse más de un tipo de entrenamiento a un equipo en un mismo periodo de tiempo (Pillay, 2014). Todo esto es lo que ha llevado a tomar esta tipología como referencia a la hora de enfrentarnos al problema objeto de estudio.

3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA GENERAL

En este capítulo se define de manera general el problema que se modelará en los capítulos siguientes, tratando de un modo detallado todos los recursos, restricciones, etc. necesarios para acercarnos de forma precisa al problema que se encuentra en el mundo real, y haciéndolo de la forma más genérica posible en aras de que pueda ser extrapolado al mayor número de clubes posible sin una modificación significativa de la definición.

3.1 Recursos disponibles

Este problema nace de la necesidad de establecer un calendario de entrenamientos óptimo para el conjunto de equipos que componen una cantera o escuela de fútbol base. El primer factor que influye en la asignación del horario es el conjunto de equipos que componen la determinada cantera o escuela. Estos equipos, en su mayoría, han de ser tratados como actores individuales debido a las dispares características que definen a unos y a otros. Algunas de ellas se repiten entre equipos, lo que nos permite establecer agrupaciones. La más importante es la diferenciación entre equipos que pertenecen a categorías de fútbol siete (7) y equipos que lo hacen a categorías de fútbol once (11). Estos dos conjuntos se diferencian fundamentalmente, en relación a nuestro problema, en la utilización que hacen del campo, ya que un campo de fútbol once (11) equivale a dos (2) campos de fútbol siete (7), como bien puede apreciarse en la ilustración 1, en la cual aparecen en blanco las líneas que definen un campo de fútbol once (11) y en amarillo las que delimitan cada uno de los dos (2) campos de fútbol siete (7) que se muestran.



1. Relación campos fútbol 7 y fútbol 11

Otro aspecto importante es la edad de los jugadores, estando la de los niños de las categorías de fútbol siete (7) comprendida entre los cinco (5) y los once (11) años y la de los niños de las categorías de fútbol once (11) entre los trece (13) y los dieciocho (18) años. Esta característica puede afectar a los horarios de entrenamiento dado que generalmente es preferible que los más pequeños no entrenen en un horario tardío. Los equipos de una escuela o cantera de fútbol pueden diferenciarse también por ser femeninos o masculinos, ya que esto puede interferir en el uso de instalaciones concretas, por ello en ocasiones los turnos de entrenamiento van establecidos de forma que no se compartan los vestuarios al mismo tiempo por chicos y chicas. Otro factor a tener en cuenta es si el club dispone de algún tipo de transporte privado que facilite a sus jugadores acudir a los entrenamientos. Cuando esto ocurre, habrá que diferenciar qué equipos cuentan entre sus filas con jugadores que hagan uso de ese servicio pues esos equipos deberán tener su entrenamiento en el horario que encaje con el servicio de transporte ofertado por el club. En último lugar, como hablaremos con más detalle a continuación, es posible y deseable que el club cuente entre sus instalaciones con campos de césped natural y campos de césped artificial. En este caso, los equipos jugarán generalmente en un tipo u otro de césped de acuerdo a la tipología que predomine en la liga a la que pertenezcan, de acuerdo al desgaste que supongan para el campo al realizar su entrenamiento, etc. Por todo ello habrá que establecer qué equipos pertenecen al conjunto de aquellos que juegan en césped artificial y cuales lo hacen al conjunto de los que juegan en césped natural.

El siguiente recurso a tener en cuenta es el cuerpo técnico con el que cuenta cada equipo. La asignación de cada cuerpo técnico queda fuera del objeto del proyecto puesto que la realiza la dirección del club de forma personal considerando muchos factores subjetivos que tienden a quedar fuera del alcance de estos problemas. Sin embargo, si es necesario tenerlos en cuenta puesto que impondrán restricciones en los días y los horarios de entrenamiento por diferentes motivos como puede ser el hecho de que existan personas que pertenezcan a más de un cuerpo técnico y esto impida a determinados equipos entrenar al mismo tiempo, la compatibilización de la profesión de cada miembro del cuerpo técnico con su trabajo como entrenador, preparador físico, etc., o la aplicación de métodos que relacionen la distribución de entrenamientos y descansos durante la semana con la maximización del rendimiento de sus jugadores.

Dejamos a un lado los recursos humanos y pasamos a las instalaciones y demás recursos materiales que suelen estar a disposición de un club. El más importante de ellos es el conjunto de campos con los que cuentan. Generalmente estos campos suelen ser de césped natural o artificial, siendo cada vez menos frecuente encontrar equipos que dispongan de campos de albero. Los campos de césped natural son muy delicados y requieren muchos cuidados, entre ellos que no se haga un uso muy alto de ellos, que se respete un tiempo mínimo de recuperación entre usos para favorecer la regeneración del césped o que los equipos que hagan uso de ellos no sean muy agresivos y traten de respetarlo. Los campos de césped artificial y de albero, por el contrario, tienen unos cuidados menos complejos y no se desgastan con tanta facilidad por tanto permiten un mayor uso y no son exigentes con los tiempos de descanso ni la agresividad del juego.

Otro recurso que ya adelantábamos antes que pueden tener los clubes a su disposición es algún medio de transporte, en propiedad o no, que facilite el desplazamiento de los jugadores a las instalaciones. Al igual que sucede en el caso de los entrenadores, el objetivo del problema no es determinar qué equipos hacen uso del servicio, o establecer qué rutas de transporte son preferibles, etc. sino que simplemente se debe tener en cuenta la limitación que implica en cuestiones de horario el hecho de que los equipos cuenten con jugadores que se desplacen en este medio, ya que los horarios de entrenamiento de estos equipos deberá ajustarse al horario del transporte que generalmente será fijo.

Buscando siempre la mejora de los equipos que componen una cantera o escuela de fútbol, no son pocos los clubes que ponen a disposición de éstos algunas instalaciones extra a las que llamaremos gimnasios donde los equipos pueden realizar entrenamientos de fuerza, entrenamientos preventivos, etc. o donde algunos jugadores individualmente pueden hacer trabajo de recuperación tras alguna lesión. Estas instalaciones se usarán para realizar entrenamientos complementarios a los entrenamientos básicos e impondrán al problema algunas restricciones concretas.

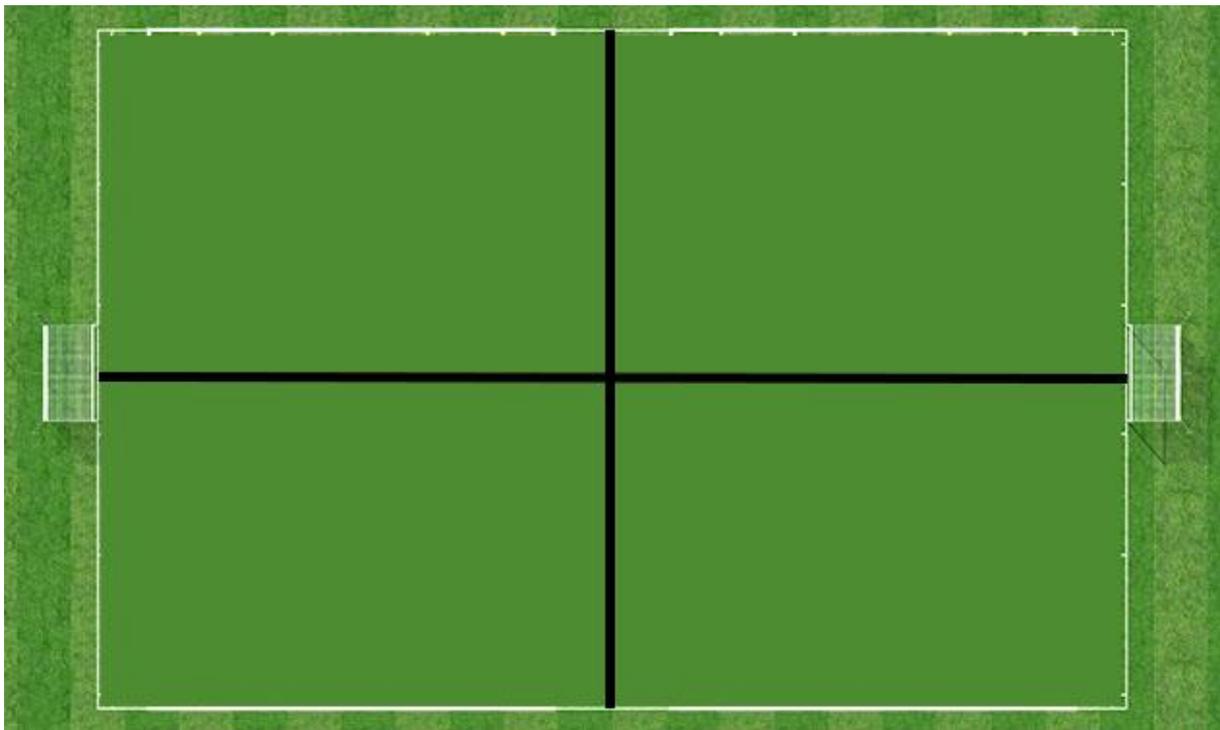
El último recurso a tener en cuenta por los clubes es el tiempo, tiempo que por un lado hace referencia a los días de la semana en los que es posible establecer entrenamientos y por otra parte hace referencia a los horarios concretos, reflejados en turnos, en los que pueden desarrollarse los entrenamientos a lo largo de cada día. Lo más habitual es que los entrenamientos puedan ocurrir de lunes a viernes, guardando el fin de semana para los partidos, y en diferentes turnos repartidos por las tardes, respetando las mañanas para asistir a la escuela. Sin embargo, esto puede variar de un club a otro y dentro del mismo club de un equipo a otro, lo cual se reflejará en

el problema en forma de restricciones como no podía ser de otra forma.

3.2 Utilización de los recursos

Debemos tener en cuenta la utilización que cada equipo, en función de si pertenece a fútbol siete (7) u once (11), hace de un campo durante su entrenamiento. Como ya se comentó anteriormente, la mitad de un campo de fútbol once (11) es prácticamente equivalente a un campo de fútbol siete (7). De aquí en adelante se hará referencia a la utilización del campo completo o sencillo por parte de los equipos y se tomará siempre como unidad el campo de fútbol once (11) puesto que es mucho más habitual que las instalaciones cuenten con campos de este tipo dado que son más versátiles.

En la ilustración dos (2) se muestra un campo de fútbol once (11) dividido en cuatro (4) cuadrantes para facilitar la comprensión de la explicación.



2. División en cuadrantes

Cuando hablemos de la utilización de un campo completo por parte de un equipo de fútbol once (11) significará que éste está haciendo uso de los cuatro (4) cuadrantes de un campo y cuando se hable de que está utilizando el campo sencillo querrá decir que está haciendo uso bien de los dos (2) cuadrantes “A”, o bien de los dos (2) cuadrantes tipo “B”. Por otra parte, la utilización completa de un campo por un equipo de fútbol siete (7) significará que está ocupando los dos cuadrantes tipo “A” o los dos cuadrantes tipo “B”, y cuando mencionemos la ocupación sencilla de un campo será que el equipo está entrenando en uno (1) solo de los cuadrantes.

Lo deseable para la maximización del rendimiento de los jugadores sería que todos los equipos pudiesen entrenar todos los días haciendo uso del campo completo. Como esto no es posible en la mayoría de las situaciones, se intentará que todos los equipos puedan entrenar en campo completo al menos un día a la semana.

El gimnasio con el que cuentan algunos clubes suele ser una instalación más bien pequeña en la que se realizan entrenamientos de fuerza y entrenamientos de tipo preventivo. La capacidad del gimnasio suele ser tal que pueda albergar al mismo tiempo a dos equipos, siempre y cuando uno de los equipos esté trabajando la fuerza y el otro está realizando ejercicios preventivos.

La utilización que los equipos hacen del tiempo puede variar de un equipo a otro según la categoría o según la prioridad. Como se refleja en el punto anterior, el tiempo se considerará dividido en turnos y la utilización del tiempo se reflejará como número de turnos que se asigna a cada equipo.

3.3 Decisiones técnicas

Las canteras o escuelas de fútbol de los diferentes clubes cuentan con una dirección deportiva que es quién establece todas las cuestiones técnicas relacionadas con los entrenamientos. En primer lugar, se establece el número de entrenamientos que debe realizar cada equipo, diferenciando, si fuera posible, cuántos entrenamientos básicos, cuántos entrenamientos de fuerza, cuántos entrenamientos de tecnificación, etc. debe realizar cada equipo. El siguiente parámetro que ésta establece para cada equipo es el tipo de campo en el que debe entrenar, siendo posible que no haya preferencia de campo para algún equipo o para ninguno de ellos. Cabe señalar que aunque los campos tengan el mismo tipo de terreno de juego no son nunca idénticos ya sea por la localización, por el soleamiento o por alguna pequeña variación de las dimensiones, entre otras muchas diferencias que se podrían mencionar. Es por ello que en algunos casos, para algunos equipos concretos, la dirección deportiva establecerá que se procure entrenar en un campo determinado. También, como ya se mencionó anteriormente, es dicha dirección deportiva quien asigna a cada entrenador a un equipo y quien se encarga de fichar a los jugadores y de asignarlos o no a alguna ruta de transporte. Por otra parte, es habitual que la dirección deportiva de cada club establezca un orden de prioridades entre los diferentes equipos por diversos motivos, para que se favorezca siempre en primer lugar a los equipos prioritarios sin que ello implique que los menos prioritarios queden descuidados. Otra variable con la que puede jugar la dirección es el descanso de los equipos. Existen muchos estudios que hablan sobre el tema y en los cuales se basa la dirección para recomendar que determinados equipos descansen un día concreto.

4 MÉTODO DE RESOLUCIÓN SELECCIONADO

Como se ha comentado con anterioridad, los modelos que se han tomado como base del que se trata de resolver en este proyecto se encuentran resueltos en numerosas investigaciones por medio de dos fases consecutivas.

En la primera fase se va a realizar la asignación de cada equipo a unos turnos de entrenamiento concretos y en la segunda fase, partiendo del resultado obtenido, se otorgará a cada equipo un número exacto de cuadrantes pertenecientes a un campo específico para cada uno de los turnos de entrenamiento.

Tanto en el modelado como en la resolución de este problema, se ha optado en primer lugar por un modelo simple en el que solo se tendrán en cuenta los entrenamientos básicos, es decir, la tecnificación y el trabajo de gimnasio quedarán al margen. En cuanto al tiempo, se establecerán turnos de una duración igual a la duración que deba tener el entrenamiento cuya duración preestablecida por la dirección deportiva sea mayor, de modo que cada equipo únicamente pueda ser asignado cada día a uno solo de los turnos y ocasionando un desperdicio de tiempo cuando se desarrollen entrenamientos de equipos cuya duración sea menor a la máxima. Esta forma de secuenciar los turnos de entrenamiento es la que se lleva a cabo en cuantiosos clubes, pero, como se ha tratado de exponer, tiene algunos defectos visibles en relación con el aprovechamiento del tiempo. Es por ello por lo que se va a trabajar un modelo más complejo en aras de mejorar las planificaciones ya existentes.

En el modelo complejo se tendrán en cuenta los entrenamientos específicos que cada equipo deba realizar a lo largo de la semana y su duración determinada, que deberá sumarse a la del entrenamiento básico, que por supuesto, está presente en este modelo. Además, el tratamiento que se hará del tiempo permitirá una mayor variabilidad del horario de entrenamientos de cada equipo y permitirá que el aprovechamiento que se haga del tiempo sea mayor.

Puesto que el modelo simple es una mera aproximación al problema, se ha tenido a bien resolver la segunda fase únicamente tras la aplicación de la primera fase del modelo complejo.

Ambos modelos se resolverán para el horizonte temporal de una semana y el resultado obtenido se aplicará al total de semanas que dure la temporada.

Para el modelado y resolución del problema se ha optado por la utilización del lenguaje Python 2.7 y las API (Application Program Interface) del solver de optimización Gurobi ® en su versión 7.5.2.

5 MODELO SIMPLE

En este capítulo se expone de forma detallada el modelo simple que se ha realizado como primera aproximación al problema. Se incluye en primer lugar la definición de los conjuntos, seguida de los diferentes parámetros. Tras ello, se comentan las variables y por último las restricciones, acompañadas de una breve explicación.

Además, se incluye en el capítulo un comentario sobre las limitaciones que presenta este modelo y los motivos por los cuales es necesario realizar un modelo de mayor alcance que se acerque más al problema real.

5.1 Definición de conjuntos

Hemos comenzado el modelo definiendo el total de conjuntos que emplearemos para las diferentes restricciones y funciones objetivo que trataremos de optimizar durante el desarrollo del estudio. Estos conjuntos se muestran clasificados en función del recurso al que hacen referencia.

5.1.1 Equipos

En primer lugar, se definen los conjuntos relacionados con el recurso equipos, siendo:

$E = \{1, 2, \dots, n_E\}$ el conjunto total de equipos.

$E_F = \{1, 2, \dots, n_{EF}\} \subset E$ el conjunto de equipos femeninos.

$E_M = \{1, 2, \dots, n_{EM}\} \subset E$ el conjunto de equipos masculinos.

$E_7 = \{1, 2, \dots, n_{E7}\} \subset E$ el conjunto de equipos de fútbol siete (7).

$E_{11} = \{1, 2, \dots, n_{E11}\} \subset E$ el conjunto de equipos de fútbol once (11).

$E_{7A} = \{1, 2, \dots, n_{E7A}\} \subset E$ el conjunto de equipos de fútbol siete (7) que entrenan en césped artificial.

$E_{11A} = \{1, 2, \dots, n_{E11A}\} \subset E$ el conjunto de equipos de fútbol once (11) que entrenan en césped artificial.

$E_{7N} = \{1, 2, \dots, n_{E7N}\} \subset E$ el conjunto de equipos de fútbol siete (7) que entrenan en césped natural.

$E_{11N} = \{1, 2, \dots, n_{E11N}\} \subset E$ el conjunto de equipos de fútbol once (11) que entrenan en césped natural.

$E_B = \{1, 2, \dots, n_{EB}\} \subset E$ el conjunto de equipos con jugadores en ruta de autobús.

5.1.2 Tiempo

En segundo lugar, se definen los conjuntos relacionados con el recurso tiempo, siendo:

$D = \{L, M, X, J, V\}$ el conjunto de días de entrenamiento.

$T = \{1, 2, \dots, n_T\}$ el conjunto de turnos diarios de entrenamiento.

$T_B = \{1, 2, \dots, n_{TB}\} \subset T$ el conjunto de turnos limitados, es decir, en los que no puede entrenar E_B .

$T_7 = \{1, 2, \dots, n_{TB}\} \subset T$ el conjunto de turnos limitados, es decir, en los que no puede entrenar E_7 .

5.1.3 Campos

Por último, se definen los conjuntos relacionados con el recurso campos, siendo:

$C = \{1, 2, \dots, n_C\}$ el conjunto total de campos.

$C_N = \{1, 2, \dots, n_{CN}\} \subset C$ el conjunto de campos de césped natural.

$C_A = \{1, 2, \dots, n_{CA}\} \subset C$ el conjunto de campos de césped artificial.

$C_{11} = \{1, 2, \dots, n_{C11}\} \subset C$ el conjunto de campos de fútbol once (11).

$C_7 = \{1, 2, \dots, n_{C7}\} \subset C$ el conjunto de campos de fútbol siete (7).

5.2 Definición de parámetros

Haciendo uso de los conjuntos previamente expuestos se han definido una serie de parámetros relacionados con ellos, que igualmente se expresarán clasificados en función de los conjuntos a los cuales afectan.

