UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS

DISEÑO ÓPTIMO DE REDES PARA LA PROGRAMACIÓN DE OBRAS DE EDIFICACIÓN, PARA UNA NIVELACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE RECURSOS PERSONALES CONSTANTE

TESIS DOCTORAL

Doctorando: Francisco Javier Medina Ramón

Director: Dr. D. José Luis Ferrer Muñoz
Catedrático de la Universidad
CEU-CARDENAL HERRERA

Tutor: Dr. D. Julián Magro Moro
Catedrático de Escuela Universitaria
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Julio 2008

A mi familia, en especial a las
últimas incorporaciones, Javi y Miguel.

AGRADECIMIENTOS

Si bien una Tesis Doctoral es el resultado de un proceso de estudio e investigación del doctorando, la presente ha sido posible gracias al Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad Politécnica de Valencia que, con la constante preocupación de su director, el profesor **D. Javier Benlloch Marco**, en que el mismo estuviera dotado del mayor número posible de doctores, en todo su proceso de elaboración no ha cesado de aportar su apoyo y total disposición para cuanto fuera necesario.

Al Director de la Tesis **D. José Luis Ferrer Muñoz** y al Tutor **D. Julián Magro Moro** por su fructífera colaboración y permanente disponibilidad.

A los profesores **D. José Luís Montalva Conesa** y **D. David Soler Fernández** por sus minuciosas y precisas correcciones.

A la profesora **Dª Cristina Tudela Andreu** por sus inestimables traducciones.

Al profesor **D. Enrique Carvajal Salinas** por sus orientaciones en momentos de despiste.

A los profesores, compañeros de la asignatura, **D. Eduardo Bolufer Catalá** y **D. José Luis Ponz Tienda**, por su comprensión, apoyo y colaboración.

Al profesor **D. Ulises Ponce Ferrer**, con el que he compartido asignatura durante más de treinta años, por transmitirme sus amplios conocimientos y por su incondicional y total apoyo.

A todos, muchas gracias.

ÍNDICE

CAPÍTULO 0
RESUMEN

RESUMEN

Desde inicios del siglo XX, hasta la fecha, la problemática de los recursos ha sido ampliamente estudiada, y en concreto la de los recursos humanos o personales en su sentido más amplio, incluido el sector de la edificación.

Se han realizado y siguen realizándose muchos y excelentes trabajos sobre la mano de obra interviniente en la Edificación, con notables aportaciones, en especial relacionadas con sus rendimientos, producción, productividad, métodos y sistemas para mejorar el rendimiento, distribución de recursos, etc., etc., pero más bien escasos son los trabajos y aportaciones en lo que a su nivelación ideal, definida en esta Tesis, se refiere.

Este trabajo de investigación tiene por objeto el diseño de una red óptima, que prevea los tiempos de comienzo y terminación de todos los trabajos necesarios para la ejecución de una obra de edificación, que defina las relaciones de simultaneidad o dependencia entre ellos y que la misma sea el resultado de una nivelación y distribución de medios personales constante.

Su objetivo general es establecer el proceso para el diseño óptimo de una red de programación de obras de edificación, como consecuencia de una nivelación y distribución de recursos personales constante, previa consecución de los objetivos específicos intermedios que se concretan en desarrollar un algoritmo heurístico que nos permita nivelar los recursos personales intervinientes de una forma ideal u óptima, modelizándolo y procesándolo, resolviendo los casos singulares y obteniendo la red ideal u óptima de la programación a partir de la nivelación anterior.

Esta Tesis Doctoral, pretende aportar unas teorías que puedan llevarse a la práctica, para solucionar los problemas descritos anteriormente, con especial atención a la nivelación de la mano de obra, poniendo a disposición del sector de la Edificación una herramienta, novedosa, práctica, eficaz y útil.

RESUM

Des de l'inici del segle XX fins a l'actualitat, la problemàtica dels recursos ha estat àmpliament estudiada, i en concret la dels recursos humans o personals en el sentit més ampli, inclòs el sector de l'edificació.

S'han realitzat i segueixen realitzant-se molts i excel·lents treballs sobre la mà d'obra que intervé en l'edificació, amb notables aportacions, especialment relacionades amb els seus rendiments, producció, productivitat, mètodes i sistemes per a millorar el rendiment, distribució de recursos, etc., etc., però són més aviat escassos els treballs i les aportacions pel que fa a la seua anivellació ideal, definida en aquesta tesi.

Aquest treball d'investigació té per objecte el disseny d'una xarxa òptima que preveja els temps de començament i acabament de tots els treballs necessaris per a l'execució d'una obra d'edificació, que definisca les relacions de simultaneïtat o dependència entre aquests i que aquesta siga el resultat d'una anivellació i distribució de mitjans personals constant.

L'objectiu general és establir el procés per al disseny òptim d'una xarxa de programació d'obres d'edificació, com a conseqüència d'una anivellació i distribució de recursos personals constant, amb la consecució prèvia dels objectius específics intermedis que es concreten a desenvolupar un algorisme heurístic que ens permeta anivellar els recursos personals que hi intervenen d'una forma ideal o òptima, modelitzant-lo i processant-lo, resolent els casos singulars i obtenint la xarxa ideal o òptima de la programació a partir de l'anivellació anterior.

Aquesta tesi doctoral pretén aportar unes teories que es puguen dur a la pràctica per a solucionar els problemes descrits anteriorment, amb especial atenció a l'anivellació de la mà d'obra, posant a la disposició del sector de l'edificació una eina, nova, pràctica, eficaç i útil.

SUMMARY

Since the beginning of the 20^{th} century until the present day, the problem of resources has been widely studied, in particular that of human or staff resources in its broader sense including the field of building.

Many and excellent works have been carried out and are still being developed about the labour taking part in Building with outstanding contributions, especially those related to its performance, productivity, methods and systems to improve performance, resources distribution, etc., but rather scarce are the research and contributions with regard to its ideal balancing referred to in this thesis.

The aim of this research study is the design of an optimum network to predict the beginning and completion timing of all the necessary jobs for the implementation of a building work, to define the simultaneity or dependence relationship among them, and being the result of a constant balance and distribution of staff.

Our general objective in this research work, is to establish a process for the optimum design of a scheduling network of building works, as a consequence of a constant balancing and distribution of staff resources by previously attaining the intermediate specific objectives fulfilled in the development of a heuristic algorithm that permits us balance the staff resources in an ideal or optimum way, modelling and processing it, solving the peculiar cases and obtaining the ideal or optimum scheduling network from the former balance.

This doctoral thesis tries to provide with some theories that can be put into practice, to solve the previously mentioned problems, paying especial attention to labour balancing and offering the Building sector a new, practical, efficient and useful tool.

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

1.1. PREÁMBULO.

Hace tiempo, más del que yo hubiera deseado, cuando decidí realizar mi Tesis Doctoral, se me planteó, como es lógico, elegir el tema de la misma.
Para ello analicé los factores de orden subjetivo y objetivo que podían condicionar la elección del mismo.

En cuanto a los factores subjetivos me planteé qué temática era de mi interés y me provocaba entusiasmo. La respuesta fue inmediata: La Programación de Obras y los recursos intervinientes.

Seguidamente, analicé mi capacidad para desarrollar un tema o problemática sobre dicha materia. Dados mis conocimientos teóricos sobre la misma, derivados de mi trayectoria docente e investigadora y prácticos como fruto del ejercicio profesional como Arquitecto y Arquitecto Técnico, la respuesta fue positiva.

Posteriormente intenté evaluar el tiempo necesario para desarrollar mi Tesis Doctoral. No pude cuantificarlo pues el gran número de variables intervinientes era muy grande y la mayoría de ellas no estaban bajo mi control. En consecuencia decidí no ponerme plazo, ni siquiera aproximado, con lo cual cometí mi primer error, ya que el tiempo pasaba, las variables incontrolables seguían siendo las mismas o similares y la investigación no avanzaba. ¿El ámbito era muy amplio? Probablemente. Por ello decidí acotarlo y limitarlo a los recursos personales.

Por último analicé los factores objetivos y confronté que el tema era útil, despertaba interés y aportaba una metodología novedosa sobre el tratamiento de los recursos personales a la hora de su nivelación, lo que, unido al ánimo de mis compañeros, dio como fruto el título de la misma:

“DISEÑO ÓPTIMO DE REDES PARA LA PROGRAMACIÓN DE OBRAS

DE EDIFICACIÓN, PARA UNA NIVELACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE

RECURSOS PERSONALES CONSTANTE”

1.2. RESEÑA HISTÓRICA. ANTECEDENTES.

A principios del siglo XX, Henry L. Gantt y Frederick W. Taylor, introducen su modelo de gráfico de barras horizontales que, de inmediato, alcanza gran auge en el sector industrial.

En **1956** el equipo formado por Morgan Walker de la empresa Du Pont de Nemours & Company y James E. Kelley Jr. de la Rémington Rand Corporation, presentaron su teoría de la técnica de redes, estableciendo las bases matemáticas en que se basa el método de la ruta crítica. Al querer abordar proyectos de gran envergadura y con el fin de adaptar la técnica de Walker y Kelley a la computadora digital, se unió al equipo el doctor John W. Marchly, de la empresa Univac.
Paralelamente, la Marina de los EE.UU. intentaba encontrar técnicas para llevar a cabo los proyectos de gran importancia, creándose un departamento de evaluación de programas de la Special Projects Office, Bureau of Naval Ewapons, al frente del cual se encontraba Willard Fazar. La misión de este departamento era la de evaluar las actuaciones y avances realizados, en función de los objetivos finales, en el proyecto del submarino Polaris.

A finales de **1957**, la Marina decidió contactar con la firma de ingenieros asesores Booz, Allen & Hamilton International I.N.C. y con la Lockheed Missle and Space División, que era uno de los contratistas del subsistema de proyectiles Polaris, para la creación de un sistema para evaluar programas que facilitara una mayor información que la que se estaba obteniendo hasta el momento en el proyecto Polaris. El resultado fue el "Program Evaluation Research Task" (Investigación de evaluación de programa). La Booz, Allen & Hamilton y el doctor Charles E .Clark, plantearon el concepto de red con tres estimaciones de tiempo para cada actividad, estableciendo las bases del P.E.R.T. ("Program Evaluation and Review Technique"), técnica de evaluación y revisión de programa.

En **1958**, el matemático francés, B. Roy, empieza a trabajar en su teoría de la red de potenciales, con motivo del armado de barcos realizado por SERA, la Cíe des Machines Bull y la Chantiers de L'Atlantique.

En **1959**, aparecen los primeros textos sobre la Técnica de Potenciales.

En **1960**, Roy, B., presenta su trabajo ya perfeccionado.

En **1961**, John W. Fondahl, profesor de la Universidad de Stanford, ideó una técnica en la cual las actividades estaban en los nodos. Esta técnica fue desarrollada posteriormente por IBM, dando lugar a un programa que se llamó Precedence Diagramming Method (P.D.M.), más conocido como Red de Precedencias, de uso muy generalizado en la actualidad.

Es en la década de los 60 cuando empiezan a surgir investigaciones significativas acerca de la programación de proyectos con recursos limitados y sobre la asignación y distribución de recursos, bien mediante Programación Matemática, Técnicas de Enumeración o Métodos Heurísticos.

En **1962**, aparecen los trabajos pioneros de A.R. Burgess y J.B. Killebrew,[1] y de F.K. Levy, G.L.Thompson y J.D. Wiest[2], desarrollando algoritmos heurísticos de nivelación y asignación de recursos.

En **1963**, B. Roy, dentro de su teoría sobre la Técnica de los Potenciales, considera la limitación de recursos como una ligadura "acumulativa" de los problemas de programación y "disyuntiva" cuando dos trabajos se ejecutan, obligatoriamente, en periodos distintos por tener que utilizar un mismo equipo, considerando que las ligaduras acumulativas son complicadas de definir matemáticamente, creando las disyuntivas grandes problemas combinatorios[3].

En **1964**, B. Roy, y B. Sussmann, publican el artículo *"Les problèmes d´ordonnanccement avec contraintes disjonctives".*[4]

En **1966**, B. Roy, publica *"Prise en compte des contraintes disjonctives Dans les methodes de chemin critique".*[5]

En **1967**, A. Durand, publica *"Une methode optimale de traitement des contraintes disjonctives dans les problemas d´ordonnancement. Application a la construction d´un barrage".*[6]

En ese mismo año, empiezan a utilizarse las Técnicas de Enumeración, que suponen la creación de secuencias factibles de actividades, eligiéndose, de entre todas ellas, la que optimiza el objetivo. R.V. Johnson, desarrolla una Técnica de Enumeración en la cual las decisiones de secuenciación deben considerar únicamente las fechas de finalización de las actividades. El modelo

---

[1] *"Variation in Activity on a Cyclic Arrow Diagram".* Journal of Industrial Engineering. Volumen 13, 1962.
[2] *"Multi-Ship, Muti-Shop, Workload Smoothing Program".* Naval Research Logistics Quarterly. Volumen 9, 1962.
[3] *"Algunos aspectos teóricos de los problemas de programación".* Coloquio hispano-francés sobre métodos modernos de gestión. Barcelona, 1964.
[4] Rapport de Recherche, nº 9. Direction Scientifique SEMA. Décembre, 1964.
[5] Revue Française de Recherche Operationnelle, nº 38, 1966.
[6] Revue Française de Informatique et de Recherche Operationnelle, nº 3, 1967.

se establece para un único recurso y demanda del mismo constante durante toda la duración de la actividad.

El periodo comprendido entre 1962 y 1967, fue un quinquenio prodigioso en cuanto a la producción de algoritmos heurísticos para la programación óptima de proyectos con recursos limitados. Junto al ya indicado anteriormente de F.K. Levy, G.L.Thompson y J.D. Wiest, cabe destacar, entre otros, el:

HGSG del Ground Systems Group de Huges Corporation.

RAMPS (Resource Allocation and Multi-Project Scheduling), de la C-E-I-R Inc.

RPSM (Resource Planning and Scheduling Method) de Imbrie, explotado por Manchly Associates.

ALTAI (Analisi, Livellamento e Tempificazione Automatici e Integrati), de IBM.

ROC 8001 de Richfield Oil Company.

CORUA de M. Doliguez.

SPAR-1 y SPAR-2 (Scheduling Program for Allocation of Resources) de J.D. Wiest.

Por el interés para esta Tesis Doctoral los analizaremos más adelante.

En **1968**, E.W. Davis, diseña un modelo de enumeración aplicable a la limitación de varios recursos y cuando las actividades tienen niveles variables de demanda.

En **1969**, A.A. Pritsker et al., desarrollan una de las técnicas más utilizadas para proyectos simples, sin interrupción de actividades y disponibilidades, utilizando la programación matemática.

En **1970**, M. Schrage, presenta un algoritmo para enumerar todas las secuencias factibles de un proyecto, para un único recurso y demanda constante.

En **1971**, E.W. Davis y G.E. Heidorn, desarrollan un modelo de programa con 3 recursos y 35 actividades, con demandas variables y partiendo las actividades.

En **1972**, N.A. Hastings, diseña un algoritmo de acotación en el que inserta cotas para acelerar la obtención de la solución, para un único recurso y demanda constante para toda la duración de la actividad.

En **1973**, B.C. Paulson, aplica métodos heurísticos a las Redes de Precedencias.

En **1978**, B. Talbot y J.H. Patterson, diseñan un procedimiento de enumeración sistemática de todos los posibles tiempos de finalización de las actividades del proyecto.
En el mismo año, C. Stinson et al., utilizan la acotación, basada en criterios dominantes y en el cálculo de una cota inferior, aplicándolo a 4 tipos de recursos.
En la misma línea y en el mismo año, N. Christofides, R. Álvarez-Valdés y J.M. Tamarit, presentan un algoritmo que utiliza una cota inferior para resolver las incompatibilidades que existen entre actividades debido a las restricciones en los recursos.

El año **1983**, marca un hito en el campo de la gestión de proyectos en general y en el de la Organización, Programación y Control de obras en particular, pues aparece en el mercado el primer software para la gestión de proyectos en entornos de computadores personales, el programa Harvard Project Manager, a partir del cual y debido a la constante evolución de los computadores, podemos contar, hoy en día, de grandes paquetes de software de gestión de proyectos (CA-SuperProject, Microsoft Project, Project Scheduler, Time Line, Primavera Project Planner, Artemis Schedule Publisher, SAS/OR Software, Lingo, Lindo, etc., etc.).
Hay que resaltar que, en general, el software de gestión de proyectos nos proporciona información para que se pueda nivelar el histograma de recursos, pero **no resuelve el problema de la nivelación de recursos personales**.

En **1984**, R.H. Möhring, propone el problema de secuenciación de proyectos con costes sobre los recursos (RACP) y lo aplica para resolver un problema de construcción de un puente.

En **1995**, E. Demeulemeester, utiliza procedimientos exactos para resolver el mismo problema anterior (RACP).

En el **2000**, A. Drexl y A. Kimms, para resolver el RACP, propone cotas inferiores.

En el **2002**, K. Newman et al., proponen la nivelación de recursos cuando pueden considerarse ilimitados, disponibles a un cierto coste y se ha de minimizar el coste asociado al máximo consumo de dichos recursos.

En el **2006**, D.S. Yamashita et al., proponen resolver el RACP mediante métodos heurísticos.
En ese mismo año, R. Álvarez-Valdés et al., presentan un estudio[7] sobre el problema de secuenciación de proyectos cuando los recursos pueden considerarse ilimitados, disponibles a un cierto coste y se ha de minimizar el coste asociado al máximo consumo de dichos recursos, desarrollando algoritmos metaheurísticos. Se trata de un caso particular del problema de nivelación estudiado por K. Newman et al. en el año 2002.

Después de esta reseña histórica que define los antecedentes, se extraen las siguientes,

CONCLUSIONES

1ª. La preocupación por la programación mediante técnicas de redes (camino crítico), nace en la **segunda mitad del siglo XX** y se centra en la minimización de la duración del proyecto, teniendo únicamente en cuenta las dependencias de las actividades o trabajos necesarios para ejecutarlo y las duraciones de los mismos, suponiéndose que los recursos son suficientes a la hora de ser demandados.

2ª. A partir de **1962** se plantea la programación de proyectos con recursos limitados y comienzan las investigaciones para su nivelación, empezando con **la Programación Matemática** que enseguida se abandona debido a que en redes de cierta complejidad se generan modelos combinatorios de grandes dimensiones al tener que coordinar restricciones y dependencias tecnológicas con necesidades y disponibilidades.

3ª. Derivado de la problemática que plantea la Programación Matemática, en el periodo **1962-1967**, las investigaciones se centran en **Algoritmos Heurísticos.**

[7] XXIX Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa. 15-19 de mayo 2006. Tenerife.

4ª. A partir de **1967**, se combinan dos líneas de investigación, la de los **Algoritmos Heurísticos** y la de las **Técnicas de Enumeración**.

5ª. **Sigue sin solucionarse la problemática de la nivelación de recursos a través de Algoritmos Heurísticos, los cuales no nos proporcionan la seguridad de que la solución sea óptima.**

1.3. LOS RECURSOS.

1.3.1. CONCEPTOS Y CLASIFICACIÓN.

La producción conlleva saber no solo lo que se desea obtener, sino también los medios necesarios para obtenerlo. Es decir hay que conocer los recursos que se necesitan, por lo que, tradicionalmente, se definen como los medios necesarios para llevar a cabo la realización de un producto.

Muchas son las definiciones que se pueden encontrar sobre el término, pero significativa y novedosa resulta la definición de recursos del profesor E. Carvajal, derivada de su "Teoría del Uniproducto"[8], que aparece en su libro "Las funciones básicas de la producción en la construcción"[9]:

"Los recursos son los medios que se interponen en el proceso productivo para llevar a cabo la realización del producto. Cada uno de ellos pierde la forma independiente con que entran en el proceso de trabajo para constituir la unidad inmueble y su coste pasa a formar parte del coste del producto acabado."

En todas las definiciones, tanto clásicas como novedosas, aparece un denominador común, la palabra **"medios"** y, en la mayoría, **"necesarios"** pero, a veces, los necesarios no son los disponibles. Lo más frecuente es que su disponibilidad esté limitada.

Las técnicas utilizadas para la programación de obras (P.E.R.T., C.P.M., ROY, PRECEDENCIAS, etc.) permiten establecer programas que minimizan la duración de un proyecto, teniendo en cuenta las relaciones de dependencia o precedencia de los trabajos necesarios para ejecutar la obra, así como las duraciones de cada uno de ellos pero, implícitamente, presuponen la disponibilidad de recursos en el momento que son necesarios, lo cual no

---

[8] Carvajal E. *"Uniproduct o Multiproducto"*. Colegios Oficiales de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla y Las Palmas. Sevilla, 1992.
[9] Carvajal E. *"Las funciones básicas de la producción en la construcción"*. Centro Internacional para la Conservación del Patrimonio. CICOP. Sevilla, 2001.

obedece a la realidad, planteándose el problema más grave de la programación de obras. **La limitación de recursos**.

Los recursos intervinientes en una obra de edificación los clasifico en los siguientes grupos:

1. **Recursos Materiales**.

Partiendo de la base de que los proyectos de ejecución, en general, están bien definidos, las necesidades de materiales no cambiarán durante la ejecución de la obra, por lo que no influirán en el tiempo de ejecución de los distintos trabajos y en consecuencia en el plazo final de la obra. Estos recursos no son variables en función del tiempo de ejecución, siendo sus cantidades y costes directos fijos. Los problemas con estos recursos surgen, generalmente, por incumplimientos en plazos de entrega, roturas y problemas derivados de su transporte.

2. **Recursos humanos o personales.**

Son los recursos más complejos de cualquier actividad.
Su gestión tiene como objetivo el definir, cuantitativa y cualificativamente, las necesidades profesionales para la ejecución de la obra.
Este tipo de recurso lo desarrollaré en el siguiente apartado.

3. **Maquinaria, equipos y medios auxiliares.**

Su necesidad está definida por el tipo de trabajo a ejecutar, por el volumen del mismo y por la evolución de la propia construcción que, de un producto relativamente simple, ha pasado a otro de mayores requerimientos tecnológicos, usando la mecanización como un recurso para reducir los plazos de ejecución y garantizar los mismos.

4. **Subcontratas.**

Este recurso viene derivado del alto grado de especialización de la mano de obra en la edificación. A medida que ha ido evolucionando la especialización de la mano de obra, las subcontratas han ido en aumento, representando un porcentaje muy considerable sobre el coste de ejecución material de un edificio, resultando un gran recurso, pues supone eliminar la preocupación por los rendimientos y costes de las unidades de obra.

5. **Recursos económicos.**

En los cuales incluiremos los propios y los obtenidos a través de actividades de crédito, descuento comercial, pago aplazado, etc., etc., teniendo en cuenta que, estos últimos, son variables en el tiempo, dependiendo de que la situación del sector de la construcción sea más o menos favorable.

1.3.2. LOS RECURSOS PERSONALES.

Los recursos personales, definidos en el apartado anterior, intervinientes en la ejecución material de una obra de edificación los clasifico en cuatro grupos:

Grupo 1. **Mano de obra directa**.

Es la mano de obra consumida en la ejecución material de las distintas unidades de obra, conformada por los operarios intervinientes en los distintos oficios.

Grupo 2. **Mano de obra indirecta**.

Es la mano de obra consumida en las distintas secciones de la empresa que sirven de apoyo a la producción, pero no intervienen en la materialización de la misma.

Grupo 3. **Mano de obra de gestión**.

Es la mano de obra correspondiente al personal directivo y ejecutivo de la empresa.

Grupo 4. **Mano de obra comercial**.

Es la mano de obra encargada de la gestión comercial de la empresa.

En esta Tesis Doctoral me referiré siempre a la MANO DE OBRA DIRECTA.

1.4. SITUACIÓN ACTUAL.

1.4.1. PUNTO DE PARTIDA.

Actualmente es inconcebible que pueda estudiarse y mucho menos ejecutarse una obra sin un programa previo que nos fije:

1.- Los objetivos a alcanzar.

2.- Las actividades o tareas y el orden de ejecución de las mismas, además de las relaciones existentes entre ellas.

3.- Los medios necesarios para poderlas ejecutar en un plazo determinado.

4.- Plazo final esperado para los objetivos intermedios y el final de ejecución de la obra.

5.- La probabilidad de ejecución de la obra en determinado plazo.

Conscientes de la necesidad de la programación de las obras, la misma se aborda a través de tres grandes fases.

FASE 1.

