
Una Aplicación de Prismas de Factibilidad para Resolver el Problema de Asignación de Horarios en una Empresa de Doblajes de Películas

Carmen Ortiz*

Escuela de Ingeniería Industrial
Universidad Adolfo Ibáñez

Roberto Opazo**

Empresas VyReal

Resumen

El problema de asignación de horarios es un clásico de la literatura en el área de la investigación operativa. Normalmente se presenta aplicado a colegios o universidades con grandes simplificaciones, lo que hace que las soluciones obtenidas sean de dudosa aplicabilidad.

En este trabajo se define una versión aplicada del problema para una empresa de doblajes de películas, con la intención de adaptar la definición de un modelo a las necesidades de la empresa y no la empresa a las limitaciones del modelo.

El resultado es un sistema computacional fácil de utilizar, eficiente y que genera soluciones mejores de las que una persona es capaz de encontrar. Además, se propuso una estructura de datos especializada en la administración de restricciones de horario, que puede ser utilizada en la implementación de muchas heurísticas en el área.

* E-mail: cortiz@uai.cl

** Roberto Opazo es académico jornada parcial del Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Chile. E-mail: roberto@opazo.cl

1. Introducción

Una empresa de doblajes de películas recibe películas en un idioma, por ejemplo inglés y las entrega dobladas a otro idioma, por ejemplo, castellano. Para esto cuenta con un grupo de actores, los que deben grabar con su voz la traducción del texto original de los personajes de la película.

Para una empresa de doblajes mediana, la cantidad de personajes es muy superior a la cantidad de actores disponibles, por lo que se requiere organizar el trabajo de doblaje de los actores, considerando que cada actor sólo puede estar en un estudio de grabación en cada momento del tiempo y, adicionalmente, debido a que los actores además tienen otros trabajos cada actor entrega una disponibilidad de horario a la empresa.

Existen varias formas de organizar a los actores: una de ellas consiste en reunir a todos los actores que doblan la voz de los personajes que participan en cada escena y reproducir sincronizadamente los diálogos doblados en el idioma objetivo; otra alternativa consiste en capturar la voz de cada actor separadamente y luego, mediante un proceso de mezcla, conseguir la secuencia de sonidos que corresponde a la escena doblada. También es posible trabajar con una combinación de ambos métodos, situación que corresponde al caso que se describe en este trabajo.

Una programación horaria para actores de una empresa de doblajes, consiste en indicar las horas de inicio y término en que los actores asisten a cada estudio para doblar los parlamentos de los personajes que se les haya asignado. Además, debe indicarse las líneas de texto que cada actor debe doblar en estas entradas a los estudios de doblaje.

No es posible determinar en forma exacta el tiempo que utilizará un actor para grabar los parlamentos de un personaje, pues, en la práctica, intervienen una serie de factores impredecibles en la grabación. Por ejemplo, un actor puede requerir ensayar viendo la cinta original antes de grabar, puede equivocarse realizando la grabación o puede estar en desacuerdo con el director en la forma de interpretar al personaje. Además, estos tiempos varían entre los actores y también, algunos personajes son más fáciles de doblar que otros, por ejemplo un dibujo animado que no mueve la boca es fácil de doblar, porque los sonidos son más fáciles de coordinar con el movimiento de imagen en pantalla. Esta situación es difícil de administrar, pues si el tiempo de grabación de un actor es una variable estocástica, entonces todo el problema de programación horaria lo es.

Históricamente, la programación de actores se ha realizado en DINT (Doblajes Internacionales) en forma manual, asignando un tiempo aproximado para el doblaje de cada personaje. En la implementación de la heurística que se describe en este trabajo, se mantuvo esta simplificación que evita la variable estocástica en el problema.

Por restricción de la empresa, cada película debe grabarse completamente en un sólo estudio, no pudiendo grabarse alguna parte en otro estudio, o suspender su grabación para grabar partes de otra película. Esto se debe a que los directores son citados a los estudios para dirigir películas específicas y existen complicaciones técnicas asociadas al cambio de película, como tiempos de inicialización de las cintas correspondientes.

A cada actor se le puede asignar la grabación de uno o más personajes en todas las películas que la Unidad de Operaciones decida hacerlo participar. En casos excepcionales, puede exigirse que dos o más actores asistan concurrentemente a grabar en un estudio. Esto puede deberse a características especiales del personaje o de la escena. Por ejemplo, un personaje puede requerir doblarse con dos voces en paralelo (como Dos Caras, el enemigo de Batman), o la escena puede consistir en el grito de varios personajes. En esta última situación, no es posible aprovechar el proceso de mezcla de la película para juntar los gritos, pues sólo se dispone de dos pistas de sonido libre para juntar grabaciones hechas en los estudios. Se usan otras dos pistas para incluir los sonidos de música y efectos especiales.

Los actores no forman parte de la planta fija de personal de la empresa, por lo que no es posible contar con ellos en cualquier horario de cualquier día. Para administrar la información de las disponibilidades de horario, los actores llenan un formulario en el cual indican los horarios en que pueden asistir a grabar. Eventualmente, los estudios también pueden no estar disponibles, debido a diferentes razones, como mantenciones, horarios de almuerzo o la realización de trabajos que no pueden ser planificados por Operaciones.

Para organizar la asignación de parlamentos en horarios de grabación, la película es dividida en unidades elementales de guión, llamadas "loop". Cada loop consiste en 4 líneas seguidas del mismo personaje, sin importar si éstas se ven interrumpidas por la intervención de otros personajes.

Actualmente, la empresa cuenta con 4 estudios de grabación y más de 50 actores, lo que es una empresa mediana a pequeña en relación con el tamaño de las empresas españolas que se dedican a la misma actividad, pero es la empresa más grande en Chile en el rubro.