5.2.1 Equipos

Se comienza definiendo los parámetros que se relacionan con cada equipo, siendo:

NE_E el número de entrenamientos que debe realizar el equipo E semanalmente.

$$EC_E = \begin{cases} 0 & \text{si el equipo E debe entrenar en campo de césped artificial} \\ 1 & \text{si el equipo E debe entrenar en campo de césped natural} \\ 2 & \text{si es indiferente la tipología del campo de entrenamiento del equipo E} \end{cases}$$

$$EB_E = \begin{cases} 1 & \text{si el equipo E tiene jugadores en ruta de autobús} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$EP_E \in \mathbb{N}$ un parámetro representativo de la prioridad del equipo E, mayor cuanto más importante es el equipo.

$US_E \in \{0.25, 0.50\}$ un parámetro que representa la porción de campo que ocupa el equipo E cuando entrena en campo sencillo.

$UC_E \in \{0.50, 1.00\}$ un parámetro que representa la porción de campo que ocupa el equipo E cuando entrena en campo completo.

5.2.2 Tiempo

Se finaliza definiendo los parámetros que se relacionan con el tiempo, es decir, con cada día y cada turno, siendo en este caso:

$^{11}CD_{dt}$ el número total de campos de fútbol once (11) disponibles el día d en el turno t.

$^{11}CND_{dt}$ el número de campos de fútbol once (11) de césped natural disponibles el día d en el turno t.

$^{11}CAD_{dt}$ el número de campos de fútbol once (11) de césped artificial disponibles el día d en el turno t.

$^7CD_{dt}$ el número total de campos de fútbol siete (7) disponibles el día d en el turno t.

$^7CND_{dt}$ el número de campos de fútbol siete (7) de césped natural disponibles el día d en el turno t.

$^7CAD_{dt}$ el número de campos de fútbol siete (7) de césped artificial disponibles el día d en el turno t.

5.3 Variables

Una vez definidos los conjuntos y los parámetros es el momento de especificar los diferentes conjuntos de variables que se emplearán en el modelo, todos ellos conjuntos de variables binarias.

$$\delta_{dt}^e \begin{cases} 1 & \text{si equipo } e \text{ está asignado al turno } t \text{ en el día } d \text{ para entrenar} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$\delta d_{dt}^e \begin{cases} 1 & \text{si equipo } e \text{ está asignado al turno } t \text{ en el día } d \text{ para entrenar a campo completo} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$\delta s_{dt}^e \begin{cases} 1 & \text{si equipo } e \text{ está asignado al turno } t \text{ en el día } d \text{ para entrenar a campo sencillo} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

5.4 Restricciones

Para finalizar con la explicación del modelo, se describen las diferentes restricciones, cada una de ellas con su expresión matemática y una breve explicación.

5.4.1 Incompatibilidad de entrenamiento sencillo y completo

Debe prohibirse en el modelo que un equipo pueda ser asignado un mismo un día en un mismo turno a realizar un entrenamiento en campo completo al mismo tiempo que es asignado a realizar un entrenamiento a campo sencillo.

$$\delta d_{dt}^e + \delta s_{dt}^e = \delta_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (5-1)$$

5.4.2 Asignación de un equipo a un único turno en un día

El modelo deberá asegurar que cada equipo sea asignado como máximo a un turno de entrenamientos cada día.

$$\sum_{t \in T} \delta_{dt}^e \leq 1 \quad \forall e \in E, \forall d \in D \quad (5-2)$$

5.4.3 Entrenamiento en campo completo

Esta restricción viene marcada por el cuerpo técnico en aras de maximizar la calidad de las condiciones de entrenamiento de los equipos y consiste en asegurar que el total de equipos puedan entrenar al menos una vez a la semana en campo completo. A sabiendas de que es una restricción que puede ocasionar grandes problemas de capacidad, no será una restricción fuerte y si el problema no encontrase una solución factible, se podría optar por relajarla reduciendo el conjunto de equipos a los cuales se aplica.

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \delta d_{dt}^e \geq 1 \quad \forall e \in E \quad (5-3)$$

5.4.4 Número de entrenamientos

Se debe cumplir en el modelo que el número de entrenamientos que realice cada equipo sea exactamente el que haya definido la dirección técnica.

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \delta_{dt}^e = NE_e \quad \forall e \in E \quad (5-4)$$

5.4.5 Capacidad

La limitación de capacidad es una de las más importantes del modelo. Ésta se traduce en tres (3) restricciones de modo que la primera de ellas modela la capacidad de campos total en relación a los equipos totales, la segunda refleja la capacidad de campos de césped natural en relación a los equipos que deben entrenar en ese tipo de campo y la tercera de ellas limita la capacidad de campos de césped artificial respecto a los equipos que entrenan en dicha tipología. La primera restricción es tan necesaria como la segunda y la tercera por la existencia de equipos para los cuales la tipología del campo de entrenamiento es indiferente. Estos equipos no se estarían teniendo en cuenta si únicamente se tuvieran en cuenta las últimas restricciones.

$$\sum_{e \in E} US_e \cdot \delta S_{dt}^e + UC_e \cdot \delta d_{dt}^e \leq {}^{11}CD_{dt} + 0,5 \cdot {}^7CD_{dt} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (5-5)$$

$$\sum_{e \in E_{11N} \cup E_{7N}} US_e \cdot \delta S_{dt}^e + UC_e \cdot \delta d_{dt}^e \leq {}^{11}CND_{dt} + 0,5 \cdot {}^7CND_{dt} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (5-6)$$

$$\sum_{e \in E_{11A} \cup E_{7A}} US_e \cdot \delta S_{dt}^e + UC_e \cdot \delta d_{dt}^e \leq {}^{11}CAD_{dt} + 0,5 \cdot {}^7CAD_{dt} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (5-7)$$

5.4.6 Entrenamientos viernes

Por motivos relativos a los días en los que se disputan los partidos de las ligas en las que participan los equipos de fútbol siete (7), éstos no pueden entrenar los viernes durante la temporada.

$$\sum_{t \in T} \delta_{dt}^e = 0 \quad \forall e \in E_7, d = V \quad (5-8)$$

5.4.7 Entrenamientos en la tarde/noche

Dado que algunos turnos comienzan bien entrada la tarde y que la edad de los niños que componen las categorías de fútbol siete (7) es bastante pequeña, se restringe que estos equipos sean asignados a dichos turnos.

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T_7} \delta_{dt}^e = 0 \quad \forall e \in E_7 \quad (5-9)$$

5.4.8 Equipos con transporte

Los equipos que tienen jugadores que se desplazan a los entrenamientos mediante el medio que pone a su disposición el club, deberán entrenar en el horario que se adapte al del transporte y quedan restringidos de entrenar en cualquier otro.

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T_B} \delta_{dt}^e = 0 \quad \forall e \in E_B \quad (5-10)$$

5.4.9 Fútbol siete (7) en el primer turno

Por cuestiones relacionadas con la conciliación familiar, generalmente el mejor turno de entrenamiento para los más pequeños es el primero, es decir, el que antes comience y finalice. Es por ello que se puede imponer que no entrenen en ningún otro turno, pero eso puede suponer que el problema sea infactible porque no exista capacidad suficiente. Dado que esta restricción es suave, si el problema resulta infactible, se tratará como una función objetivo que tratará de maximizar el número de equipos que entrenan en el primer turno.

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \neq 1} \delta_{dt}^e = 0 \quad \forall e \in E_7 \quad (5-11)$$

5.5 Función objetivo I

En primer lugar se ha optado por maximizar el número de equipos que descansen el martes, respetando el orden de prioridad que establezca cada club. Esta función objetivo viene dada por la dirección deportiva que asegura que hay numerosos estudios que abalan que tal como se distribuyen los partidos y los entrenamientos, el mejor día para descansar y maximizar el rendimiento es el martes. De este modo se define la función objetivo como:

$$MIN \sum_{e \in E} \sum_{t \in T} EP_e \cdot \delta_{dt}^e \quad d = M \quad (5-12)$$

5.6 Función objetivo II

Otro objetivo que puede ser interesante es maximizar la ocupación de los campos, de forma que se maximice el número de entrenamientos a campo completo teniendo en cuenta las prioridades establecidas. Esta función objetivo tendrá también mucho sentido cuando la capacidad de la instalación no permita que todos los equipos entrenen al menos una vez en semana en campo completo.

$$MAX \sum_{e \in E} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} EP_e \cdot \delta d_{dt}^e \quad (5-13)$$

5.7 Función objetivo III

La última función objetivo que tendremos en cuenta es la maximización de los equipos de fútbol siete (7) que entrenan en el primer turno. Ésta solo será resuelta si no es posible encontrar una solución para el modelo que satisfaga la restricción 5-11. De nuevo esta restricción tiene en cuenta la prioridad de los equipos.

$$MIN \sum_{e \in E_7} \sum_{d \in D} \sum_{t \neq 1} EP_e \cdot \delta_{dt}^e \quad (5-14)$$

5.8 Desarrollo modelo simple

$$MIN \sum_{e \in E} \sum_{t \in T} EP_e \cdot \delta_{dt}^e \quad d = M$$

$$Sa: \delta d_{dt}^e + \delta s_{dt}^e = \delta_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$\sum_{t \in T} \delta_{dt}^e \leq 1 \quad \forall e \in E, \forall d \in D$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \delta d_{dt}^e \geq 1 \quad \forall e \in E$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \delta_{dt}^e = NE_e \quad \forall e \in E$$

$$\sum_{e \in E} US_e \cdot \delta S_{dt}^e + UC_e \cdot \delta d_{dt}^e \leq {}^{11}CD_{dt} + 0,5 \cdot {}^7CD_{dt} \quad \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$\sum_{e \in E_{11N} \cup E_{7N}} US_e \cdot \delta S_{dt}^e + UC_e \cdot \delta d_{dt}^e \leq {}^{11}CND_{dt} + 0,5 \cdot {}^7CND_{dt} \quad \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$\sum_{e \in E_{11A} \cup E_{7A}} US_E \cdot \delta S_{dt}^e + UC_e \cdot \delta d_{dt}^e \leq {}^{11}CAD_{dt} + 0,5 \cdot {}^7CAD_{dt} \quad \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$\sum_{t \in T} \delta_{dt}^e = 0 \quad \forall e \in E_7, d = V$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T_7} \delta_{dt}^e = 0 \quad \forall e \in E_7$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T_B} \delta_{dt}^e = 0 \quad \forall e \in E_B$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \neq 1} \delta_{dt}^e = 0 \quad \forall e \in E_7$$

5.9 Limitaciones del modelo

Este modelo presenta dos limitaciones importantes. En primer lugar no se tienen en cuenta los entrenamientos específicos que deben realizar los equipos, considerándose únicamente los básicos. Esto provoca que al asignar a los equipos un turno de entrenamientos de duración inferior, o bien haya que comprimir el entrenamiento específico dentro del turno, o bien se retrase la finalización del entrenamiento y por tanto también lo haga el inicio del siguiente entrenamiento.

La segunda limitación que presenta es la rigidez de horarios que ocasiona que el aprovechamiento de los campos no sea óptimo cuando la duración del entrenamiento del equipo asignado al turno sea inferior a la longitud del intervalo de tiempo del turno definido.

Las mejoras principales que se plantean en el modelo complejo son los turnos de entrenamiento flexibles y la consideración de los entrenamientos de tecnificación, que se llevan a cabo en los campos al igual que los entrenamientos básicos.

6 MODELO COMPLEJO FASE I

En el modelo que se describe en este capítulo se tratan de solventar las limitaciones del anterior de modo que la aproximación al problema real sea máxima. Esto se busca mediante la incorporación al modelo simple de ciertos parámetros, variables y restricciones que lo completan y le aportan lo necesario para suplir las carencias.

En este capítulo se van a comentar las modificaciones que se han realizado respecto al modelo simple que se planteó en el capítulo anterior.

6.1 Conjuntos

Para la elaboración de este modelo únicamente se han visto modificados los conjuntos con la inclusión de uno nuevo que se relaciona directamente con el recurso tiempo.

6.1.1 Tiempo

T_7 el conjunto de turnos restringidos para los entrenamientos de los equipos pertenecientes a las categorías de fútbol siete (7).

6.2 Modificación de parámetros

Para el modelo complejo se han añadido algunos parámetros nuevos y el significado de algunos otros se ha visto modificado con la inclusión de éstos. A continuación se muestran clasificados en función de los recursos con los que se relacionan.

6.2.1 Equipos

$NE_E \in \mathbb{N}$ el número de entrenamientos totales que debe realizar el equipo E semanalmente.

$NET_E \in \mathbb{N}$ el número de entrenamientos con tecnificación que debe realizar el equipo E semanalmente.

$DE_E \in \mathbb{N}$ la duración del entrenamiento del equipo E cuando no realiza tecnificación, es decir, cuando realiza un entrenamiento básico, medida dicha duración en turnos.

$DET_E \in \mathbb{N}$ la duración del entrenamiento del equipo E cuando realiza tecnificación, es decir, cuando realiza además del entrenamiento básico un entrenamiento de tecnificación, medida dicha duración en turnos.

6.3 Variables

Las variables del modelo simple se trasladan a éste y se suman además algunos conjuntos de variables binarias que ahora se comentan.

$$\alpha_d^e \begin{cases} 1 & \text{si equipo } e \text{ está asignado al día } d \text{ para entrenar sin tecnificación} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$\beta_d^e \begin{cases} 1 & \text{si equipo } e \text{ está asignado al día } d \text{ para entrenar con tecnificación} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$\gamma_{dt}^e \begin{cases} 1 & \text{si equipo } e \text{ comienza entrenamiento el día } d \text{ en el turno } t \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$\gamma\alpha_{dt}^e \begin{cases} 1 & \text{si equipo } e \text{ comienza entrenamiento sin tecnificación el día } d \text{ en el turno } t \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$\gamma\beta_{dt}^e \begin{cases} 1 & \text{si equipo } e \text{ comienza entrenamiento con tecnificación el día } d \text{ en el turno } t \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$\theta s_d^e \begin{cases} 1 & \text{si equipo } e \text{ entrena el día } d \text{ en campo simple} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$\theta d_d^e \begin{cases} 1 & \text{si equipo } e \text{ entrena el día } d \text{ en campo doble} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

6.4 Restricciones

Llegados a este punto, es el momento de describir las diferentes restricciones que se han planteado en esta primera resolución del modelo fase I

6.4.1 Campo sencillo o completo.

La restricción 6-1 impone que cada equipo cada día únicamente pueda hacer uso del campo completo o sencillo, eso significará que el modelo deberá asegurar que no se alternen turnos simples y completos en un mismo día. Esto se consigue mediante las restricciones 6-2 y 6-3 que por una parte imponen para cada día y para cada equipo que si no se asigna campo completo ningún turno pueda activarse con campo completo y análogamente para campo sencillo. Además se limita el número de turnos que pueden activarse, solo si la variable de asignación diaria se activa, en función de la máxima duración que puede tener el entrenamiento de cada equipo. Con las restricciones 6-4 y 6-5 limitamos la activación de las variables de asignación por turno, permitiendo que se activen únicamente cuando se haya asignado un equipo a un día.

$$\theta d_d^e + \theta s_d^e \leq 1 \quad \forall e \in E, \forall d \in D \quad (6-1)$$

$$\theta d_d^e \cdot DET_e \geq \sum_t \delta d_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D \quad (6-2)$$

$$\theta s_d^e \cdot DET_e \geq \sum_t \delta s_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D \quad (6-3)$$

$$\sum_t \delta d_{dt}^e \geq \theta d_d^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D \quad (6-4)$$

$$\sum_t \delta s_{dt}^e \geq \theta s_d^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D \quad (6-5)$$

6.4.2 Entrenamiento en campo completo.

Se deberá imponer que cada equipo realice su entrenamiento al menos un día a la semana en campo completo, dejando libertad al modelo en todo caso para que asigne un mayor número de entrenamientos en dichas condiciones siempre que así lo demande la función objetivo que sea impuesta.

$$\sum_d \theta d_d^e \geq 1 \quad \forall e \in E \quad (6-6)$$

6.4.3 Número de entrenamientos semanales

Cada equipo entrenará semanalmente el número de veces que se establezca desde la dirección deportiva y que se refleje a través de los parámetros número de entrenamientos totales y número de entrenamientos con tecnificación.

En primer lugar se muestra la restricción que trata de fijar los entrenamientos básicos a partir de la diferencia entre entrenamientos totales y entrenamientos con tecnificación y en segundo lugar se establecen los entrenamientos con tecnificación.

$$\sum_{d \in D} \alpha_d^e = NE_e - NET_e \quad \forall e \in E \quad (6-7)$$

$$\sum_{d \in D} \beta_d^e = NET_e \quad \forall e \in E \quad (6-8)$$

6.4.4 Capacidad

Las restricciones de capacidad se respetan en el paso del modelo simple al modelo complejo, siendo éstas idénticas y guardando el mismo significado.

$$\sum_{e \in E} US_E \cdot \delta S_{dt}^e + UC_E \cdot \delta d_{dt}^e \leq {}^{11}CD_{dt} + 0,5 \cdot {}^7CD_{dt} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (6-9)$$

$$\sum_{e \in E_{11A} \cup E_{7A}} US_E \cdot \delta S_{dt}^e + UC_E \cdot \delta d_{dt}^e \leq {}^{11}CAD_{dt} + 0,5 \cdot {}^7CAD_{dt} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (6-10)$$

$$\sum_{e \in E_{11N} \cup E_{7N}} US_E \cdot \delta S_{dt}^e + UC_E \cdot \delta d_{dt}^e \leq {}^{11}CND_{dt} + 0,5 \cdot {}^7CND_{dt} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (6-11)$$

6.4.5 Entrenamientos fútbol siete (7) los viernes

Tal como se comentó en el modelo simple, existe la imposibilidad de que los equipos de las categorías de fútbol siete (7) entrenen los viernes, por tanto, el modelo debe impedir que se asigne ningún tipo de entrenamiento a dicho día.

$$\sum_{e \in E_7} \alpha_d^e + \beta_d^e = 0 \quad d = V \quad (6-12)$$

6.4.6 Entrenamientos fútbol siete (7) tarde/noche

Para que los más pequeños del club no tengan que entrenar a partir de determinada hora, se define un conjunto de turnos para los cuales quedan restringidos los entrenamientos de los estos equipos para todos los días de la semana.

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T_7} \delta_{dt}^e = 0 \quad \forall e \in E_7 \quad (6-13)$$

6.4.7 Equipos con jugadores en ruta

Los equipos que tienen niños en las diferentes rutas que flota el club para que puedan acudir a los entrenamientos con la máxima facilidad tienen limitados sus turnos de entrenamiento y únicamente pueden ser asignados a los turnos que sean compatibles con el horario de las mencionadas rutas.