Arranca del proyecto de ejecución de la obra. A partir del estado de mediciones y con los recursos disponibles y rendimientos de la mano de obra, se calcula la duración de los distintos trabajos necesarios para ejecutarla así como sus costes directos.

FASE 2.

Con las duraciones obtenidas y sus costes, se procede a la programación inicial mediante cualquiera de las técnicas existentes, generalmente mediante una técnica de redes, con lo cual se obtiene la red inicial para, seguidamente, obtener, según interese, la solución de duración normal, mínima u óptima, con sus correspondientes costes directos, indirectos y totales.

Entiendo por:

Solución de duración normal.

La obtenida a partir de las duraciones normales de los trabajos y sus correspondientes costes directos normales o mínimos, los cuales, incrementados con los costes indirectos, nos dará los totales.

Solución de duración mínima.

La correspondiente al mínimo tiempo necesario para la ejecución de la obra, a la cual corresponderá el coste directo máximo.

Solución óptima.

La de menor coste total.
Estas soluciones, representadas en un gráfico de costes-tiempos[10] las sitúo de la siguiente forma:

GRÁFICO DE COSTES-TIEMPOS

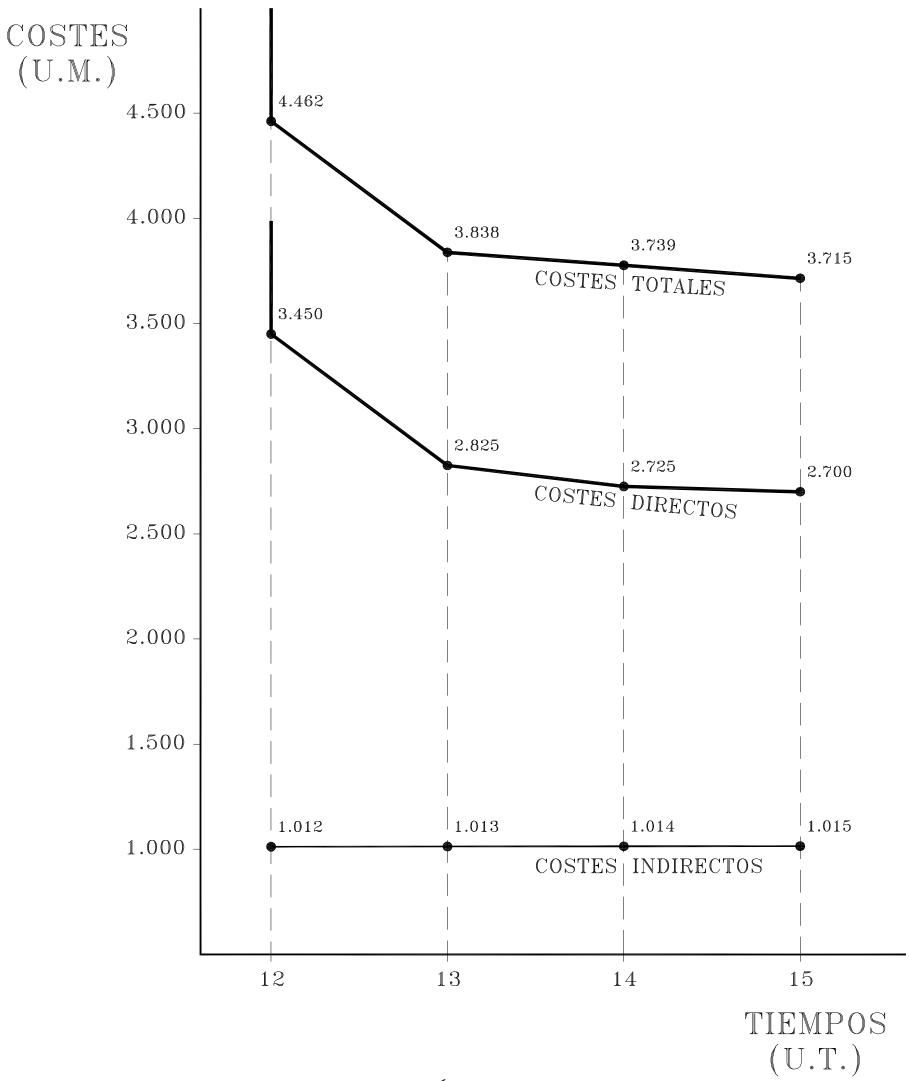


GRÁFICO A
(CI=1000+T_E)

Siendo las soluciones las siguientes:

Solución de duración normal.
Corresponderá a 15 unidades de tiempo con un coste directo de 2700 unidades monetarias, un coste indirecto de 1015 unidades monetarias y un coste total de 3715 unidades monetarias.

[10] Medina F.J. *“Técnicas de Redes. TomoI”*.Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 1997. Pp. 70-72.

Solución de duración mínima.

Corresponderá a 12 unidades de tiempo con un coste directo de 3450 unidades monetarias, un coste indirecto de 1012 unidades monetarias y un coste total de 4462 unidades monetarias.

Solución óptima.

Coincidirá con la solución de duración normal.

Hay que tener en cuenta que los costes totales anteriores y, en consecuencia, las soluciones, pueden variar en función de los costes indirectos, de manera que en el gráfico de costes-tiempos anterior, si modifico la pendiente de la recta representativa de los costes indirectos a CI = 1000 + 30 T_E, tendré:

GRÁFICO DE COSTES–TIEMPOS

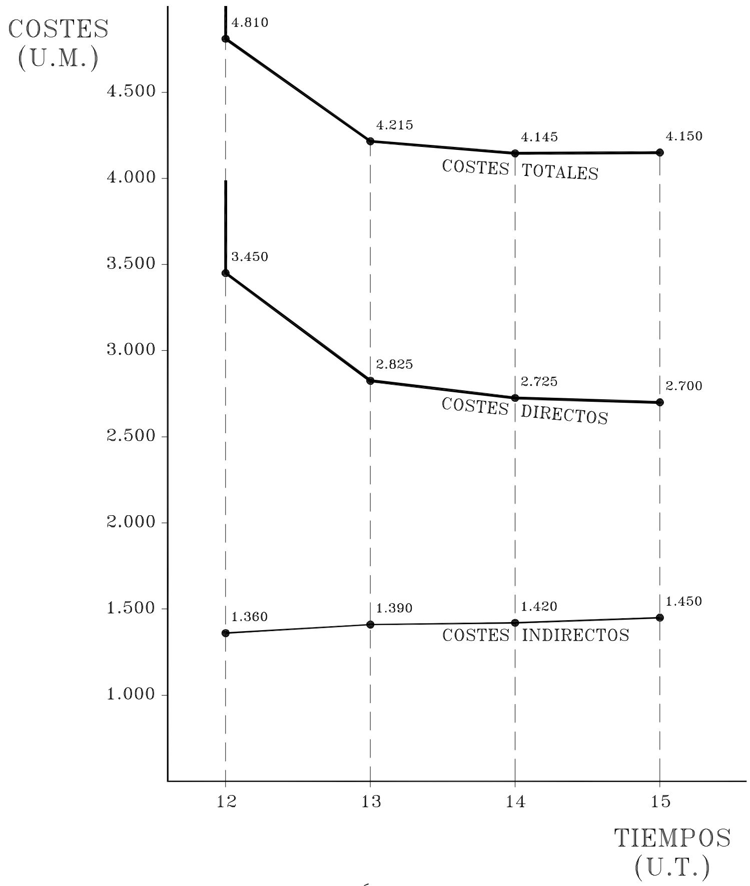


GRÁFICO A
(CI=1000+30T_E)

Cuyas soluciones son:

Solución de duración normal.

Corresponderá a 15 unidades de tiempo con un coste directo de 2700 unidades monetarias, un coste indirecto de 1450 unidades monetarias y un coste total de 4150 unidades monetarias.

Solución de duración mínima.

Corresponderá a 12 unidades de tiempo con un coste directo de 3450 unidades monetarias, un coste indirecto de 1360 unidades monetarias y un coste total de 4810 unidades monetarias.

Solución óptima.

Corresponderá a 14 unidades de tiempo con un coste directo de 2725 unidades monetarias, un coste indirecto de 1420 unidades monetarias y un coste total de 4145 unidades monetarias.

Incluso se podría dar el caso paradójico de costes totales iguales para duraciones distintas. Esto ocurre cuando el incremento de coste directo coincide con lo que disminuye el indirecto. En el ejemplo indicado, si la ecuación de costes indirecto es CI = 1000 + 25 T_E el gráfico costes-tiempo es:

GRÁFICO DE COSTES-TIEMPOS

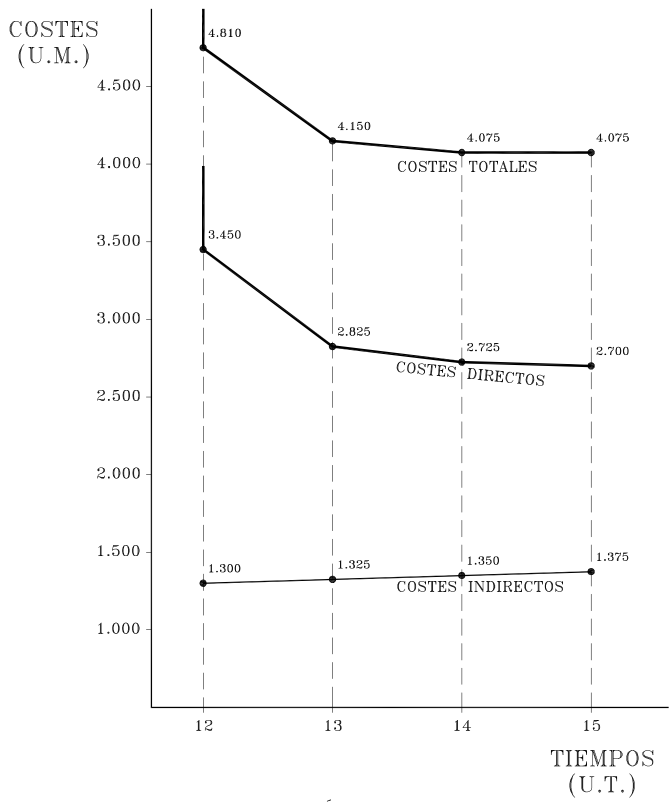


GRÁFICO A
(CI=1000+25T_E)

Y las soluciones son:

Solución de duración normal.

Corresponderá a 15 unidades de tiempo con un coste directo de 2700 unidades monetarias, un coste indirecto de 1375 unidades monetarias y un coste total de 4075 unidades monetarias.

Solución de duración mínima.

Corresponderá a 12 unidades de tiempo con un coste directo de 3450 unidades monetarias, un coste indirecto de 1300 unidades monetarias y un coste total de 4810 unidades monetarias.

Solución óptima.

Corresponderá a 14 y 15 unidades de tiempo con un coste directo de 2725 y 2700 unidades monetarias respectivamente, un coste indirecto de 1350 y 1375 unidades monetarias respectivamente y un coste total de 4075 unidades monetarias para ambas duraciones.

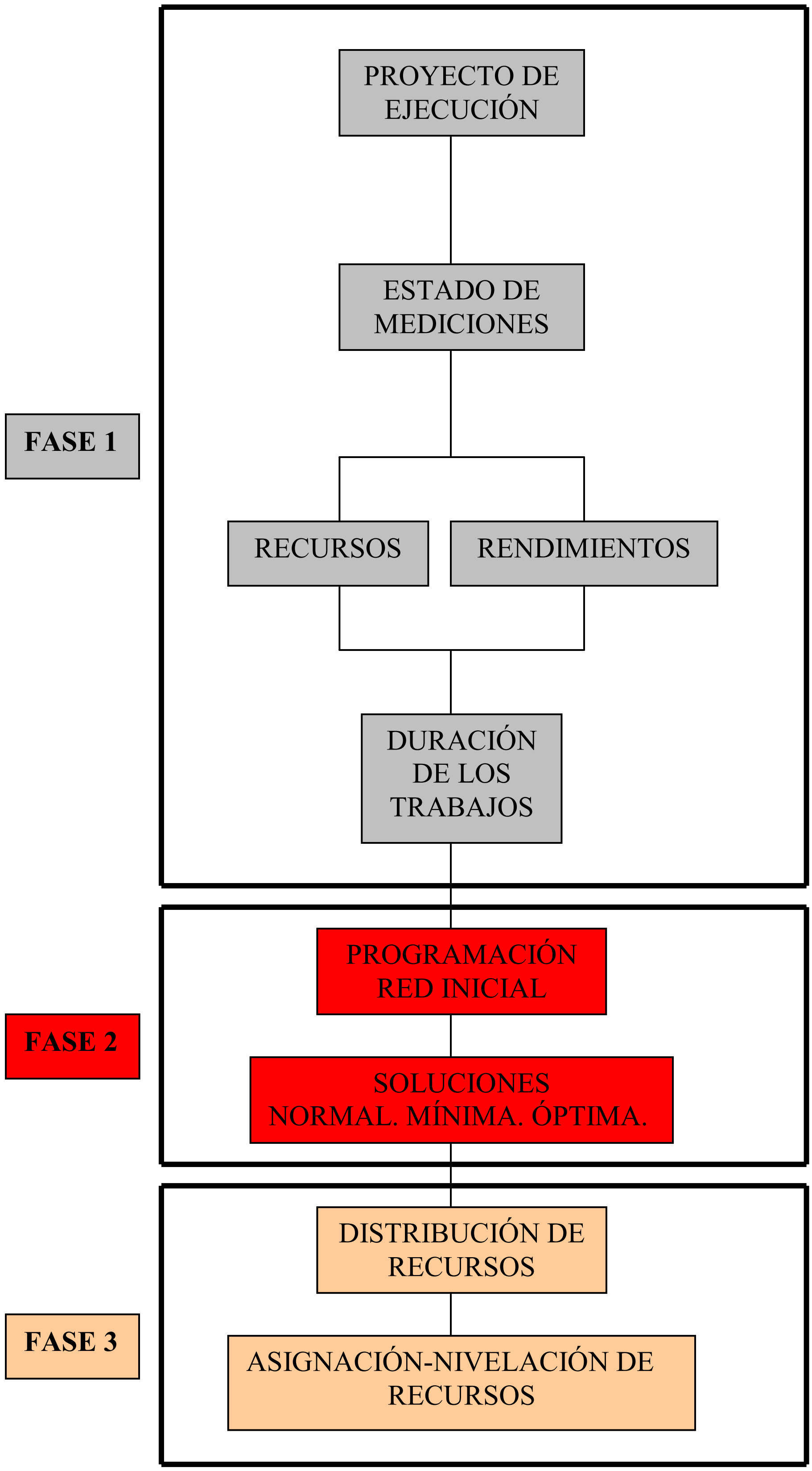
En conclusión, una simple variación en la pendiente de la recta representativa de los costes indirectos, varía las soluciones.

FASE 3.

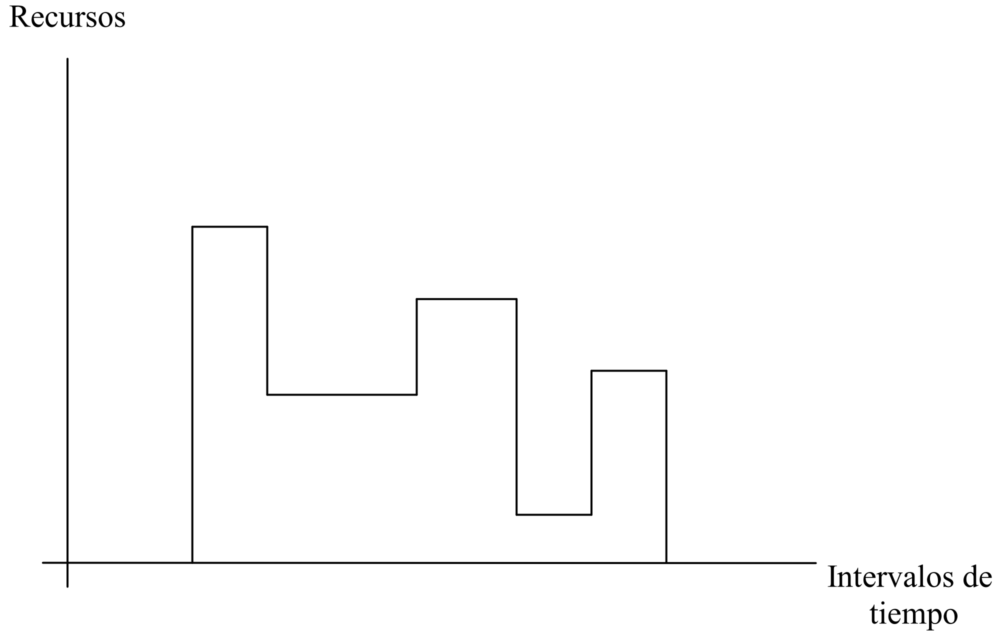
Generalmente, a partir de la red óptima y, en un gráfico de barras horizontales o de Gantt, se distribuyen, temporalmente, los recursos disponibles, obteniéndose el histograma de cargas de mano de obra o de distribución de recursos personales, el cual adoptará una forma más o menos caprichosa, en función de la distribución.
Finalmente se procede a la asignación o nivelación de recursos en función del objetivo que se persiga.

El organigrama de las distintas fases, es el siguiente:

SITUACIÓN ACTUAL. PUNTO DE PARTIDA



HISTOGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DE RECURSOS RESULTANTE



Tomando como base el histograma indicado, se procede a la asignación o nivelación de los recursos.

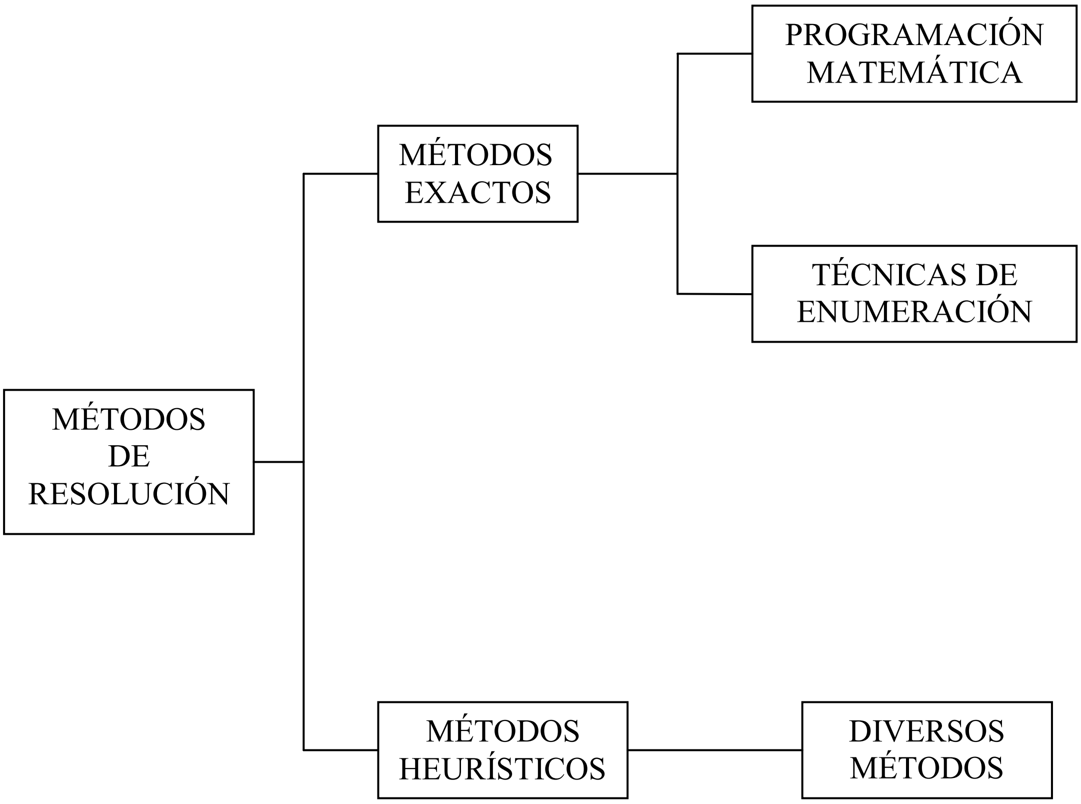
1.4.2. MÉTODOS DE ASIGNACIÓN Y NIVELACIÓN DE RECURSOS.

Se entiende por métodos de **asignación** de recursos, aquellos que tienen por objetivo el que, en ningún momento, los recursos de mano de obra necesarios para realizar un determinado trabajo, superen a los disponibles, aunque ello suponga un incremento de tiempo en el plazo final de ejecución de la obra.
En consecuencia, se trata de minimizar el plazo de ejecución sin incrementar los recursos de mano de obra disponibles.

Análogamente, se entiende por métodos de **nivelación** de recursos, aquellos que tienen por objetivo, el mantener lo más uniforme posible el consumo de mano de obra y, en consecuencia, su histograma de cargas, sin que el plazo inicial de ejecución de la obra se incremente.

Para la resolución de los problemas de asignación y nivelación de recursos, generados por la normal limitación de los mismos, se siguen métodos distintos que se clasifican y analizan seguidamente.

Clasificación de los métodos de resolución.



1. **Métodos exactos.**

Nos conducen a una solución óptima y se pueden dividir en dos grupos.
1.a. **La Programación Matemática.**

Aborda la optimización a través de la programación de actividades con recursos limitados utilizando la programación entera.

1.b. **Las Técnicas de Enumeración.**

Suponen la generación de secuencias factibles de actividades, eligiéndose, de entre todas ellas, la que optimiza el objetivo.

Ambas técnicas, de origen combinatorio, resultan de aplicación muy limitada, sobre todo a proyectos de cierta envergadura, ya que la Programación Matemática genera modelos de gran número de variables y restricciones y las Técnicas de Enumeración desembocan en un gran número de secuencias a analizar, por lo que no resulta factible su aplicación a proyectos del sector de la edificación, dado el gran número de unidades de obra a tratar y relaciones

de simultaneidad y dependencia que existen entre ellas. Creo que se les podría sacar un mayor aprovechamiento si se investigara más en su aplicación.
Por esos motivos, los métodos de resolución han evolucionado hacia los métodos heurísticos.

2. **Métodos heurísticos.**

No conducen a una solución óptima pero si a soluciones muy buenas o casi óptimas.

La mayoría se basan en reglas de prioridad, estableciendo un esquema de secuenciación y una regla de prioridad, partiendo de una solución inicial y, mediante procesos iterativos, tratan de mejorarla, pero sin la seguridad de que la solución sea óptima.

Se analizan los métodos pioneros que han dado origen a los actuales.

2.a. Método de **A.R. BURGESS Y J.B. KILLEBREW.**

J.F. Boss[11], resume los fundamentos del método en:

"La eficacia en la asignación de un recurso determinado, en función de una distribución ideal, varia en sentido inverso a la suma –obtenida en cada unidad de tiempo, del principio al fin del proyecto- de los cuadrados de las diferencias entre las cargas totales que corresponden a las dos asignaciones".

Parte de una red y la transforma en el Gantt equivalente, suponiendo que las actividades comienzan lo más pronto posible.

Pasos a seguir:

1. Se comienza por la parte inferior del Gantt, tomando la primera actividad que tenga holgura total. Esta actividad se desplaza hacia la derecha, unidad por unidad de tiempo, determinando, para cada día, la suma de cuadrados de la carga de mano de obra.

2. Se determina, de todas las posiciones posibles de la actividad estudiada, aquella que, sin agotar la holgura total, totalice el valor más bajo en la suma

[11] Boss, J.F. *"Prise en consideration des contraintes pesant sur la disponibilité des moyens Dans les methodes de chemin critique"*. Revue Française de Recherche Operationelle, nº 38, 1966.

de los cuadrados de carga. A valores iguales, se tomará aquél que sitúe la actividad lo más a la derecha posible.

3. Se modifican las fechas más tarde de terminación de las actividades precedentes que hayan sido afectadas por la operación anterior.

4. Situada la anterior actividad en su posición óptima, subiendo en el Gantt, se pasa a la actividad más inmediata que disponga de holgura. Esta actividad se somete a un tratamiento semejante al descrito para su antecesora, es decir, se desplaza hacia la derecha hasta el límite permitido por su holgura, de forma que su ubicación represente una carga mínima.

5. El proceso descrito se sigue con las demás actividades hasta llegar a la primera.

6. Cuando se acaba el primer barrido del Gantt, se vuelve a comenzar una nueva iteración, Para ello, empezamos por el principio o final del Gantt.