Una forma de abordar este problema es mediante programación matemática. En el apéndice 1 se muestra un modelo entero mixto, de variables enteras y continuas, que describe una versión simplificada del problema considerando sólo un estudio de grabación.

Para administrar la disponibilidad de horario de los actores, la jornada de trabajo se divide en bloques de 30 minutos cada uno, denominados módulos. En el caso de DINT, la jornada de trabajo se extiende desde las 8:00 a las 22:00 hrs. Por lo que hay 28 módulos diarios. El modelo posee gran cantidad de variables binarias, lo que en general, hace crecer exponencialmente el tiempo requerido para su resolución, independientemente del algoritmo y del software que se use. Podría hacerse el esfuerzo de preprocesar el modelo para reducir el número de variables, aprovechando simetrías y otras propiedades. Con ello se lograría reducir a la mitad el número de variables de secuenciamiento, sin embargo, aún con esta mejora, el número total de variables enteras para una instancia pequeña del problema (mostrada en el apéndice) resulta ser de 12.825, si se considera un horizonte de planificación de 1 día, 50 actores, cada uno con un promedio de 10 módulos disponibles y un máximo de 3 entradas por día. Así, dada la dimensión del modelo, la utilización de software comercial capaz resolver problemas mixtos de optimización quedó descartada.

Este problema se asemeja a una combinación entre los problemas de Asignación de Maquinaria y los problemas de Asignación de Horarios de Clases. La principal diferencia con los problemas clásicos de Asignación de Maquinaria es que en este caso se requiere especificar restricciones de horario. Y la principal diferencia con las formulaciones previas del problema de Asignación de Horarios de Clases es que el tiempo de asignación es una variable continua y no un módulo de largo fijo, por ejemplo, todas las clases duran 90 minutos.

Los problemas de Asignación de Maquinaria han sido estudiados en una amplia gama de trabajos previos, indicándose en muchos de ellos formas eficientes de encontrar soluciones exactas y heurísticas, un resumen clasificado de estos problemas puede verse en Pinedo (1995). En cambio, el problema de Asignación de Horarios en Escuelas, en casi todas las experiencias previas ha sido formalizado con tantas simplificaciones, que no resulta práctico para las necesidades de situaciones reales (Kitagawa y Ikeda, 1987), una de las pocas buenas simplificaciones se presenta en Ortiz (1989).

En Opazo (1999) se demostró que el Problema de Asignación de Horarios aplicado a una Empresa de Doblajes de Películas pertenece a la clase NP-Completo, por lo que se resolvió utilizar un método heurístico de solución.

A continuación se describe la heurística desarrollada en este trabajo.

2. Heurística

Esta heurística es capaz de administrar las restricciones de horario de los actores y de los estudios, combinándolas con criterios de planificación tales como considerar las preferencias de los actores por algunos módulos de grabación (unos prefieren la mañana, otros la tarde, etc.), mantener la duración (tiempo) de las entradas a grabar en cada estudio en rangos razonables, considerar el tiempo que le toma a un actor trasladarse de un estudio a otro, entre otras consideraciones.

La Ilustración 1 muestra la estructura general de la heurística:

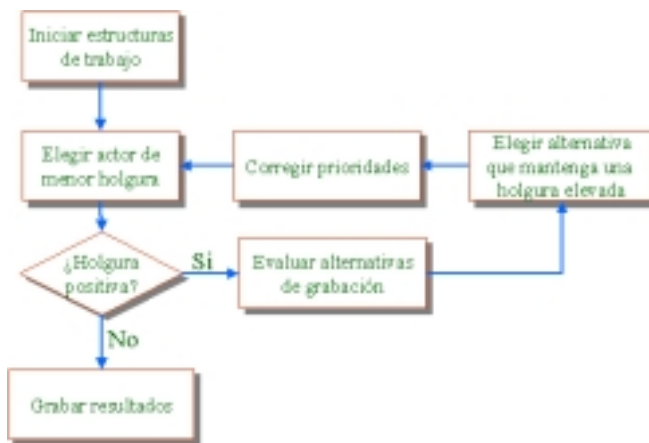


Ilustración 1: Estructura General de la Heurística

El método se articula en torno a un ciclo en el que en cada iteración se elige el elemento (actor) con mayor prioridad (menor holgura) y se asigna considerando sus preferencias y los espacios de tiempos menos demandados, con esto se busca mantener siempre a los elementos pendientes por ser asignados con la mayor holgura posible:

$$\text{holguraActor} = \frac{\sum \text{alternativasReales} \times \text{duracionAlternativa}}{\sum \text{tiempoPersonaje}}$$

Las alternativas reales de grabación son calculadas para cada actor en cada estudio, sumando los minutos en que se cumplen 3 condiciones: el actor puede grabar, el estudio está disponible y además el actor tiene personajes con texto pendiente asignados al estudio en evaluación. Este valor es dividido por la suma de minutos requeridos para doblar todos los parlamentos de personajes asignados al actor.

La prioridad de cada actor se define de modo que tengan mayor prioridad los actores con menos holgura, por ejemplo, si un actor debe doblar la voz de dos personajes, para lo que necesita 49 minutos (esto se calcula basándose en la cantidad de loops en el parlamento de cada personaje y la velocidad de grabación definida por el usuario para cada personaje) y tiene una disponibilidad de horario que incluye 5 módulos, pero en uno de esos módulos el estudio está en mantención y en otro módulo el estudio tiene asignada una película para la cual el actor no tiene que doblar voces, entonces sus alternativas reales son sólo 3 y en consecuencia la holgura del actor se define como $3 \cdot 30 / 49 = 1,84$. De esta manera un actor con menos disponibilidad tiene menos holgura y a más loops por grabar también disminuye la holgura.