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T_B} \delta_{dt}^e = 0 \quad \forall e \in E_B \quad (6-14)$$

6.4.8 Un tipo de entrenamiento diario.

El modelo deberá asegurar que en ningún caso se asigne a un equipo un mismo día un entrenamiento básico y al mismo tiempo un entrenamiento con tecnificación.

$$\alpha_d^e + \beta_d^e \leq 1 \quad \forall e \in E, \forall d \in D \quad (6-15)$$

6.4.9 Turno de inicio del entrenamiento.

Al cambiar el concepto de turno respecto al modelo simple, habrá que tener en consideración que en un mismo día un equipo será asignado a más de un turno pero únicamente uno de ellos será el turno inicial a partir del cual se desarrollará el entrenamiento completo.

$$\sum_{t \in T} \gamma_{dt}^e = \alpha_d^e + \beta_d^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D \quad (6-16)$$

6.4.10 Número de turnos diario.

Si un equipo ha sido asignado a un día de entrenamiento, bien para entrenar con tecnificación, o bien para realizar un entrenamiento básico éste tendrá acotado superiormente el número de turnos a los que puede ser asignado. Por el contrario, si el equipo no está asignado a un día para ninguno de los dos tipos de entrenamiento, no podrá ser asignado a ningún turno en dicho día.

$$\sum_{t \in T} \delta_{dt}^e \leq 6 \cdot \alpha_d^e + 9 \cdot \beta_d^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D \quad (6-17)$$

6.4.11 Ocupación de turnos.

Cada equipo deberá ocupar un número determinado de turnos cada día de entrenamiento marcado por el tipo de entrenamiento que realice. Dicha ocupación de turnos se verá reflejada en los parámetros duración del entrenamiento básico y duración del entrenamiento con tecnificación. Para modelar este concepto se precisan cuatro (4) restricciones relativas a los entrenamientos básicos (6-18, 6-19, 6-20 y 6-21) y otras cuatro (4) restricciones análogas para los entrenamientos con tecnificación (6-22, 6-23, 6-24 y 6-25). Mediante las dos primeras se impone que solo se asigne un equipo a un turno y un día concretos para comenzar un entrenamiento con o sin tecnificación en el único caso en el que se activen tanto la variable de inicio de entrenamiento como la variable de tipo de entrenamiento diario. Con la tercera restricción se impide la asignación de más de un turno de inicio específico diario. La última de las restricciones se encarga de realizar la asignación de un número determinado de turnos consecutivos a partir del turno asignado como inicio.

$$2 \cdot \gamma_{dt}^e \leq \gamma_{dt}^e + \alpha_d^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (6-18)$$

$$\gamma_{dt}^e + \alpha_d^e \leq 1 + \gamma_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (6-19)$$

$$\sum_{t \in T} \gamma \alpha_{dt}^e \leq 1 \quad \forall e \in E, \forall d \in D \quad (6-20)$$

$$\gamma \alpha_{dt}^e \cdot DE_E \leq \sum_{s=t}^{t+DE_E-1} \delta_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (6-21)$$

$$2 \cdot \gamma \beta_{dt}^e \leq \gamma_{dt}^e + \beta_d^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (6-22)$$

$$\gamma_{dt}^e + \beta_d^e \leq 1 + \gamma \beta_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (6-23)$$

$$\sum_{t \in T} \gamma \beta_{dt}^e \leq 1 \quad \forall e \in E, \forall d \in D \quad (6-24)$$

$$\gamma \beta_{dt}^e \cdot DET_E \leq \sum_{s=t}^{t+DET_E-1} \delta_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (6-25)$$

6.4.12 Un tipo de ocupación por turno.

De nuevo debe impedirse, tal como ocurría en el modelo simple, que un equipo se asigne un mismo día en un mismo turno a un campo completo y a un campo sencillo al mismo tiempo.

$$\delta d_{dt}^e + \delta s_{dt}^e = \delta_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (6-26)$$

6.4.13 Tecnificación en campo sencillo.

Muy relacionada con el conjunto de restricciones anterior se encuentra ésta que impone que los entrenamientos que se realicen con tecnificación se lleven a cabo en campo sencillo puesto que no se permite alternancia y que la ocupación es mayor en cuanto a número de turnos nos referimos, por tanto, se procura de este modo evitar problemas de capacidad.

$$\beta_d^e \leq \theta s_d^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D \quad (6-27)$$

6.5 Función objetivo I

Se comienza planteando la maximizar del número de equipos que descansen el martes, esto es minimizar el número de equipos que entrenen dicho día, respetando el orden de prioridad proporcionado por el club.

$$\text{MIN} \sum_{e \in E} (EP_e \cdot \alpha_d^e + EP_e \cdot \beta_d^e) \quad d = M$$

6.6 Función objetivo II

La segunda función objetivo que se propone consiste en maximizar la ocupación de los campos, es decir, el número de entrenamientos a campo completo, respetando las prioridades establecidas por el club.

$$MAX \sum_{e \in E} \sum_{d \in D} EP_e \cdot \theta d_d^e$$

6.7 Función objetivo III

En último lugar se trata de maximizar el número de equipos pertenecientes a las categorías de fútbol siete (7) cuyos entrenamientos dan comienzo en el primer turno.

$$MAX \sum_{e \in E_7} \sum_{d \in D} EP_e \cdot \gamma_{d1}^e$$

6.8 Modelo versión compleja fase I

$$MIN \sum_{e \in E} (EP_e \cdot \alpha_M^e + EP_e \cdot \beta_M^e)$$

$$Sa: \theta d_d^e + \theta s_d^e \leq 1 \quad \forall e \in E, \forall d \in D$$

$$\theta d_d^e \cdot DET_e \geq \sum_t \delta d_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D$$

$$\theta s_d^e \cdot DET_e \geq \sum_t \delta s_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D$$

$$\sum_t \delta d_{dt}^e \geq \theta d_d^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D$$

$$\sum_t \delta s_{dt}^e \geq \theta s_d^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D$$

$$\sum_d \theta d_d^e \geq 1 \quad \forall e \in E$$

$$\sum_{d \in D} \alpha_d^e = NE_e - NET_e \quad \forall e \in E$$

$$\sum_{d \in D} \beta_d^e = NET_e \quad \forall e \in E$$

$$\sum_{e \in E} US_E \cdot \delta s_{dt}^e + UC_E \cdot \delta d_{dt}^e \leq {}^{11}CD_{dt} + 0,5 \cdot {}^7CD_{dt} \quad \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$\sum_{e \in E_{11A} \cup E_{7A}} US_E \cdot \delta s_{dt}^e + UC_E \cdot \delta d_{dt}^e \leq {}^{11}CAD_{dt} + 0,5 \cdot {}^7CAD_{dt} \quad \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$\sum_{e \in E_{11N} \cup E_{7N}} US_E \cdot \delta s_{dt}^e + UC_E \cdot \delta d_{dt}^e \leq {}^{11}CND_{dt} + 0,5 \cdot {}^7CND_{dt} \quad \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$\sum_{e \in E_7} \alpha_d^e + \beta_d^e = 0 \quad d = V$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T_7} \delta_{dt}^e = 0 \quad \forall e \in E_7$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T_B} \delta_{dt}^e = 0 \quad \forall e \in E_B$$

$$\alpha_d^e + \beta_d^e \leq 1 \quad \forall e \in E, \forall d \in D$$

$$\sum_{t \in T} \gamma_{dt}^e = \alpha_d^e + \beta_d^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D$$

$$\sum_{t \in T} \delta_{dt}^e \leq 6 \cdot \alpha_d^e + 9 \cdot \beta_d^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D$$

$$2 \cdot \gamma \alpha_{dt}^e \leq \gamma_{dt}^e + \alpha_d^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$\gamma_{dt}^e + \alpha_d^e \leq 1 + \gamma \alpha_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$\sum_{t \in T} \gamma \alpha_{dt}^e \leq 1 \quad \forall e \in E, \forall d \in D$$

$$\gamma \alpha_{dt}^e \cdot DE_E \leq \sum_{s=t}^{t+DE_E-1} \delta_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$2 \cdot \gamma \beta_{dt}^e \leq \gamma_{dt}^e + \beta_d^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$\gamma_{dt}^e + \beta_d^e \leq 1 + \gamma \beta_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$\sum_{t \in T} \gamma \beta_{dt}^e \leq 1 \quad \forall e \in E, \forall d \in D$$

$$\gamma \beta_{dt}^e \cdot DET_E \leq \sum_{s=t}^{t+DET_E-1} \delta_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$\delta d_{dt}^e + \delta s_{dt}^e = \delta_{dt}^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$\beta_d^e \leq \theta s_d^e \quad \forall e \in E, \forall d \in D$$

6.9 Solución que se obtiene

Tras la resolución de esta primera fase se obtiene una solución en la que cada equipo está asignado a unos días y unos turnos concretos y únicamente falta por determinar en qué campo y en qué cuadrantes deberán realizar los entrenamientos. Para ello, partiendo de esta solución, deberemos resolver la fase II que se plantea en el capítulo siguiente.

El horizonte temporal al cual se aplica este modelo es de una semana y durante todas las semanas que dure la temporada de entrenamientos se repetirá la misma programación salvo excepción marcada por la dirección deportiva del club.

7 MODELO COMPLEJO FASE II

A continuación se describe la segunda fase del modelo complejo, en la cual, partiendo de los datos obtenidos tras la resolución de la fase primera, se asignará el campo en el cual tendrá lugar el entrenamiento de cada uno de los equipos de la cantera o escuela del club.

La estructura elegida para ello será la empleada en los capítulos anteriores. Se comenzará con los conjuntos que se han definido, seguidos de los parámetros y de las variables. Más tarde se detallarán las diferentes restricciones pertenecientes al modelo, todas ellas acompañadas con una breve explicación, y por último se plantearán algunas posibles funciones objetivo. Tras todo ello, se mostrará el modelo completo y una breve conclusión.

7.1 Definición de conjuntos

Para esta segunda fase del modelo se han mantenido algunos de los conjuntos que ya se definieron para el modelo simple y se han incorporado otros nuevos. A continuación, clasificados se muestran todos ellos en función del recurso al que hagan referencia.

7.1.1 Equipos

Comenzamos reflejando los conjuntos relacionados con el recurso equipos, los cuales provienen de la resolución de la fase I. Estos son:

$E_T = \{1, 2, \dots, n_{ET}\} \subset E$ el conjunto total de equipos que entrena el día D, es decir, el día para el cual se resuelve el modelo.

$E_{TA} = E_{TA7} \cup E_{TA11} = \{1, 2, \dots, n_{ETA}\} \subset E_T$ el conjunto de equipos que entrenan el día D en césped artificial.

$E_{TN} = E_{TN7} \cup E_{TN11} = \{1, 2, \dots, n_{ETN}\} \subset E_T$ el conjunto de equipos que entrenan el día D en césped natural.

7.1.2 Tiempo

En cuanto al recurso tiempo, se hará el mismo uso que en los modelos previos, siendo:

$T = \{1, 2, \dots, n_T\}$ el conjunto de turnos diarios de entrenamiento.

7.1.3 Campos

Por último, en relación al recurso campos, se mantienen respecto a la fase I:

$C = \{1, 2, \dots, n_C\}$ el conjunto de campos.

$C_N = \{1, 2, \dots, n_{CN}\} \subset C$ el conjunto de campos de césped natural.

$C_A = \{1, 2, \dots, n_{CA}\} \subset C$ el conjunto de campos de césped artificial.

Pero también se han definido en especial para esta fase:

$Q = \{Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_{nc}\}$ el conjunto que agrupa a los cuadrantes de todos los campos definidos en el modelo.

$Q_C = \{C.1, C.2 \dots\}$ el conjunto de cuadrantes en los cuales se divide el campo C.

7.2 Definición de parámetros

En esta segunda fase del modelo la mayor parte de los parámetros que intervienen son datos obtenidos con la

previa resolución de la primera fase, bien utilizados directamente, o bien empleados tras la aplicación de una fórmula de reinterpretación. A continuación se mencionará cada uno de ellos y se explicará, en su caso, el modo de obtención del mismo.

7.2.1 Equipos

En relación a los equipos se define NQ^e como el número de cuadrantes que debe ocupar el equipo e en la realización de su entrenamiento. Este parámetro viene determinado por los valores de las variables δs_{dt}^e y δd_{dt}^e obtenidos en la resolución de la fase I de la siguiente forma:

$$\text{Si } \delta s_{dt}^e = 1 \text{ y } e \in E_7 \rightarrow NQ^e = 1$$

$$\text{Si } \delta d_{dt}^e = 1 \text{ y } e \in E_7 \rightarrow NQ^e = 2$$

$$\text{Si } \delta s_{dt}^e = 1 \text{ y } e \in E_{11} \rightarrow NQ^e = 2$$

$$\text{Si } \delta d_{dt}^e = 1 \text{ y } e \in E_{11} \rightarrow NQ^e = 4$$

Este parámetro se define para cada equipo independientemente del turno puesto que se da por hecho que en todos los turnos ha de ocupar el mismo número de cuadrantes. El parámetro si es variable respecto al día, pero no se refleja explícitamente al resolverse el modelo para este horizonte temporal.

7.2.2 Equipos y campos

Respecto a los recursos equipos y campos se considera el siguiente parámetro binario.

$$p_c^e = \begin{cases} 1 & \text{si el equipo } E \text{ prefiere entrenar en el campo } C \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

Este parámetro se define en dos sentidos. Para el primer día de resolución, marca las prioridades definidas desde la dirección deportiva. A partir del segundo día de resolución, en busca de que los equipos entrenen durante toda la semana en el mismo campo, el campo preferido será generalmente el asignado el día previo.

7.2.3 Equipos y turnos

El siguiente parámetro que entra en juego en este modelo es A^{et} definido como el valor de cada una de las celdas de una matriz binaria, definida para cada día, en la cual se plasman los valores de la variable δ_{dt}^e obtenidos en la resolución de la fase I, de modo que las filas representan los turnos y las columnas los equipos.

Por último, con la ayuda de la misma matriz, se define el parámetro NT^e como el sumatorio por columnas de las filas de la matriz, así, para cada equipo, se conoce el número de turnos a los que ha sido asignado un día concreto.

7.2.4 Campos

Se define $NumQ_c$ como el número de cuadrantes del cual dispone cada uno de los campos.

7.3 Variables

Definidos los conjuntos y parámetros, se describen a continuación las variables que serán empleadas en este modelo.

$$x_c^e = \begin{cases} 1 & \text{si equipo } e \text{ está asignado al campo } c \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$y_{cq}^e = \begin{cases} 1 & \text{si equipo } e \text{ está asignado al cuadrante } q \text{ del campo } c \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$z_{cq}^{et} \begin{cases} 1 & \text{si equipo } e \text{ está asignado al cuadrante } q \text{ del campo } c \text{ el turno } t \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

7.4 Restricciones

En este punto se explica cada uno de los conjuntos de restricciones que aparecen en esta fase II del modelo complejo.

7.4.1 Un único campo

Cada equipo solo podrá ser asignado diariamente a un único campo.

$$\sum_{c \in C} x_c^e = 1 \quad \forall e \in E_T \quad (7-1)$$

7.4.2 Número de cuadrantes diario

La primera fase del modelo complejo dio como resultado la asignación de los diferentes equipos a unos días y turnos concretos para realizar su entrenamiento, bien en campo sencillo, o bien en campo completo. En esta fase se debe asegurar que cada equipo cuente realmente con la porción de campo que le debe corresponder según la solución previamente obtenida.

$$\sum_{q \in Q} y_{cq}^e = NQ^e \cdot x_c^e \quad \forall e \in E_T, \forall c \in C \quad (7-2)$$

La restricción obliga a que si un campo es asignado a un equipo un día, dicho equipo reciba el número de cuadrantes preciso para realizar su entrenamiento dicho día.

7.4.3 Número de cuadrantes por turno

Este conjunto de restricciones pretende asegurar que para todos los equipos, durante todos los turnos en los que el equipo deba entrenar el número de cuadrantes asignados sea el adecuado a sus necesidades.

$$\sum_{c \in C} \sum_{q \in Q} z_{cq}^{et} = NQ^e \cdot A^{et} \quad \forall e \in E_T, \forall t \in T \quad (7-3)$$

7.4.4 Capacidad del campo

Para cada uno de los campos, no debe sobrepasarse en ningún caso el límite de cuadrantes que se asignan para el total de equipos según el número de cuadrantes de los que disponga en función de la tipología de campo de la que se trate.

$$\sum_{e \in E_T} \sum_{q \in Q} z_{cq}^{et} \leq NumQ^c \quad \forall c \in C_7, \forall t \in T \quad (7-4)$$

7.4.5 Un único equipo

Se debe asegurar en el modelo que en cada cuadrante de cada campo solo esté asignado un único equipo por turno.

$$\sum_{e \in E_T} z_{cq}^{et} \leq 1 \quad \forall c \in C, \forall q \in Q, \forall t \in T \quad (7-5)$$

7.4.6 Número de turnos

Con este conjunto de restricciones se modela que el número de turnos en los cuales un equipo sea asignado a un campo y a uno o varios cuadrantes concretos sea el número preciso y nunca más ni menos.

$$\sum_{t \in T} z_{cq}^{et} = y_{cq}^e * NT^e \quad \forall e \in E_T, \forall c \in C, \forall q \in Q_7 \cup Q_{11} \quad (7-6)$$

7.4.7 Césped natural

El modelo debe asegurar que ningún equipo que deba entrenar en césped natural sea asignado a un campo de césped artificial.

$$\sum_{e \in E_{TA}} x_c^e = 0 \quad \forall c \in C_N \quad (7-7)$$

7.4.8 Césped artificial

Análogamente a la restricción anterior, el modelo debe asegurar que ningún equipo que deba entrenar en césped artificial sea asignado a un campo de césped natural.

$$\sum_{e \in E_{TN}} x_c^e = 0 \quad \forall c \in C_A \quad (7-8)$$

7.5 Función objetivo I

En esta segunda fase el objetivo consiste en maximizar el número de equipos que realizan su entrenamiento en el campo preferido.

Debido al doble sentido del parámetro p_c^e , el primer día que se resuelve el modelo no serán muchos los equipos que tengan un campo preferido, por tanto, la mayoría de ellos serán asignados de forma arbitraria. Para conseguir el objetivo de que los equipos se mantengan, en la medida de lo posible, en el mismo campo durante toda la semana, el campo que se asigne el lunes a los equipos sin prioridad se convertirá en ese momento en su campo preferido para la elaboración de la planificación del martes. Para la ejecución del modelo aplicado al miércoles, se resolverá con los datos del martes y se verá qué otorga mejores resultados, y así sucesivamente hasta llegar a completar la semana completa. Como siempre, el modelo deberá asegurar que se respete la prioridad establecida para los equipos.

$$MAX \sum_{e \in E_T} \sum_{c \in C} EP_e \cdot P_c^e \cdot x_c^e$$

7.6 Función objetivo II

Como mejora a la función objetivo planteada inicialmente, se plantea la posibilidad de equilibrar el uso de los campos, de modo que si un día un determinado campo ha sufrido un desgaste excesivo, éste tenga una

penalización en la función objetivo del día siguiente. Esto se consigue mediante la incorporación del parámetro Uti_c definido como:

$$Uti_c = \sum_{q \in Q_c} \sum_{e \in E} \sum_{t \in T} z_{cq}^{et} \quad \forall c \in C$$

De esta forma la nueva función objetivo quedaría de la forma:

$$MAX \sum_{e \in E_T} \sum_{c \in C} EP_e \cdot P_c^e \cdot x_c^e - \sum_{c \in C} Uti_c \cdot \xi$$

Donde ξ es un parámetro experimental que otorgará mayor o menor importancia al segundo miembro dentro de la expresión de la función objetivo.

7.7 Modelo versión compleja fase II

$$MAX \sum_{e \in E_T} \sum_{c \in C} EP_e \cdot P_c^e \cdot x_c^e$$

$$Sa: \sum_{c \in C} x_c^e = 1 \quad \forall e \in E_T$$

$$\sum_{q \in Q} y_{cq}^e = NQ^e \cdot x_c^e \quad \forall e \in E_T, \forall c \in C$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{q \in Q} z_{cq}^{et} = NQ^e \cdot A^{et} \quad \forall e \in E_T, \forall t \in T$$

$$\sum_{e \in E_T} \sum_{q \in Q} z_{cq}^{et} = NumQ_c \quad \forall c \in C, \forall t \in T$$

$$\sum_{e \in E_T} z_{cq}^{et} \leq 1 \quad \forall c \in C, \forall q \in Q, \forall t \in T$$

$$\sum_{t \in T} z_{cq}^{et} = y_{cq}^e * NT^e \quad \forall e \in E_T, \forall c \in C, \forall q \in Q$$

$$\sum_{e \in E_{TA}} x_c^e = 0 \quad \forall c \in C_N$$

$$\sum_{e \in E_{TN}} x_c^e = 0 \quad \forall c \in C_A$$

7.8 Conclusiones

En esta segunda fase se busca que los equipos se mantengan en el mismo campo durante toda la semana, en la medida de lo posible, y que la utilización de los campos esté repartida entre ellos, es decir, que no haya campos que se empleen durante todos los turnos todos los días y otros campos que apenas tengan uso, para que así el desgaste de los mismos se encuentre equilibrado.