7. Se da por finalizado el proceso cuando, tras un barrido, ya no sea posible disminuir el valor de la suma de cuadrados de la carga de la última iteración.

Se trata de un algoritmo heurístico, no pudiéndose saber si hemos llegado a la nivelación óptima, a no ser que el histograma de carga sea uniforme.
Puede aplicarse a varios recursos.

2.b. **Programa $(MS)^2$. Multiship, multichip, workload-smoothing.**

Diseñado por F.K. Levy, G.L. Thompson y J.D. Wiest, para la nivelación simultánea de la mano de obra de varios proyectos.
El $(MS)^2$ tiene por objetivo alcanzar una programación que represente unos costes de mano de obra lo más bajos posible. El número de operarios a emplear está en función de las cargas máximas de trabajo resultantes de la programación de las actividades, intentando reducir las cargas máximas mediante el desplazamiento de las actividades con holgura total que las producen a períodos con cargas más pequeñas, por lo que es similar al método de A.R. Burgess y J.B. Killebrew.

Parte de una red y la transforma en el Gantt equivalente, con indicación de las fechas más pronto y más tarde de comienzo y de terminación, así como sus holguras totales. Todo ello para cada uno de los proyectos.

El programa de salida se configura con las actividades de cada uno de los proyectos, ajustadas a sus tiempos más pronto de comienzo, determinándose las correspondientes curvas de carga o histogramas representativos de las necesidades de mano de obra.
Para cada proyecto y especialidad, se fija un nivel de intervención, el cual está un operario por debajo del nivel correspondiente a la carga de mano de obra máxima requerida.
Seguidamente se reprograman las actividades que tengan holgura, con el fin de reducir la carga máxima por debajo del nivel de intervención.
Si, a consecuencia de la mencionada reprogramación, se consigue que en algún otro intervalo de tiempo no se supere el nivel de intervención, se baja otra unidad de operario, repitiéndose el proceso hasta que no sea posible reducir el nivel de intervención en un proyecto.

2.c. Método de **Hughes Corporation.**

Es un algoritmo heurístico desarrollado por el Ground Systems Gruop de la compañía Hughes Corporation.

Su objetivo es minimizar las variaciones de nivel de la mano de obra mediante criterios establecidos previamente, generalmente los mínimos cuadrados de las variaciones.

El proceso consiste en dividir el perfil del histograma de cargas en intervalos y nivelar, por separado, cada uno de ellos, modificando las fechas más pronto de comienzo de las actividades que siguen al intervalo analizado.
Para seleccionar los intervalos consideraremos los tramos en los cuales la carga mínima rebasa la media y las zonas en las que la carga máxima está por debajo de la media, por lo que, será en estos últimos intervalos, donde intentaremos mover el mayor número de actividades posibles, procurando que sean las de menor carga, con el fin de no sobrepasar la carga media.

El gran inconveniente de este sistema es que acarrea la aparición de gran número de actividades críticas.

2.d. Métodos de **R.C. Wilson, T.C. Hu** y **O.J. Black**.

Son variantes del $(MS)^2$ en el cual introducen variaciones conducentes a emplear el mínimo de recursos para una duración predeterminada de la obra, incorporando en cada barrido del calendario una técnica de programación dinámica para obtener secuencias factibles de trabajos, incorporándose un método que da todas las soluciones factibles que satisfacen las restricciones impuestas por los recursos.

Se trata de una sistemática poco práctica que no se puede aplicar al sector de la Edificación debido al gran número de actividades con que se trabaja.

2.e. El **Programa ROC 8001**.

Se trata de un método de asignación en serie de recursos, desarrollado por la empresa Richfield Oil Company, aplicable a proyectos con gran número de actividades.

Los criterios de partida en que se fundamenta la metodología son los siguientes:

a) Los recursos se adjudican primero a las actividades que carecen de holguras, es decir a las críticas y posteriormente a las no críticas, utilizando la holgura libre.
b) Si es preciso y posible utilizaremos la programación intermitente de los trabajos.
c) Cuando la asignación no sea satisfactoria, aumentaremos la duración de la obra y realizaremos otra iteración.

Metodología.

a) Parte de una red y la transforma en el Gantt equivalente, ordenando las actividades por sus tiempos más pronto de comienzo y distribuyendo los recursos cronológicamente, día a día, pasando a una lista de espera las actividades a las que no se les haya asignado recursos.

La lista de espera se confecciona según las siguientes reglas de prioridad:

1. Las actividades de la lista pueden comenzar si únicamente se consideran las restricciones temporales, ya que sus tiempos más pronto de comienzo son anteriores a la que estamos trabajando en ese momento.
2. Las actividades se ordenan en la lista según sus tiempos más tarde de comienzo, para evitar que se conviertan en críticas.
3. En el caso de que las actividades tengan igual tiempo más tarde de comenzar, se dará preferencia a la de menor duración.

b) Seguidamente se ordena el comienzo de las actividades críticas si es posible, es decir, si todas las actividades precedentes han sido terminadas y las que están en ejecución, que han comenzado antes de la fecha actual, dejan disponibles recursos.

c) Si no hay recursos disponibles procede de la siguiente forma:

c.1) Retrasar el comienzo de ciertas actividades en ejecución, mandándolas a la lista de espera, con lo cual liberan recursos.
c.2) Interrumpir actividades no críticas que se encuentren en la lista sin rebasar la fecha más tarde de terminación.

Si con las medidas anteriores no se consiguen los recursos suficientes para las actividades críticas, el proyecto habrá de ser retrasado.
En este caso, se aumentarán en una unidad de tiempo más tarde de comienzo de la lista de actividades y se comenzará la iteración de nuevo.

d) Se ordena, si es posible, el tiempo más pronto de comienzo de las tareas no críticas de lista de espera.

e) Se indica el final de las actividades terminadas, borrándolas de la lista, pasando los recursos que utilizaban a estar disponibles.

f) Avanzamos un periodo y se reinicia la iteración.

2.f.) La técnica **ALTAI.**

La técnica Altai (Análisi, Livellamento e Tempificazione Automatici e Integrati), es un método para compatibilizar recursos acometiendo la programación simultánea de varios proyectos con intensidad fija, siendo original de IBM.[12]

Su objetivo es minimizar la suma del coste total de los retrasos en la terminación de los proyectos y los costes derivados de la sobrecarga e infracarga de los recursos.

Características del Altai:

1. Se puede aplicar a un número de proyectos ilimitado.
2. No existe limitación en el número de actividades de cada proyecto.
3. Parte de una red de flechas para cada proyecto.

---

[12] Ricciardi, M. *"ALTAI, técnica di programmazione Della produzione con più commesse contemperanne"*. IBM, Italia, 1963.

4. Las fechas de comienzo de cada proyecto pueden establecerse en función de la fecha en que se desee terminar el mismo y en función de la duración del proyecto y a una holgura de seguridad.
5. La intensidad de cada actividad se fija de manera que su rendimiento sea máximo.

Metodología.

Etapa 1. Coordinación de todas las actividades de todos los proyectos, determinando fechas de comienzo, terminación, holguras y marcando su criticidad.

Etapa 2. Las actividades de cada proyecto de clasifican por puestos de trabajo.

Etapa 3. Se comprueba la posibilidad de asignar a los distintos puestos de trabajo las actividades que se consideren oportunas, controlando la carga asignada a partir de la fecha más pronto de comienzo.
En caso necesario, se retrasan las actividades hasta encontrar una nueva fecha más pronto de comienzo que permita compatibilizar las cargas de trabajo ya existentes, modificando las fechas de comienzo que parten de la zona analizada. Seguidamente y para cada uno de los proyectos se recalculan los tiempos y su criticidad.

Etapa 4. Se ordenan las actividades por puestos de trabajo y se calcula la carga para cada uno de ellos.

2.g.) El método de **McGee-Markarian**.

A.A. McGee y M.D. Markarian[13] abordan la problemática de programar simultáneamente varios proyectos con intensidades variables, desarrollando un método para un solo recurso: la mano de obra.
El origen del método fue resolver el problema de limitación de recursos alargando la duración de las actividades, suprimiendo recursos que se le habían asignado desde un principio.

El algoritmo desarrollado sigue las siguientes secuencias:

1. Se asigna a cada actividad un nivel mínimo de recursos, calculando los tiempos más pronto de comienzo y terminación de cada una de ellas y el camino crítico.

[13] Investigadores de IBM

2. Se establecen los histogramas de carga y se comparan con los de carga disponible en cada intervalo de tiempo, calculando el exceso de operarios.

3. Si con la programación inicial se superan los límites de carga disponibles, se desplazan las actividades con holgura en aquellos intervalos con sobrecarga.
Si no se consigue respetar los recursos disponibles buscaremos recursos suplementarios o retrasaremos la duración del proyecto.

4. Si se respetan los límites disponibles, comprobaremos que la duración del proyecto es la deseada.

2.h.) El programa **CORUA**.

M. Doligez, desarrolla un programa que, mediante un algoritmo heurístico, pretende llegar a una solución tan cercana a la óptima como sea posible y que garantice la compatibidad de recursos necesarios y disponibles, reduciendo el plazo de ejecución de los proyectos, priorizando los más urgentes.

El algoritmo que desarrolla para la asignación de los recursos disponibles, realiza una simulación en el tiempo, seleccionando las actividades que deberán comenzar, continuar, interrumpir o reducir, en base a criterios de prioridad como la duración, urgencia y holgura del proyecto.
Para cada clase de recurso define el histograma de disponible y necesario, adjudicando la diferencia entre ambos a un proyecto ficticio con prioridad máxima.

2.i.) El método **RAMPS**.

El método RAMPS (Resource Allocation and Multi-Proyect Scheduling) es un método para la distribución de recursos y la programación simultánea de proyecto.

Fue desarrollado por la compañía C-E-I-R Inc.[14], por encargo de la empresa Dupont de Nemours.

El algoritmo se basa en un modelo combinatorio que busca una solución relativamente satisfactoria, por lo cual se divide el problema en partes, optimizando cada una de ellas para, posteriormente, unir los óptimos.

2.j.) Los métodos **SPAR**.

[14] Filial de Control Data Corporation.

Los métodos SPAR-1 y 2 (Scheduling Program for Allocation of Resources), fueron desarrollados por J.D. Wiest.
M. Ortigueira[15] los describe de la siguiente forma:

"SPAR-1 realiza la distribución de recursos siguiendo un procedimiento en serie. Para ello se comienza por elaborar una lista con todas las tareas ordenadas para que comiencen en sus fechas más tempranas. El proceso se inicia ordenando las tareas que pueden comenzar en el primer intervalo de tiempo por sus márgenes totales. Las tareas críticas son las que tienen mayor probabilidad de ser comenzadas. Se programan tantas tareas como lo permiten las disponibilidades de recursos. Las tareas que no pueden ser comenzadas por falta de recursos se dejan para el período siguiente.
Estas tareas se hacen más críticas y se mueven hacia la cabeza de la lista de tareas prioritarias.
La mecánica anterior se modifica mediante la intervención de una serie de sub-rutinas, concebidas para mejorar la utilización de los recursos disponibles y/o reducir la duración del programa.
A cada tarea se le asocian tres intensidades: normal, mínima y máxima.
La selección de estas intensidades sigue las siguientes reglas:
Si una tarea a programar es crítica, se coloca en la lista de prioridad de acuerdo con su grado de criticidad (parámetro de entrada) y se le concede un tratamiento especial. Si hay suficientes hombres disponibles la tarea se programa con una intensidad o "equipo" de tamaño máximo.
Si no hay suficientes hombres disponibles se programa la tarea a una intensidad normal. Si esto tampoco fuera posible, se intentan conseguir los hombres necesarios mediante el empleo de rutinas de "Préstamo y Reprogramado" (Borrow and Rescheduling) que luego consideraremos. Si a pesar de esta medida todos los esfuerzos fallan y la tarea no puede ser programada ni a intensidad mínima, se procede a retrasar su fecha más temprana de comienzo una unidad de tiempo, y se deja en espera para el período siguiente. Las tareas no críticas se programan a intensidad normal siempre y cuando estén disponibles los suficientes hombres necesarios; pero, si no lo están, ni para realizar la programación a intensidad mínima, entonces las tareas se retrasan para ser consideradas el próximo día.
Para su ejecución, las tareas pueden precisar un número diferente de recursos (por ejemplo, hombres de diferentes especialidades) que pueden ser limitados. Estas tareas multi-recursos se descomponen en tareas independientes, una para cada recurso, imponiéndoseles la restricción de que se comiencen el

[15] Ortigueira, M. *"La Programación de proyectos con recursos limitados"*. Revista de Economía Política nº 57, 1971.

mismo día y con el mismo nivel de recurso asignado: normal, mínimo o máximo (o algún nivel intermedio).
Si los recursos disponibles son insuficientes para la programación de alguna tarea crítica j, entonces el modelo utiliza un procedimiento para examinar si las tareas en ejecución tienen suficientes hombres que les permita prestarlos para la ejecución, en ese día, de la tarea j. Los hombres se prestan únicamente cuando la tarea que se desprende de ellos no provoca un retraso en la fecha de terminación del proyecto.
A veces, una tarea crítica j se programa si otras tareas que emplean el mismo recurso y están ya programadas desplazan su comienzo a un período posterior. El modelo examina la lista de tareas en ejecución y señala aquellas que se pueden demorar sin perjudicar la fecha final del proyecto.
Si de esta forma se pueden obtener suficientes hombres y/o del procedimiento de préstamo descrito anteriormente, entonces se programa la tarea j y se realizan los ajustes precisos en la asignaciones previas.
Como podemos apreciar, la operatoria de SPAR-1 es complicada. Esta parece ser la característica común de todos los sistemas de programación múltiple de proyectos."

El SPAR-2 es una versión mejorada del SPAR-1.

2.k.) Método **RPSM**.

EL RPSM (Resource Planning and Scheduling Method) es explotado por Manchly Associates y se aplica, generalmente a la mano de obra.

El sistema tiene tres fases:

1. Un ciclo de tiempo normal del CPM.
2. La compilación de recursos.
3. Los recursos disponibles limitados.

Entre las ventajas de RPSM se encuentra la de poder reducir el volumen de mano de obra extraordinaria.

Hasta aquí hemos descrito varios métodos heurísticos, algunos de ellos son verdaderos embriones de esta metodología, que unido a la gran evolución de la tecnología computacional, dieron como fruto en 1983 el programa Harvard Project Manager y a los que hoy en día, dentro de las distintas variedades, se utilizan, como CA-SuperProject, Microsoft Project, Project Scheduler, Time Line, Primavera Project Planner, Artemis Schedule Publisher, SAS/OR Software, Lingo, Lindo, etc., etc., cuyas prestaciones son similares dentro de “la mima gama”, pero sus orígenes y objetivos son los mismos, al igual que similares sus metodologías.

1.5. LA PROGRAMACIÓN ÓPTIMA Y LA NIVELACIÓN IDEAL Y ÓPTIMA DE RECURSOS PERSONALES.

1. **La programación óptima.**

En toda edificación se producen dos tipos de costes:

- Costes directos.
- Costes indirectos.

Llamaremos costos directos a aquellos que se consumen en la producción, es decir en la ejecución material de la obra.

Llamaremos costos indirectos a aquellos que no se consumen en la ejecución material de la obra pero que son necesarios para llevarla a cabo. También se les conoce con el nombre de costes de estructura de la empresa.
A la suma de los costes directos e indirectos se les llama costes totales.

Como sabemos, el tiempo de duración a una actividad determinada, se obtiene en función de los recursos disponibles[16], fijándolo de una manera óptima, estableciendo dos límites:

1. Tiempo máximo que puede durar una actividad y

2. Tiempo mínimo que puede durar una actividad.

Como es lógico a cada uno de los mencionados tiempos les corresponderá un coste.

Los costes directos aumentan al disminuir la duración de una actividad, puesto que para reducir su tiempo de ejecución hay que aumentar, por ejemplo, el personal, lo que supone un incremento del coste de la mano de obra. Por contra al disminuir la duración de una actividad, descienden los costes indirectos al ser menor la repercusión de gastos de estructura.

Como vemos los factores principales que intervienen en la programación son:

---

[16] Me gusta añadir, aunque sea subjetivo, y “….en función de la experiencia….” Medina F.J. *“Técnicas de Redes. TomoI”.*Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 1997. P. 55

1. El tiempo.
2. El coste.
3. Los recursos.

Del equilibrio apropiado entre ellos depende la solución óptima.

¿Cual será la solución óptima?

La solución óptima será la que nos permita la ejecución del proyecto en el menor tiempo posible y con el mínimo costo total.

Obsérvese que se pretenden optimizar dos conceptos, el tiempo y el costo, por lo que podemos hablar de dos soluciones:

1. La solución de coste mínimo o solución óptima.

2. La solución de duración mínima.

Ambas han sido definidas en el punto 1.4.1.

En consecuencia **la solución óptima será siempre la que nos proporcione un coste total mínimo**, aunque en ocasiones y por política comercial de la empresa, la solución óptima puede ser la que nos permita finalizar el proyecto en el mínimo tiempo posible.

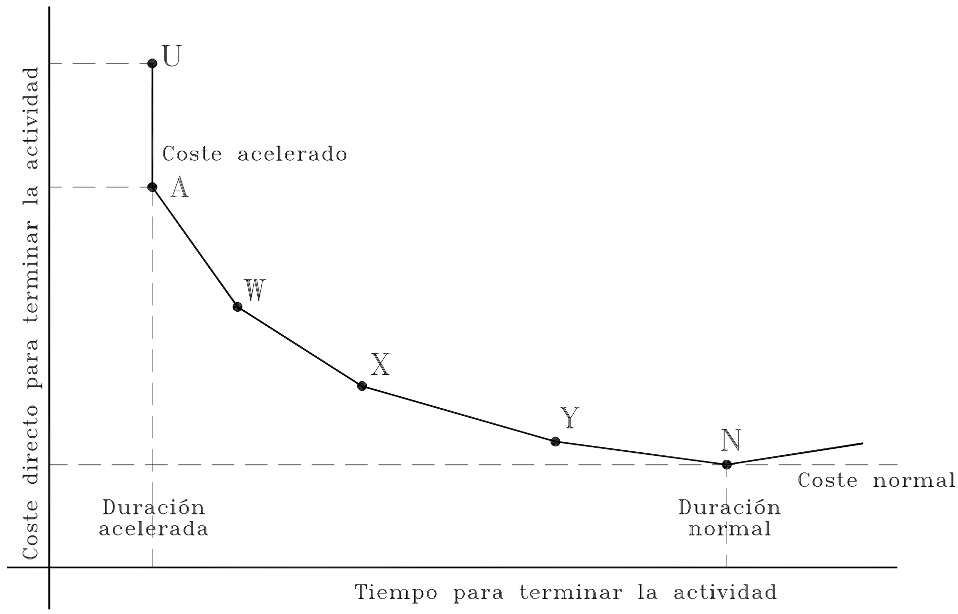
Los dos límites de tiempo, citados anteriormente, marcan un intervalo para la ejecución de una actividad, en función del coste. Obviamente ello repercute en el tiempo del suceso final de la obra, el cual podrá estar también entre un límite mínimo y otro máximo, correspondiendo respectivamente a la duración ACELERADA y a la duración NORMAL del proyecto.

Lo anteriormente expuesto nos da pie a, partiendo de un proyecto o programa realizado con las duraciones normales de las actividades, reducir el tiempo final de ejecución, con las consiguientes variaciones de costes. A esta operación se le conoce con el nombre de REDUCCIÓN o COMPRESIÓN de la red.

Análogamente, se puede realizar la operación inversa, es decir ampliar la duración final del programa o proyecto, con las consiguientes variaciones de costes, conociéndose esta operación con el nombre de AMPLIACIÓN o DES COMPRESIÓN de la red.

Los datos de coste y tiempo de una actividad, son la información básica necesaria para determinar el coste y la duración óptima del proyecto. Supóngase que se analiza la ejecución de una determinada actividad por distintos métodos o procedimientos. A cada uno de esos métodos o procedimientos le corresponderá una duración y un coste directo. Cada uno de esos pares de valores nos determinará un punto en unos ejes de coordenadas cartesianas, en los cuales el eje de abscisas es representativo del tiempo para terminar la actividad por un determinado método o procedimiento y el eje de ordenadas representará el costo directo de la actividad para cada uno de los métodos o procedimientos de ejecución analizados.

Si se unen los distintos puntos así obtenidos, obtendremos una línea quebrada a la cual se le denomina CURVA PRACTICA DE COSTO DIRECTO-TIEMPO. A esta línea quebrada, se le denomina erróneamente "curva" ya que se aproxima a la curva teórica ideal. Téngase presente que en la práctica únicamente se analizan un determinado número de métodos o procedimientos y en consecuencia solo se obtienen un número finito de puntos. Por ello la curva práctica de costo directo-tiempo adopta la siguiente forma.

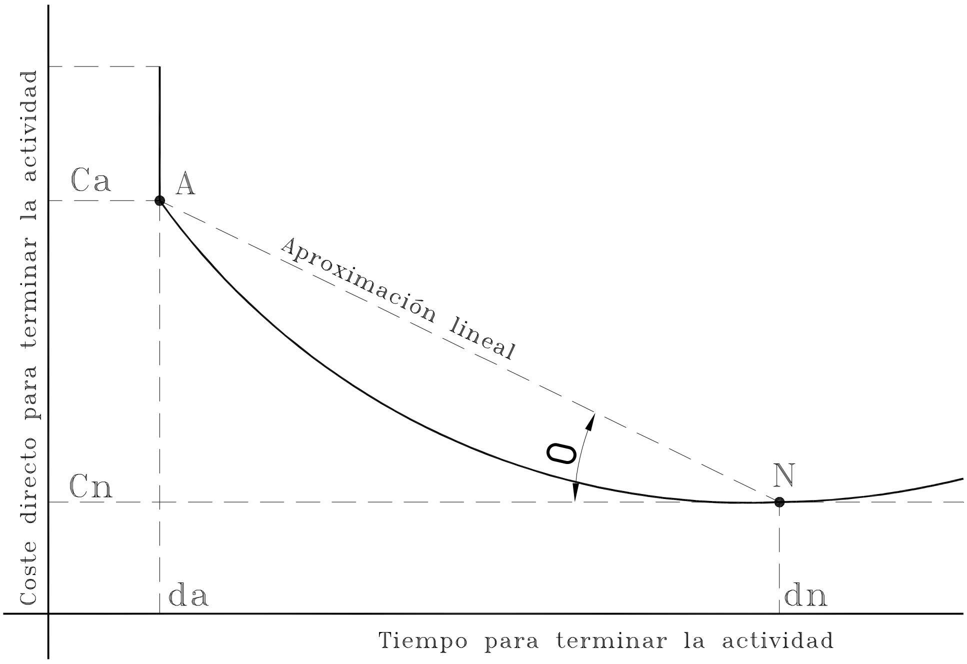


En la curva práctica de coste directo-tiempo, anteriormente citada, destacan los siguientes puntos:

Punto A. Corresponde al punto "acelerado", es decir al tiempo mínimo con un costo directo máximo.

Punto N. Corresponde al punto "normal", es decir al tiempo normal (máximo) con un costo directo mínimo (normal).

Se observa que en la curva práctica solo se consideran segmentos lineales, aproximándose a la CURVA TEÓRICA IDEAL que se indica a continuación.



Fijándose en la curva anterior, fácilmente se deduce que siempre nos moveremos entre las rectas $x = d_a$ y $x = d_n$, puesto que d_a es el tope para disminuir la duración de la actividad, aunque se incremente el coste. Es absurdo pensar que la duración de una actividad pueda llegar a ser cero, por muchos medios y procedimientos constructivos que se puedan utilizar.

Análogamente es ilógico buscar un tiempo de duración superior a d_n, ya que ello supondría más tiempo de ejecución de la actividad y más coste.

Prácticamente, para hacer más sencillo el cálculo, se sustituye la curva por la aproximación lineal, que es la recta que une el punto normal (N) y el acelerado (A).

Se llama pendiente unitaria de costes al incremento de coste directo por unidad de tiempo. Según se desprende de la curva anterior:

$$P = pendiente\ de\ \cos tos = tag\ 0 = \frac{Diferencia\ de\ \cos tos}{Diferencia\ de\ tiempos} = \frac{C_a - C_n}{d_n - d_a}$$

Como es lógico, curvas de este tipo pueden ser obtenidas para actividades individuales, para un conjunto de actividades o para un proyecto completo.