La complejidad de la heurística es de orden $O(J^2)$, en que J representa el número de actores que deben doblar personajes en la película que se está programando. El ciclo principal de la heurística se ejecuta una vez para cada entrada a grabar de algún actor (el promedio de entradas por actor (p) varía entre 2 y 4), por lo que este ciclo se ejecuta $p \cdot J$ veces. Por otra parte, la operación más costosa en tiempo dentro del ciclo es la de corrección de prioridades, ya que se debe revisar para cada actor la forma en que la asignación elegida afecta su prioridad, la que podría ocupar espacios temporales en los que el actor tenía disponibilidad de horario y por lo tanto si estos tiempos los usa otro actor, entonces disminuyen las alternativas reales de grabación, esta operación requiere $O(J)$ operaciones.

El diseño de la heurística es simple, pero su implementación podría ser muy compleja si no se utiliza una herramienta especializada. La complejidad en la implementación se deriva de la necesidad de responder en cualquier momento, durante la asignación, preguntas como las siguientes:

¿Cuáles actores pueden trabajar en un horario particular en un estudio?

Esto requiere revisar los datos de las disponibilidades de horario, los personajes asignados al actor (debe tener al menos uno con parlamentos pendientes en la

película asignada al estudio en dicho tiempo) y las grabaciones programadas para el actor.

¿Cuáles son los tiempos de horario más demandados?

Un espacio de tiempo está demandado por cada actor que tiene disponibilidad, no ha sido asignado y tiene personajes en la película correspondiente.

¿En qué horarios pueden trabajar juntos todos los actores de un grupo dado?

¿Cuáles son todas las alternativas de grabación para un actor particular?

3. Uso de Prismas de Factibilidad

Como se ha dicho, la principal dificultad de este procedimiento es la administración de las alternativas de asignación de cada actor en todo momento del tiempo durante su ejecución.

Por ejemplo, inicialmente un actor puede ser asignado en un módulo en el cual se cumplen las siguientes condiciones:

- El actor tiene disponibilidad de horario.
- El estudio tiene disponibilidad de horario.
- El actor tiene trabajo pendiente para la película que se está grabando en ese momento en el estudio.

En un punto intermedio de la asignación la situación se vuelve más compleja, puesto que también hay que considerar que:

- El actor puede tener completamente asignada la carga de trabajo correspondiente a la película que se está grabando en el módulo del estudio.
- El módulo del estudio puede haber sido asignado parcial o totalmente a otro actor.
- El actor puede haber sido asignado en ese horario a otro estudio. Si así fuera, hay que considerar además, que el actor demora una cantidad de tiempo en trasladarse de un estudio a otro.

Para administrar esta información de un modo fácil y eficiente, se creó una estructura de datos denominada “prisma de factibilidad” y una operación de proyección sobre este prisma.

Un prisma de factibilidad es una secuencia de cristales. Cada cristal representa el estado de un intervalo de tiempo y está identificado por:

- Un inicio (t_{Ini}) y un fin (t_{Fin}), medidos en unidades de tiempo (minutos).
- Un color (Color), expresado como un número entero. Si el número es positivo, se entiende que el cristal es transparente, es decir factible o disponible. En

cambio un color 0 o negativo, indica que el cristal es opaco o infactible. Los colores de los cristales pueden representar distintas cosas, por ejemplo la preferencia del actor por grabar durante ese tiempo o la demanda de actores por un espacio de tiempo particular de grabación.

- Una caja de información asociada (INF), la cual contiene datos asociados al estado del cristal (espacio temporal). En el caso de la heurística presentada en este trabajo, se decidió que las cajas de información puedan almacenar una identificación de película, una identificación de personaje, una identificación de estudio y un valor real llamado carga, que indica el porcentaje de sobrecarga al cual puede estar sometido el cristal. Si este valor es 1, entonces el trabajo asignado en el cristal puede desempeñarse a una velocidad normal, pero si la carga es, por ejemplo, 1.2, entonces el cristal tiene asignado un 20% de trabajado adicional con relación al que se lograría grabando a velocidad normal, por lo que el actor debe trabajar más apurado. Uno de los parámetros de la heurística controla la sobrecarga máxima que se le puede asignar a un cristal.

Un cristal puede ser imaginado como se muestra en la Ilustración 2



Ilustración 2: Cristal de Factibilidad

Un prisma de factibilidad es una secuencia de cristales contiguos. Entonces, puede verse como se representa en la Ilustración 3.

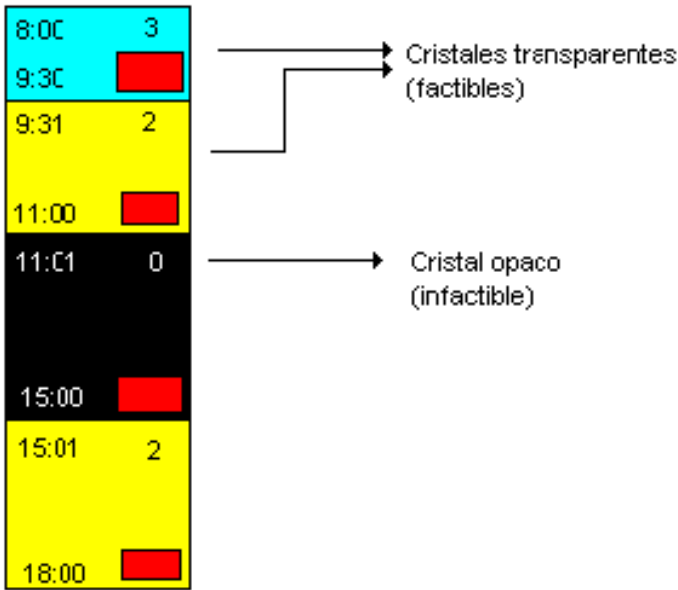


Ilustración 3: Prisma de Factibilidad

Los prismas son usados en la heurística para administrar la siguiente información