Dado que el horizonte temporal para el que se resuelve este modelo es un día, el resultado semanal se obtiene al resolver el modelo una vez por cada día de la semana. Para conseguir los objetivos que se pretenden alcanzar, partiremos de algunos datos para resolver el modelo aplicado al lunes y a partir de los datos obtenidos de ese día y se irán resolviendo los siguientes. Los resultados de los días anteriores servirán en cada caso como dato para los días siguientes.

Al finalizar esta segunda fase del modelo tendremos asociados los diferentes equipos a unos días, unos turnos y un campo concretos y quedará concluida la planificación de los entrenamientos.

8 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA CONCRETO

Dejamos a un lado la parte teórica del proyecto para adentrarnos en la parte práctica del mismo, en la cual serán aplicados los tres modelos que han sido expuestos en los capítulos anteriores al problema concreto que se detalla a continuación.

El problema tiene como datos de partida la estructura de la cantera del Sevilla Fútbol Club, compuesta por una serie de equipos de fútbol agrupados en categorías diversas y por un grupo de cuerpos técnicos asociados a los diferentes equipos; y las instalaciones de la Ciudad Deportiva José Ramón Cisneros Palacios, de la cual hacen uso los equipos para llevar a cabo sus entrenamientos en unos intervalos de tiempo concretos.

El objetivo del problema que va a resolverse es hacer un uso óptimo en el horario de tarde de las instalaciones con las que cuenta el Sevilla Fútbol Club en su ciudad deportiva.

8.1 Equipos que componen la cantera del Sevilla Fútbol Club

El Sevilla Fútbol Club cuenta en sus escalafones inferiores con un total de veintiséis (26) equipos entre los que se incluyen equipos de fútbol siete (7) masculino, equipos de fútbol once (11) masculino y equipos femeninos tanto de fútbol siete (7) como de fútbol once (11).

En cuanto al fútbol siete (7) masculino, el Sevilla FC cuenta con un total de once (11) equipos en los cuales se incluyen tres categorías diferentes. La categoría “prebenjamín” es aquella en la que juegan los más pequeños de la casa, niños que se encuentran entre los seis (6) y siete (7) años. Actualmente existen dos (2) equipos de esta categoría. A continuación, encontramos cuatro (4) equipos de la categoría “benjamín”, aquella en la que juegan los niños de entre ocho (8) y nueve (9) años. Por último, la categoría más numerosa e importante de entre las que componen el fútbol siete (7) es la categoría “alevín” que cuenta con cinco (5) equipos formados por niños de entre diez (10) y once (11) años.

Por cuestiones metodológicas, el conjunto de equipos que componen el fútbol siete (7) entrena un total de tres (3) días durante la semana, intentando no entrenar en viernes y no pudiendo entrenar bajo ningún concepto en sábado o domingo por estar estos días destinados bien a los partidos, o bien a los descansos.

El fútbol once (11) masculino dentro de la cantera del Sevilla FC está formado por once (11) equipos de los cuales tres (3) de ellos son de la categoría “infantil”, que recoge a niños de entre doce (12) y trece (13) años. De la siguiente categoría, “cadete”, existen otros tres (3) equipos en los cuales se incluyen a los niños que se encuentran entre los catorce (14) y los quince (15) años. La última categoría que nos afecta en el desarrollo del problema es la categoría “juvenil”, formada por chicos de entre dieciséis (16) y dieciocho (18) años y que cuenta con un total de tres (3) equipos, aunque uno de ellos no lo tendremos en cuenta dado que su entrenamiento tiene lugar en horario de mañana, el División de Honor.

Además, existen dos (2) equipos más de fútbol once (11) que son el Sevilla C y el Sevilla Atlético, los cuales no tienen trascendencia en la planificación que se llevará a cabo por tener lugar sus entrenamientos en horario de mañana y quedar fuera del alcance de este proyecto, dado que en las mañanas no existen dificultades para la asignación de campos y horarios pues hay capacidad más que suficiente para albergar a los pocos equipos que trabajan en dichos turnos.

A continuación, hablaremos de la importancia que están adquiriendo los equipos femeninos poco a poco dentro de la cantera de este equipo. Actualmente se cuenta con un equipo de fútbol siete (7) en el que entrenan juntas niñas de la categoría “alevín” e “infantil” y con tres (3) equipos de fútbol once (11), uno de ellos con niñas pertenecientes a las categorías “cadete” y “juvenil”, otro de ellos de la categoría “senior” y el último que es el Sevilla Fútbol Club Femenino. Este primer equipo queda fuera del objeto del proyecto puesto que tiene un turno y un campo determinados que no afectan a la planificación de la cantera. Además, para la nueva temporada 2018-2019 se va a incorporar un equipo alevín que competirá en la categoría alevín masculina, pero que tampoco

nos afectará al problema puesto que se integrará en el campo número ocho (8) como si de un equipo más de escuela se tratase, en lugar de ser tratado como un equipo de cantera a efectos únicamente de planificación de horario.

MASCULINO		FEMENINO	
FÚTBOL 7	FÚTBOL 11	FÚTBOL 7	FÚTBOL 11
Prebenjamín A	Infantil A	Femenino D	Femenino A (Primer equipo)
Prebenjamín B	Infantil B	Alevín fem	Femenino B
Benjamín A	Infantil C		Femenino C
Benjamín B	Cadete A		
Benjamín C	Cadete B		
Benjamín D	Cadete C		
Alevín A	Juvenil A (División de Honor)		
Alevín B	Juvenil B (Liga Nacional)		
Alevín C	Juvenil C		
Alevín D	Sevilla C		
Alevín E	Sevilla Atlético		

Tabla 1. Equipos que componen la cantera

8.1.1 Prioridad de los equipos

Puesto que la capacidad de la ciudad deportiva es limitada se hace imposible que todos los equipos entrenen en las condiciones más beneficiosas para la mejora del rendimiento, es por este motivo que se establece un orden de prioridad de los equipos en base al cual se cumplirán las restricciones que más adelante se detallan. Dicho orden puede verse en la siguiente tabla.

Orden de prioridad	Equipos
1º	Liga Nacional
2º	Cadete A
3º	Infantil A
4º	Alevín A
5º	Benjamín A
6º	Prebenjamín A
7º	Juvenil C
8º	Cadete B
9º	Infantil B
10º	Alevín C
11º	Benjamín C
12º	Prebenjamín B
13º	Cadete C
14º	Infantil C
15º	Alevín B
16º	Benjamín B
17º	Benjamín D
18º	Alevín D
19º	Alevín E
20º	Femenino B
21º	Femenino C
22º	Femenino D

Tabla 2. Orden de prioridad de los equipos

8.2 Instalaciones disponibles

La ciudad deportiva Ramón Cisneros Palacios se encuentra localizada en las afueras de la ciudad sevillana, junto

a la carretera de Utrera. El Sevilla cuenta allí con doscientos cincuenta mil metros cuadrados (250.000 m²) sobre los que se han construido un total de once (11) campos de fútbol once (11), un campo de fútbol siete (7) y un gimnasio, quedando aún superficie disponible para posibles ampliaciones futuras.



3. Localización Ciudad Deportiva J.R. Cisneros Palacios

Entre los campos de fútbol once (11) existen siete (7) de ellos cuyo césped es natural, siendo el resto de césped artificial. Además, existe un campo de fútbol siete (7), el campo doce (12), que también es de césped natural. En la medida de lo posible, nos transmiten el deseo desde el club de que cada equipo realice sus entrenamientos en la tipología de campo que comúnmente se emplee para los partidos de la liga de su categoría específica.

En la ilustración cinco (5) está representada la distribución del total de campos de la ciudad deportiva. En dicha imagen se muestran de un tono verde claro los campos que son de césped natural, es decir, los campos uno (1), dos (2), tres (3), cuatro (4), nueve (9), diez (10) y once (11) y en un tono verde más oscuro los campos que son de césped artificial, es decir, los campos cinco (5), seis (6), siete (7) y ocho (8).

En los campos, tanto de césped artificial como de césped natural, se llevan a cabo los entrenamientos básicos y los entrenamientos de tecnificación.

El gimnasio del que dispone el club para que sus jugadores puedan realizar los trabajos de fuerza y los entrenamientos preventivos permite albergar al mismo tiempo a dos (2) equipos, siempre que uno de ellos trabaje la fuerza y el otro haga ejercicios preventivos.



4. Campos de la Ciudad Deportiva J. R. Cisneros Palacios

Aplicadas a los diferentes campos de los que dispone la ciudad deportiva existen algunas restricciones que se detallan a continuación como punto de partida para la resolución de los modelos.

8.2.1 Entrenamientos a campo completo

Una de las restricciones marcadas por el Departamento de Optimización del Rendimiento es la necesidad de que todos los equipos que componen la cantera tengan la posibilidad de trabajar al menos un día en semana en campo completo, con lo que esto implica para cada categoría.

Desde el club se transmite que esta restricción es débil y que si, al resolver el modelo éste no tuviese solución factible, se podría optar en primer lugar por relajarla e imponerla únicamente para los equipos masculinos, ya que los equipos femeninos tienen otras prioridades. Para éstos se trataría de maximizar el número de equipos que pueden entrenar en campo completo al menos un día a la semana. Si el problema siguiese sin solución se relajaría para los equipos de menor prioridad y se procedería de igual modo. Por último, de seguir sin hallar una solución factible, se suprimiría esta restricción para el total de los equipos y se resolvería el modelo incluyendo una función objetivo que tratase de maximizar el número de equipos que entrenan en campo completo al menos una vez en semana, teniendo siempre presente el orden de prioridades que el club establece para ellos.

8.2.2 Capacidad del gimnasio

Esta restricción ha sido mencionada de alguna forma durante la descripción de las instalaciones. Como se comentaba, la capacidad del gimnasio y la distribución de sus máquinas en planta únicamente permiten que pueda ser empleado por dos equipos al mismo tiempo. Es importante que esos equipos estén realizando bien entrenamientos de fuerza, o bien ejercicios preventivos, nunca coincidiendo en la actividad sendos equipos, ya que el gimnasio no está preparado para albergar en la misma área de trabajo a dos equipos simultáneamente.

8.2.3 Estadio Jesús Navas

El campo uno (1), conocido popularmente como “Mini Estadio” y recientemente renombrado como Estadio Jesús Navas, no podrá emplearse en ningún caso para el entrenamiento de equipos de cantera, a excepción del Sevilla Atlético o del División de Honor que se escapan del objeto de estudio de nuestro proyecto. Este campo es el destinado a acoger los partidos del Sevilla Atlético y de la UEFA Youth League. Por este motivo, solo podría utilizarse por los equipos mencionados de cara a la preparación de algún partido. Dado que ambos equipos quedan fuera de nuestro estudio, optamos por no considerar dicho campo en el modelo.

8.2.4 Campo dos

Queda restringido el uso del campo dos (2) para los entrenamientos de la tarde, pues es el campo reservado para los entrenamientos del Sevilla Atlético que tienen lugar en horario de mañana y como es de césped natural, no puede usarse el mismo día durante la mañana y la tarde.

8.2.5 Campo tres

Al igual que sucede con el campo dos (2), este campo queda exento de ser usado por algún equipo de la cantera para los entrenamientos de la tarde pues se reserva para los entrenamientos del primer equipo que tienen lugar en horario de mañana.

En ocasiones, este campo puede ser usado por los porteros para su entrenamiento debido a que el uso que estos hacen del mismo no supone un desgaste significativo para el césped.

8.2.6 Campo cuatro

El campo cuatro (4) está reservado igualmente para el primer equipo, además de albergar los partidos oficiales del Sevilla C y del División de Honor.

8.2.7 Campo seis

Este campo, por motivos de seguridad y organización, es el destinado a los partidos de las ligas de fútbol siete (7) que se disputan los viernes en la ciudad deportiva. Es por ello que queda restringido su uso para los entrenamientos dicha tarde.

8.2.8 Campos destinados a la Escuela de Fútbol Sevilla FC Antonio Puerta

La entidad Sevilla Fútbol Club cuenta con la Fundación Sevilla FC, la cual pretende transmitir los valores del club mediante el desarrollo de diferentes actividades de índole deportiva, social y cultural. Entre las diferentes actividades que a través de la Fundación se llevan a cabo, destaca la Escuela de Fútbol Sevilla FC Antonio Puerta mediante la cual se forma a niños y niñas de todas las edades en valores tales como la tolerancia, la cooperación, la motivación o el compromiso en un clima, como no podía ser de otra forma, futbolístico que sigue la misma metodología de entrenamientos y competición que la cantera del Sevilla FC.

Esta actividad tiene lugar en la ciudad deportiva en horario de tarde, conviviendo con los entrenamientos de los equipos de la cantera objeto de nuestro estudio. Esto limita el uso del campo número ocho (8) durante los primeros turnos de entrenamiento, quedando libre únicamente a partir de las ocho de la tarde (20:00h).

8.2.9 Campos nueve y diez

A comienzos de la pasada temporada 2017-2018 se comenzó la resiembra de estos campos y por ello no pudieron ser incluidos en la planificación de entrenamientos de dicha temporada. Tras el descanso de navidad se comenzaron a usar y podrán ser incluidos en el horario de la próxima temporada 2018-2019, por tanto, podemos disponer de dos (2) campos más que a priori quedaban restringidos.

8.2.10 Campo once

En la planificación de la temporada 2017-2018 encontramos este campo en uso, pero se nos ha transmitido por parte del club que para la próxima temporada 2018-2019 se llevarán a cabo labores de mejora del césped y por tanto no podrá ser incluido en la nueva planificación. Al igual que ocurrió con los campos nueve (9) y diez (10), es posible que a partir del descanso de navidad pueda ser utilizado nuevamente, pero no podemos considerarlo al no estar completamente seguros de que ello vaya a ser efectivamente así. Además, es muy probable que si estuviese listo a mediados de temporada, se asignase directamente a los entrenamientos del Sevilla Fútbol Club Femenino.

8.2.11 Campos destinados al entrenamiento de porteros

El campo número doce (12), el cual es de césped natural y cuyo tamaño es categoría fútbol siete (7), no podrá ser considerado para su uso en la planificación de horarios de entrenamiento de los equipos de cantera, pues es empleado para el entrenamiento de los diferentes porteros pertenecientes a las categorías de fútbol siete (7). Si existiese algún día en el que estos no lo usasen, entonces quedaría libre para su utilización, pero en principio se limita al uso por los porteros.

Los porteros de las categorías de fútbol once (11) realizan sus entrenamientos en los campos dos (2) o tres (3) ya que, aunque estos campos deben ser reservados para el Primer Equipo y el Sevilla Atlético, su entrenamiento es muy suave y no supone un daño para el césped de dichos campos.

8.3 Fundamento deportivo de las restricciones

Existen restricciones en nuestro problema que están fundamentadas en el acondicionamiento físico, es decir, provienen de grandes estudios sobre la mejora de los deportistas a través de los entrenamientos. Dichas restricciones nacen de decisiones tomadas por la Dirección en aras de alcanzar el rendimiento máximo en sus jugadores y, por tanto, tienen una gran importancia y deben ser cumplidas de forma estricta.

8.3.1 El número de entrenamientos

La primera restricción a considerar en este aspecto es el número de entrenamientos semanales que debe realizar cada equipo de cada tipo de entrenamiento.

Esto varía principalmente por la categoría a la que pertenezca cada equipo, a excepción de la categoría “cadete” en la cual existe distinción entre equipos.

Los equipos de fútbol siete (7) junto con la categoría “infantil” al completo de fútbol once (11) y con el equipo C de la categoría “cadete” tienen entrenamiento base tres (3) días en semana por decisión técnica. El resto de equipos masculinos tienen todos entrenamiento base cuatro (4) días en semana, también por decisión técnica.

En cuanto al fútbol femenino encontramos que el equipo “femenino D” entrena en campo dos (2) días en semana, los equipos B y C entrenan en campo tres (3) días en semana y, por último, el primer equipo entrena en campo en cuatro (4) ocasiones durante la semana.

Así pues, puede verse en las tres (3) y cuatro (4) el número de entrenamientos semanales que ha de realizar cada equipo.

MASCULINO			
FÚTBOL 7	nº entrenamientos	FÚTBOL 11	nº entrenamientos
Prebenjamín A	3	Infantil A	3
Prebenjamín B	3	Infantil B	3
Benjamín A	3	Infantil C	3
Benjamín B	3	Cadete A	4
Benjamín C	3	Cadete B	4
Benjamín D	3	Cadete C	3
Alevín A	3	Liga Nacional	4
Alevín B	3	Juvenil C	4
Alevín C	3		
Alevín D	3		
Alevín E	3		

Tabla 3 Número de entrenamientos básicos de los equipos masculinos

FEMENINO			
FÚTBOL 7	nº entrenamientos	FÚTBOL 11	nº entrenamientos
Femenino D	2	Femenino B	3
		Femenino C	3

Tabla 4. Número de entrenamientos básicos de los equipos femeninos

Los entrenamientos de fuerza y preventivos no se desarrollan en los equipos masculinos hasta la categoría “infantil” y los entrenamientos de tecnificación hasta la categoría “benjamín”. El número de entrenamientos de cada tipo es muy variable y se muestra en la tabla cinco (5).

MASCULINO							
FÚTBOL 7	Fuerza	Preventivos	Tecnificación	FÚTBOL 11	Fuerza	Preventivos	Tecnificación
Prebenjamín A	0	0	0	Infantil A	1	1	2
Prebenjamín B	0	0	0	Infantil B	1	1	2
Benjamín A	0	0	1	Infantil C	1	1	2
Benjamín B	0	0	1	Cadete A	1	1	1
Benjamín C	0	0	1	Cadete B	1	1	2
Benjamín D	0	0	1	Cadete C	1	1	1
Alevín A	0	0	2	Liga Nacional	1	2	1
Alevín B	0	0	1	Juvenil C	1	1	1
Alevín C	0	0	2				
Alevín D	0	0	1				
Alevín E	0	0	1				

Tabla 5. Número de entrenamientos específicos de los equipos masculinos

En cuanto a los equipos femeninos, los entrenamientos específicos que se tratarán de llevar a cabo para la siguiente temporada se muestran en la tabla seis (6). Se considera oportuno señalar que aunque aparentemente no se refleje trabajo de tecnificación para estos equipos esta tipología de entrenamientos si tiene lugar. Esto es debido a que éste se realiza dentro del horario de entrenamiento básico. Si reflejásemos en la tabla algún número diferente de cero (0) para los entrenamientos de tecnificación de los equipos femeninos el modelo reservaría un horario extraordinario para llevarlos a cabo y no sería la forma correcta de proceder.

FEMENINO							
FÚTBOL 7	Fuerza	Preventivos	Tecnificación	FÚTBOL 11	Fuerza	Preventivos	Tecnificación
Femenino D	0	0	0	Femenino B	1	1	0
				Femenino C	0	1	0

Tabla 6. Número de entrenamientos específicos de los equipos femeninos

8.3.2 Tipología del campo

Con anterioridad se comentó la necesidad de que los equipos hagan sus trabajos de entrenamiento en los campos de la tipología en la que se disputan los partidos de las ligas en las que participan. En la siguiente tabla se muestran los campos disponibles clasificados según su tipo de césped y los equipos que deben realizar sus entrenamientos en dichos campos.