Se entiende por comprimir una red a la reducción del tiempo del suceso final de la misma, con el consiguiente incremento de costes directos y disminución de los costes indirectos. Si tal reducción alcanza el mínimo valor posible, diremos que la compresión es total. (Solución de duración mínima).

Para realizar la compresión de una red, procederemos de la siguiente forma:

1.- Se calculan los días posibles de reducción de todas las actividades, que será la diferencia entre la duración acelerada y normal de cada una de ellas. Es decir:

$$D = \text{días posibles de reducción} = d_n - d_a$$

2.- Se obtiene la pendiente de costes o incremento de coste directo por unidad de tiempo de todas las actividades.

3.- En el supuesto que exista un solo camino crítico, se reduce la actividad de menor pendiente de costes, con lo cual conseguiremos que el incremento de coste directo, sea el mínimo. ¿Cuantos días? Los días posibles de reducción anteriormente hallados.

¿Por qué reducimos actividades críticas? Porque el reducir la duración de una actividad no crítica supondría que el plazo final no disminuyera.

4.- Una vez elegida la actividad a reducir, construiremos la nueva red con la duración reducida de la actividad, calculando el coste de la reducción en cuestión, el cual obtendremos multiplicando la pendiente de costes de la actividad reducida por el número de días que se ha reducido, lo que nos dará el aumento del coste directo. A la mencionada cantidad le restaremos la variación del coste indirecto, con lo que obtendremos el incremento de coste total de la reducción, el cual podrá ser positivo o negativo, dependiendo del montante de la variación del coste indirecto.

5.- En el caso de que existan varios caminos críticos, hay dos posibilidades.

1ª.- Reducir una actividad común a todos los caminos críticos.

2ª.- Reducir una actividad de cada camino crítico el mismo tiempo.

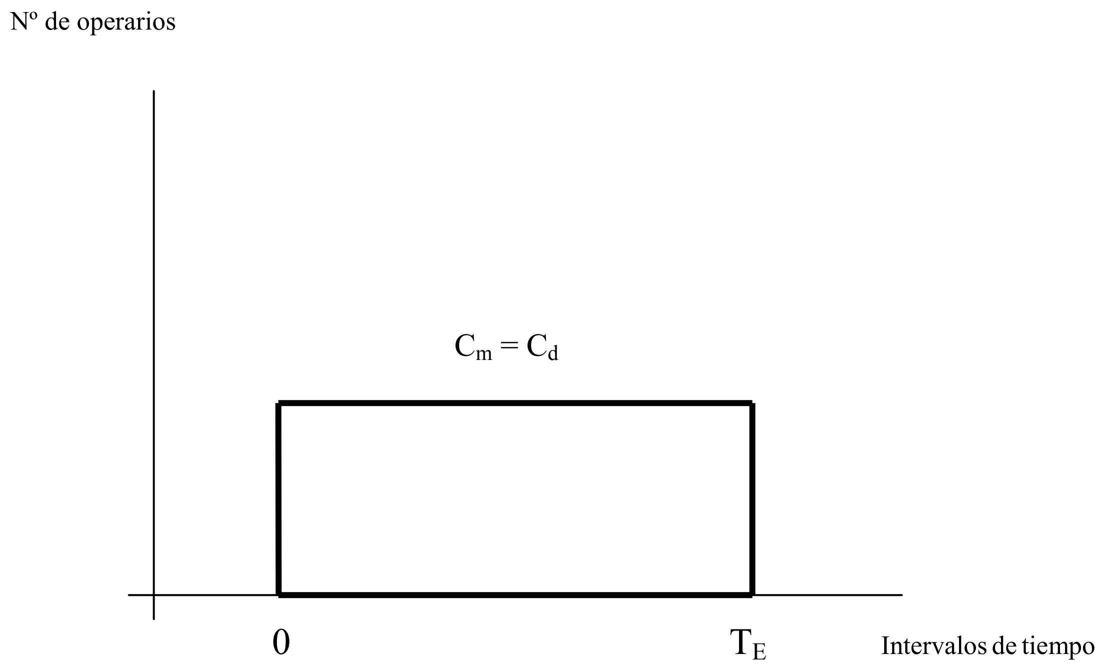
¿Cual elegiremos? Obviamente la más económica, es decir la que suponga un incremento de coste directo menor.

6.- Hay que tener presente en todo momento que al efectuar una compresión o reducción de una red, ninguna de las actividades críticas deben dejar de serlo aunque, debido a la compresión realizada, pueden aparecer nuevas actividades críticas.

En conclusión, efectuado el proceso de compresión, obtengo los gráficos de Costes-Tiempos, indicados en 1.4.1. y las distintas soluciones, siendo **la programación óptima, la red correspondiente al mínimo coste total.**

2. Nivelación ideal y óptima de recursos personales.

Se define la **nivelación ideal como aquella cuyo histograma de recursos personales, derivado de la programación, es constante, lo que implica la igualdad entre la carga media y diaria de recursos personales.**



Se define **nivelación óptima de recursos personales, a la que, teniendo el mismo coste que la ideal, su histograma de cargas de recursos personales más se le aproxima.**

Lógicamente existirán infinitas nivelaciones con el mismo coste, por lo que, el criterio que se sigue para definir la que más se aproxima a la ideal, tanto por exceso como por defecto, está en función de su **asintoticidad.**

CAPÍTULO 2
OBJETO

2.1. OBJETO.

Partiendo de las palabras clave del título de la tesis doctoral defino el objeto de la misma.

DISEÑO ÓPTIMO DE REDES PARA LA PROGRAMACIÓN DE OBRAS DE EDIFICACIÓN, PARA UNA NIVELACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE RECURSOS PERSONALES CONSTANTE

PALABRAS CLAVE

DISEÑAR.

Crear un modelo gráfico que, en nuestro caso, tendrá forma de grafo.

OPTIMIZAR.

Mejor manera de realizar un trabajo con un coste mínimo.

PROGRAMAR.

Anunciar las partes de que se ha de componer una obra, definiendo las relaciones entre ellas, previendo las fechas de comienzo y terminación.

EDIFICAR.

Hacer un edificio.

NIVELAR.

Dejar a igual altura.

DISTRIBUIR.

Colocar convenientemente.

RECURSOS.

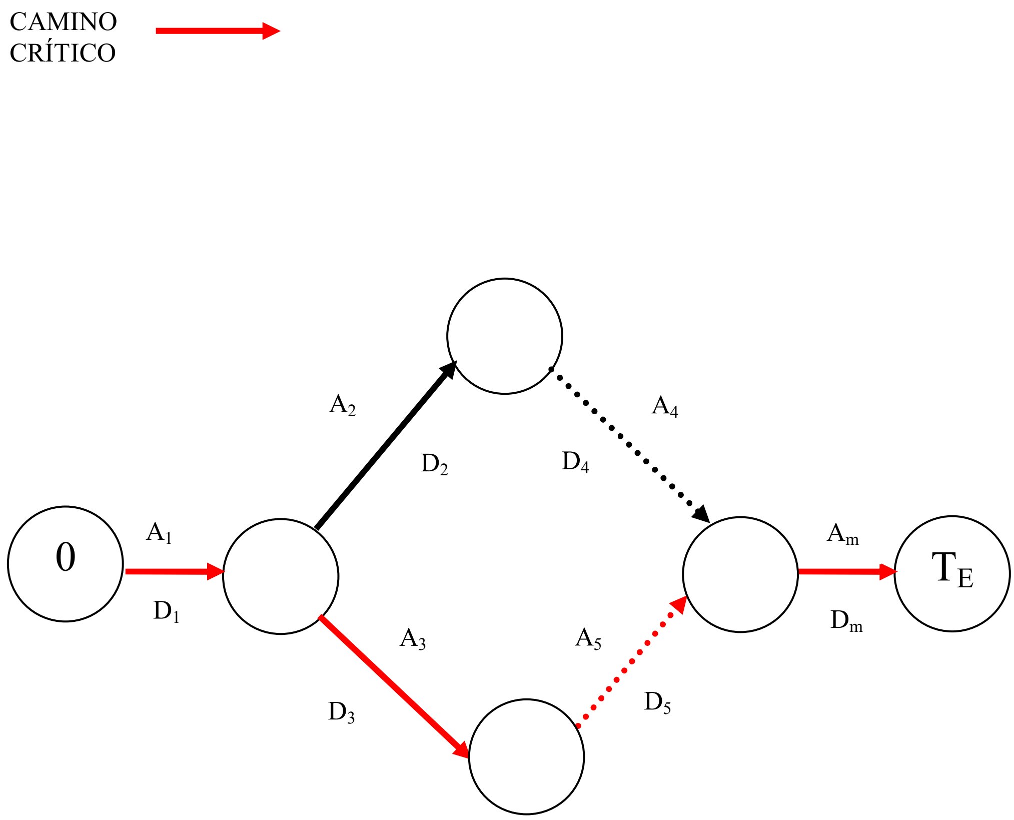
Medios para la producción.

En consecuencia, el tema objeto de la presente tesis doctoral es:

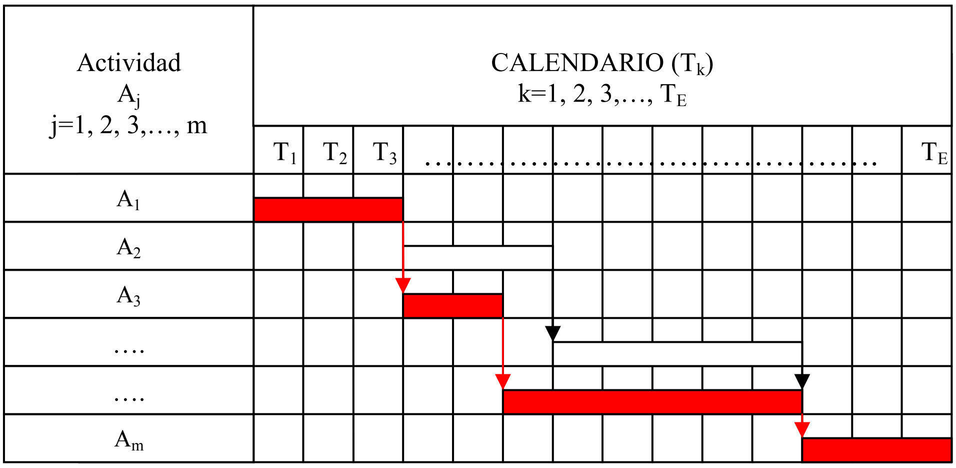
“El diseño de una red óptima, que prevea los tiempos de comienzo y terminación de todos los trabajos necesarios para la ejecución de una obra de edificación, que defina las relaciones de simultaneidad o dependencia entre ellos y que la misma sea el resultado de una nivelación y distribución de medios personales constante”.

2.2. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA. ACOTACIÓN.

Partimos de una red representativa de la programación de una obra, la cual hemos optimizado, es decir su **coste total es mínimo**.



DIAGRAGRAMA DE GANTT EQUIVALENTE DE LA RED ANTERIOR



Siendo:

i – Índice representativo de los recursos en estudio. Si se estudian q recursos, i = 1, 2, 3,…, q.

j – Índice representativo de las actividades que componen el proyecto. Si hay m actividades, j = 1, 2, 3,…, m.

k – Índice representativo de las unidades de tiempo en que está dividido el proyecto. Si la duración del proyecto es T_E , K = 1, 2, 3,…, T_E.

$\mathbf{A_j}$ – Actividades necesarias para ejecutar el proyecto.

$\mathbf{D_j}$ – Duración de la actividad j-ésima.

$\mathbf{T_k}$ – Unidades de tiempo en que está dividido el proyecto.

$\mathbf{C_{ij}}$ – Demanda del recurso i-ésimo para la actividad j-ésima.

$\mathbf{X_{jk}}$ – Variable bivalente, objeto de análisis.

El problema se plantea a partir de la siguiente pregunta:

¿Qué cantidad de recursos de cada tipo, asignaremos diariamente a cada actividad, de manera que la distribución de recursos de cada tipo, diariamente sea constante?

La matriz solución adoptará la siguiente estructura:

ESTRUCTURA DE LA MATRIZ SOLUCIÓN

Actividad A_j $j=1, 2, 3,\ldots,m$	CALENDARIO (T_k) $k=1, 2, 3,\ldots, T_E$			
A_1	$X_{11}C_{11}$	$X_{12}C_{12}$	….	$X_{1TE}C_{1TE}$
A_2	$X_{21}C_{21}$	$X_{22}C_{22}$	….	$X_{2TE}C_{2TE}$
A_3	$X_{31}C_{31}$	$X_{32}C_{32}$	….	$X_{3TE}C_{3TE}$
…	….	….	….	….
…	….	….	….	….
…	….	….	….	….
A_m	$X_{m1}C_{m1}$	$X_{m2}C_{m2}$	….	$X_{mTE}C_{mTE}$

RESTRICCIONES

1. RESTRICCIÓN RELATIVA A LA BIVALENCIA DE LA VARIABLE X_{jk}.

La mencionada variable solo podrá tomar dos valores **enteros y no negativos**. Estos dos valores serán 0, en el caso que alguna o algunas actividades A_j no estén consumiendo recursos en un determinado periodo k, o 1 en caso contrario.
Es decir:

$$\mathbf{0 \leq X_{jk} \leq 1}$$

X_{jk} es número entero.

$$j = 1, 2, 3,\ldots, m$$
$$k = 1, 2, 3,\ldots,T_E$$

Ello supone la consideración de **2jk** restricciones.

La matriz asociada a esta restricción, tomando como referencia el Gantt de salida, es:

Actividad A_j j=1, 2, 3,…, m	CALENDARIO (T_k) k=1, 2, 3,…,T_E												
	T_1	T_2	T_3	…	…	…	…	…	…	…	…	…	T_E
A_1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_2	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
A_3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_E	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
….	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
A_m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

2. RESTRICCIÓN RELATIVA AL TIEMPO PROGRAMADO.

Todos los trabajos deben de ejecutarse durante los T_E periodos de tiempo. Es decir:

$$\sum_{k=1}^{T_E} \mathbf{X_{jk} = D_j}$$

$$j = 1, 2, 3,\dots, m$$

Ello supone la consideración de $\mathbf{T_E}$ restricciones.

3. RESTRICCIÓN RELATIVA A LAS DEPENDENCIAS O PRECEDENCIAS ENTRE LAS ACTIVIDADES.

Deben respetarse las relaciones de simultaneidad o dependencia entre los distintos trabajos. Es decir:

$$\sum_{p=1}^{k-1} \mathbf{X_{rp}} \geq \mathbf{D_r X_{jk}}$$

Para $\forall$ r que preceda al trabajo j, siendo r el número de dependencias de la actividad j.

$$j = 1, 2, 3,\dots, m$$
$$k = 1, 2, 3,\dots,T_E$$

Ello supone la consideración de **$(T_E$-1)R** restricciones, siendo R el número total de dependencias de todos los trabajos necesarios para ejecutar el proyecto.

4. RESTRICCIÓN RELATIVA AL FRACCIONAMIENTO DE LOS TRABAJOS.

Partiendo de la base de que todos los trabajos deben realizarse de una forma continúa.

$$\mathbf{D_j \geq D_j X_{j,k+1} + \sum_{l=k+2}^{T_E} X_{jl}}$$

$$j = 1, 2, 3, \ldots, m$$
$$k = 1, 2, 3, \ldots, T_E - 2$$

Ello supone la consideración de **$m(T_E$-2)** restricciones.

En consecuencia:

Número de variables = **mT_E**

Número total de restricciones = **$(T_E$-1) (R+m)+2mT_E**

FUNCIÓN OBJETIVO

Para obtener la función objetivo se debe minimizar la varianza de la carga total, pero como el histograma ideal es constante, con un valor equivalente a la carga media, para minimizar la varianza minimizaremos la suma de los cuadrados de las cargas. Es decir:

FUNCIÓN OBJETIVO

$$\textbf{Mín} \sum_{k=1}^{T_E} \left[\sum_{i=1}^{q} \sum_{j=1}^{m} C_{ij} X_{jk} \right]^2$$

ACOTACIÓN

El ámbito conceptual en el que se encuadra la presente tesis la podría hacer de tal magnitud, que resulta imprescindible acotarla. Tal acotación, por supuesto, resultará para unos de dimensiones satisfactorias y para otros excesiva, pero detrás de cada tipo de recurso, subyacen técnicas que, cada una de ellas, por si mismas, su desarrollo podría ser objeto de una tesis.

Por ello, la presente tesis doctoral se ha centrado en un único recurso: **RECURSOS PERSONALES**.

En consecuencia, la función objetivo anterior quedará de la siguiente forma:

FUNCIÓN OBJETIVO
PARA RECURSOS PERSONALES

$$\textbf{Mín} \sum_{k=1}^{T_E} \left[\sum_{j=1}^{m} C_j X_{jk} \right]^2$$

En consecuencia el problema de nivelación de recursos puede resolverse mediante un **modelo de Programación Matemática (Programación Entera)**, en el cual la solución óptima debe minimizar la función objetivo cumpliendo unas determinadas restricciones.

Si bien es la única técnica exacta para resolver problemas de nivelación, en la práctica resulta casi imposible su aplicación, planteando un gran problema debido a que se generan modelos de grandes dimensiones, inabordables en obras de tamaño medio o grande, a pesar de la capacidad de los computadores actuales, debiéndose recurrir a Métodos Heurísticos que no siempre nos proporcionan una solución óptima.

La resolución de este problema es uno de los principales motivos, como se ha indicado en el preámbulo, que me han motivado a realizar mi tesis doctoral en este campo.

El modelo de Programación Matemática anterior, puede aplicarse para la resolución de problemas de asignación de recursos, añadiendo una restricción

relativa a los consumos de de los mismos, de manera que no superen a los disponibles.
Por lo que respecta a la función objetivo debe minimizar la duración del proyecto.
No se entra más en el tema de asignación de recursos que, aunque íntimamente ligado con la nivelación, no es objeto de esta tesis.

2.3. OBJETIVOS.

Los objetivos que se persiguen con el presente trabajo de investigación son:

A) OBJETIVO GENERAL.

ESTABLECER el proceso para el diseño óptimo de una red de programación de obras de edificación, como consecuencia de una nivelación y distribución previa de recursos personales constante.

B) OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

-DESARROLLAR un algoritmo heurístico que nos permita nivelar los recursos personales intervinientes en una obra de edificación de una forma ideal u óptima.

-MODELIZAR el algoritmo.

-PROCESAR el algoritmo.

-RESOLVER los casos singulares de nivelación.

-OBTENER la red ideal u óptima de la programación a partir de la nivelación de recursos ideal u óptima.

CAPÍTULO 3
METODOLOGÍA

3.1. PROCESO METODOLÓGICO.

De acuerdo a los objetivos expuestos en el apartado anterior, he adoptado como metodología en el desarrollo de este trabajo la consistente en el estudio de un modelo teórico, básico y general de nivelación de recursos que, tomando como base un análisis bibliográfico previo, unas hipótesis de partida y determinados fundamentos matemáticos, desemboque en un algoritmo heurístico de nivelación de recursos ideal u óptimo.
Posteriormente, con el algoritmo generado, procedo al análisis de los casos singulares que se plantean, siguiendo con la validación del algoritmo a través de diversas aplicaciones, tanto del modelo general como de los casos singulares, para finalizar con su modelización, procesado y diseño de la red óptima, objetivo último de esta tesis doctoral.

En primer lugar, considero necesaria una revisión bibliográfica de los trabajos y estudios relativos a la asignación de recursos y nivelación de los mismos, que ha de exigir, dada la complejidad de la documentación en este campo, la concreción de un método en consonancia con la finalidad de este trabajo.
La aplicación de este método, para la revisión bibliográfica, que se describe en el siguiente apartado, ha supuesto una selección de los resultados descritos en la bibliografía consultada, selección que ha venido determinada fundamentalmente por dos factores; por una parte, por las exigencias derivadas de los objetivos y, por otra, por las conclusiones, unas veces satisfactorias y otras no tanto, que iba obteniendo conforme este trabajo de investigación avanzaba. Por ello las referencias bibliográficas que aparecen en el capítulo 6 son solo aquellas que se han consultado y considerado necesarias para llevar esta investigación a buen término.

En segundo lugar, establezco las hipótesis que servirán de punto de partida y los fundamentos matemáticos de apoyo.

En tercer lugar procedo a la generación del algoritmo, al estudio de los casos singulares que se plantean, a su validación, mediante aplicaciones, y a su modelización y procesado.

Termino con el diseño de la red ideal u óptima y con una aplicación general a la edificación.

3.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Cuando decidí el campo cognoscitivo en que iba a encuadrarse mi Tesis Doctoral, inicié la búsqueda de la información existente sobre la materia, desde la más general hasta la más especializada, a recopilar antecedentes, a revisar el conocimiento existente, a “apropiármelo” y a realizar una crítica constructiva que me ha sido de gran utilidad al poder detectar los puntos débiles de determinados procesos y técnicas.

Comencé por la información más general, la cual no me aportó grandes conocimientos puesto que dispongo de una cierta formación teórica y experiencia práctica sobre el tema.
Lo más útil de esta primera revisión, a efectos bibliográficos, ha sido que me ha permitido concretar la búsqueda de los elementos fundamentales.

En un segundo paso, procedí a ubicar las principales publicaciones sobre el tema, utilizando palabras clave relacionadas con el mismo, con lo cual conseguí que mi primera relación bibliográfica se redujera considerablemente y su concreción fuera mayor.

Por último y con el fin de no terminar con mi salud mental deteriorada, procedí a una depuración total del material bibliográfico a manejar, dejándome sobre la mesa únicamente el que iba a ser de consulta diaria. Por este motivo, tal como he indicado en el apartado anterior, las referencias bibliográficas del capítulo 6, son sólo aquellas que se han consultado y considerado necesarias para llevar esta Tesis Doctoral a buen término, correspondiendo las citas a pie de página a publicaciones y textos consultados esporádicamente.

Durante todo el proceso de revisión bibliográfica no han faltado las constantes consultas a colegas, la mayoría de ellos expertos y estudiosos de la problemática planteada en esta investigación.

Llegado este momento pude establecer dos conclusiones:

1ª.- Que, si bien el tema de asignación y nivelación de recursos ha sido tratado en numerosos trabajos de investigación, el elegido para mi Tesis Doctoral no había sido estudiado por otro investigador, al no haber encontrado referencias al mismo en la extensa bibliografía consultada.

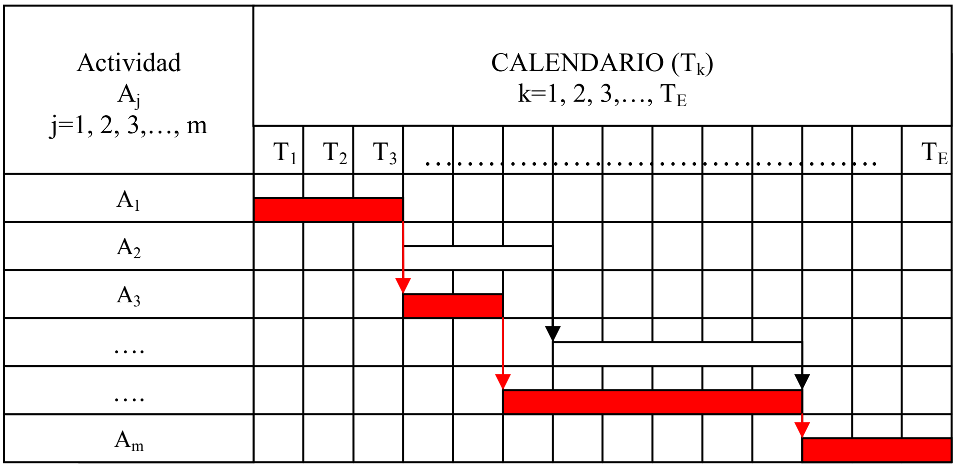
2ª.- El total convencimiento de la utilidad práctica que mi aportación podría tener en el campo de la nivelación de recursos personales en el sector de la edificación, al no existir investigaciones en la línea marcada en mi Tesis Doctoral.

3.3. HIPÓTESIS DE PARTIDA.

En el apartado “2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ACOTACIÓN.”, se ha visto que la solución exacta al problema planteado, pasaba por un modelo de Programación Matemática (Programación Entera), en el cual se minimizaba una función objetivo con sujeción a ciertas restricciones.

Este método de resolución, inviable en la práctica por el número de variables y sobre todo de restricciones, se sustituye por algoritmos heurísticos que no aportan la solución exacta pero si aproximada.