- **Prismas de Actor:** Las preferencias de los actores son almacenadas en 5 prismas (uno para cada día de la semana). Inicialmente estos prismas tienen cristales negros en todos los módulos en que el actor no puede grabar. En los otros módulos el prisma tiene cristales cuyo color indica la preferencia del actor por el módulo, a mayor número (más claro), mayor es la preferencia. La caja de información está inicialmente vacía.
- **Prismas de Estudio:** Cada vez que un actor es asignado a grabar en un estudio, se marca un cristal desde el instante de inicio hasta el final de la grabación con color opaco (-1) y la caja de información se llena con todos los datos del personaje y estudio en el que se trabajará. Los prismas de estudio inicialmente tienen cristales negros en todos los módulos en que el estudio no está disponible y cristales con color cuyo número se calcula como la cantidad de actores que pueden utilizar ese módulo para grabar al menos uno de sus personajes asignados y la caja de información guarda información sobre la película que debe grabarse en ese cristal.
- **Asociaciones actor-estudio:** Para cada par (actor, estudio), se definen 5 prismas (uno para cada día de la semana), que tienen cristales negros en los intervalos de tiempo en que el actor no tiene carga de trabajo pendiente para la película que está asignada en ese momento en el estudio y tiene color transparente (1) cuando sí tiene personajes asignados.

Existen dos operaciones que pueden ser realizadas sobre un prisma de factibilidad:

- **Creación del prisma:** Inicializarlo como un sólo cristal completamente opaco. Esta operación puede tener distintas interpretaciones dependiendo del tipo de prisma. Si es un prisma actor, entonces se tiene un actor sin disponibilidades (ni preferencias) de horario; si es un prisma estudio, entonces el estudio está cerrado todo el día; y si es un prisma actor-estudio, entonces el actor no tiene ningún personaje que grabar de la película asignada al estudio en cada momento del tiempo. En todos estos casos la estructura de datos y la operación usada es la misma, lo que cambia es el ente dueño del prisma.
- **Pintado del prisma:** Indicar el tiempo de inicio y término en que el prisma debe tener un color determinado y una caja de información con valores específicos. Esta operación crea un nuevo cristal en el prisma que se está pintando, con el valor correspondiente en el color y caja de información. Si después de pintar un cristal o una parte de un cristal, el prisma queda con dos cristales contiguos de las mismas características (color y caja de información), entonces estos cristales son unidos, generando un nuevo cristal más grande (desde t_{Ini} del primer cristal hasta t_{Fin} del segundo) con el color y caja de información indicado. Esto evita la fragmentación de cristales, con lo que se protege el tiempo de respuesta de la heurística.

Además se define una operación, llamada Proyección de Prismas de Factibilidad, que toma como entrada dos o más Prismas de Factibilidad. Al proyectar dos o más prismas de factibilidad, se obtiene otro prisma, cuyos cristales están definidos por el color que generaría un rayo de luz al intentar pasar por todos los cristales de la línea que le corresponda. Un ejemplo se muestra en la Ilustración 4.

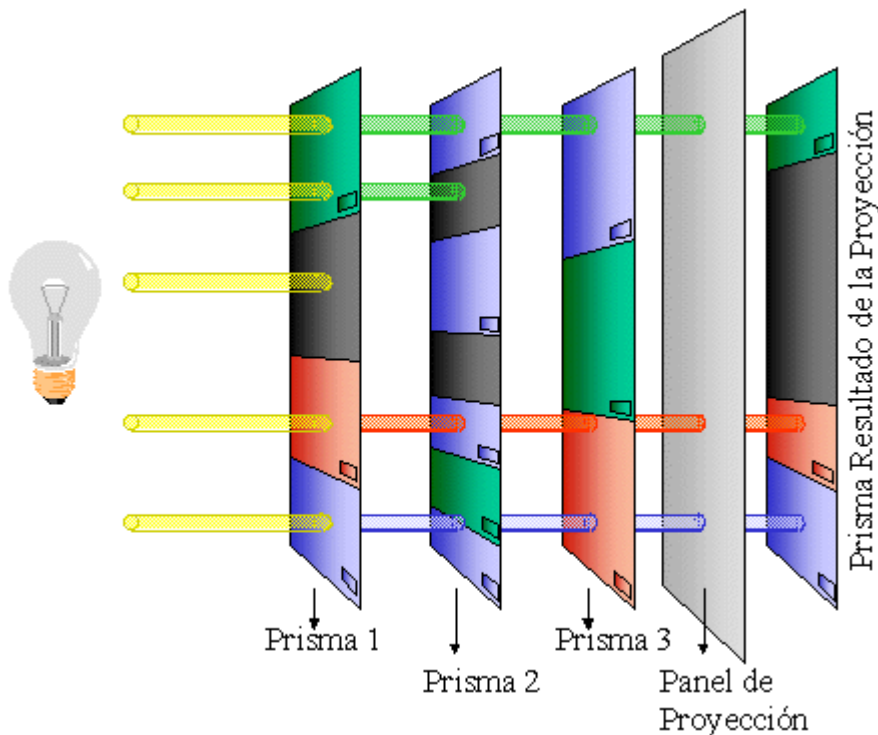


Ilustración 4: Proyección a través de prismas de Factibilidad

En la figura anterior sólo se proyectaron 3 prismas, pero podría ser cualquier número de éstos. El prisma resultante es una secuencia de cristales.