Césped Natural	Césped artificial		
9, 10, 12	5, 6, 7, 8		
Prebenjamín A	Benjamín A	Alevín D	Cadete A
Prebenjamín B	Benjamín B	Alevín E	Cadete B
Benjamín C	Alevín A	Infantil A	Cadete C
Benjamín D	Alevín B	Infantil B	Liga Nacional
	Alevín C	Infantil C	Juvenil C

Los equipos femeninos no se encuentran incluidos en ninguna categoría puesto que no tienen preferencia entre un tipo de césped u otro, lo cual aporta flexibilidad a la hora de resolver el problema.

8.3.3 Día de descanso preferente

En base a numerosos estudios realizados en el ámbito de la recuperación entre entrenamientos, se ha concluido que el día de descanso que mejores resultados da es el martes, teniendo en cuenta la distribución de partidos y entrenamientos que tienen lugar durante la semana.

Dado que resulta imposible cuadrar que todos los equipos descansen dicho día por las instalaciones de las que dispone el club, será un objetivo del problema la búsqueda del mayor número de equipos que puedan hacerlo. Esto debemos hacerlo de forma coherente con el orden prioritario de equipo establecido por el decisor.

8.3.4 Duración de los entrenamientos

Como ya se ha comentado, existen cuatro tipos de entrenamientos diferentes que todos los equipos pueden realizar en algún momento durante la semana. Como eje central tenemos los entrenamientos de campo que tienen una duración de una (1) hora y media para cualquier equipo de cualquier categoría. El grupo de entrenamientos que se llevan a cabo en el gimnasio y que comprende el entrenamiento de fuerza y el entrenamiento preventivo se desarrolla en un tiempo de cuarenta y cinco (45) minutos. Por último, los entrenamientos de tecnificación tienen una duración variables en función de la categoría. Para los equipos de fútbol siete (7) tendrán una duración de treinta (30) minutos y para los equipos de fútbol once (11) tendrán una duración de cuarenta y cinco (45) minutos.

Como excepción, se plantea que los equipos de fútbol once (11) cuyos turnos de entrenamiento estén limitados por pertenecer a alguna ruta de autobús realicen entrenamientos de tecnificación de una duración igual a treinta (30) minutos en lugar de los cuarenta y cinco (45) minutos que sería conveniente, pues de otro modo no sería factible la resolución del problema.

8.3.5 Planificación entrenamientos específicos

Siempre que algún equipo deba realizar algún tipo de entrenamiento específico se llevará a cabo al comienzo del entrenamiento y nunca al final por motivos físicos de optimización del rendimiento de los jugadores.

8.3.6 Planificación entrenamientos de fuerza

Según investigaciones acerca de la recuperación de los deportistas, es recomendable que los entrenamientos de fuerza tengan lugar el día previo a un día de descanso. Por tanto, se procurará que se cumpla para el conjunto de equipos. Si al acotar la región de admisibilidad de esta forma el modelo no proporcionase ninguna solución válida, se podría optar por maximizar el número de equipos que cumplen con el día óptimo del trabajo de fuerza, siempre considerando el orden de prioridades preestablecido.

8.3.7 Entrenamientos de fuerza categoría “infantil”

Por decisión técnica del cuerpo de entrenadores y preparadores físicos de la cantera, los equipos pertenecientes a la categoría “infantil” realizan sus entrenamientos en el propio campo y no en el gimnasio.

La forma en la cual se considera esto dentro del modelo es tratando los entrenamientos de fuerza de la categoría “infantil” como si se tratasen de entrenamientos preventivos.

8.3.8 Entrenamientos de fuerza equipos “Liga Nacional”, “Cadete A” e “Infantil A”

Estos equipos están en lo más alto de la clasificación de equipos preferentes de la cantera del Sevilla FC, tal como se mostró en la tabla dos (2), por ello es importante para el club, según lo explicado en el capítulo 8.3.6, que el entrenamiento de fuerza tenga lugar el día previo al descanso. Además, esto se une con la condición expuesta en el capítulo 8.3.3 que establecerá el descanso de estos equipos el martes. Dado que no es aconsejable en ningún caso realizar un entrenamiento de fuerza el día posterior a jugar un partido, nos piden desde el club que los entrenamientos de fuerza tanto del equipo Liga Nacional como del Cadete A y del Infantil A puedan ser variables, es decir, que se realice en lunes cuando el partido de esa semana tenga lugar en sábado y que se lleve a cabo en miércoles cuando el equipo juegue el domingo para que así de minimicen las lesiones y se maximice el rendimiento de los jugadores.

En el caso del equipo Infantil A, como su entrenamiento de fuerza se realiza en el propio campo y no en el gimnasio, como ya se ha comentado, bastará con alternar tecnificación y fuerza la semana que el partido se dispute el domingo.

8.3.9 Días de partido

Los diferentes equipos que componen la cantera del Sevilla FC compiten durante la temporada en ligas distintas, esto hace que los días de partido difieran y esto condiciona los días de entrenamiento.

Una de las restricciones del problema es la imposibilidad de los equipos de fútbol siete (7) de entrenar los viernes, puesto que sus partidos son generalmente esos días y en ocasiones los sábados.

Los equipos de fútbol once (11) pueden entrenar sin inconveniente de lunes a viernes, dado que los partidos de las competiciones en las que participan se juegan en sábado o domingo y no hay posibilidad de que coincida.

8.4 Horarios prefijados

El tratamiento del tiempo que se lleva a cabo en este problema es un tratamiento que lo divide en diferentes períodos en los que se desarrollan los diferentes tipos de entrenamientos. Estos períodos están prefijados y son invariables, por tanto, únicamente se puede jugar con qué equipos ocupan cada período, pero nada más.

Los períodos de entrenamientos están condicionados por una parte por el horario de los niños que se desplazan desde las afueras de la ciudad. Estos niños pertenecen a diferentes equipos de categorías de fútbol 7 (siete) y se desplazan hasta aquí mediante diferentes rutas de autobús que el club pone a su disposición. Dichos niños proceden de tres zonas diferentes de Andalucía que son: Huelva, Cádiz y la Sierra Sur de Sevilla. Para facilitar

que estos niños puedan venir a entrenar se hace indispensable que los entrenamientos no comiencen nunca antes de las 17:30h, sean del tipo que sean.

El segundo condicionante es meramente técnico y tiene que ver con la duración que ha de tener cada tipo de entrenamiento según la categoría de la que se trate para optimizar de esta forma el rendimiento de los jugadores. Estas duraciones se detallaron con anterioridad en el punto que trata sobre el fundamento deportivo de las restricciones.

En la tabla nueve (9) se muestran los diferentes turnos con los que se ha trabajado hasta ahora en la planificación de los entrenamientos.

	Base	Fuerza	Preventivo	Tecnificación
Primer turno	18:00 - 19:30	17:30 - 18:30	17:30 - 18:30	17:30 - 18:00
Segundo turno	19:30 - 21:45	18:30 - 19:15	18:30 - 19:15	19:00 - 19:30
Tercer turno	20:00 - 21:30	19:15 - 20:00	19:15 - 20:00	19:15 - 20:00

Tabla 7. Horario actual de entrenamientos

Con el desarrollo de este proyecto vamos a intentar establecer un horario óptimo que no tenga tanta rigidez, sino que nos permita jugar con periodos de quince (15) minutos que aporten algo de flexibilidad a los horarios y que compondrán finalmente la duración total de cada entrenamiento.

8.5 Restricciones relativas al factor humano

En el funcionamiento de la cantera del Sevilla FC interviene un capital humano que supera las cuatrocientas (400) personas, entre los que se encuentran, jugadores, entrenadores, preparadores físicos y personal de dirección y administración. Todos ellos tienen circunstancias personales y familiares que intentan ser coordinadas con las complicaciones que eso conlleva. Algunos de esos condicionantes aportan restricciones a nuestro problema que hacen que la complejidad del mismo aumente.

8.5.1 Desplazamientos en autobús

A entrenar en los equipos de la cantera del Sevilla FC vienen niños desde diferentes partes de España, incluso del mundo. Algunos, cuando llegan a una edad concreta, hacen uso de la residencia que el club pone a su disposición para evitar grandes desplazamientos, otros deciden venir junto con su familia a Sevilla a vivir y otros acuden cada día de entrenamiento a las instalaciones, bien por sus propios medios, o bien mediante tres (3) rutas de autobús que el Sevilla FC flota para facilitar todo lo posible su asistencia.

Existe una ruta que abarca la zona de Cádiz, otra que transporta niños desde la Sierra Sur y la última que alberga la zona de Huelva, además se está estudiando la inclusión de una cuarta ruta para niños de la provincia de Córdoba. Todas ellas llegan a la ciudad deportiva a las cinco de la tarde (17:30h) y parten de vuelta a las siete de la tarde (19:30h), siendo imposible que lleguen antes o partan más tarde, por tanto, los equipos en los cuales entrena algún niño que acude a los entrenamientos en alguna de las citadas rutas están obligados a entrenar siempre en el primer turno.

Los equipos que incluyen en sus filas a algún jugador perteneciente a alguna ruta de autobús son:

- Prebenjamín A
- Benjamín A
- Benjamín C
- Alevín A
- Alevín C
- Infantil A
- Cadete A
- Juvenil C

8.5.2 Horarios del fútbol siete

Dado que en las categorías de fútbol siete (7) entrenan niños desde los cinco (5) hasta los doce (12) años, se procurará que éstos lo hagan en el primer turno puesto que el segundo haría que llegasen demasiado tarde a casa, sobre todo para los más pequeños. En el caso de que fuese imposible que el total de equipos de fútbol siete (7) entrenasen en el primer turno, tendrían prioridad para hacerlo los equipos de la categoría “prebenjamín”, seguidos de los pertenecientes a la categoría “benjamín” y finalizando con la categoría “alevín”.

8.5.3 Restricciones relacionadas con la disponibilidad del personal

Por motivos personales, familiares y laborales de diferentes miembros del cuerpo técnico de los distintos equipos existen restricciones en relación a los días que no pueden entrenar los equipos a los que éstos pertenecen.

- El equipo Cadete B no puede entrenar los lunes.
- El equipo Infantil A no puede entrenar los martes.
- El Femenino B no puede entrenar antes de las ocho de la tarde (20:00h).
- El Femenino C no puede entrenar antes de las siete de la tarde (19:00h).

9 RESOLUCIÓN MODELO SIMPLE

En este capítulo se resuelve, haciendo uso de los datos proporcionados por el club como datos de partida, el modelo simple, expuesto en el capítulo cinco (5), como primera aproximación a la resolución del problema planteado. El objetivo de esta primera resolución es la validación del modelo. Los resultados no serán presentados a la organización, sino que se emplearán únicamente a nivel de investigación.

9.1 Maximización del descanso preferente

De las diferentes posibilidades de resolución que se habían planteado para este modelo se ha optado por comenzar resolviendo el modelo tratando de maximizar el número de equipos que realizan su descanso el martes, teniendo en cuenta el orden de prioridades proporcionado por el club. Puesto que se proporcionó una lista ordenada de los equipos, ha sido necesaria realizar una ponderación de los diferentes equipos para su aplicación al modelo, los cuales pueden ser observados en la tabla que se muestra a continuación.

Orden de prioridad	Equipos	Peso asignado
1°	Liga Nacional	1500
2°	Cadete A	1400
3°	Infantil A	1300
4°	Alevín A	1200
5°	Benjamín A	1100
6°	Prebenjamín A	1000
7°	Juvenil C	600
8°	Cadete B	500
9°	Infantil B	400
10°	Alevín C	250
11°	Benjamín C	200
12°	Prebenjamín B	150
13°	Cadete C	100
14°	Infantil C	50
15°	Alevín B	30
16°	Benjamín B	25
17°	Benjamín D	20
18°	Alevín D	15
19°	Alevín E	10
20°	Femenino B	3
21°	Femenino C	2
22°	Femenino D	1

Tabla 8. Pesos en función de la prioridad

De esta forma se obtienen tres soluciones admisibles en un tiempo de resolución que no alcanza un (1) segundo.

9.2 Conclusiones obtenidas

La primera conclusión puede extraerse del hecho de que el problema sea capaz de otorgar soluciones a pesar de la imposición de dos restricciones que aparentemente podían suponer un problema: que todos los equipos de fútbol siete (7) entrenen en el primer turno y que todos los equipos entrenen al menos un día a la semana en campo completo. Esto significa que la capacidad disponible en la ciudad deportiva para realizar los entrenamientos es suficiente para satisfacer las necesidades que en un primer momento han transmitido desde el

departamento de optimización del rendimiento.

En cuanto al asunto de asignar un campo completo a cada equipo al menos una vez por semana puede verse en la solución la existencia de equipos que cuentan con dicho campo asignado más de una vez por semana. Esto nos hace ver que con la función objetivo que estamos resolviendo en esta primera aproximación cabe la posibilidad de que la capacidad no se esté ocupando por completo y pueda mejorar el rendimiento de los equipos si, además de buscar el descanso el martes, buscamos que se maximice el número de equipos que entrenen en campo completo, respetando el orden de prioridades, de modo que se aprovechen las instalaciones al máximo posible.

Estas conclusiones son muy alentadoras a la hora de abordar la resolución de la fase I del modelo complejo pues hacen ver que la capacidad no está tan limitada como se pensaba en un primer momento.

En la tabla nueve (9) se muestra una de las posibles soluciones que podrían ser aplicadas y que se obtienen con la resolución del modelo simple. Junto al nombre de cada equipo se muestra una "S" si tiene asignado el campo sencillo o una "C" si lo tiene asignado completo.

	LUNES		MARTES		MIÉRCOLES		JUEVES		VIERNES	
PRIMER TURNO	Prebenjamín A	S			Prebenjamín A	S	Prebenjamín A	C		
	Prebenjamín B	S			Prebenjamín B	S	Prebenjamín B	C		
	Benjamín A	S			Benjamín A	S	Benjamín A	C		
	Benjamín B	S	Benjamín B	C			Benjamín B	S		
	Benjamín C	S			Benjamín C	C	Benjamín C	S		
	Benjamín D	C			Benjamín D	C	Benjamín D	S		
	Alevín A	S			Alevín A	C	Alevín A	S		
	Alevín B	S	Alevín B	C	Alevín B	S				
	Alevín C	C			Alevín C	S	Alevín C	S		
	Alevín D	S	Alevín D	C			Alevín D	S		
	Alevín E	S	Alevín E	C	Alevín E	S				
	Cadete A	S			Infantil A	S	Infantil A	S	Infantil A	C
	Juvenil C	S	Juvenil C	C	Cadete A	C	Cadete A	S	Cadete A	S
							Juvenil C	S	Juvenil C	S
						Femenino D	C	Femenino D	C	
SEGUNDO TURNO	Infantil B	S			Infantil B	C				
					Infantil C	S	Infantil C	S	Infantil C	C
	Cadete C	S	Cadete B	C	Cadete B	S	Cadete B	S	Cadete C	C
	Liga Nacional Femenino C	C					Cadete C	S		
						Liga Nacional	S			
						Femenino C	C		Femenino C	C
TERCER TURNO							Infantil B	S		
					Liga Nacional Femenino B	S			Cadete B	S
	Femenino B	C					Femenino B	S	Liga Nacional	S

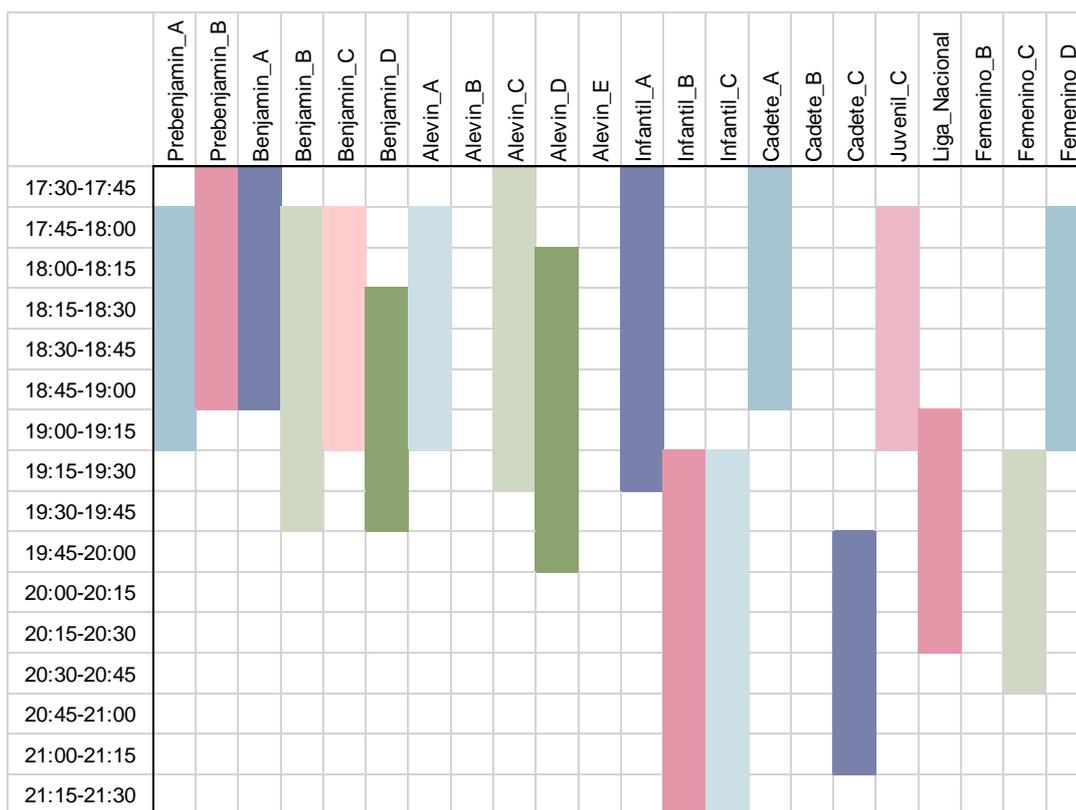
Tabla 9. Primera resolución: horario

A continuación, con los datos proporcionados por el club, se resuelve la primera fase del modelo complejo, la cual se detalló en el capítulo seis (6). Con esta resolución obtendremos un horario de entrenamientos para el total de los equipos que componen la cantera. Estos resultados si serán presentados a la organización para que tras su validación dé comienzo la resolución de la fase dos (2), que necesita de la solución de ésta.

10.1 Maximización del descanso preferente

Comenzamos resolviendo el modelo empleando la función objetivo análoga a la que se empleó en el modelo simple, la maximización de los descansos que se producen el martes.