Como quiera que uno de los objetivos específicos de esta Tesis Doctoral es el desarrollo de un algoritmo que nos proporcione la solución ideal u óptima a la nivelación de recursos personales en edificación, las restricciones indicadas pasan a ser la cimentación de apoyo de la investigación y marcan el camino que he decidido seguir para la solución del problema, por lo que tales restricciones pasan a ser hipótesis de partida, que voy a analizar seguidamente, tomando como referencia el mismo diagrama de Gantt utilizado en el apartado 2.2..



Siendo:

j – Índice representativo de las actividades que componen el proyecto. Si hay m actividades, j = 1, 2, 3,…, m.

k – Índice representativo de las unidades de tiempo en que está dividido el proyecto. Si la duración del proyecto es T_E , K = 1, 2, 3,…, T_E .

$\mathbf{A_j}$ – Actividades necesarias para ejecutar el proyecto.

$\mathbf{D_j}$ – Duración de la actividad j-ésima.

$\mathbf{T_k}$ – Unidades de tiempo en que está dividido el proyecto.

$\mathbf{C_{ij}}$ – Demanda del recurso de mano de obra para la actividad j-ésima.

$\mathbf{X_{jk}}$ – Variable bivalente, objeto de análisis.

HIPÓTESISIS I.

Dentro de un diagrama de Gantt, representativo de la programación de una obra nos podemos encontrar con que una determinada casilla esté o no ocupada. Ello nos indica que un determinado trabajo se ejecuta o no ese día, por lo que la variable X_{jk} toma el valor 0 si no se ejecuta ese día o 1 si se ejecuta ese día.

En consecuencia:

$$\mathbf{0 \le X_{jk} \le 1}$$

X_{jk} es número entero.

$$j = 1, 2, 3, \ldots, m$$
$$k = 1, 2, 3, \ldots, T_E$$

HIPÓTESIS II.

Todas las actividades o trabajos necesarios para ejecutar la obra se realizan dentro del tiempo programado para la finalización de la misma, T_E.

En consecuencia:

$$\sum_{k=1}^{T_E} \mathbf{X_{jk} = D_j}$$

$$j = 1, 2, 3, \ldots, m$$
$$k = 1, 2, 3, \ldots, T_E$$

HIPÓTESIS III.

Ningún trabajo necesario para ejecutar la obra se inicia sin que hayan finalizado los precedentes, de acuerdo con la programación del proyecto, es decir, se mantienen sus relaciones de simultaneidad o de dependencia.

En consecuencia:

$$\sum_{p=1}^{k-1} \mathbf{X_{rp}} \geq \mathbf{D_r X_{jk}}$$

Para $\forall$ r que preceda al trabajo j, siendo r el número de dependencias de la actividad j.

$$j = 1, 2, 3, \ldots, m$$
$$k = 1, 2, 3, \ldots, T_E$$

HIPÓTESIS IV.

Todos los trabajos se realizan de forma continua, por lo que no se interrumpe su ejecución. En el caso que un trabajo se realice por fases, cada fase se considera como una actividad independiente.

En consecuencia:

$$\mathbf{D_j} \geq \mathbf{D_j X_{j,k+1}} + \sum_{l=k+2}^{T_E} \mathbf{X_{jl}}$$

$$j = 1, 2, 3, \ldots, m$$
$$k = 1, 2, 3, \ldots, T_E\text{-}2$$

Estas cuatro hipótesis, como he indicado, vienen derivadas de las restricciones señaladas anteriormente.

Además y sin olvidar en ningún momento que el marco de esta Tesis Doctoral es la edificación, debo hacer referencia a una quinta hipótesis que, si bien puedo considerar implícita en el contexto del planteamiento del problema, el rigor científico me obliga a una especial referencia y análisis de la misma. Me refiero a la **“homogeneidad de la mano de obra”**.
Precisamente, una de las características principales de la edificación es la **heterogeneidad** de los recursos personales intervinientes.

Teniendo en cuenta el número de capítulos, unidades de obra y oficios a considerar en una edificación, nos daremos cuenta de la heterogeneidad de los recursos personales intervinientes. Así, por lo que a capítulos y oficios intervinientes, considero los siguientes[17]:

CAPÍTULOS.

1. Actuaciones previas.
2. Acondicionamiento y Cimientos.
3. Estructuras.
4. Fachadas y particiones.
5. Instalaciones.
6. Aislamientos e impermeabilización.
7. Cubiertas.
8. Revestimientos.
9. Señalización y equipamiento.
10. Seguridad y Salud.

OFICIOS.

1. Construcción. Albañilería.
2. Carpintería.
3. Electricidad.
4. Fontanería.
5. Jardinería.
6. Telecomunicaciones.
7. Metal.
8. Pintura.
9. Vidrio.

En cada oficio, a su vez, se distinguen varias categorías. Así en el oficio de "Construcción. Albañilería", tenemos las siguientes:

1. Encargado construcción.
2. Capataz construcción.
3. Oficial 1ª construcción.
4. Oficial 2ª construcción.
5. Ayudante construcción.
6. Peón especializado construcción.
7. Peón ordinario construcción.

[17] Según Base de datos de Construcción 2007/2008 de la Comunitat Valenciana. Instituto Valenciano de la Edificación.

8. Aprendiz 3º y 4º construcción.
9. Aprendiz 1º y 2º construcción.

En el resto de oficios las categorías son prácticamente las mismas.

En consecuencia, la heterogeneidad de la mano de obra es evidente, lo que me plantea un grave problema.

¿Cómo aplicar mi modelo de nivelación ante tanta heterogeneidad?

Considerando la variable **homogénea.**

¿Cómo?

Dispongo de varias posibilidades:

1ª. Considerar, dentro de las distintas categorías de operarios que intervienen en la ejecución de una determinada unidad de obra, el rendimiento menor de entre todos ellos, a efectos del cálculo del tiempo de ejecución de esa unidad de obra.
Ello significa que el tiempo a invertir en la ejecución de cada unidad de obra será el mismo para cada categoría de operarios.

2ª. Con la finalidad del cálculo del tiempo de ejecución de una unidad de obra, definir lo que llamo un operario equivalente, con un rendimiento equivalente a la suma proporcional de los rendimientos de cada uno de ellos, tomando como base el rendimiento menor de entre todas las categorías de operarios que intervienen en la unidad de obra.

3ª. Aplicar mi modelo, por separado, a cada una de las categorías de operarios intervinientes en la unidad de obra.

Consideraciones sobre cada posibilidad:

Con respecto a la primera posibilidad y, aunque en la práctica, por cuestiones de operatividad, se considera el rendimiento menor, generalmente de los oficiales, no me resulta atractiva, puesto que, una vez nivelado el recurso, la nivelación sólo sería real para aquella categoría cuyo rendimiento fuera menor, quedando implícitamente desniveladas el resto de categorías.

Con respecto a la segunda posibilidad, el rendimiento del operario equivalente, no nos proporcionaría un rendimiento real y en consecuencia tampoco sería real la duración de la unidad de obra.
Por otra parte, una vez nivelados los operarios equivalentes habrá que deshacer el proceso con el fin de saber el número de operarios de cada categoría intervinientes.

Por ello, lo más razonable y estricto resulta acogerme a la tercera posibilidad, aunque ello suponga repetir el algoritmo de nivelación que voy a diseñar, tantas veces como categorías de operarios intervengan en la ejecución de una determinada unidad de obra.

En consecuencia:

HIPÓTESIS V.

La variable objeto de estudio es **homogénea**.

3.4. FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DE LA NIVELACIÓN DE RECURSOS.

Como se ha visto en el apartado 2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ACOTACIÓN. y en el anterior dedicado a las HIPÓTESIS DE PARTIDA, uno de los fundamentos matemáticos de apoyo, ha sido la **Programación Matemática (Programación Entera)**.

Con el fin de evaluar la variación de los recursos personales durante el tiempo programado de ejecución de la obra me he basado en la **Teoría de los Números Índices,** los cuales me proporcionan una medida estadística que me cuantifican los cambios de la variable respecto al tiempo, tomando una base de referencia.
¿Por qué los números índice?
1º. Permiten reducir sensiblemente las dimensiones del problema.
2º. Aportan una herramienta para justificar la toma de determinadas decisiones.
3º. Cuantifican relaciones.
4º. Ayudan a comprender el desarrollo del proceso resumiéndolo en un solo dato.

Para el desarrollo del algoritmo y la nivelación ideal u óptima de los recursos personales, mi base de apoyo ha sido la **Estadística Descriptiva**, en especial la **Teoría de Regresión Lineal Simple, el Método de los Mínimos**

Cuadrados y, sobre todo, la infinidad de aplicaciones que subyacen en el concepto de **Varianza.**

3.5. EL MODELO GENERAL.

El modelo general objeto de análisis adopta la siguiente estructura:

RED DE PROGRAMACIÓN DE PARTIDA DE COSTE MÍNIMO

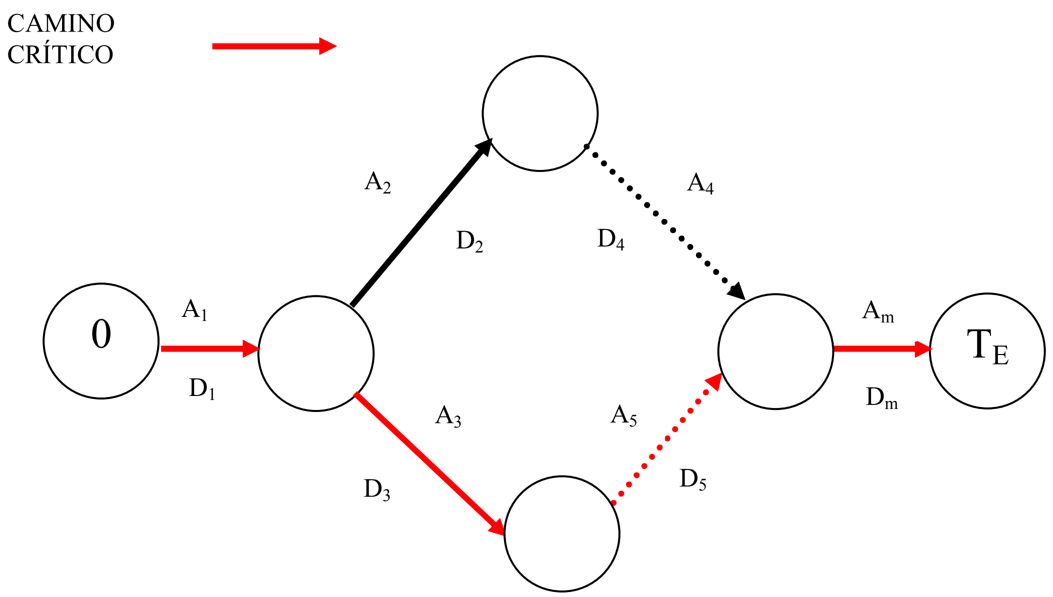
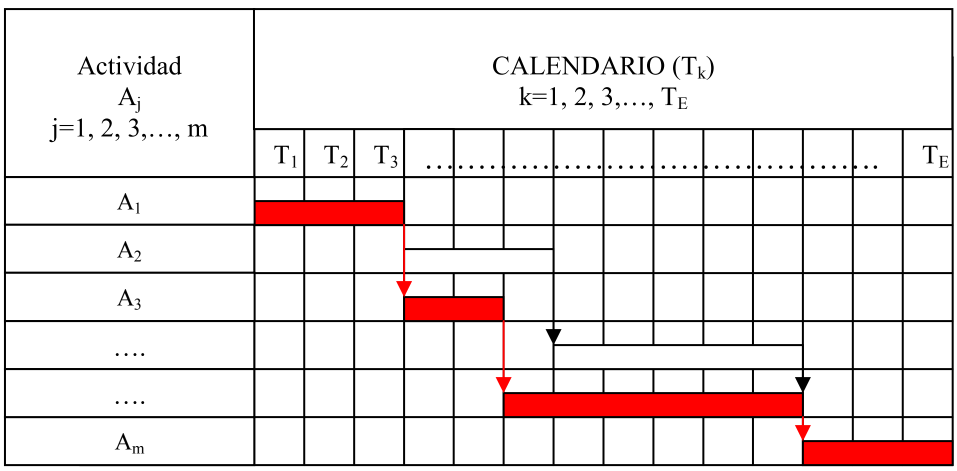


DIAGRAMA DE GANTT DE PARTIDA EQUIVALENTE A LA RED



Siendo:

i – Índice representativo de los recursos en estudio. Si estudiamos q recursos, i = 1, 2, 3,…, q.

j – Índice representativo de las actividades que componen el proyecto. Si hay m actividades, j = 1, 2, 3,…, m.

k – Índice representativo de las unidades de tiempo en que está dividido el proyecto. Si la duración del proyecto es T_E , K = 1, 2, 3,…, T_E .

$\mathbf{A_j}$ **–** Actividades necesarias para ejecutar el proyecto.

$\mathbf{D_j}$ **–** Duración de la actividad j-ésima.

$\mathbf{T_k}$ **–** Unidades de tiempo en que está dividido el proyecto.

$\mathbf{C_{ij}}$ **–** Demanda del recurso i-ésimo para la actividad j-ésima.

$\mathbf{X_{jk}}$ **–** Variable bivalente, objeto de análisis.

3.5.1. PLANTEAMIENTO.

El objetivo final es el diseño de una red de coste mínimo a partir de una nivelación de recursos personales constante.
En consecuencia un objetivo específico e intermedio es la nivelación del recurso de mano de obra.

El problema se plantea a partir de la siguiente pregunta:

¿Qué cantidad de recursos personales asignaremos, diariamente, a cada actividad, de manera que la distribución diaria total de los mismos sea constante?

3.5.2. RESOLUCIÓN.

La respuesta a la pregunta anterior pasa por hacer mínima la función objetivo, con las restricciones anteriormente expuestas.

FUNCIÓN OBJETIVO

$$\textbf{Mín} \sum_{k=1}^{T_E} \left[\sum_{j=1}^{m} C_j X_{jk} \right]^2$$

Por los motivos indicados en el apartado 2.2. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA. ACOTACIÓN., propongo, como alternativa, el aplicar un algoritmo para minimizar la función anterior. Al mencionado algoritmo lo llamaré **MÉTODO DE LOS ÍNDICES DE MANO DE OBRA (MIMO).**

3.5.3. DESARROLLO DEL ALGORITMO.

DEFINICIONES

En relación con el recurso objeto de estudio, llamo:

-Carga diaria (C_d).

A la cantidad del mismo que, diariamente, necesito para ejecutar un determinado trabajo que forma parte de un proyecto de edificación.

-Carga total (C_T).

A la cantidad total de los recursos que intervienen en la ejecución de un proyecto de edificación. Equivale a la suma de las cargas diarias.

-Carga media (C_m).

A la media aritmética entre la carga total y el número de unidades de tiempo que dura el proyecto.

-Varianza de la carga C ($\sigma_c{}^2$).

Al cuadrado de sus desviaciones con respecto a la media.

$$\sigma_c{}^2 = \tfrac{1}{T_E} \sum_{d=1}^{T_E} C_d{}^2 - C_m{}^2$$

Si la carga diaria coincide con la carga media: $C_d = C_m$ para d = 1, 2, 3,…,T_E
resulta que la varianza $\sigma_c^2 = \frac{1}{T_E}(T_E C_m^2) - C_m^2 = 0$

-Carga óptima (C_o).

Es la que corresponde a un consumo diario igual a la carga media. (Varianza de las cargas nula).

PROCESO

A. PREVIO

Partiendo de la red de programación de coste mínimo, procedo de la siguiente forma:

1. Dibujo el diagrama de Gantt con las fechas más pronto de comienzo y terminación de todas las actividades, marcando su holgura total.

2. Al calendario anterior le asigno, diariamente, los recursos de mano de obra disponibles.

3. Obtengo la carga media diaria de mano de obra (C_m), que defino como la relación existente entre la cantidad total de recursos de mano de obra necesarios para ejecutar todos los trabajos (C_R) y el tiempo total programado para ejecutarlos (T_E).

$$\boxed{C_m = C_R/T_E}$$

4. Elevo al cuadrado la carga media diaria (C_m^2) y obtengo la suma de los cuadrados de la carga media diaria $\sum C_m^2$.

5. Calculo la carga diaria (C_d), que será la suma de las cargas diarias necesarias para ejecutar todos los trabajos.

6. Elevo al cuadrado las cargas diarias (C_d^2) y obtenemos la suma de los cuadrados de las cargas diarias $\sum C_d^2$.

B. OBJETIVO

<u>Disminuir o aumentar la carga diaria hasta que sea igual a la carga diaria media, lo que implica que la diferencia de sus cuadrados será nula y, en consecuencia, su varianza.</u>

$$\sigma_c^2 = 1/T_E \sum_{d=1}^{T_E} C_d^2 - C_m^2 = 0$$

C. DESARROLLO DEL ALGORITMO

Para su desarrollo propongo la siguiente metodología.

1. Defino diariamente, es decir para cada columna, un número índice (i) que llamaremos Índice de Mano de Obra, el cual obtendré dividiendo el cuadrado de la carga media diaria entre el cuadrado de la carga diaria.

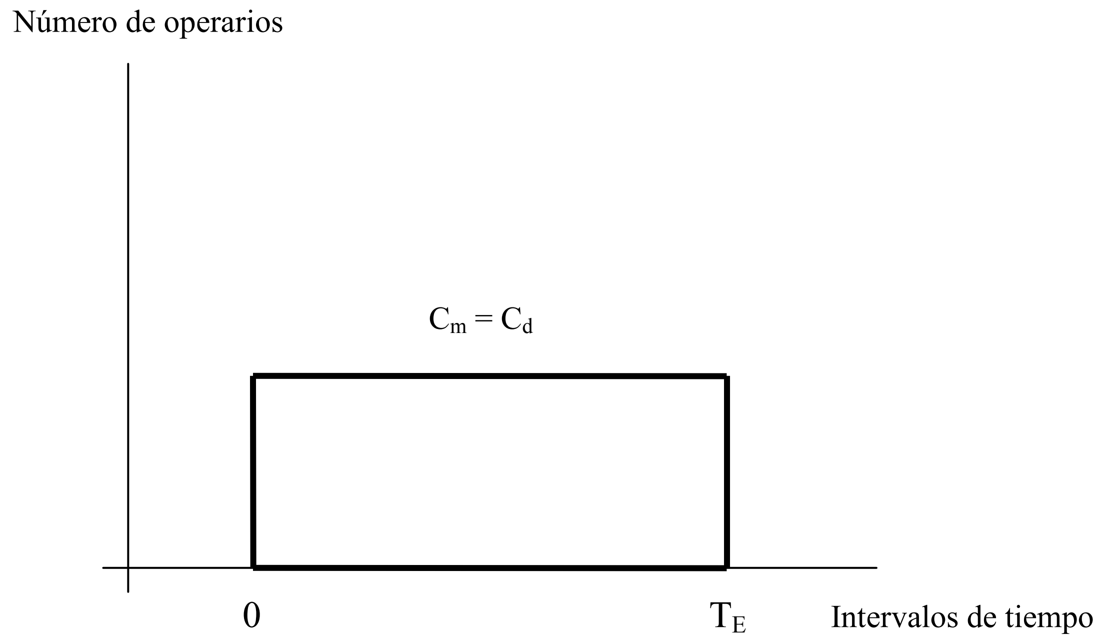
$$i = C_m^2 / C_d^2$$

2. En el gráfico de Gantt, definido anteriormente, mantendremos con sus cargas diarias las actividades críticas y aquellas columnas, es decir los días, que tengan un índice de mano de obra igual a la unidad.

3. Elijo la columna de menor número índice, cronológicamente y de izquierda a derecha, y de esa columna la actividad que tenga mayor holgura. A la casilla intersección de columna con fila le rebajaremos su carga de mano de obra hasta que la cantidad de mano de obra de esa casilla junto con el resto de cargas de mano de obra de todas las actividades, en ese día, iguale a la carga media.
La cantidad de carga de mano de obra rebajada la traspasaré al primer día de holgura total de ese trabajo cuyo número índice no sea 1.
Elegido un índice, no me moveré del mismo hasta agotarlo, es decir hasta que no podamos operar más en ese día, lo que llamo **“agotar el día”**.
Análogamente, seleccionada la actividad de mayor holgura total con que trabajar, habiéndose iniciado el proceso de trasvase de mano de obra y ante la posibilidad de elegir otra actividad con la misma holgura total, continuaré con la primitiva hasta a acabar con su holgura total, lo que llamo **“agotar holgura”.**

4. Repetiré el proceso del punto anterior con la columna de índice inmediatamente superior y así sucesivamente, día a día hasta que todos los índices sean igual a 1, realizando cuantos barridos del calendario o iteraciones sean necesarias, con lo cual habré llegado a la nivelación ideal.

El histograma resultante es el siguiente:



CONCLUSIONES

1º. **LOS NÚMEROS ÍNDICE DE TODOS LOS DIAS DEL CALENDARIO SON 1.**

2º. LA DIFERENCIA DE LOS CUADRADOS DE LA CARGA DIARIA Y MEDIA ES NULA Y EN CONSECUENCIA SU VARIANZA.

3º. LA CARGA DIARIA DE MANO DE OBRA ES CONSTANTE Y, CONSECUENTEMENTE, EL HISTOGRAMA DE CARGA TOTAL DIARIA DE MANO DE OBRA.

3.5.4. PROGRAMACIÓN IDEAL.

Una vez realizada la nivelación ideal, procederé a la obtención de la programación ideal, objetivo de esta Tesis Doctoral.

Parto de la nivelación ideal y analizo las variaciones que tal nivelación ha provocado en el diagrama de Gantt de partida. Estas variaciones pueden ser en las duraciones de las actividades, en las holguras y en las relaciones de dependencia o precedencia.

Las variaciones en las duraciones de las actividades no afectarán a la duración final del proyecto, ya que cualquier incremento en la duración de una actividad está dentro de la holgura total de la misma.

Por lo que respecta a las holguras, las variaciones en las mismas, no afectarán a la duración de la programación inicial, puesto que no se supera, en ningún caso, la holgura total de la actividad.

Y, por último, las posibles modificaciones en las relaciones de dependencia o precedencia que puedan aparecer son compatibles con las iniciales que hemos obligado a mantener.

Por lo que respecta al camino o caminos críticos iniciales no sufrirán variación alguna, aunque pueden aparecer nuevos caminos críticos.

En consecuencia, introduciendo las variaciones indicadas en la red de programación primitiva obtendremos:

LA PROGRAMACIÓN IDEAL DE LA OBRA, QUE SERÁ ÓPTIMA EN CUANTO A SU COSTE TOTAL SE REFIERE, AL NO VARIAR EL COSTE DE MANO DE OBRA NO CAMBIA EL COSTE DIRECTO Y EL COSTE TOTAL DE LA OBRA SE MANTIENE EN EL MÍNIMO, PUESTO QUE HE PARTIDO DE LA RED DE COSTE MÍNIMO, NO VARIANDO EL TIEMPO INICIAL PROGRAMADO PARA LA EJECUCIÓN DE LA OBRA.