En el prisma resultante aparecen cristales negros en todos los intervalos de tiempo en los que alguno de los prismas proyectados haya tenido un cristal opaco. El color y la información de los cristales transparentes del prisma resultante, están determinados por el cristal del primer prisma en la lista a proyectar. Si después de la proyección quedan en posición contigua 2 cristales de las mismas características, estos son fundidos en un sólo cristal que abarque todos los intervalos de tiempo involucrados. El poder de la operación de proyección queda más claro al ver la forma en que puede usarse para responder algunas de las preguntas fundamentales de este proceso, planteadas previamente:

¿Cuáles actores pueden trabajar en un horario particular en un estudio?

Primero se construye un prisma auxiliar que sólo tiene transparente el horario por el cual se desea preguntar, luego, para cada actor se proyecta el prisma auxiliar, con el prisma actor y el prisma actor-estudio correspondiente, si el prisma resultante tiene un cristal transparente en el horario consultado, entonces la asignación es factible.

¿Cuáles son los horarios más demandados?

La demanda por cada intervalo de tiempo en un estudio está dada por el color del cristal con que se representa dicho intervalo en el prisma estudio.

¿En que horarios pueden trabajar juntos todos los actores de un grupo dado?

Para conocer las disponibilidades comunes de un grupo de actores, basta con proyectar todos sus prismas actor.

¿Cuáles son todas las alternativas de grabación para un actor particular?

Las alternativas de grabación de cada actor están dadas por el resultado de proyectar el prisma actor, el prisma estudio y el prisma actor estudio correspondiente para cada estudio.

4. Calibración de la Heurística

La solución que entrega la heurística depende del valor que se asigne a varios parámetros de entrada.

Estos parámetros pueden ser agrupados en dos grandes categorías: aquellos que deben ser definidos por el usuario, en función de sus requerimientos (como la duración de los módulos y el tiempo de traslado entre estudios) y los que tienen una influencia en el comportamiento de la heurística, pero cuya magnitud ideal es difícil de determinar por el usuario, como el valor de premios o pesos de diferentes criterios. Sin embargo, el usuario puede indicar relaciones cualitativas indirectas de estos

parámetros, como por ejemplo definir si es más importante que las programaciones usen al máximo los estudios o respetar las preferencias de los actores por los horarios de los módulos.

La heurística implementada considera 7 parámetros directamente definidos por el usuario, entre los que se cuentan el tiempo mínimo, máximo y óptimo de duración de las entradas a grabar de un actor, la duración de los módulos para entregar las disponibilidades de horario (30 minutos), el tiempo de traslado entre estudios (5 minutos, se asume constante para todos los viajes entre estudios), la cantidad de entradas diaria máxima para los actores (3 entradas máximo en un día) y la máxima sobrecarga (10% por sobre lo que se graba normalmente en un intervalo de tiempo).

Para definir el valor a usar en los otros parámetros (los que no puede definir el usuario directamente) se decidió utilizar un criterio simple, que permite reducir a un valor escalar la calidad de una solución a una instancia del problema de asignación de horario. Con este criterio simple o función de desempeño, es posible modificar el valor de los diferentes parámetros para estudiar su impacto en el resultado de la función objetivo.

La función de desempeño analizada fue la tasa de utilización promedio de los estudios, ya que la maximización de ésta es el principal objetivo de la empresa. En forma complementaria se obtuvo el número de entradas promedio por actor, índice que debería ser lo más pequeño posible a fin de no tener las entradas demasiado fragmentadas. Es decir, una solución es mejor mientras mayor sea la tasa de utilización de los estudios y menor sea la cantidad de entradas a grabar de los actores.

Para analizar el impacto de cada una de estas variables en la calidad de la solución entregada por el programa, se experimentó con un ejemplo real de programación de estudios, en el cual se requiere programar un horizonte de dos días, con tres estudios. Las 4 películas ingresadas suman 173 personajes a doblar, con 1678 loops¹ en total, para lo que se cuenta con 35 actores diferentes asignados al reparto de estas películas.

En el funcionamiento interno, la heurística utiliza varios criterios de asignación, estos criterios no siempre son complementarios y se requiere determinar cuáles reglas tendrán mayor importancia con respecto a las otras en la elección de una asignación de horario parcial (una entrada a grabar de un actor), para esto se asignó un valor numérico que se calcula para cada criterio de selección y un peso (número que se multiplica por el nivel de cumplimiento de la regla).

Existen 2 tipos de parámetros estudiados que el usuario no puede definir directamente, esto es por lo difícil que resulta predecir su efecto en las soluciones generadas.

1 Cada loop representa 4 líneas de parlamento del mismo personaje.

Parámetros de pesos relativos: Son usados para modificar la importancia de cada criterio con respecto a los otros, como el peso de cuan demandado es cada intervalo de tiempo, peso de las preferencias por módulos de los actores y peso del respeto por el número máximo de entradas

Parámetros usados para calcular el valor numérico que indica el grado de cumplimiento de un criterio: Premio por no dejar espacios vacíos al asignar a un actor, premio por llenar un espacio vacío al asignar a un actor, premio por conectar una entrada de un actor con otra del mismo actor, castigo por violar el tiempo mínimo de duración de una entrada y número de actores demandando un espacio temporal que vuelve crítica o urgente su asignación.

Para analizar la sensibilidad de la heurística con respecto a cada uno de estos parámetros, se hicieron pruebas preliminares en las que se evaluaron todas las combinaciones de valores para cada parámetro, pero considerando pocas alternativas de valor por parámetro con el fin de mantener controlado el número de escenarios diferentes. Esto permitió conocer los intervalos en que cada parámetro puede afectar en la calidad de la solución encontrada.