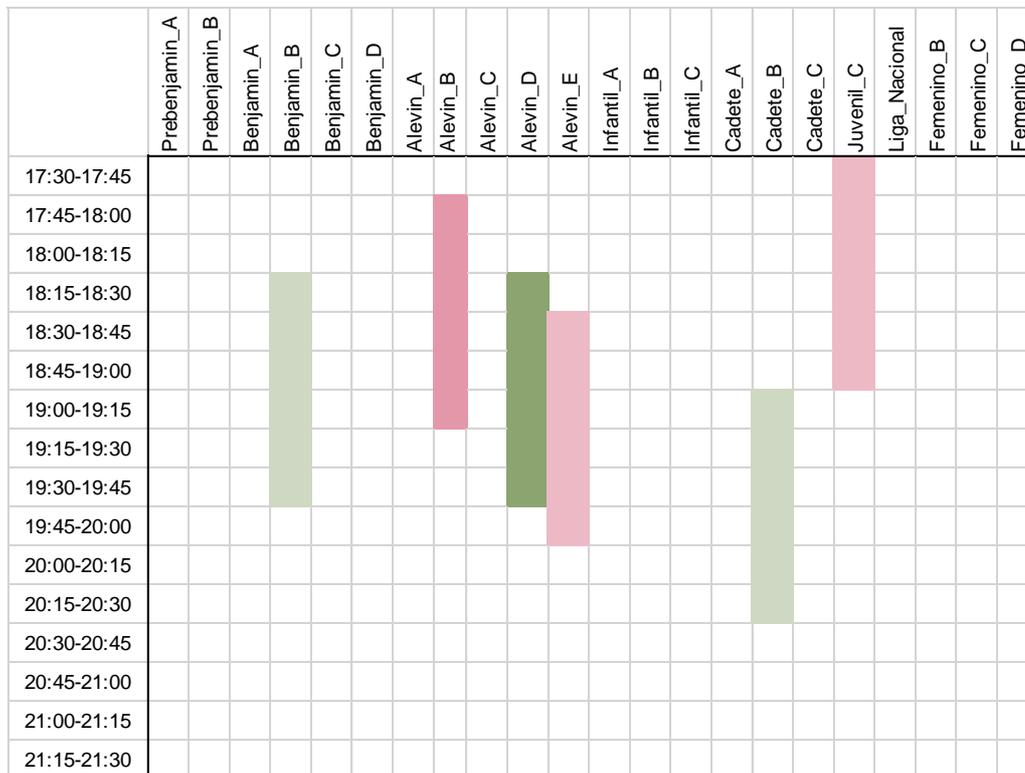
Al resolver el modelo con esta función objetivo se obtienen tres (3) soluciones en aproximadamente siete (7) segundos. A continuación se muestra representadas una de ellas.



5. Horario del lunes: maximización descanso

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A	Completo	Básico
Prebenjamín B	Sencillo	Básico
Benjamín A	Sencillo	Básico
Benjamín B	Sencillo	Tecnificación
Benjamín C	Sencillo	Básico
Benjamín D	Completo	Básico
Alevín A	Completo	Básico
Alevín B	X	X
Alevín C	Sencillo	Tecnificación
Alevín D	Sencillo	Tecnificación
Alevín E	X	X
Infantil A	Sencillo	Tecnificación
Infantil B	Sencillo	Tecnificación
Infantil C	Sencillo	Tecnificación
Cadete A	Sencillo	Básico
Cadete B	X	X
Cadete C	Completo	Básico
Juvenil C	Sencillo	Básico
Liga Nacional	Sencillo	Básico
Femenino B	X	X
Femenino C	Sencillo	Básico
Femenino D	Completo	Básico

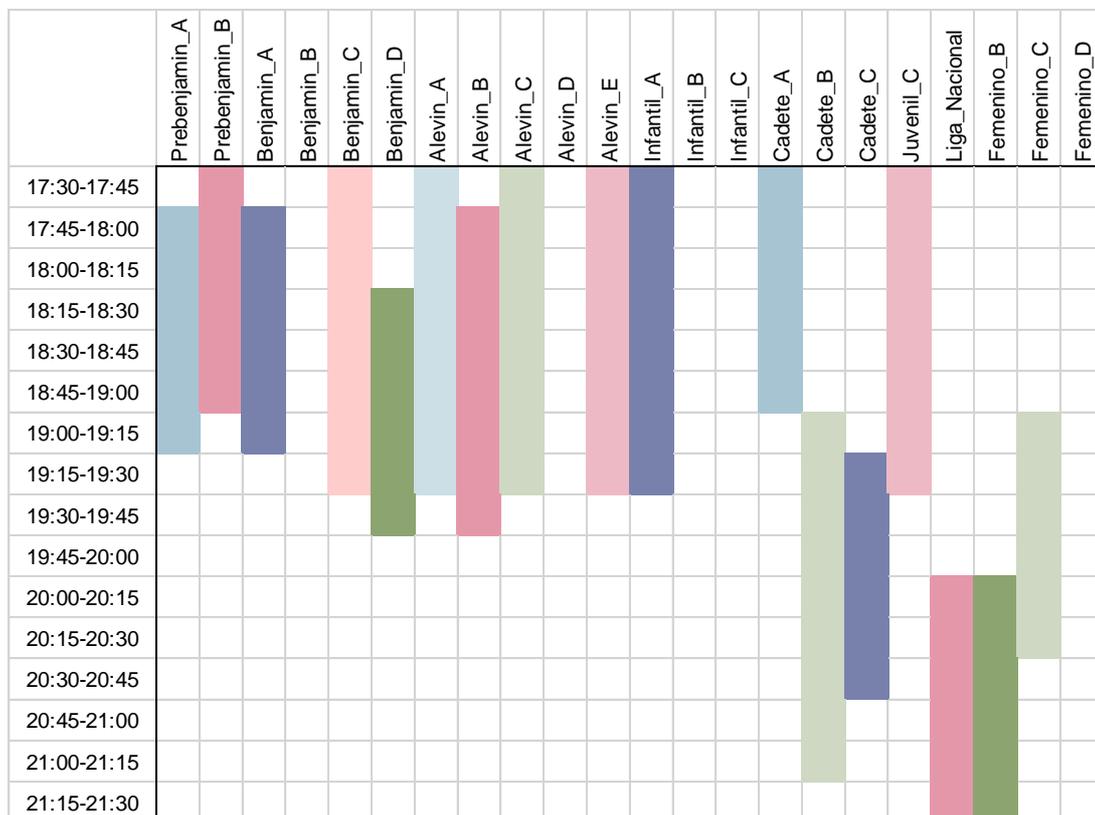
Tabla 10. Tipo de campo y entrenamiento del lunes: maximización descanso



6. Horario del martes: maximización descanso

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A	Completo	Básico
Prebenjamín B		
Benjamín A		
Benjamín B		
Benjamín C	Completo	Básico
Benjamín D		
Alevín A	Completo	Básico
Alevín B	Completo	Básico
Alevín C		
Alevín D		
Alevín E		
Infantil A		
Infantil B	Completo	Básico
Infantil C		
Cadete A	Completo	Básico
Cadete B		
Cadete C		
Juvenil C		
Liga Nacional		
Femenino B		
Femenino C		
Femenino D		

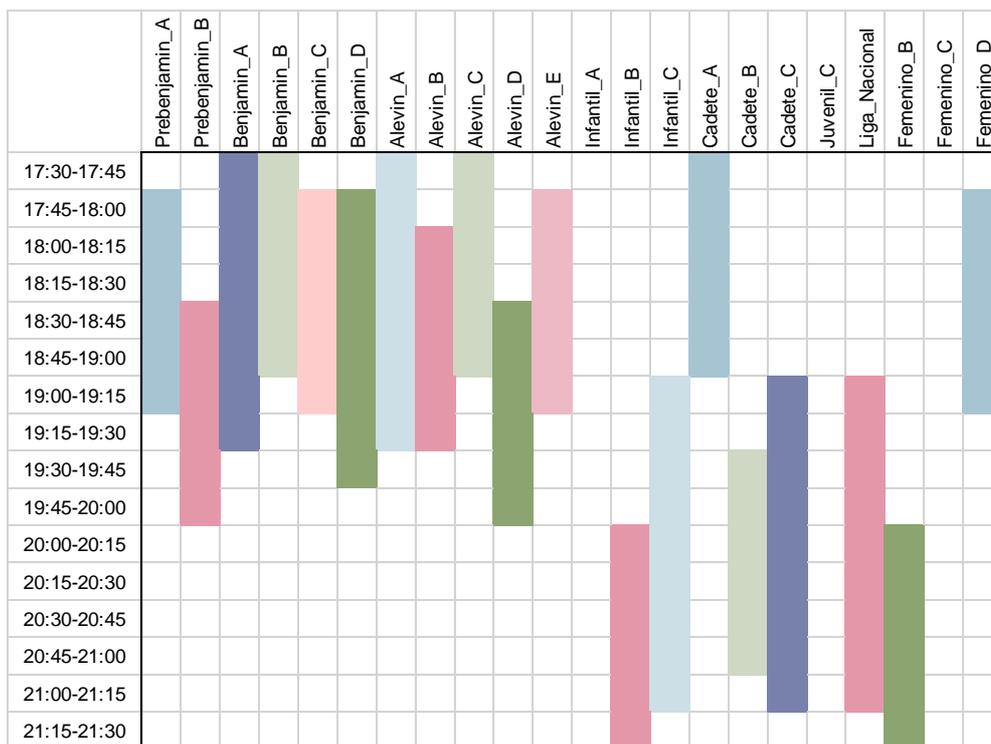
Tabla 11. Tipo de campo y entrenamiento del martes: maximización descanso



7. Horario del miércoles: maximización descanso

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A	Sencillo	Básico
Prebenjamín B	Completo	Básico
Benjamín A	Completo	Básico
Benjamín B	X	X
Benjamín C	Sencillo	Tecnificación
Benjamín D	Sencillo	Básico
Alevín A	Sencillo	Tecnificación
Alevín B	Sencillo	Tecnificación
Alevín C	Sencillo	Tecnificación
Alevín D	X	X
Alevín E	Sencillo	Tecnificación
Infantil A	Sencillo	Tecnificación
Infantil B	X	X
Infantil C	X	X
Cadete A	Sencillo	Básico
Cadete B	Sencillo	Tecnificación
Cadete C	Sencillo	Básico
Juvenil C	Sencillo	Tecnificación
Liga Nacional	Sencillo	Básico
Femenino B	Completo	Básico
Femenino C	Completo	Básico
Femenino D	X	X

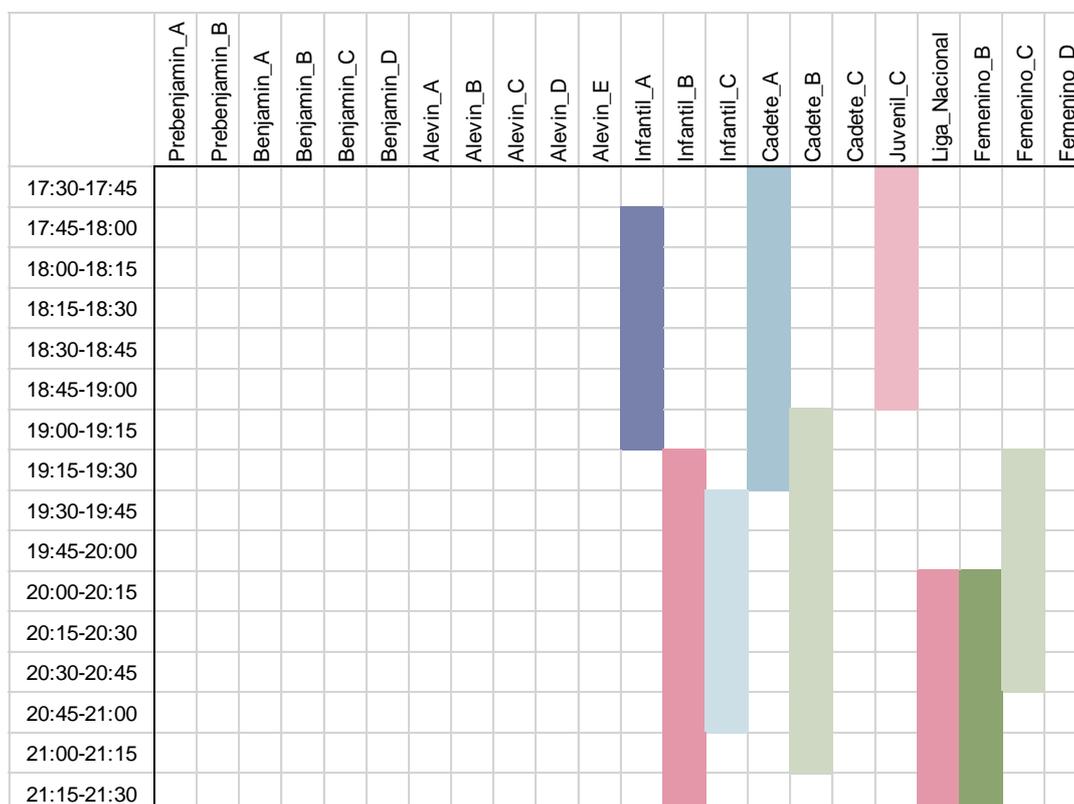
Tabla 12. Tipo de campo y entrenamiento del miércoles: maximización descanso



8. Horario del jueves: maximización descanso

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A	Sencillo	Básico
Prebenjamín B	Sencillo	Básico
Benjamín A	Sencillo	Tecnificación
Benjamín B	Sencillo	Básico
Benjamín C	Completo	Básico
Benjamín D	Sencillo	Tecnificación
Alevín A	Sencillo	Tecnificación
Alevín B	Sencillo	Básico
Alevín C	Completo	Básico
Alevín D	Sencillo	Básico
Alevín E	Sencillo	Básico
Infantil A	X	X
Infantil B	Completo	Básico
Infantil C	Sencillo	Tecnificación
Cadete A	Completo	Básico
Cadete B	Sencillo	Básico
Cadete C	Sencillo	Tecnificación
Juvenil C	X	X
Liga Nacional	Sencillo	Tecnificación
Femenino B	Completo	Básico
Femenino C	X	X
Femenino D	Completo	Básico

Tabla 13. Tipo de campo y entrenamiento del jueves: maximización descanso



9. Horario del viernes: maximización descanso

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A		
Prebenjamín B		
Benjamín A		
Benjamín B		
Benjamín C		
Benjamín D		
Alevín A		
Alevín B		
Alevín C		
Alevín D		
Alevín E		
Infantil A	Completo	Básico
Infantil B	Sencillo	Tecnificación
Infantil C	Completo	Básico
Cadete A	Sencillo	Tecnificación
Cadete B	Sencillo	Tecnificación
Cadete C		
Juvenil C	Sencillo	Básico
Liga Nacional	Completo	Básico
Femenino B	Completo	Básico
Femenino C	Sencillo	Básico
Femenino D		

Tabla 14. Tipo de campo y entrenamiento del viernes: maximización descanso.

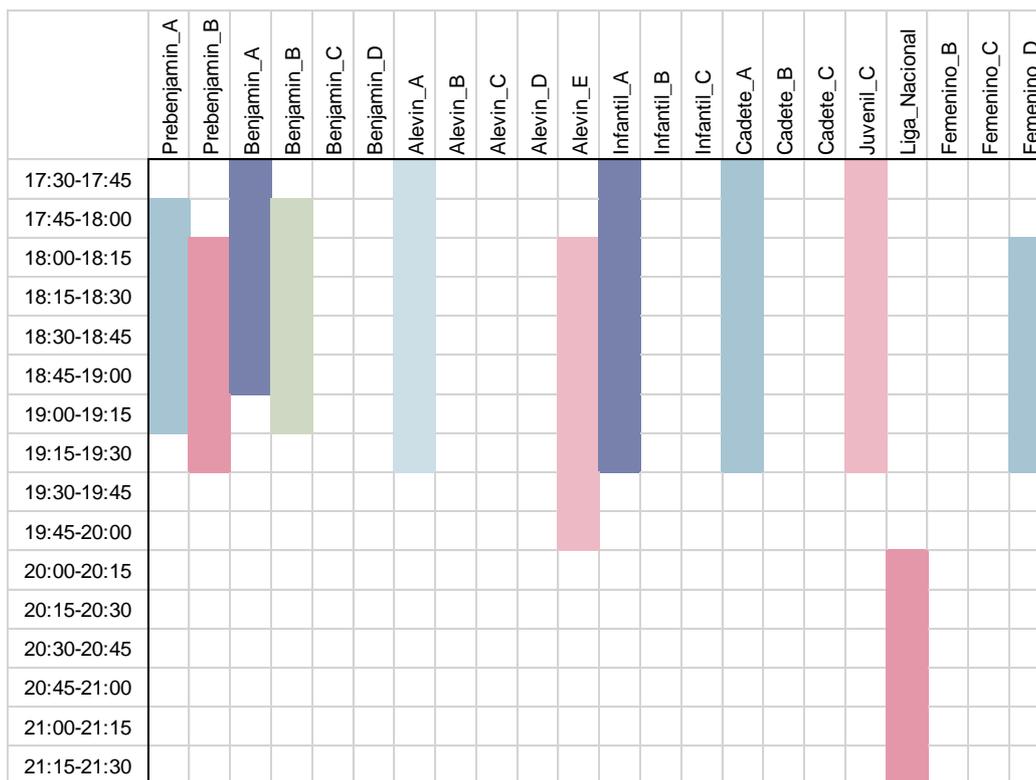
10.1.1 Conclusiones de la maximización del descanso

Los datos que se obtienen al resolver el problema con esta función objetivo son bastante favorables puesto que únicamente son seis (6) los equipos que son asignados al martes, cuatro (4) de ellos pertenecientes a prioridades inferiores a la decimoquinta. De los otros dos (2) que sí son equipos que podrían ser considerados preferentes, hay que destacar que el Cadete B debe entrenar obligatoriamente el martes puesto que tiene restringido entrenar el lunes y el número de entrenamientos semanales a realizar es cuatro (4).

10.2 Maximización del entrenamiento en campo completo

La segunda función objetivo que se ha resuelto para este modelo busca la maximización de los entrenamientos que se producen en campo completo, teniendo presente las prioridades que se establecen para los diferentes equipos como pesos positivos en dicha función objetivo.

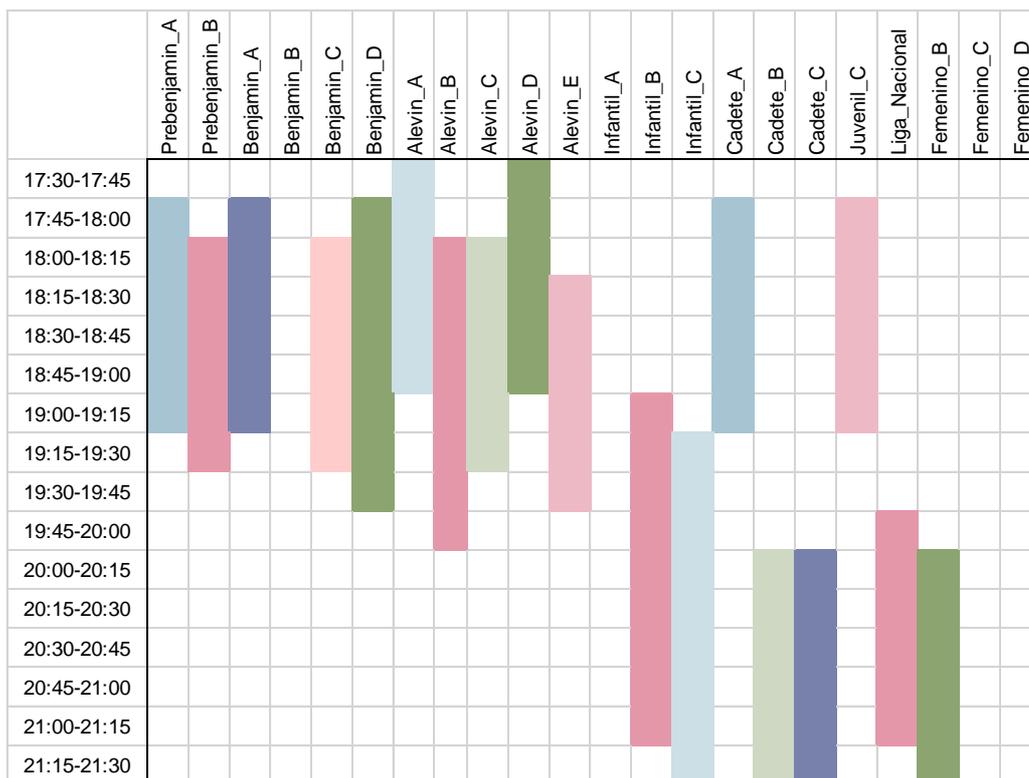
A continuación se muestran los horarios de una de las dos (2) soluciones que se obtienen en un tiempo de ejecución de aproximadamente siete (7) segundos.