3.5.5. APLICACIÓN 1.

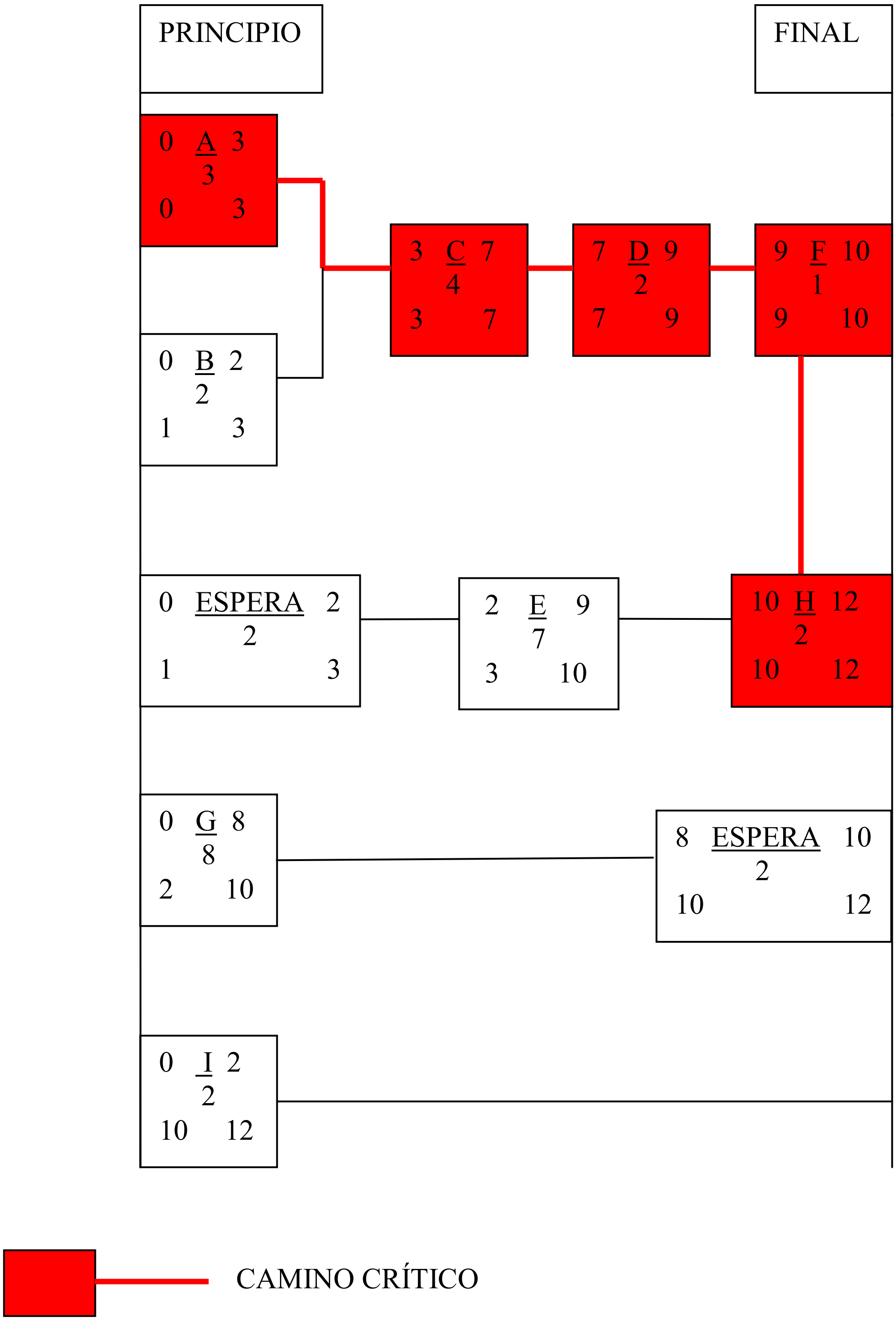
CASO A

Partiendo de la red siguiente, cuyo coste total es mínimo, obtenida a partir de las duraciones y relaciones de precedencias que se indican, voy a obtener la programación óptima de la obra para una nivelación de recursos de mano de obra constante, siendo el número de operarios disponibles para ejecutar cada actividad el siguiente:

Actividad	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Nº de operarios	10	5	5	5	5	5	5	5	10

ACTIVIDAD	DURACIÓN (Días)	RELACIONES DE PRECEDENCIA
A	3	Actividad inicial.
B	2	Actividad inicial.
C	4	Comienza terminadas A y B.
D	2	Comienza terminada C.
E	7	Comienza 2 días después de iniciarse los trabajos.
F	1	Comienza terminada D.
G	8	Actividad inicial y deben de transcurrir al menos 2 días, desde su terminación, para que finalicen todos los trabajos.
H	2	Comienza terminadas F y E.
I	2	Actividad inicial.

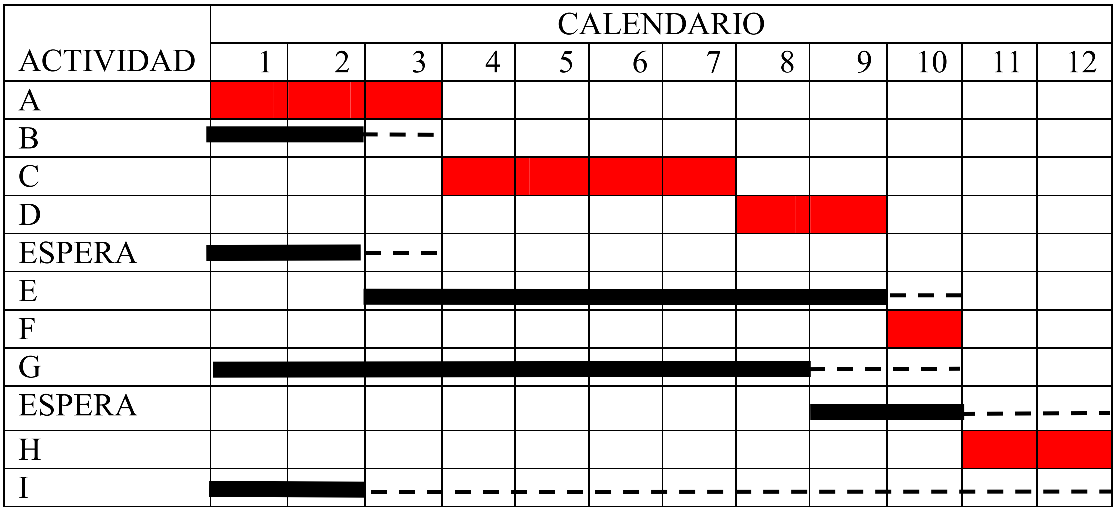
1. RED DE PARTIDA



Actividad	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Holgura total	0	1	0	0	1	0	2	0	10
Holgura libre	0	1	0	0	1	0	0	0	10

2. DIAGRAMA DE GANTT

Fechas más pronto de comienzo
Fechas más pronto de terminación
Holguras totales



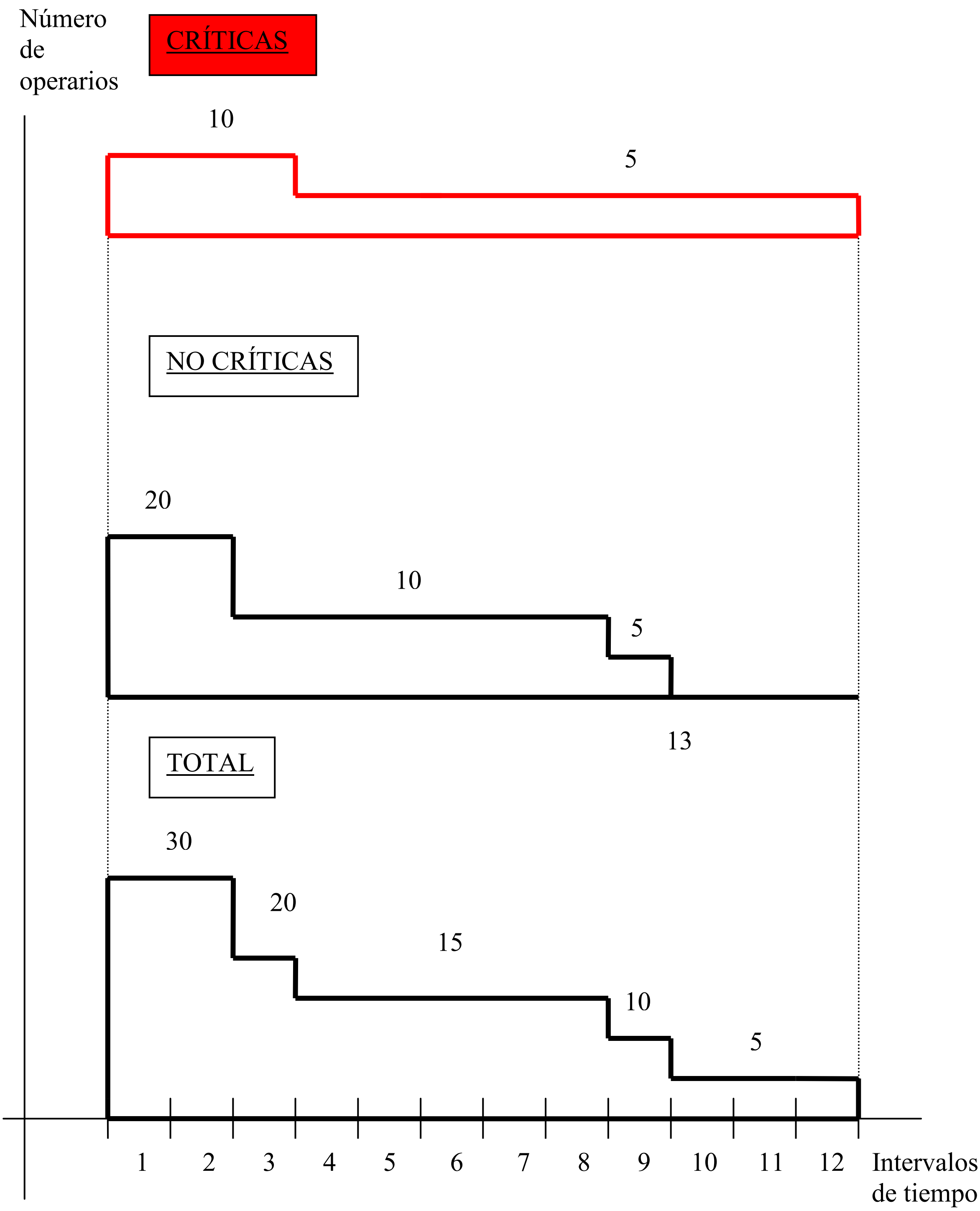
HOLGURA TOTAL - - - - - - - - -

3. DIAGRAMA DE GANTT DE DISTRIBUCIÓN DE RECURSOS

Carga diaria de mano de obra de las actividades críticas (C_d^c)
Carga diaria de mano de obra de las actividades no críticas (C_d^{nc})
Carga diaria total de mano de obra (C_d)

ACTIVIDAD	CALENDARIO												$\sum$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			5	5	5	5	5	5	5	--			35
F										5			5
G	5	5	5	5	5	5	5	5	--	--			40
H											5	5	10
I	10	10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	20
C_d^c	10	10	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	75
C_d^{nc}	20	20	10	10	10	10	10	10	5	0	0	0	105
C_d	30	30	20	15	15	15	15	15	10	5	5	5	**180**

4. HISTOGRAMAS DE CARGA



5. CÁLCULOS PREVIOS

a) Carga media diaria de mano de obra (C_m).

$$C_m = C_R/T_E$$

Siendo:

C_R la cantidad total de recursos de mano de obra necesarios para ejecutar todos los trabajos. En el presente caso, 180 operarios.
T_E el tiempo total programado para ejecutar todos los trabajos. En este supuesto, 12 días.

En consecuencia:

$$C_m = C_R/T_E = 180 \text{ operarios}/12 \text{ días} = 15 \text{ operarios/día}$$

b) Suma de los cuadrados de la carga media diaria ($\sum C_m^2$).

$$\sum C_m^2 = 12 \times 15^2 = 2700$$

c) Carga diaria (C_d) y suma de los cuadrados de las cargas diarias ($\sum C_d^2$), que se indican en la siguiente tabla.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			5	5	5	5	5	5	5	--			35
F										5			5
G	5	5	5	5	5	5	5	5	--	--			40
H											5	5	10
I	10	10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	20
C_d	30	30	20	15	15	15	15	15	10	5	5	5	**180**
C_d^2	900	900	400	225	225	225	225	225	100	25	25	25	**3500**
C_m	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
C_m^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**

6. OBJETIVO

Pretendo, partiendo de la situación actual, con la distribución de recursos indicada en la tabla y en los histogramas de cargas anteriores, **disminuir o aumentar la carga diaria hasta que sea igual a la carga diaria media, lo que implica que la diferencia de sus cuadrados será nula y, en consecuencia, su varianza**, obteniendo una nivelación de recursos de mano de obra **ideal**, al ser su histograma uniforme.

7. APLICACIÓN DEL ALGORITMO **MIMO**

a) Defino el índice diario de mano de obra.

$$i = C_m^2 / C_d^2$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			5	5	5	5	5	5	5	--			35
F										5			5
G	5	5	5	5	5	5	5	5	--	--			40
H											5	5	10
I	10	10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	20
C_d	30	30	20	15	15	15	15	15	10	5	5	5	**180**
C_d^2	900	900	400	225	225	225	225	225	100	25	25	25	**3500**
C_m	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
C_m^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
i	0,25	0,25	0,56	1	1	1	1	1	2,25	9	9	9	

b) Manteniendo las cargas diarias de las actividades críticas y columnas de número índice igual a la unidad, cronológicamente y de izquierda a derecha, elijo la columna de menor número índice y de esa columna la actividad que tenga mayor holgura.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			5	5	5	5	5	5	5	--			35
F										5			5
G	5	5	5	5	5	5	5	5	--	--			40
H											5	5	10
I	10	10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	20
i	0,25	0,25	0,56	1	1	1	1	1	2,25	9	9	9	

En este caso corresponde a la fila de la actividad I y columna del día 1.

c) La mencionada columna dispone de una carga diaria de 30 operarios, siendo la media de 15 operarios, por lo que disminuiremos la carga diaria en 15 operarios.
Para ello elimino los 10 operarios del trabajo I, que traspaso al primer día de holgura de ese trabajo, es decir al día 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			5	5	5	5	5	5	5	--			35
F										5			5
G	5	5	5	5	5	5	5	5	--	--			40
H											5	5	10
I	0	10	10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	20
C_d	20	30	30	15	15	15	15	15	10	5	5	5	**180**

Con esta operación he reducido la carga diaria del día 1 a 20 operarios, por lo que aún le sobran 5 operarios para que se iguale a la carga media.
Con el fin de conseguir esa igualdad, manteniendo la misma columna, la de menor número índice inicial, busco su intersección con la siguiente actividad de mayor holgura, que es la G.

Aunque, después de traspasar los 10 operarios, el índice del día 1 cambiará (0,56), sigo considerando el índice inicial (0,25) de la columna elegida en un principio hasta igualar la carga diaria a la media o hasta que no se pueda seguir operando con la columna elegida, a lo que llamo **“agotar el día”.**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			5	5	5	5	5	5	5	--			35
F										5			5
G	5	5	5	5	5	5	5	5	--	--			40
H											5	5	10
I	0	10	10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	20
i	0,25	0,25	0,56	1	1	1	1	1	2,25	9	9	9	

La casilla intersección está cargada con 5 operarios que traspaso a su primer día de holgura, con lo cual la carga de mano de obra del día 1 será de 15 operarios e igual a la carga media.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			5	5	5	5	5	5	5	--			35
F										5			5
G	0	5	5	5	5	5	5	5	5	--			40
H											5	5	10
I	0	10	10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	20
C_d	15	30	30	15	15	15	15	15	15	5	5	5	**180**

A consecuencia de la operación anterior, los índices de algunas columnas varían, como es el caso de las columnas 1, 3 y 9, siendo la distribución del Gantt de recursos, después de esta primera operación, la siguiente:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			5	5	5	5	5	5	5	--			35
F										5			5
G	0	5	5	5	5	5	5	5	5	--			40
H											5	5	10
I	0	10	10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	20
C_d	15	30	30	15	15	15	15	15	15	5	5	5	**180**
C_d^2	225	900	900	225	225	225	225	225	225	25	25	25	**3450**
C_m	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
C_m^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
i	1	0,25	0,25	1	1	1	1	1	1	9	9	9	

d) A partir de la nueva distribución de los recursos de mano de obra, procedo de forma análoga a lo indicado anteriormente.

Manteniendo las cargas diarias de las actividades críticas y columnas de número índice igual a la unidad, cronológicamente y de izquierda a derecha, elijo la columna de menor número índice y de esa columna la actividad que tenga mayor holgura, es decir la columna correspondiente al día 2 (menor índice) y la fila correspondiente a la actividad I (mayor holgura).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			5	5	5	5	5	5	5	--			35
F										5			5
G	0	5	5	5	5	5	5	5	5	--			40
H											5	5	10
I	0	10	10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	20
i	1	0,25	0,25	1	1	1	1	1	1	9	9	9	

La casilla intersección está cargada con 10 operarios que traspaso a su primer día de holgura, con lo cual la carga de mano de obra del día 2 será de 20 operarios.

Observo que su primer día de holgura, al efecto de traspasar carga, será el 10, ya que los anteriores los respeto por tener un índice de 1.
Manteniendo la columna de menor índice busco la intersección con la actividad de mayor holgura. En nuestro caso existen dos posibilidades; la actividad B y la actividad G. Elijo ésta última puesto que agota su holgura, lo que llamo **"agotar holgura"**, aunque podría haber seleccionado la B, trasvasando los 5 operarios a su primer día de holgura que es el día 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			5	5	5	5	5	5	5	--			35
F										5			5
G	0	5	5	5	5	5	5	5	5	--			40
H											5	5	10
I	0	0	10	--	--	--	--	--	--	10	--	--	20
i	1	0,25	0,25	1	1	1	1	1	1	9	9	9	

En consecuencia la nueva distribución de recursos de mano de obra y sus números índices quedarán como sigue:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			5	5	5	5	5	5	5	--			35
F										5			5
G	0	0	5	5	5	5	5	5	5	5			40
H											5	5	10
I	0	0	10	--	--	--	--	--	--	10	--	--	20
C_d	15	15	30	15	15	15	15	15	15	20	5	5	**180**
C_d^2	225	225	900	225	225	225	225	225	225	400	25	25	**3150**
C_m	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
C_m^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
i	1	1	0,25	1	1	1	1	1	1	0,56	9	9	

A partir de este momento se debe tener en cuenta que la actividad G pasa a ser crítica.

e) Agotado el día 2, paso a la columna de menor índice que es la 3 y busco su intersección con la actividad de mayor holgura, que corresponde a la I.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			5	5	5	5	5	5	5	--			35
F										5			5
G	0	0	5	5	5	5	5	5	5	5			40
H											5	5	10
I	0	0	10	--	--	--	--	--	--	10	--	--	20
i	1	1	0,25	1	1	1	1	1	1	0,56	9	9	

Los 10 operarios de su casilla intersección los traspaso al primer día de holgura que sea posible, es decir al 11, puesto que las casillas anteriores, con holgura, tienen un índice de 1.
Análogamente y, agotando el día, procedo con la casilla intersección de la columna 3 con la fila correspondiente a la actividad E, traspasando los 5 operarios a su primer día de holgura, es decir al 10.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			5	5	5	5	5	5	5	--			35
F										5			5
G	0	0	5	5	5	5	5	5	5	5			40
H											5	5	10
I	0	0	10	--	--	--	--	--	--	10	--	--	20
i	1	1	0,25	1	1	1	1	1	1	0,56	9	9	

Con lo cual la nueva tabla de distribución de recursos de mano de obra y sus nuevos números índice será:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			0	5	5	5	5	5	5	5			35
F										5			5
G	0	0	5	5	5	5	5	5	5	5			40
H											5	5	10
I	0	0	0	--	--	--	--	--	--	10	10	--	20
C_d	15	15	15	15	15	15	15	15	15	25	15	5	**180**
C_d^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	625	225	25	**2900**
C_m	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
C_m^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,36	1	9	

Observo que pasa a crítica la actividad E.

f) Agotado el día 3, repito el proceso con la columna de menor índice, que corresponde a la columna 10 (0,36), cuya intersección con la actividad de mayor holgura, la I, me configura la casilla cargada con 10 operarios, que traslado al primer día de holgura, es decir al 12, con lo cual agoto su holgura. En consecuencia:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			0	5	5	5	5	5	5	5			35
F										5			5
G	0	0	5	5	5	5	5	5	5	5			40
H											5	5	10
I	0	0	0	--	--	--	--	--	--	10	10	--	20
i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,36	1	9	

Por lo tanto la nueva distribución de recursos de mano de obra y sus nuevos índices es la siguiente:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E			0	5	5	5	5	5	5	5			35
F										5			5
G	0	0	5	5	5	5	5	5	5	5			40
H											5	5	10
I	0	0	0	--	--	--	--	--	--	0	10	10	20
C_d	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
C_d^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
C_m	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
C_m^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Pasa a crítica la actividad I.

En consecuencia he finalizado el proceso, al ser 1 todos los números índice, lo que supone que la carga diaria de mano de obra es igual a la media.

En el supuesto de que no hubiera sido así, realizaría otra iteración con el mismo razonamiento.

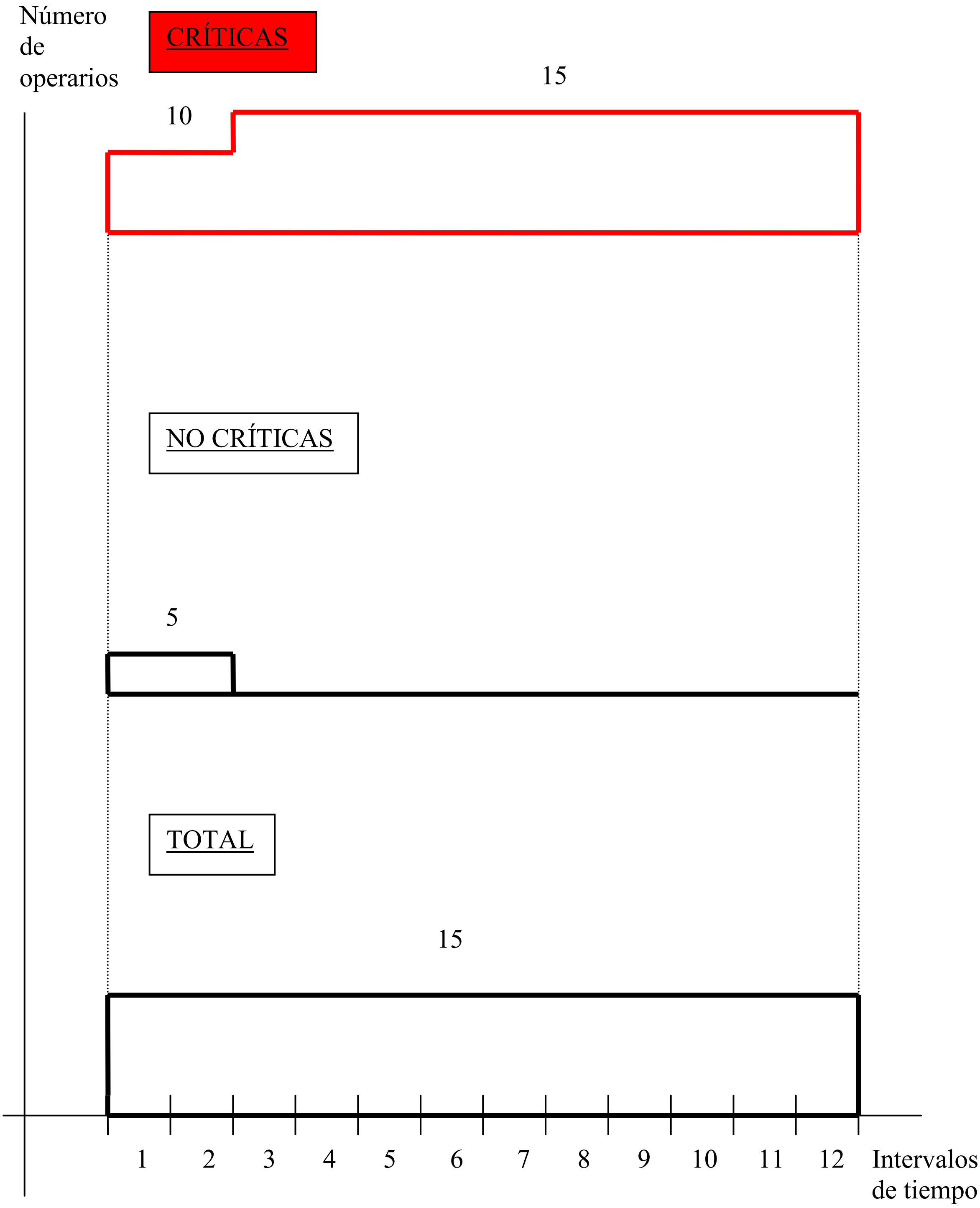
Distribución de los recursos de mano de obra, nivelados, en función del tipo de actividades:

ACTIVIDAD	CALENDARIO												$\sum$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
A	10	10	10										30
B	5	5	--										10
C				5	5	5	5						20
D								5	5				10
E (*)				5	5	5	5	5	5	5			35
F										5			5
G (*)			5	5	5	5	5	5	5	5			40
H											5	5	10
I (*)											10	10	20
C_d^c	10	10	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	170
C_d^{nc}	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
C_d	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**

(*) Han consumido su holgura y consecuentemente han pasado a críticas.