Luego se analizaron separadamente (dejando fijos los otros valores) cada uno de los parámetros a calibrar, pero esta vez en un rango grande de valores, partiendo por los parámetros que demostraron mayor varianza en la etapa previa.

En los gráficos de las Ilustraciones 5 y 6 se muestra el valor de la tasa de ocupación de los estudios (curva de arriba) y número de entradas generadas en promedio por actor (curva de abajo).

Puede apreciarse que la función objetivo definida (tasa de utilización) no es una curva suave, es decir, si al aumentar el valor de un parámetro tiende a mejorar la calidad de las soluciones obtenidas, esto no significa que siempre que el parámetro aumente, la solución mejora. En algunos gráficos su comportamiento es tipo zigzag, esto se explica por el “Efecto Dominó” que se desencadena al cambiar alguna de las decisiones de asignación en etapas tempranas de la ejecución de la heurística.

Sin embargo, en todos los gráficos es posible distinguir una tendencia, sobre la base de la cual se eligieron los valores definitivos para cada parámetro. Se presentan a continuación dos gráficos elegidos:

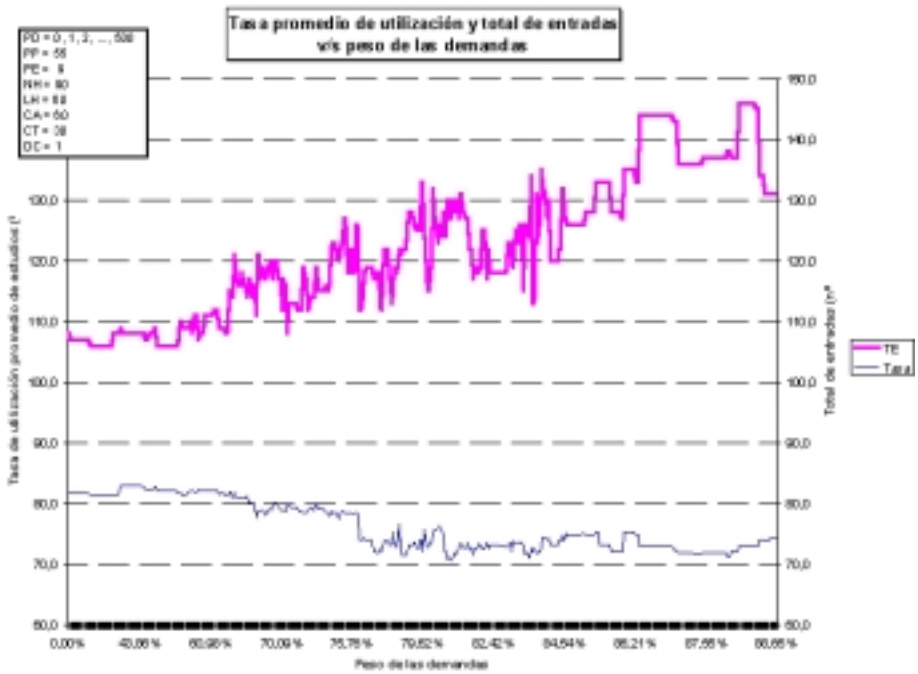


Ilustración 5: Ejemplo de gráficos de calibración de la heurística

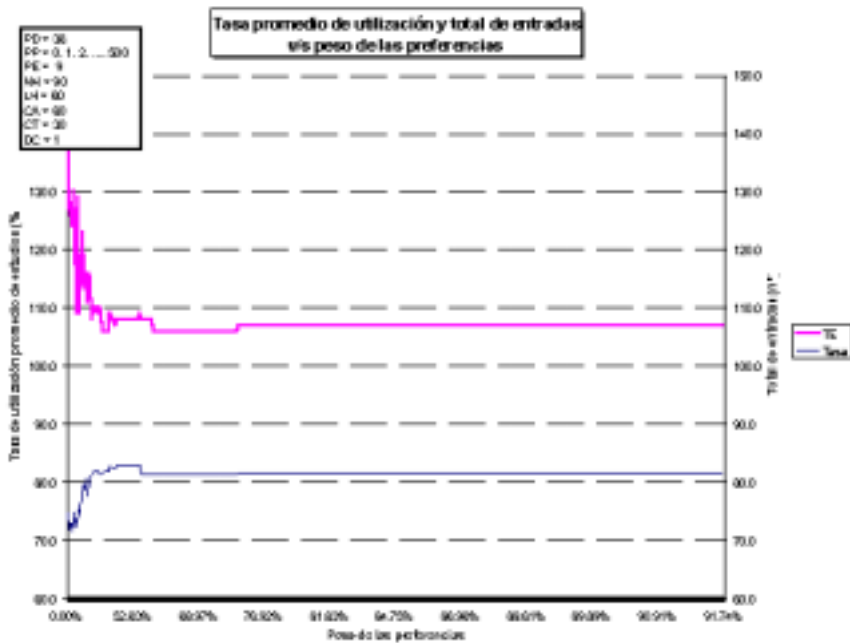


Ilustración 6: Ejemplo de gráficos de calibración de la heurística

5. Conclusiones

El problema de asignación de horarios, aplicado a una empresa de doblajes de películas, es un desafío difícil de enfrentar, debido a complicaciones propias del proceso en el cual está inmerso y a sus características combinatoriales, que hacen complejo encontrar soluciones en forma automatizada.