10. Horario del lunes: maximización campo completo

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A	Completo	Básico
Prebenjamín B	Completo	Básico
Benjamín A	Completo	Básico
Benjamín B	Completo	Básico
Benjamín C	Completo	Básico
Benjamín D	Completo	Básico
Alevín A	Sencillo	Tecnificación
Alevín B	Sencillo	Tecnificación
Alevín C	Sencillo	Tecnificación
Alevín D	Sencillo	Tecnificación
Alevín E	Sencillo	Tecnificación
Infantil A	Sencillo	Tecnificación
Infantil B	Sencillo	Tecnificación
Infantil C	Sencillo	Tecnificación
Cadete A	Sencillo	Tecnificación
Cadete B	Sencillo	Tecnificación
Cadete C	Sencillo	Tecnificación
Juvenil C	Sencillo	Tecnificación
Liga Nacional	Completo	Básico
Femenino B	Completo	Básico
Femenino C	Completo	Básico
Femenino D	Completo	Básico

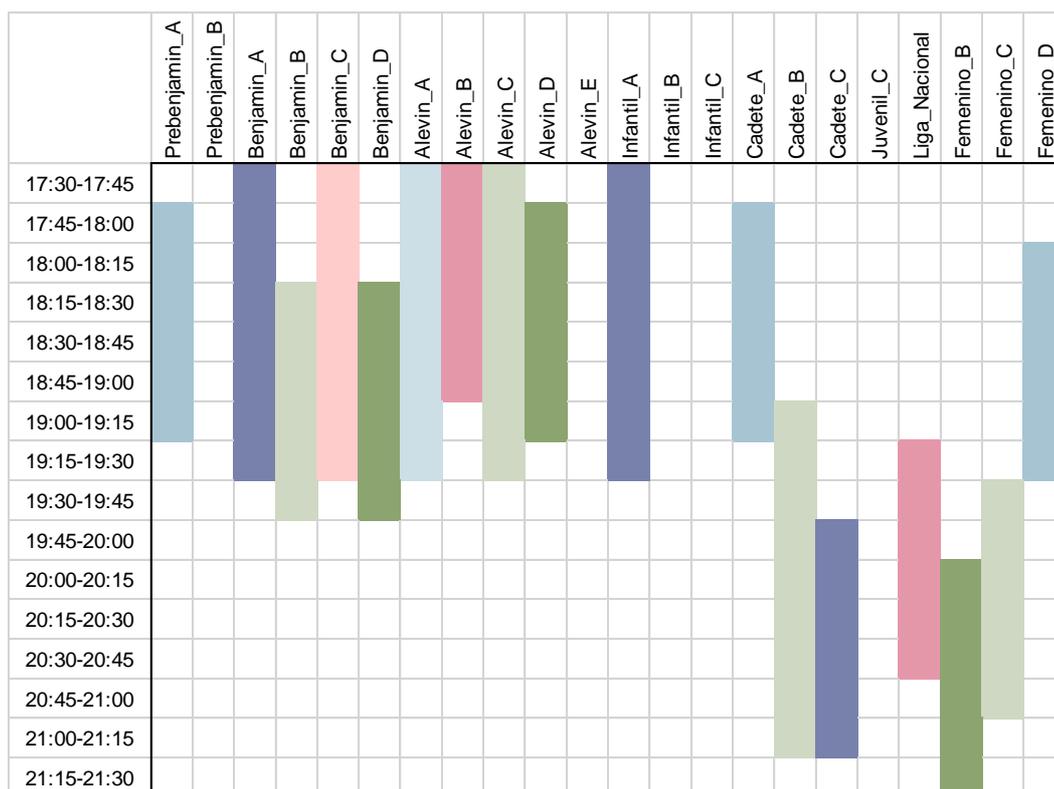
Tabla 15. Tipo de campo y entrenamiento del lunes: maximización campo completo



11. Horario del martes: maximización campo completo

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A	Completo	Básico
Prebenjamín B	Completo	Básico
Benjamín A	Sencillo	Básico
Benjamín B	Completo	Básico
Benjamín C	Completo	Básico
Benjamín D	Sencillo	Tecnificación
Alevín A	Completo	Básico
Alevín B	Sencillo	Tecnificación
Alevín C	Completo	Básico
Alevín D	Sencillo	Básico
Alevín E	Sencillo	Básico
Infantil A	Completo	Básico
Infantil B	Sencillo	Tecnificación
Infantil C	Sencillo	Tecnificación
Cadete A	Sencillo	Básico
Cadete B	Completo	Básico
Cadete C	Completo	Básico
Juvenil C	Sencillo	Básico
Liga Nacional	Completo	Básico
Femenino B	Completo	Básico
Femenino C	Completo	Básico
Femenino D	Completo	Básico

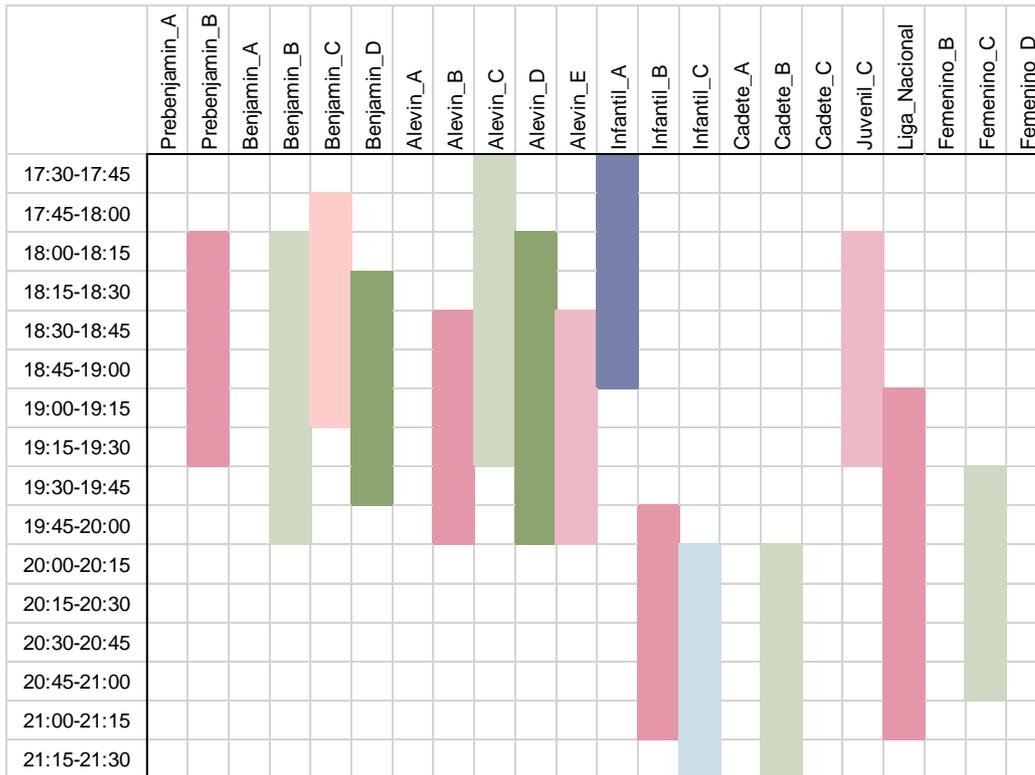
Tabla 16. Tipo de campo y entrenamiento del martes: maximización campo completo



12. Horario del miércoles: maximización campo completo

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A	Completo	Básico
Prebenjamín B	Completo	Básico
Benjamín A	Sencillo	Tecnificación
Benjamín B	Sencillo	Básico
Benjamín C	Sencillo	Tecnificación
Benjamín D	Completo	Básico
Alevín A	Sencillo	Tecnificación
Alevín B	Completo	Básico
Alevín C	Sencillo	Tecnificación
Alevín D	Completo	Básico
Alevín E	Completo	Básico
Infantil A	Sencillo	Tecnificación
Infantil B	Completo	Básico
Infantil C	Completo	Básico
Cadete A	Sencillo	Básico
Cadete B	Sencillo	Tecnificación
Cadete C	Completo	Básico
Juvenil C	Completo	Básico
Liga Nacional	Completo	Básico
Femenino B	Completo	Básico
Femenino C	Completo	Básico
Femenino D	Completo	Básico

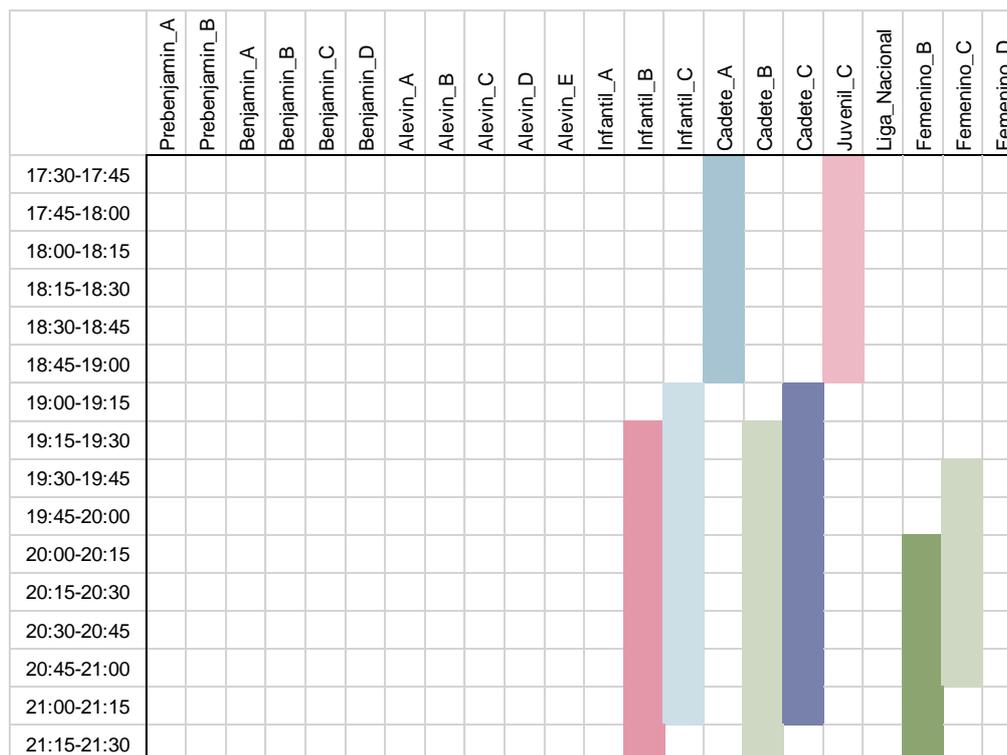
Tabla 17. Tipo de campo y entrenamiento del miércoles: maximización campo completo



13. Horario del jueves: maximización campo completo

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A		
Prebenjamín B	Completo	Básico
Benjamín A		
Benjamín B	Sencillo	Tecnificación
Benjamín C	Completo	Básico
Benjamín D	Completo	Básico
Alevín A		
Alevín B	Sencillo	Básico
Alevín C	Sencillo	Tecnificación
Alevín D	Sencillo	Tecnificación
Alevín E	Completo	Básico
Infantil A	Completo	Básico
Infantil B	Completo	Básico
Infantil C	Completo	Básico
Cadete A		
Cadete B	Completo	Básico
Cadete C		
Juvenil C	Sencillo	Básico
Liga Nacional	Sencillo	Tecnificación
Femenino B		
Femenino C	Completo	Básico
Femenino D		

Tabla 18. Tipo de campo y entrenamiento del jueves: maximización campo completo



14. Horario del viernes: maximización campo completo

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A		
Prebenjamín B		
Benjamín A		
Benjamín B		
Benjamín C		
Benjamín D		
Alevín A		
Alevín B		
Alevín C		
Alevín D		
Alevín E		
Infantil A		
Infantil B	Sencillo	Tecnificación
Infantil C	Sencillo	Tecnificación
Cadete A	Completo	Básico
Cadete B	Sencillo	Tecnificación
Cadete C	Sencillo	Tecnificación
Juvenil C	Completo	Básico
Liga Nacional		
Femenino B	Completo	Básico
Femenino C	Completo	Básico
Femenino D		

Tabla 19. Tipo de campo y entrenamiento del viernes: maximización campo completo

10.2.1 Conclusiones de la maximización del campo completo

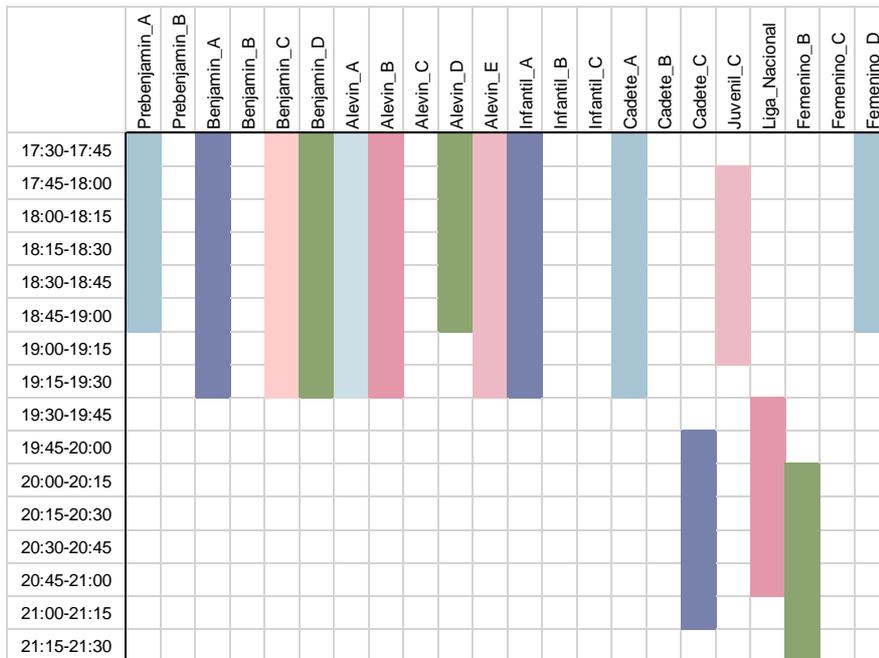
En este caso son nueve (9) los equipos que realizan todos sus entrenamientos básicos en campo completo, aunque de todos ellos únicamente hay dos (2) que pertenecen al “top ten” de equipos prioritarios: el Liga Nacional y el Prebenjamín A.

Además hay un equipo, el Cadete B, que realiza dos (2) de sus entrenamientos en campo completo y los otros dos (2) restantes en campo sencillo. El resto de equipos únicamente satisface la restricción que impone que al menos un día entrenen en campo completo.

10.3 Maximización del inicio en el primer turno

Por último, se ha resuelto el modelo de modo que se maximice el número de entrenamientos de los equipos de fútbol siete (7) cuyo comienzo se da en el primer turno, por ser este horario el más beneficioso para los más pequeños del club. De nuevo se tienen en cuenta las prioridades preestablecidas para los equipos en forma de pesos positivos aplicados a la función objetivo.

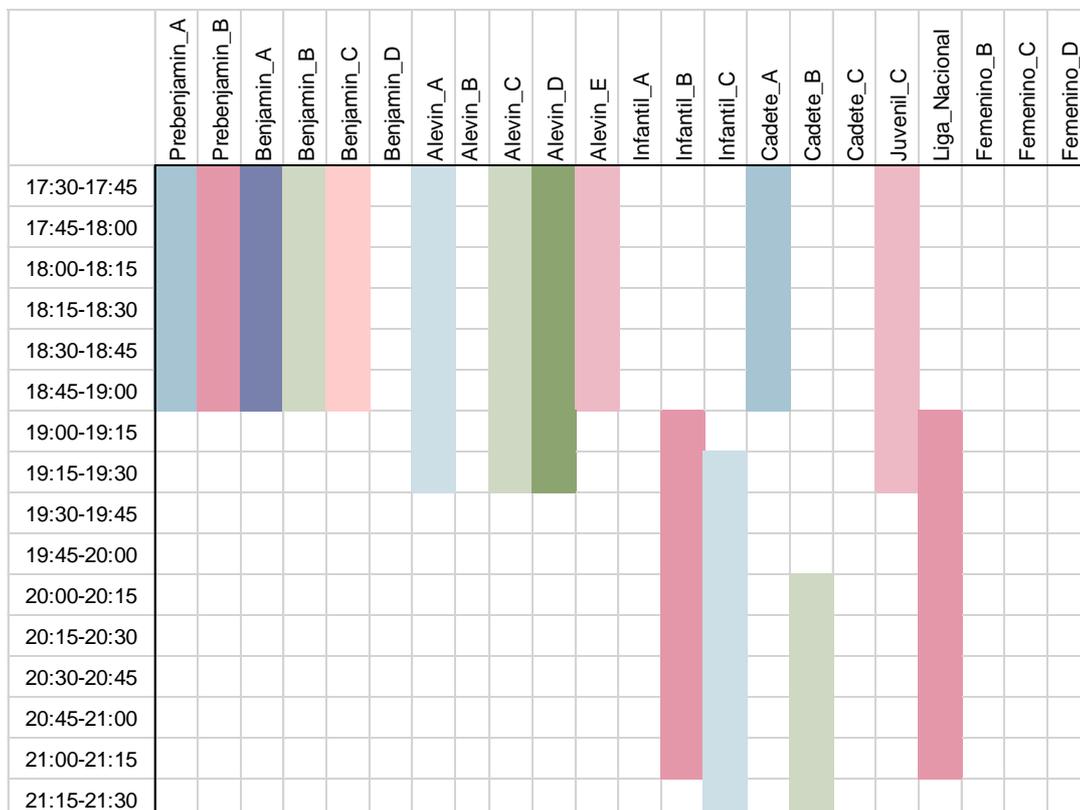
En las tablas que se muestran a continuación pueden apreciarse los horarios obtenidos de la única solución que se obtiene en aproximadamente un (1) segundo de ejecución.