Por lo que los histogramas de carga de mano de obra, son los siguientes:

HISTOGRAMAS DE CARGA



En consecuencia he llegado, en un primer barrido del calendario o primera iteración, a la **NIVELACIÓN IDEAL DEL RECURSO DE MANO DE OBRA**, puesto que:

1º. **LOS NÚMEROS ÍNDICE DE TODOS LOS DIAS DEL CALENDARIO SON 1.**

2º. LA DIFERENCIA DE LOS CUADRADOS DE LA CARGA DIARIA Y MEDIA ES NULA Y EN CONSECUENCIA SU VARIANZA.

3º. LA CARGA DIARIA DE MANO DE OBRA ES CONSTANTE Y, CONSECUENTEMENTE, EL HISTOGRAMA DE CARGA TOTAL DIARIA DE MANO DE OBRA.

8. NUEVA RED DERIVADA DE LA NIVELACIÓN

No hay que olvidar que el objetivo final es el diseño óptimo de una red a partir de una nivelación de recursos personales constante.

La nivelación de recursos de mano de obra puede modificar la duración de las actividades y en consecuencia sus holguras así como las relaciones de precedencias entre los distintos trabajos.

En este caso y por lo que se refiere a las duraciones de las actividades, no se produce modificación alguna, pero sí en alguna relación de precedencia y en las holguras, que analizo seguidamente.

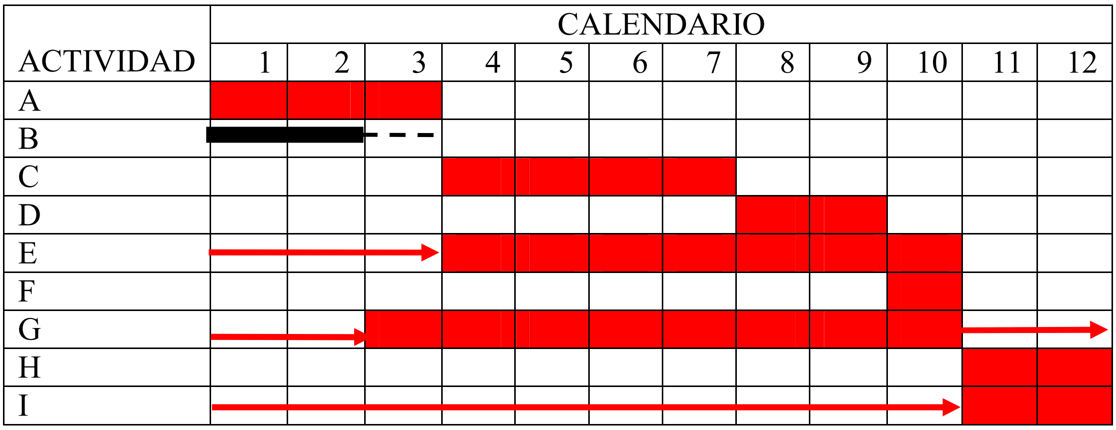
a) Relaciones de precedencia.
En la red inicial, la **actividad E** tenía el condicionante de comenzar 2 días después de iniciarse los trabajos. Este condicionante, en la nueva red, pasará a ser de 3 días o bien comenzará simultáneamente con C una vez terminada A.
La **actividad G**, era actividad inicial, ahora comenzará 2 días después de iniciarse los trabajos.
La **actividad I**, también era inicial, ahora pasará a comenzar 10 días después de iniciarse los trabajos o cuando termine la E, F y G o se ejecute simultáneamente con la H.
Si bien las relaciones de precedencia han sido modificadas, todas las modificaciones son compatibles con las primitivas al no haber superado, en ningún caso, las holguras de las actividades.

b) En relación con las holguras.
Por lo que a las holguras se refiere, pasan a ser todas nulas, a excepción de la actividad B que mantiene el día de holgura total y libre, pasando a ser críticas las actividades E, G e I.

Actividad	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Holgura total	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Holgura libre	0	1	0	0	0	0	0	0	0

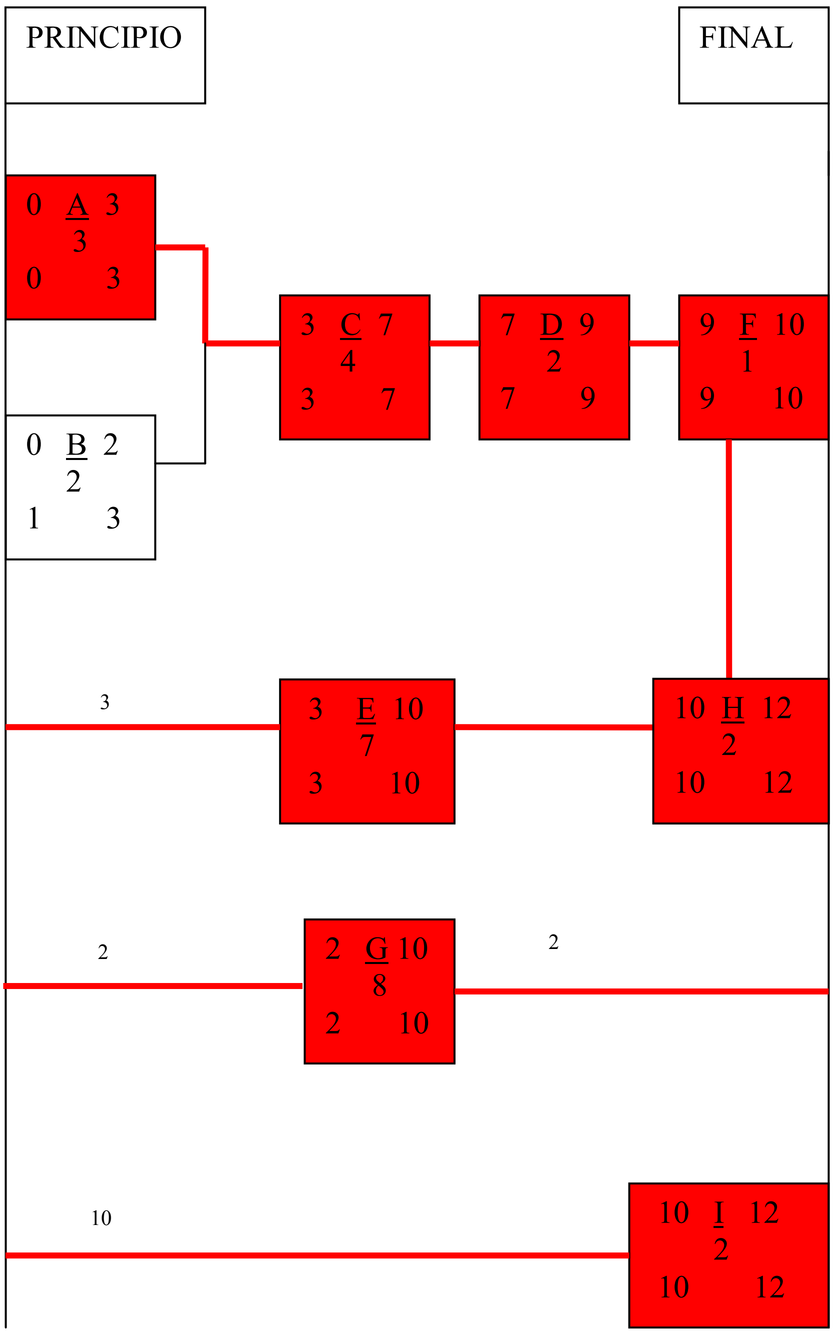
En consecuencia el diagrama de Gantt correspondiente a la red óptima, con una nivelación de recursos de mano de obra constante o ideal, es el siguiente.

DIAGRAMA DE GANTT CORRESPONDIENTE A LA RED ÓPTIMA



Introduciendo las variaciones indicadas, tanto de holguras como de relaciones de precedencias, obtengo la red óptima con una nivelación de recursos de mano de obra constante o ideal.

RED DE PRECEDENCIAS ÓPTIMA PARA UNA NIVELACIÓN DE RECURSOS DE MANO DE OBRA CONSTANTE O IDEAL



CONCLUSIONES

1º. NO VARIA LA DURACIÓN DEL PROYECTO Y EN CONSECUENCIA SU PROGRAMACIÓN INICIAL.

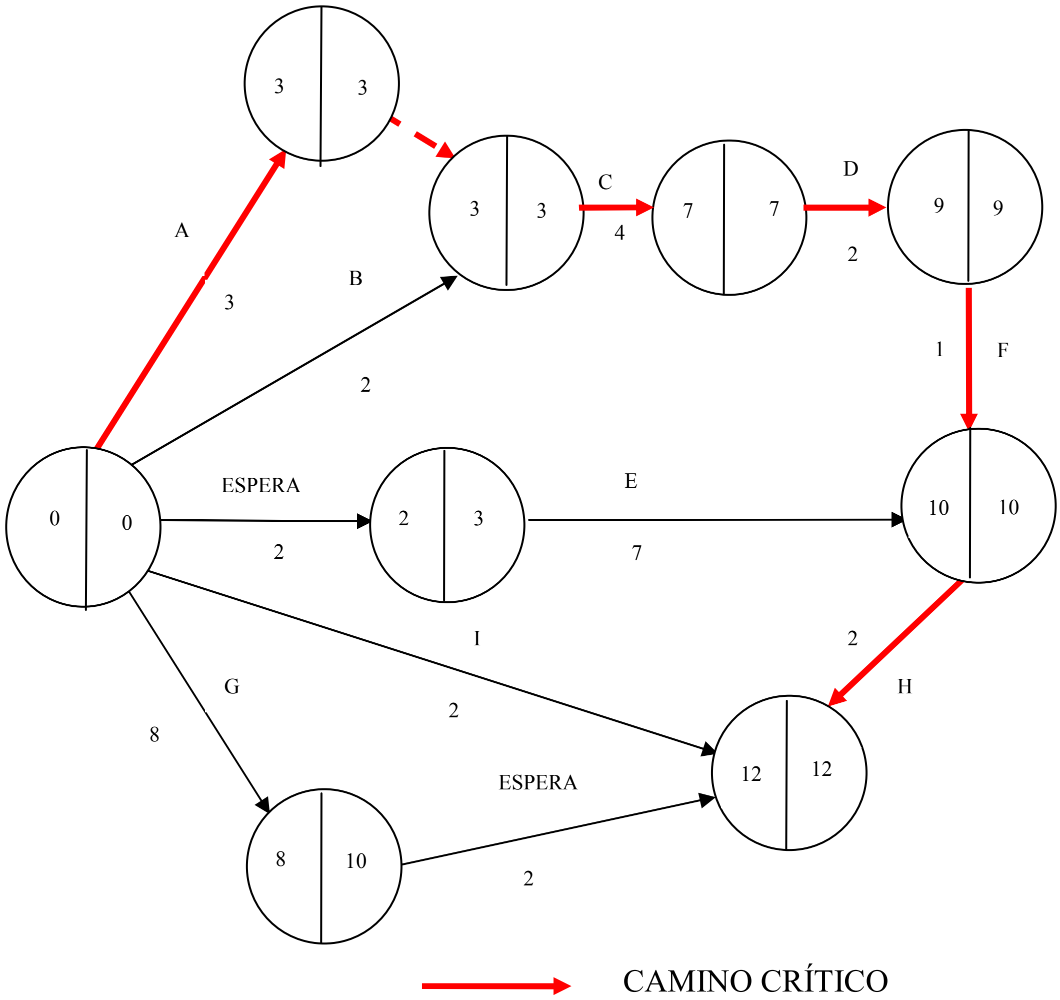
2º. AL NO VARIAR EL COSTE DE MANO DE OBRA NO CAMBIA EL COSTE DIRECTO Y EL COSTE TOTAL DE LA OBRA ES EL MÍNIMO, PUESTO QUE HE PARTIDO DE LA RED DE COSTE MÍNIMO.

<u>CASO B</u>

Tomando como base el mismo caso anterior, voy a resolverlo utilizando una red de flechas y con los siguientes recursos disponibles:

Actividad	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Nº de operarios	5	10	7	8	4	11	4	7	8

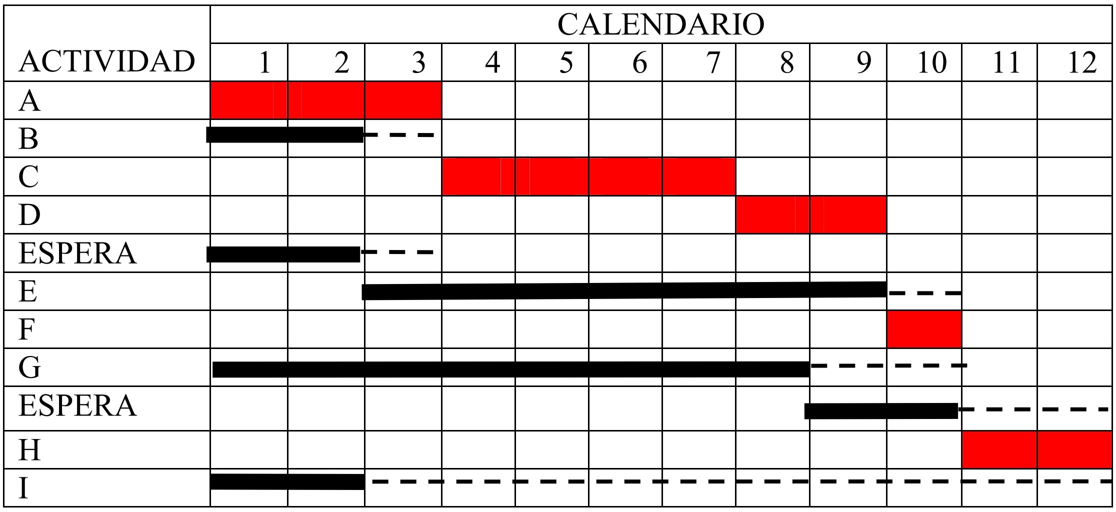
1. RED DE PARTIDA



Actividad	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Holgura total	0	1	0	0	1	0	2	0	10
Holgura libre	0	1	0	0	1	0	0	0	10

2. DIAGRAMA DE GANTT

Fechas más pronto de comienzo
Fechas más pronto de terminación
Holguras totales



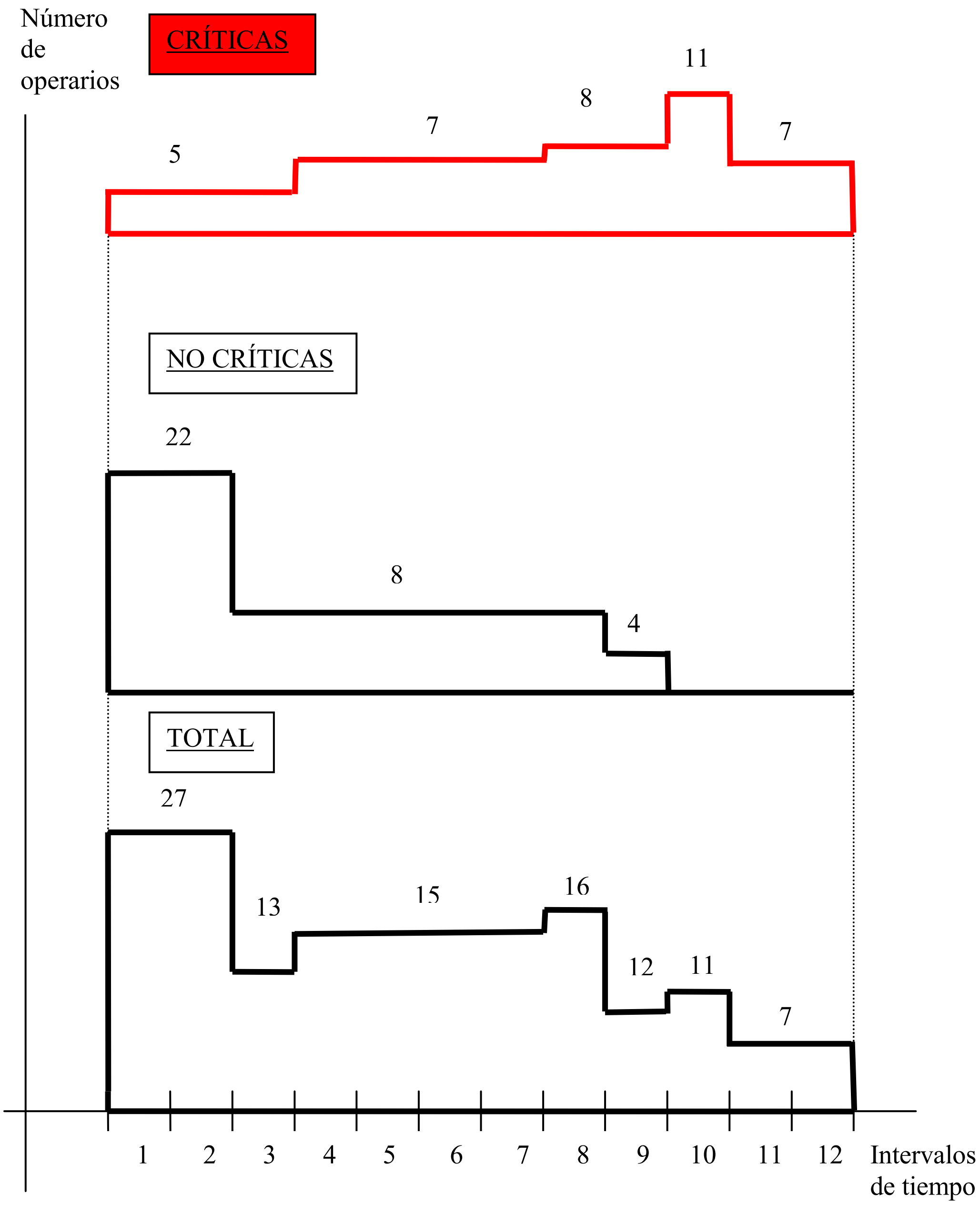
HOLGURA TOTAL – – – – – –

3. DIAGRAMA DE GANTT DE DISTRIBUCIÓN DE RECURSOS

Carga diaria de mano de obra de las actividades críticas (C_d^c)
Carga diaria de mano de obra de las actividades no críticas (C_d^{nc})
Carga diaria total de mano de obra (C_d)

ACTIVIDAD	CALENDARIO												Σ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	4	4	4	4	4	4	4	4	--	--			32
H											7	7	14
I	8	8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	16
C_d^c	5	5	5	7	7	7	7	8	8	11	7	7	84
C_d^{nc}	22	22	8	8	8	8	8	8	4	0	0	0	96
C_d	27	27	13	15	15	15	15	16	12	11	7	7	**180**

4. HISTOGRAMAS DE CARGA



5. CÁLCULOS PREVIOS

a) Carga media diaria de mano de obra (C_m).

$$C_m = C_R/T_E$$

Siendo:

C_R la cantidad total de recursos de mano de obra necesarios para ejecutar todos los trabajos. En el presente caso, igual que en el anterior, 180 operarios.
T_E el tiempo total programado para ejecutar todos los trabajos. En el presente caso, igual que en el anterior, 12 días.
En consecuencia:

$$C_m = C_R/T_E = 180 \text{ operarios}/12 \text{ días} = 15 \text{ operarios/día}$$

b) Suma de los cuadrados de la carga media diaria ($\sum C_m^2$).

$$\sum C_m^2 = 12 \times 15^2 = 2700$$

c) Carga diaria (C_d) y suma de los cuadrados de las cargas diarias ($\sum C_d^2$), que se indican en el siguiente cuadro.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	4	4	4	4	4	4	4	4	--	--			32
H											7	7	14
I	8	8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	16
C_d	27	27	13	15	15	15	15	16	12	11	7	7	**180**
C_d^2	729	729	169	225	225	225	225	256	144	121	49	49	**3146**
C_m	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
C_m^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**

6. OBJETIVO

Pretendo, partiendo de la situación actual, con la distribución de recursos indicada en la tabla y en los histogramas de carga anteriores, **disminuir o aumentar la carga diaria hasta que sea igual a la carga diaria media, lo que implica que la diferencia de sus cuadrados será nula y, en consecuencia, su varianza**, obteniendo una nivelación de recursos de mano de obra **ideal**, al ser su histograma uniforme.

7. APLICACIÓN DEL ALGORITMO **MIMO**

a) Defino el índice diario de mano de obra.

$$i = C_m^2/C_d^2$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	4	4	4	4	4	4	4	4	--	--			32
H											7	7	14
I	8	8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	16
C_d	27	27	13	15	15	15	15	16	12	11	7	7	**180**
C_d^2	729	729	169	225	225	225	225	256	144	121	49	49	**3146**
C_m	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
C_m^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
i	0,30	0,30	1,33	1	1	1	1	0,87	1,56	1,86	4,59	4,59	

b) Manteniendo las cargas diarias de las actividades críticas y columnas de número índice igual a la unidad, cronológicamente y de izquierda a derecha, elijo la columna de menor número índice y de esa columna la actividad que tenga mayor holgura.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	4	4	4	4	4	4	4	4	--	--			32
H											7	7	14
I	8	8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	16
i	0,30	0,30	1,33	1	1	1	1	0,87	1,56	1,86	4,59	4,59	

En este caso corresponde a la fila de la actividad I y columna 1.

c) La mencionada columna dispone de una carga diaria de 27 operarios, siendo la media de 15 operarios, por lo que disminuiré la carga diaria en 12 operarios.
Para ello elimino los 8 operarios del trabajo I, que traspaso al primer día de holgura de ese trabajo, es decir al día 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	4	4	4	4	4	4	4	4	--	--			32
H											7	7	14
I	0	8	8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	16
C_d	19	27	21	15	15	15	15	16	12	11	7	7	**180**

Con esta operación he reducido la carga diaria del día 1 a 19 operarios, por lo que aún le sobran 4 operarios para que se iguale a la carga media.
Con el fin de conseguir esa igualdad, manteniéndome en la misma columna, la de menor número índice inicial, busco su intersección con la siguiente actividad de mayor holgura, que es la G.

Aunque, después de traspasar los 10 operarios, el índice del día 1 cambiará (0,62), sigo considerando el índice inicial (0,30) de la columna elegida en un principio hasta igualar la carga diaria a la media o hasta que no se pueda seguir operando con la columna elegida, a lo que llamo **"<u>agotar el día</u>".**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	4	4	4	4	4	4	4	4	--	--			32
H											7	7	14
I	0	8	8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	16
i	0,30	0,30	1,33	1	1	1	1	0,87	1,56	1,86	4,59	4,59	

La casilla intersección está cargada con 4 operarios que traspaso a su primer día de holgura, con lo cual la carga de mano de obra del día 1 será de 15 operarios e igual a la carga media.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	0	4	4	4	4	4	4	4	4	--			32
H											7	7	14
I	0	8	8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	16
C_d	15	27	21	15	15	15	15	16	16	11	7	7	**180**

A consecuencia de la operación anterior, los índices de algunas columnas varían, como es el caso de las columnas 1, 3 y 9, siendo la distribución del Gantt de recursos, después de esta primera operación, la siguiente:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	0	4	4	4	4	4	4	4	4	--			32
H											7	7	14
I	0	8	8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	16
C_d	15	27	21	15	15	15	15	16	16	11	7	7	**180**
C_d^2	225	729	441	225	225	225	225	256	256	121	49	49	**3026**
C_m	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
C_m^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
i	1	0,30	0,51	1	1	1	1	0,87	0,87	1,86	4,59	4,59	

d) A partir de la nueva distribución de los recursos de mano de obra, procedo de forma análoga a lo indicado anteriormente.