En general, se ha estudiado el problema tanto desde una perspectiva teórica, como práctica. Desde el punto de vista teórico, se han construido modelos de programación lineal con variables continuas y discretas los que resultan ser tan grandes, en términos del número de variables enteras y de restricciones, que se hace infactible usarlos para realizar programaciones en situaciones reales. Por ello se decidió implementar una heurística especializada.

La heurística mencionada, fue implementada para la empresa DINT (Doblajes Internacionales) y fue probada junto con la Jefa de Operaciones de la Empresa.

La ejecución computacional de la programación de estudios permite realizar la asignación varias veces al día, antes de optar por una planificación definitiva. La ventaja de esto es que cada ejecución permite identificar a los actores que tienen disponibilidades de horario muy restringidas, negociar con ellos un aumento en su disponibilidad y así mejorar la programación de los estudios. La velocidad en la ejecución de la heurística, es el factor determinante en la factibilidad de este tipo de negociaciones. Con el nuevo sistema la empresa es capaz de agregar una disponibilidad de horario y volver a ejecutar la heurística en menos de 5 minutos.

La ejecución de la heurística toma 2 minutos aproximadamente, en un PC Pentium de 200 Mhz, con 64 Mb en memoria Ram y 2 Gb de espacio en disco.

El sistema fue conectado de un modo semiautomático tanto con el sistema que genera información de entrada para la programación de estudios (digitación de guiones), como con el sistema que recibe los resultados de la operación de doblaje en los estudios (contabilidad). La definición clara de estas interfaces de entrada y salida del sistema permitió concentrar todos los esfuerzos en el tema central en estudio y entregar una solución que no afectó a las otras áreas de la organización.

Los Prismas de Factibilidad resultaron ser una estructura de datos muy útil para manejar situaciones complejas de disponibilidad de horario. Esta estructura, también podría usarse para implementar heurísticas en otros problemas relacionados, como asignación de horarios en colegios y universidades, planificación de vuelos en aerolíneas, asignación de personal a ambulancias o empresas de servicios en general, etc. Algunos de los problemas mencionados son más simples que el problema resuelto en este trabajo, debido a que en ellos el tiempo a asignar se divide en unidades discretas de tiempo, normalmente llamadas módulos.

En la práctica la separación de los conceptos color de un cristal y caja de información resulta artificial, pues dos cristales son diferentes ya sea porque sus colores son distintos o porque sus cajas de información lo son. Entonces resulta

más natural y mejora la lúdica de los Prismas de Factibilidad definir el color de un cristal como un concepto más abstracto, que incluye todos los datos relevantes de una caja de información.

La operación de Proyección Simple entre Prismas de Factibilidad es sumamente poderosa para determinar las disponibilidades comunes entre distintos elementos que puedan manejar algún tipo de gestión de horario de trabajo, sin embargo la regla que indica que el color y la caja de información del prisma resultante están definidos por los valores que estos elementos tengan en el primer prisma usado en la proyección, hace que se pierda información útil contenida en los otros prismas. Esta operación podría aumentar su poder si se definiera una “Proyección Compuesta”, en la cual el programador pudiera ver el prisma resultante indicando en cada acceso con respecto a cual de los prismas usados en la proyección original se deben definir los colores y cajas de información de los cristales del prisma resultante.

La heurística aquí presentada también puede usarse en conjunto con otras metaheurísticas que requieren de algún método para obtener una solución inicial e intentan mejorar la solución encontrada, por ejemplo, se podría utilizar búsqueda tabú.

También sería interesante comparar el desempeño de esta heurística con otras, como búsqueda tabú, algoritmos genéticos, etc.

6. Referencias Bibliográficas

- Pinedo, 1995. *Scheduling, Theory, Algorithms and Systems*. PRENTICE HALL, New Jersey/USA.
- Kitagawa y Ikeda, 1987. An existencial problem of a weight-controlled subset and its application to school timetable construction. *Discrete Mathematics*, 72, Hiroshima/Japón, Pág. 195.
- Ortiz, 1989. *Asignación de Horarios en un Régimen Curricular Flexible*. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Industrial, Universidad de Chile, Stgo/Chile.
- Opazo, R., 1999. *Una Solución al Problema de Asignación de Horario para una Empresa de Doblajes de Películas*. Universidad de Chile, Stgo/Chile.

7. Apéndices

Apéndice 1: Modelo Matemático

El modelo que se presenta fue desarrollado para analizar la posibilidad de una solución basada en software ya existente, capaz de resolver problemas de programación lineal entera, como Cplex, Lindo, Maple, etc.

Para facilitar la comprensión del modelo, todas las ecuaciones se presentan en forma simplificada, suponiendo un problema con sólo una película, un estudio y un día de planificación.

El modelo busca maximizar la tasa de utilización de los estudios. Por simplicidad, no se incluye la consideración de preferencias de los actores en la función objetivo.

Definiciones Previas

Loop: Como ya se dijo, los guiones son divididos en unidades elementales que en este caso corresponden a cuatro líneas consecutivas del guión para el mismo personaje. En caso de que el texto del personaje sea interrumpido por otros personajes, entonces las líneas del loop no quedan seguidas, pero cada loop debe contener cuatro líneas, a menos que el personaje ya no tenga más intervenciones en la película.

Sesión: Entrada a grabar a un estudio por parte de un actor. Las sesiones tienen definida una hora de inicio y una de término. En cada sesión un actor entra a grabar a un estudio durante el tiempo programado e intenta grabar todos los loops asignados.

Módulo: Para administrar la disponibilidad de horario de los actores, la jornada de trabajo es dividida en bloques de 30 minutos denominados módulo. Indices: Se usará el índice j para actores; e , entradas y m , módulos.