15. Horario del lunes: maximización primer turno

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A	Completo	Básico
Prebenjamín B		
Benjamín A	Sencillo	Tecnificación
Benjamín B		
Benjamín C	Sencillo	Tecnificación
Benjamín D	Sencillo	Tecnificación
Alevín A	Sencillo	Tecnificación
Alevín B	Sencillo	Tecnificación
Alevín C		
Alevín D	Completo	Básico
Alevín E	Sencillo	Tecnificación
Infantil A	Sencillo	Tecnificación
Infantil B		
Infantil C		
Cadete A	Sencillo	Tecnificación
Cadete B		
Cadete C	Completo	Básico
Juvenil C	Sencillo	Básico
Liga Nacional	Completo	Básico
Femenino B	Completo	Básico
Femenino C		
Femenino D	Completo	Básico

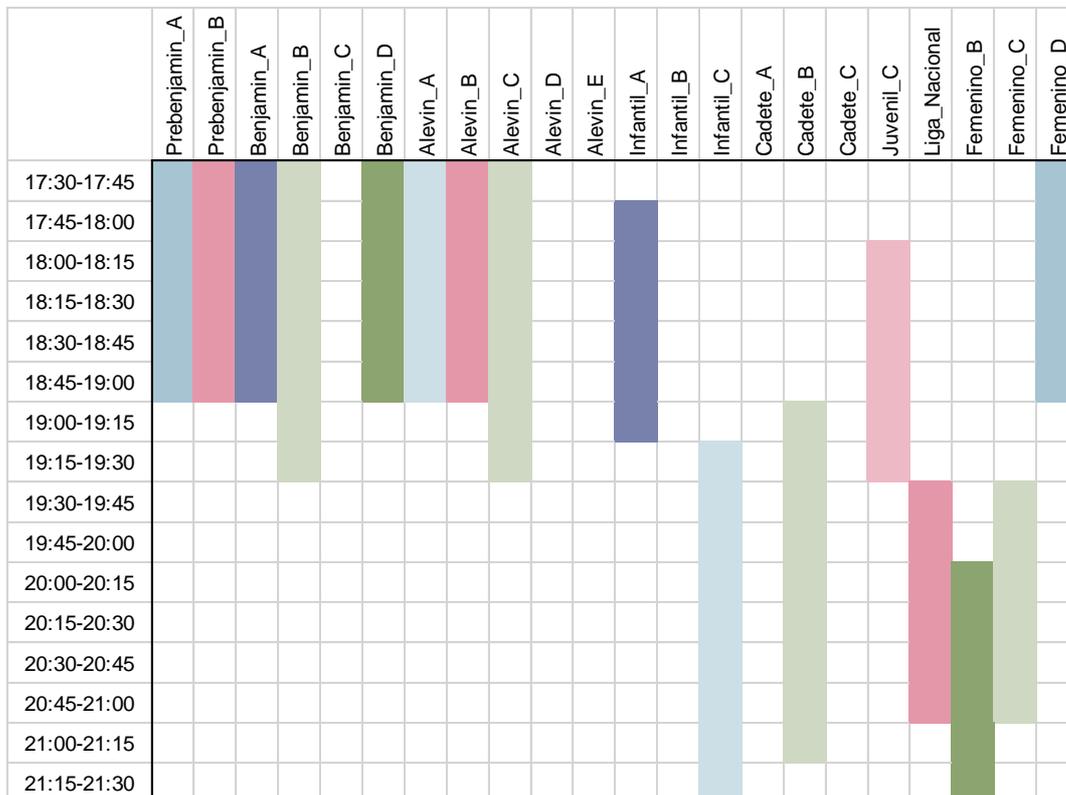
Tabla 20. Tipo de campo y entrenamiento del lunes: maximización primer turno



16. Horario del martes: maximización primer turno

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A	Sencillo	Básico
Prebenjamín B	Sencillo	Básico
Benjamín A	Completo	Básico
Benjamín B	Completo	Básico
Benjamín C	Completo	Básico
Benjamín D		
Alevín A	Sencillo	Tecnificación
Alevín B		
Alevín C	Sencillo	Tecnificación
Alevín D	Sencillo	Tecnificación
Alevín E	Sencillo	Básico
Infantil A		
Infantil B	Sencillo	Tecnificación
Infantil C	Sencillo	Tecnificación
Cadete A	Sencillo	Básico
Cadete B	Completo	Básico
Cadete C		
Juvenil C	Sencillo	Tecnificación
Liga Nacional	Sencillo	Tecnificación
Femenino B		
Femenino C		
Femenino D		

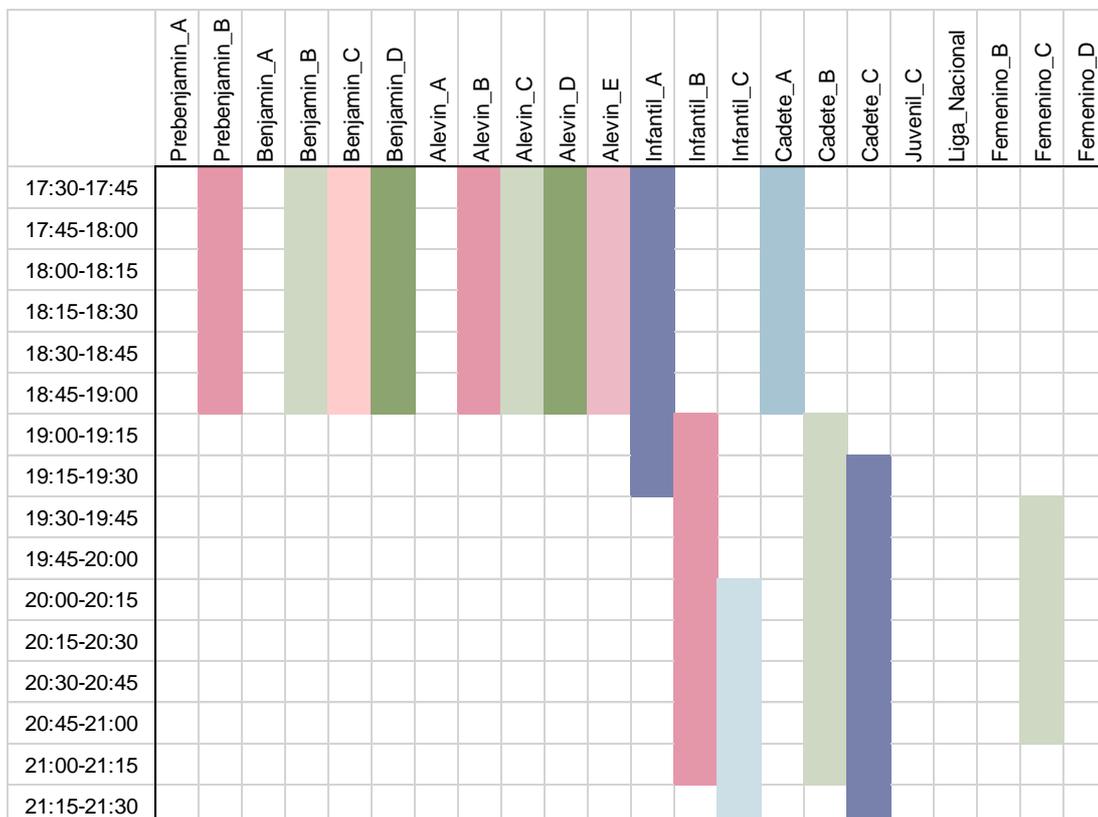
Tabla 21. Tipo de campo y entrenamiento del martes: maximización primer turno



17. Horario del miércoles: maximización primer turno

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A	Sencillo	Básico
Prebenjamín B	Sencillo	Básico
Benjamín A	Sencillo	Básico
Benjamín B	Sencillo	Tecnificación
Benjamín C		
Benjamín D	Completo	Básico
Alevín A	Completo	Básico
Alevín B	Sencillo	Básico
Alevín C	Sencillo	Tecnificación
Alevín D		
Alevín E		
Infantil A	Completo	Básico
Infantil B		
Infantil C	Sencillo	Tecnificación
Cadete A		
Cadete B	Sencillo	Tecnificación
Cadete C		
Juvenil C	Sencillo	Básico
Liga Nacional	Sencillo	Básico
Femenino B	Completo	Básico
Femenino C	Sencillo	Básico
Femenino D	Sencillo	Básico

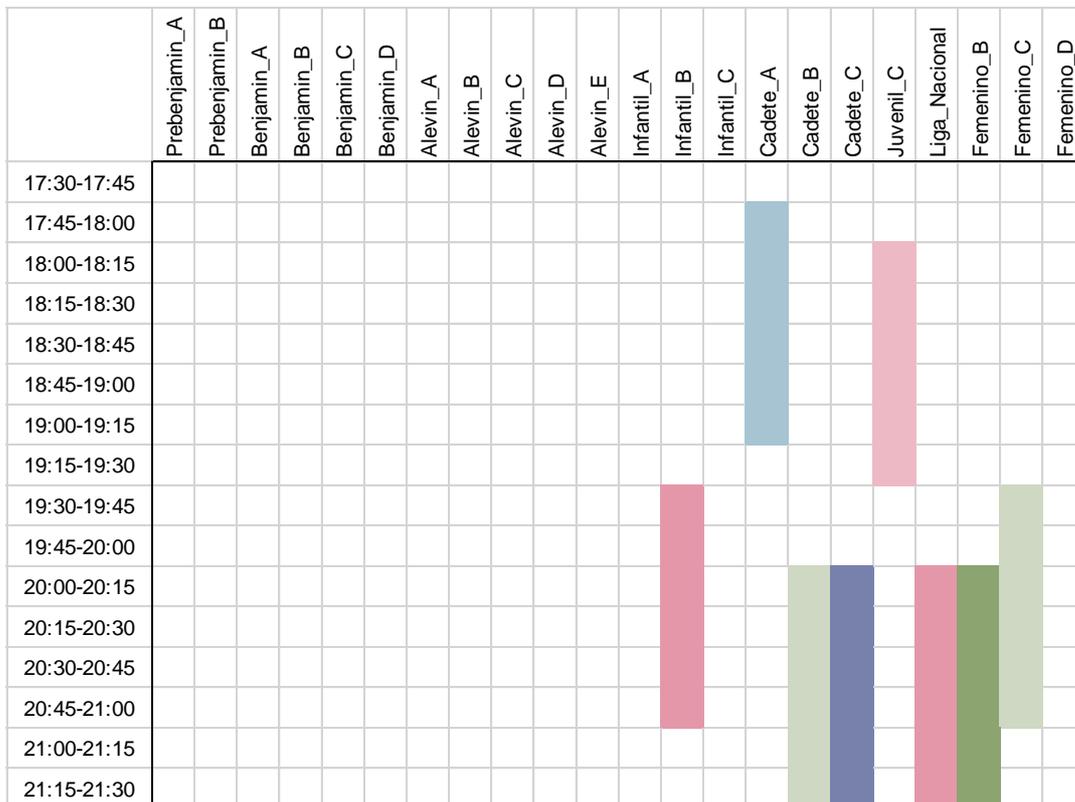
Tabla 22. Tipo de campo y entrenamiento del miércoles: maximización primer turno



18. Horario del jueves: maximización primer turno

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A		
Prebenjamín B	Completo	Básico
Benjamín A		
Benjamín B	Sencillo	Básico
Benjamín C	Completo	Básico
Benjamín D	Completo	Básico
Alevín A		
Alevín B	Completo	Básico
Alevín C	Completo	Básico
Alevín D	Sencillo	Básico
Alevín E	Completo	Básico
Infantil A	Sencillo	Tecnificación
Infantil B	Sencillo	Tecnificación
Infantil C	Completo	Básico
Cadete A	Sencillo	Básico
Cadete B	Sencillo	Tecnificación
Cadete C	Sencillo	Tecnificación
Juvenil C		
Liga Nacional		
Femenino B		
Femenino C	Completo	Básico
Femenino D		

Tabla 23. Tipo de campo y entrenamiento del jueves: maximización primer turno



19. Horario del viernes: maximización primer turno

Equipo	Tipo de campo	Tipo de entrenamiento
Prebenjamín A		
Prebenjamín B		
Benjamín A		
Benjamín B		
Benjamín C		
Benjamín D		
Alevín A		
Alevín B		
Alevín C		
Alevín D		
Alevín E		
Infantil A		
Infantil B	Completo	Básico
Infantil C		
Cadete A	Completo	Básico
Cadete B	Sencillo	Básico
Cadete C	Sencillo	Básico
Juvenil C	Completo	Básico
Liga Nacional	Completo	Básico
Femenino B	Completo	Básico
Femenino C	Sencillo	Básico
Femenino D		

Tabla 24. Tipo de campo y entrenamiento del viernes: maximización primer turno

10.3.1 Conclusiones de la maximización del primer turno

De esta resolución simplemente comentar que es posible que todos los equipos pertenecientes a las categorías de fútbol siete (7) comiencen su entrenamiento en el primer turno los días en los que deba entrenar cada uno de ellos.

En el capítulo anterior se resolvió la primera fase del modelo mediante el empleo de tres (3) funciones objetivo diferentes para que con los resultados de la que resultase de mayor agrado a la dirección deportiva del club se resolviese la segunda fase del mencionado modelo.

La solución que ha resultado ser más interesante ha sido aquella que trata de maximizar el número de entrenamientos que se realizan en campo completo, teniendo presentes las prioridades de los equipos, por tanto, en el capítulo que ahora comienza se resolverá la fase II del modelo complejo utilizando como datos de partida dichos resultados provenientes de la fase previa junto con algunas preferencias de campo proporcionadas de primera mano por la dirección deportiva del club.

11.1 Distribución de campos sin equilibrio

En una primera resolución de este modelo únicamente se distribuyen los diferentes equipos en los campos disponibles sin tener en cuenta un equilibrio en la utilización de los campos.

El primer día de la semana se resuelve el modelo con mucha libertad pues son muy pocos los equipos para los cuales la directiva tiene preferencia de campo.

Equipos	Liga Nacional	Cadete A	Infantil A	Alevín A	Benjamín A	Femenino B	Femenino C
Campo preferido	7	5	7	6	6	8	8

Tabla 25. Preferencias de campos

Para los días siguientes al lunes, el campo prioritario a asignar para cada equipo será aquel que le haya sido asignado en el día anterior. En las tablas siguientes se muestra la organización obtenida.

	PA	PB	BA	BB	BC	BD	AA	AB	AC	AD	AE
Lunes	10.1	9.1	6.1	5.1	⊗	⊗	6.2.1	⊗	⊗	⊗	6.2.2
Martes	10.2	9.1	6.1.1	⊗	9.2	10.1.1	6.2	8.1.1	8.2	8.1.2	6.1.2
Miércoles	10.1	⊗	6.1.1	8.2.1	9.2.1	10.2	6.1.2	8.1	8.2.2	7.1	⊗
Jueves	⊗	10.1	⊗	8.2.1	9.1	10.2	⊗	8.1.1	8.2.2	7.1.1	6.1
Viernes	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗

Tabla 26. Asignación de campos sin penalización I

	IA	IB	IC	CA	CB	CC	JC	LN	FB	FC	FD
Lunes	7.1	⊗	⊗	5.1	⊗	⊗	7.2	7	⊗	⊗	8.1
Martes	⊗	5.1	5.2	5.2	6	8	7.1	7	9	⊗	⊗
Miércoles	5.1	⊗	⊗	5.2	6.2	8	⊗	7	9	5	9
Jueves	5	5	8	⊗	6	⊗	6.2	7.2	⊗	9	⊗
Viernes	⊗	5.1	8.1	8	6.1	5.2	6	⊗	10	9	⊗

Tabla 27. Asignación de campos sin penalización II

En la tabla se puede ver si un equipo utiliza el campo completo, la mitad del mismo o únicamente un cuadrante. Por ejemplo, el Liga Nacional utiliza el campo completo siete (7) al completo el lunes, el cadete A hace uso de una mitad del campo cinco (5) el mismo día y el alevín E entrena en único cuadrante del campo seis (6) el martes.

11.2 Distribución de campos con equilibrio

Por último se resuelve el modelo penalizando el uso de los campos en función del número de turnos totales para los que hayan sido asignados equipos a cuadrantes, siendo mayor la penalización cuanto mayor sea la suma del número de turnos. Con esto se pretende alcanzar un equilibrio en la utilización de los campos, pero intentando que no se reste importancia a la prioridad de los equipos preferentes de entrenar en el campo preferido.

	PA	PB	BA	BB	BC	BD	AA	AB	AC	AD	AE
Lunes	10.1	9.1	6.1	5.1	×	×	6.2.1	×	×	×	6.2.2
Martes	10.2	9.1	6.1.1	×	10.2	9.1.1	6.2	8.1.1	8.2	5.1.2	6.1.2
Miércoles	10.1	×	6.1.1	8.2.1	10.2.1	9.2	6.1.2	8.1	7.2.2	7.1	×
Jueves	×	9.1	×	8.2.1	10.1	9.2	×	8.1.1	7.2.2	7.1.1	6.1
Viernes	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

Tabla 28. Asignación de campos con penalización I

	IA	IB	IC	CA	CB	CC	JC	LN	FB	FC	FD
Lunes	7.1	×	×	5.1	×	×	7.2	7	×	×	8.1
Martes	×	5.1	5.2	5.2	6	8	7.1	7	9	×	×
Miércoles	5.1	×	×	5.2	6.2	8	×	7	9	5	9
Jueves	5	5	8	×	6	×	6.2	7.2	×	10	×
Viernes	×	5.1	8.1	7	6.1	5.2	6	×	7	10	×

Tabla 29. Asignación de campos con penalización II

Puede comprobarse en las tablas que se muestran a continuación cómo se ha visto modificada la utilización de los diferentes campos en cada uno de los días, además de en el total.

Utilización sin equilibrio						
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Total
5	28	48	52	48	36	212
6	28	48	34	48	42	200
7	56	36	36	26	0	154
8	12	50	50	46	42	200
9	12	48	44	36	24	164
10	12	20	24	24	24	104

Tabla 30. Utilización de campos sin equilibrio

	Utilización con equilibrio					
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Total
5	28	48	52	48	36	212
6	28	48	34	48	42	200
7	56	36	36	26	48	202
8	12	50	50	46	18	176
9	12	44	48	24	0	128
10	12	24	20	36	24	116

Tabla 31. Utilización de campos con equilibrio

La motivación para realizar este proyecto surgió del conocimiento de que la dirección deportiva del club había invertido dos jornadas completas de trabajo para realizar un calendario de entrenamientos para todos los equipos que entrenan en horario de tarde. El horario que finalmente habían logrado hacer, si bien se acercaba bastante a sus preferencias, no cumplía todas ellas, pero invertir más tiempo en él tampoco era beneficioso pues otras tareas estaban quedando al margen al poner todos los esfuerzos en el calendario. Al ser mucho mejor que el que se aplicaba con anterioridad, se optó por implementarlo.

Cuando se nos comentó el problema, saltó a la vista que el problema que habían abordado podía encajar perfectamente en el desarrollo de un modelo lineal de optimización que considerase todas las preferencias que tenían. Con él se obtenían dos ventajas fundamentales. En primer lugar se podría garantizar que el calendario fuese óptimo y en segundo lugar, una vez realizado el modelo, si surgiese algún cambio de horario, en el número de equipos o algo similar, volver a establecer un calendario óptimo llevaría tan solo unos minutos.

Efectivamente, tal como demuestra este proyecto, el problema ha podido ser resuelto mediante programación lineal entera y se ha podido cambiar la elaboración de un calendario bueno realizado en dieciséis (16) horas de trabajo por la elaboración de un calendario óptimo realizado en escasos minutos.

REFERENCIAS

- Alarcón, F., Durán, G., Guajardo, M., Miranda, J., Muñoz, H., Ramírez, L., ... Zamorano, G. (2017). Operations research transforms the scheduling of Chilean soccer leagues and South American world cup qualifiers. *Interfaces*, 47(1), 52–69. <https://doi.org/10.1287/inte.2016.0861>
- Goossens, D., & Spieksma, F. (2009). Scheduling the Belgian soccer league. *Interfaces*, 39(2), 109–118. <https://doi.org/10.1287/inte.1080.0402>
- Kyngäs, J., Nurmi, K., Kyngäs, N., Lilley, G., Salter, T., & Goossens, D. (2017). Scheduling the Australian Football League. *Journal of the Operational Research Society*, 68(8), 973–982. <https://doi.org/10.1057/s41274-016-0145-8>
- Pillay, N. (2014). A survey of school timetabling research. *Annals of Operations Research*, 218(1), 261–293. <https://doi.org/10.1007/s10479-013-1321-8>
- Van Bulck, D., Goossens, D. R., & Spieksma, F. C. R. (2018). Scheduling a non-professional indoor football league: a tabu search based approach. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-3013-x>
- Wright, M. B. (2007). Case study: Problem formulation and solution for a real-world sports scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*, 58(4), 439–445. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602175>