Parámetros del modelo

$E =$	número máximo de sesiones para actores, 3 diarias en la situación actual.
$L =$	Duración de los módulos (30 minutos).
$M =$	número total de módulos.
$T_{\max} =$	Duración máxima de una entrada (180 minutos).
$T_{\min} =$	Duración mínima de una entrada (15 minutos).
$d_{mj} =$	1 si el actor j tiene disponibilidad en el modulo m , 0 si no tiene.
$W =$	Valor muy positivo
$J =$	Número total de actores, aproximadamente 50.
$P_j =$	Tiempo total que debe grabar el actor j . Se calcula como la suma de los tiempos de los personajes asignados al actor j .

Variables de decisión

$t_{je} =$	Instante en que el actor j entra a grabar la sesión e
$x_{je} =$	Tiempo de grabación del actor j en la sesión e
$y_{je} =$	1 si el actor j realiza la sesión e , 0 si no.
$z_{j_1 e_1 j_2 e_2} =$	1 si el actor j_1 graba su entrada e_1 antes que el actor j_2 grabe e_2 , 0 si no.
$h_{jem} =$	Variable auxiliar binaria para implementar restricciones excluyentes.

Función objetivo

El principal requerimiento que debe considerarse para elegir una solución factible, es que ésta sea la de mínimo tiempo de grabación para completar las películas. Esto se obtiene indirectamente al exigir que la tasa de utilización de los estudios sea la máxima posible. Con este criterio, se obtiene un beneficio adicional: es posible maximizar, aún cuando en el período de planificación no se pueda terminar de procesar toda la carga de trabajo asignada a los estudios y actores.

Por lo que la función objetivo puede escribirse como

$$\max \sum_{j \in \{1, \dots, J\}} \sum_{e \in \{1, \dots, E\}} x_{je}$$

Esta función objetivo podría ajustarse para considerar las preferencias de los actores, como criterio de selección, en caso de obtener 2 o más soluciones que arrojen el mismo valor para la función objetivo. O dar premios al valor de la función objetivo, si la selección tiene duraciones de las entradas cercanas a un valor óptimo.

Restricciones en la duración de las entradas

El tiempo de grabación debe ser menor o igual que el máximo permitido

$$x_{je} \leq T_{max} \quad \forall j, e$$

El tiempo de grabación debe ser mayor o igual que el mínimo permitido si la entrada se realiza ($y_{je} = 1$) y cero en caso de que la entrada no se realice ($y_{je} = 0$).

$$W(1 - y_{je}) + x_{je} \geq T_{min} \quad \forall j, e$$

$$x_{je} \leq W y_{je} \quad \forall j, e$$

$$t_{je} \leq W y_{je} \quad \forall j, e$$

Restricciones de trabajo asignado

$$\sum_{e \in \{1, \dots, E\}} x_{je} \leq P_{je} \quad \forall j \in \{1, \dots, J\}$$

Los actores no pueden grabar durante más tiempo del que se les asignó.

Restricciones de secuenciamiento

En cada estudio, los actores graban sus parlamentos independientemente. En un momento posterior, cuando se edite la película, estos parlamentos serán mezclados de forma que puedan escucharse diálogos coherentes. Esto significa que las asignaciones de actores a estudios deben hacerse de modo que en cada entrada un actor termine todo el trabajo asignado antes de que entre el siguiente. Es decir, para toda entrada e_1 del actor j_1 , esta entrada se graba completamente antes o después que cada entrada e_2 del actor j_2 .

$$\begin{aligned} t_{j_1 e_1} + x_{j_1 e_1} &\leq t_{j_2 e_2} + W(1 - z_{j_1 e_1 j_2 e_2}) \\ t_{j_2 e_2} + x_{j_2 e_2} &\leq t_{j_1 e_1} + W z_{j_1 e_1 j_2 e_2} \\ &\forall e_1, e_2 \in \{1, \dots, E\} \end{aligned}$$

Restricciones de disponibilidad de horario

Las entradas de los actores, deben ser en un momento del tiempo que tenga intersección vacía con los módulos en los que el actor no puede grabar ($d_{mj} = 0$).

Para implementar este tipo de restricciones se deben generar restricciones para cada par módulo - actor en que el actor no tenga disponibilidad de horario. Dado un m y un j que cumplan este requisito, se debe exigir que la sesión del actor termine antes que el módulo sin disponibilidad, o comience después.

$$\begin{aligned} x_{je} + t_{je} &\leq L(m - 1) + W(1 - h_{jem}) \\ Lm &\leq t_{je} + Wh_{jem} \quad \forall j, e \\ &\forall m, j \mid d_{jm} = 0 \end{aligned}$$

Restricción de término de las últimas entradas

Cada entrada debe terminar antes del fin de la jornada de trabajo.

$$x_{je} + t_{je} \leq ML \quad \forall j, e$$

Dominios de variables

$$x_{je}, t_{je} \in \mathbb{R}_0^+ \quad \forall j, e$$

$$y_{je}, z_{j_1e_1j_2e_2}, h_{jem} \in \{0, 1\}$$

En el caso que se estudió, se asumió que existen 50 actores (J = 50) que cada actor en promedio tiene 10 módulos sin disponibilidad y un máximo de 3 entradas diarias por actor (E = 3). La cantidad de variables binarias resultó ser:

Variables Binarias	Fórmula Base	Fórmula Optimizada	Cantidad Base	Cantidad Optimizada
Entradas (y_{je})	J*E	J*E	150	150
Precedencia ($z_{j_1e_1j_2e_2}$)	J2*E2	(J*E)(J*E-1)/2	22.500	11.175
Auxiliares (h_{jem})	J*E*10	J*E*10	1.500	1.500
Total			23.700	12.825