Manteniendo las cargas diarias de las actividades críticas y columnas de número índice igual a la unidad, cronológicamente y de izquierda a derecha, elijo la columna de menor número índice y de esa columna la actividad que tenga mayor holgura.
Escojo la columna correspondiente al día 2 (menor índice) y la fila correspondiente a la actividad I (mayor holgura).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	0	4	4	4	4	4	4	4	4	--			32
H											7	7	14
I	0	8	8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	16
i	1	0,30	0,51	1	1	1	1	0,87	0,87	1,86	4,59	4,59	

La casilla intersección está cargada con 8 operarios que traspaso a su primer día de holgura, con lo cual la carga de mano de obra del día 2 será de 19 operarios.
Se observa que su primer día de holgura, al efecto de traspasar carga, será el 8, ya que los anteriores los respeto por tener un índice de 1.
Manteniendo la columna de menor índice busco la intersección con la actividad de mayor holgura. En este caso existen dos posibilidades; la actividad B y la actividad G. Elijo ésta última puesto que agota su holgura, lo que llamo **"<u>agotar holgura</u>"**, por lo que **pasa a ser actividad crítica,** aunque podía haber seleccionado la B, trasvasando 4 operarios, de los 10 disponibles, a su primer día de holgura que es el día 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	0	4	4	4	4	4	4	4	4	--			32
H											7	7	14
I	0	0	8	--	--	--	--	8	--	--	--	--	16
i	1	0,30	0,51	1	1	1	1	0,87	0,87	1,86	4,59	4,59	

En consecuencia la nueva distribución de recursos de mano de obra y sus números índices quedarán como sigue:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4			32
H											7	7	14
I	0	0	8	--	--	--	--	8	--	--	--	--	16
$\mathbf{C_d}$	15	15	21	15	15	15	15	24	16	15	7	7	**180**
$\mathbf{C_d^2}$	225	225	441	225	225	225	225	576	256	225	49	49	**2946**
$\mathbf{C_m}$	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
$\mathbf{C_m^2}$	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
i	1	1	0,51	1	1	1	1	0,39	0,87	1	4,59	4,59	

e) Agotado el día 2, paso a la columna de menor índice que es la 8 y busco su intersección con la actividad de mayor holgura, que corresponde a la I.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4			32
H											7	7	14
I	0	0	8	--	--	--	--	8	--	--	--	--	16
i	1	1	0,51	1	1	1	1	0,39	0,87	1	4,59	4,59	

Los 8 operarios de su casilla intersección los traspaso al primer día de holgura, es decir al 9, con lo cual el día 8 se queda con una carga 16 operarios.
Análogamente, intentando agotar el día, procedo con la casilla intersección de la columna 8 con la fila correspondiente a la actividad E, traspasando el operario sobrante hasta igualar la carga diaria con la media, a su primer día de holgura, que es el 10. Pero ello no es posible, puesto que el día 10 tiene un índice de 1 y la actividad E no dispone de más holgura. En consecuencia el día 8, en este primer barrido de calendario que estoy efectuando, está agotado, quedando la situación como sigue.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4			32
H											7	7	14
I	0	0	8	--	--	--	--	0	8	--	--	--	16
C_d	15	15	21	15	15	15	15	16	24	15	7	7	**180**
C_d^2	225	225	441	225	225	225	225	256	576	225	49	49	**2946**
C_m	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
C_m^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
i	1	1	0,51	1	1	1	1	0,87	0,39	1	4,59	4,59	

Se observa que el $\sum C_d^2$ no ha variado con respecto a la distribución anterior. Lo único que se ha conseguido con esta operación es intercambiar los índices de los días 8 y 9.

f) Siguiendo con el mismo razonamiento, el día con menor índice corresponde al día 9 (0,39) y su intersección con la fila de mayor holgura (actividad I).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4			32
H											7	7	14
I	0	0	8	--	--	--	--	0	8	--	--	--	16
i	1	1	0,51	1	1	1	1	0,87	0,39	1	4,59	4,59	

Los 8 operarios de su casilla intersección los traspaso al primer día de holgura que no tenga un número índice igual a 1, es decir al 11, con lo cual el día 9 se queda con una carga 16 operarios.

Con esta operación agoto el primer barrido del calendario o primera iteración, puesto que el siguiente número índice menor (4,59), correspondiente al día 12, último del calendario, en su intersección con la actividad I, la carga de mano de obra es nula.

La nueva distribución, última de la primera iteración, quedará de la siguiente forma:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4			32
H											7	7	14
I	0	0	8	--	--	--	--	0	0	--	8	--	16
C_d	15	15	21	15	15	15	15	16	16	15	15	7	**180**
C_d^2	225	225	441	225	225	225	225	256	256	225	225	49	**2802**
C_m	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
C_m^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
i	1	1	0,51	1	1	1	1	0,87	0,87	1	1	4,59	

g) Segundo barrido o segunda iteración.

Columna de menor índice: la 3 (0,51).
Fila de mayor holgura: actividad I.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4			32
H											7	7	14
I	0	0	8	--	--	--	--	0	0	--	8	--	16
i	1	1	0,51	1	1	1	1	0,87	0,87	1	1	4,59	

La cantidad a traspasar será de 8 operarios que irán a parar al primer día de holgura cuyo índice no sea la unidad, es decir al día 12, **pasando a ser crítica la actividad I.**

En consecuencia la nueva tabla será la siguiente.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4			32
H											7	7	14
I	0	0	0	--	--	--	--	0	0	--	8	8	16
C_d	15	15	13	15	15	15	15	16	16	15	15	15	**180**
C_d^2	225	225	169	225	225	225	225	256	256	225	225	225	**2706**
C_m	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
C_m^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
i	1	1	1,33	1	1	1	1	0,87	0,87	1	1	1	

Procediendo con el mismo criterio:

Columna de menor índice: la 8 (0,87).
Fila de mayor holgura: actividad E.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			4	4	4	4	4	4	4	--			28
F										11			11
G	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4			32
H											7	7	14
I	0	0	0	--	--	--	--	0	0	--	8	8	16
i	1	1	1,33	1	1	1	1	0,87	0,87	1	1	1	

La cantidad a traspasar será el exceso de carga diaria hasta igualarla con la media, es decir 1 operario. Lo traspaso a la primera casilla con holgura cuyo número índice no sea 1. En este caso, y hasta el final del calendario, no es posible, por lo que, reiniciando el calendario se lo doy al primer día ocupado, de índice distinto a 1, que es el 3, resultando la siguiente distribución:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			5	4	4	4	4	3	4	--			28
F										11			11
G	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4			32
H											7	7	14
I	0	0	0	--	--	--	--	0	0	--	8	8	16
$\mathbf{C_d}$	15	15	14	15	15	15	15	15	16	15	15	15	**180**
$\mathbf{C_d^2}$	225	225	196	225	225	225	225	225	256	225	225	225	**2702**
$\mathbf{C_m}$	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
$\mathbf{C_m^2}$	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
i	1	1	1,14	1	1	1	1	1	0,87	1	1	1	

Análogamente.

Columna de menor índice: la 9.
Fila con mayor holgura: la actividad E.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			5	4	4	4	4	3	4	--			28
F										11			11
G	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4			32
H											7	7	14
I	0	0	0	--	--	--	--	0	0	--	8	8	16
i	1	1	1,14	1	1	1	1	1	0,87	1	1	1	

Al igual que en el caso anterior, traspaso 1 operario al día 3, resultando la distribución final de recursos de mano de obra, la siguiente.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			6	4	4	4	4	3	3	--			28
F										11			11
G	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4			32
H											7	7	14
I	0	0	0	--	--	--	--	0	0	--	8	8	16
$\mathbf{C_d}$	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
$\mathbf{C_d^2}$	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
$\mathbf{C_m}$	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**
$\mathbf{C_m^2}$	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	**2700**
i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

En consecuencia ha finalizado el proceso al ser 1 todos los números índice, lo que supone que la carga diaria de mano de obra es igual a la media.

Por lo que, la distribución de los recursos de mano de obra, nivelados, en función del tipo de actividades, es el siguiente.

ACTIVIDAD	CALENDARIO												$\sum$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
A	5	5	5										15
B	10	10	--										20
C				7	7	7	7						28
D								8	8				16
E			6	4	4	4	4	3	3	--			28
F										11			11
G			4	4	4	4	4	4	4	4			32
H											7	7	14
I											8	8	16
C_d^c	5	5	9	11	11	11	11	12	12	15	15	15	132
C_d^{nc}	10	10	6	4	4	4	4	3	3	0	0	0	48
$\mathbf{C_d}$	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	**180**

En consecuencia he llegado, en un segundo barrido del calendario o segunda iteración, a la **NIVELACIÓN IDEAL DEL RECURSO DE MANO DE OBRA**, puesto que:

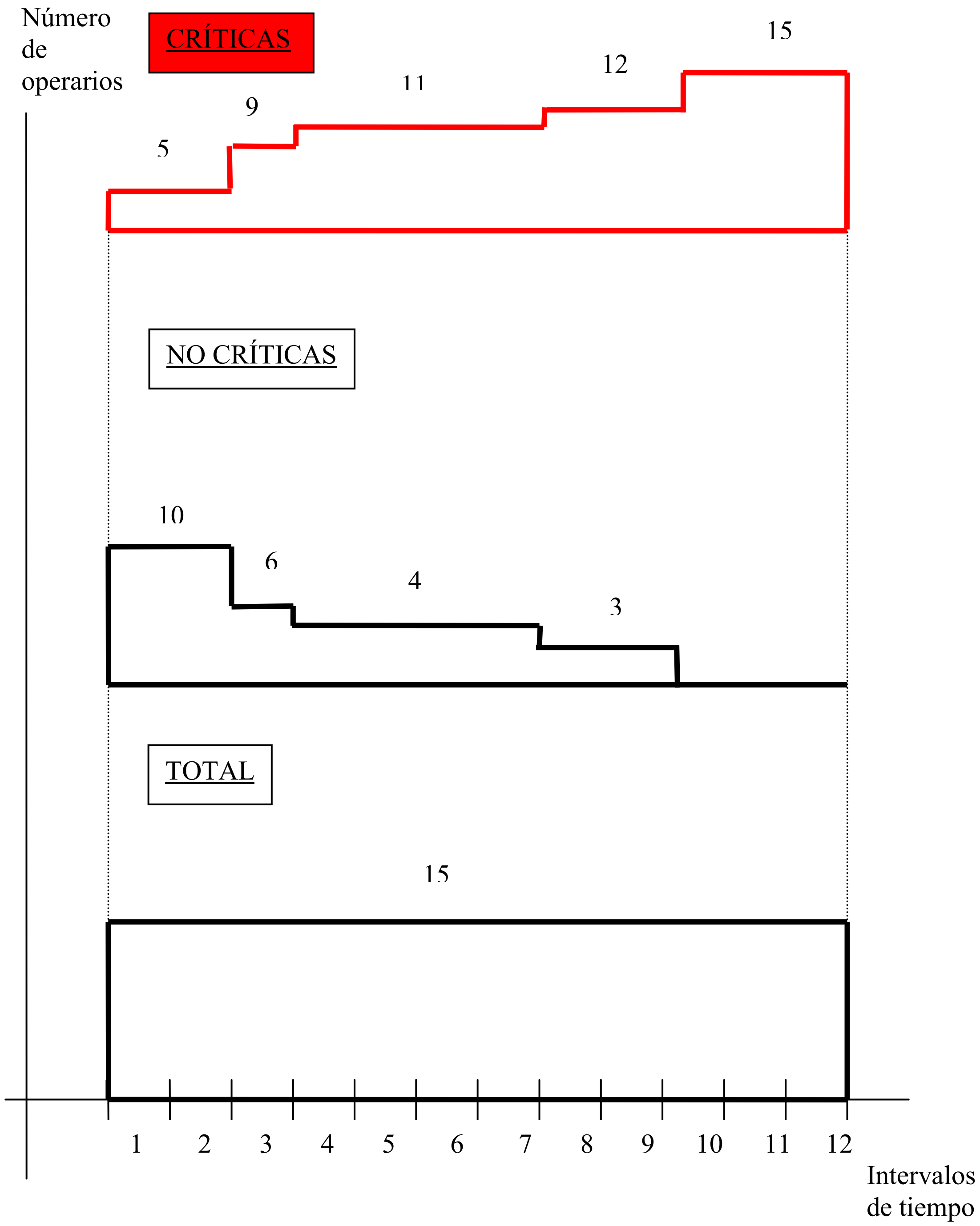
1º. **LOS NÚMEROS ÍNDICE DE TODOS LOS DIAS DEL CALENDARIO SON 1.**

2º. LA DIFERENCIA DE LOS CUADRADOS DE LA CARGA DIARIA Y MEDIA ES NULA Y EN CONSECUENCIA SU VARIANZA.

3º. LA CARGA DIARIA DE MANO DE OBRA ES CONSTANTE Y, CONSECUENTEMENTE, EL HISTOGRAMA DE CARGA TOTAL DIARIA DE MANO DE OBRA.

Por lo que, los histogramas de carga de mano de obra, son los siguientes:

HISTOGRAMAS DE CARGA



8. NUEVA RED DERIVADA DE LA NIVELACIÓN

No hay que olvidar que el objetivo final es el diseño óptimo de una red a partir de una nivelación de recursos personales constante.

La nivelación de recursos de mano de obra puede modificar la duración de las actividades y, en consecuencia, sus holguras así como las relaciones de precedencias o dependencia entre los distintos trabajos.

En este caso y por lo que se refiere a la duración de las actividades, no se produce modificación alguna, pero sí en alguna relación de dependencia y en las holguras, que analizamos seguidamente.

a) Relaciones de dependencia.
En la red primitiva la **actividad G** era inicial y pasa a comenzar dos días después de iniciarse los trabajos, pasando a ser crítica al igual que la actividad **I.** Por lo que a esta última se refiere pasa a comenzar 10 días después de iniciarse los trabajos.
Si bien las relaciones de dependencia han sido modificadas, todas las modificaciones son compatibles con las primitivas al no haber superado, en ningún caso, las holguras de las actividades.

b) Holguras.
Por lo que a las holguras se refiere, pasan a ser todas nulas, a excepción de las actividades B y E que mantiene el día de holgura total y libre, al igual que la espera de la actividad E que mantiene su día de holgura total, pasando a ser críticas las actividades I, G y su espera, apareciendo una nueva espera de comienzo crítica para la actividad I.

HOLGURAS INICIALES

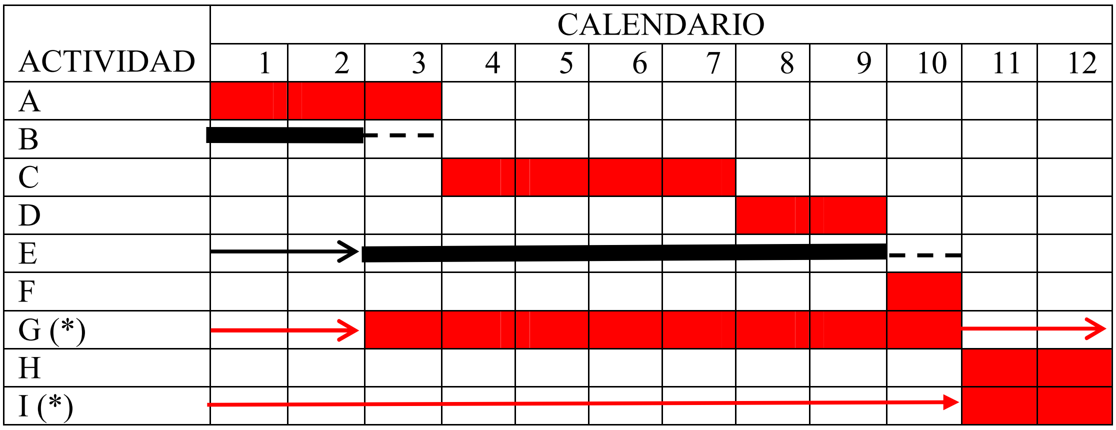
Actividad	A	B	C	D	E	F	G	H	I	ESPERA E	ESPERA G
Holgura total	0	1	0	0	1	0	2	0	10	1	2
Holgura libre	0	1	0	0	1	0	0	0	10	0	2

HOLGURAS FINALES

Actividad	A	B	C	D	E	F	G	H	I	ESPERA E	ESPERA G
Holgura total	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
Holgura libre	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0

En consecuencia el diagrama de Gantt correspondiente a la red óptima, para una nivelación de recursos personales constante o ideal, será el siguiente:

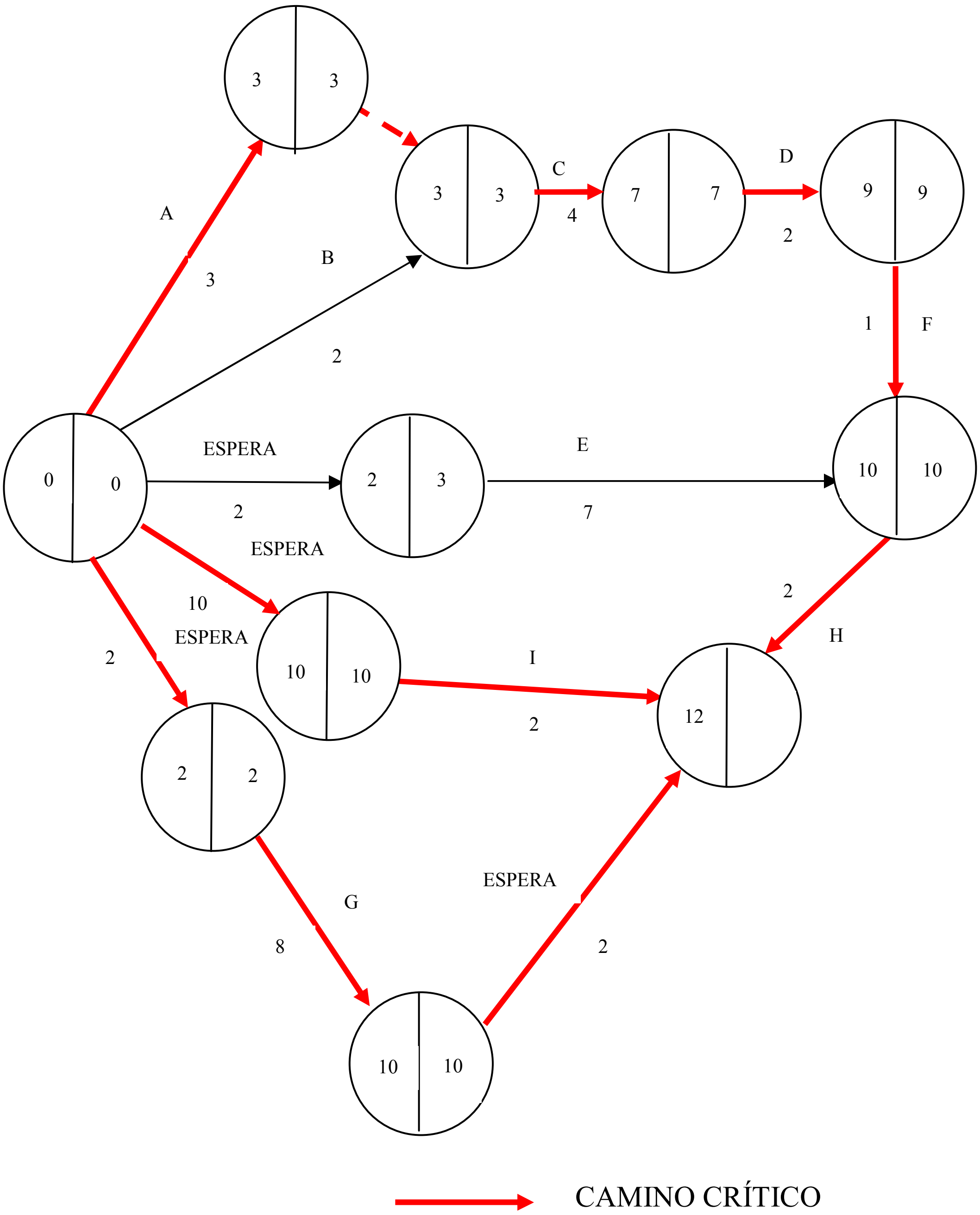
DIAGRAMA DE GANTT CORRESPONDIENTE A LA RED ÓPTIMA



(*) Se consume su holgura.

Introduciendo las variaciones indicadas, tanto de holguras como de relaciones de dependencia, obtengo la red óptima.

RED DE FLECHAS ÓPTIMA PARA UNA NIVELACIÓN DE RECURSOS DE MANO DE OBRA CONSTANTE O IDEAL



CONCLUSIONES

1º. NO VARIA LA DURACIÓN DEL PROYECTO Y EN CONSECUENCIA SU PROGRAMACIÓN INICIAL.

2º. AL NO VARIAR EL COSTE DE MANO DE OBRA NO CAMBIA EL COSTE DIRECTO Y EL COSTE TOTAL DE LA OBRA ES EL MÍNIMO, PUESTO QUE HE PARTIDO DE LA RED DE COSTE MÍNIMO.

3.6. LOS MODELOS SINGULARES.

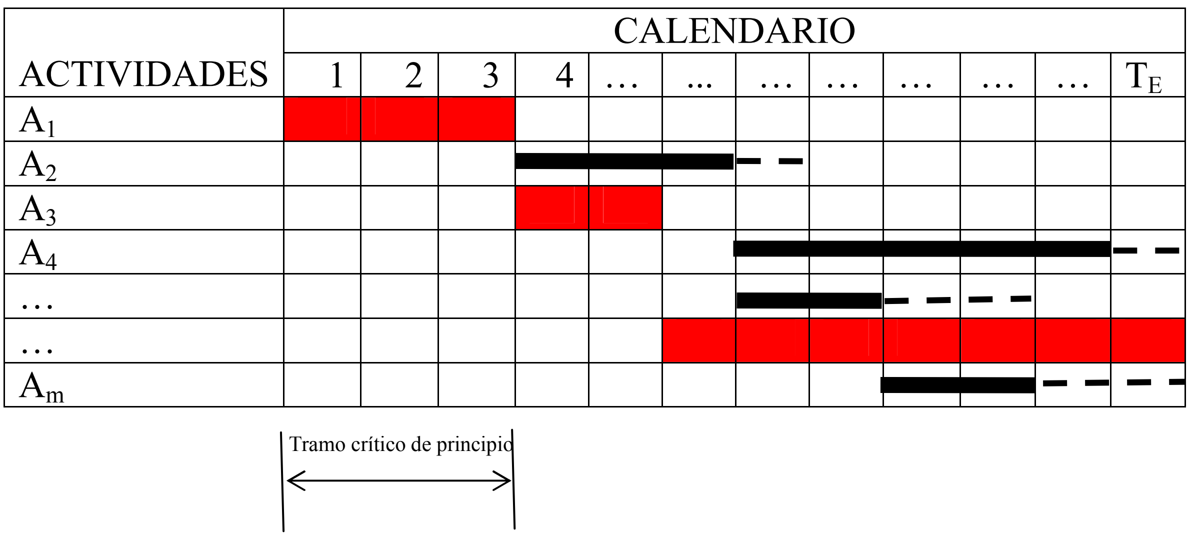
Los modelos singulares aparecen cuando en el calendario hay tramos ocupados **TAN SÓLO POR ACTIVIDADES CRÍTICAS** que, al carecer de holguras, nos imposibilita trabajar con ellas, debiendo permanecer inalterables durante todo el proceso de nivelación.

3.6.1. PLANTEAMIENTO.

Los modelos singulares los clasifico en cuatro grupos:

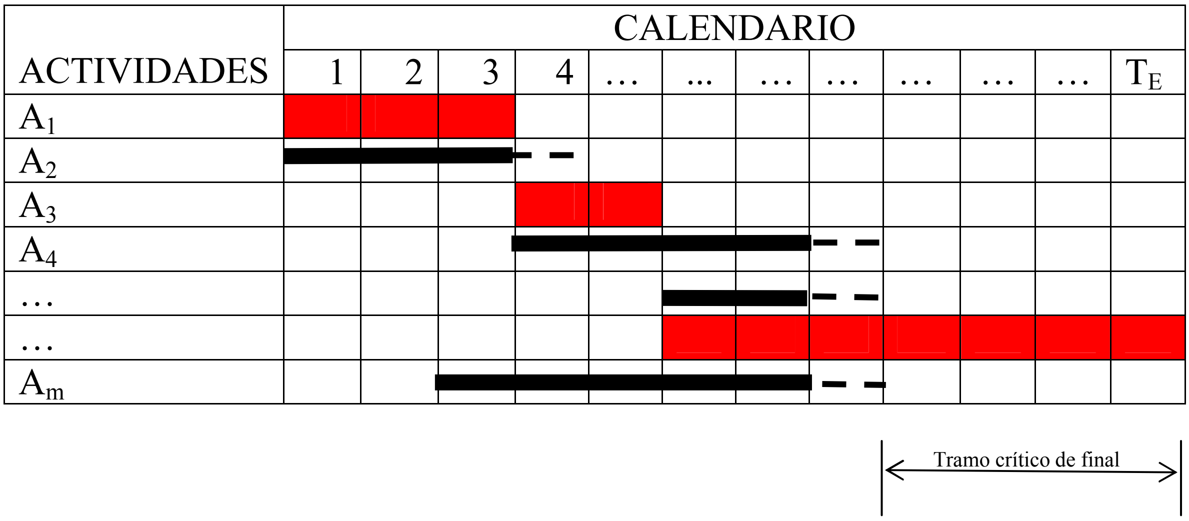
Grupo 1. Críticos de principio.

Son aquellos que en el tramo inicial del diagrama de Gantt sólo existen actividades críticas. La estructura modelo del diagrama de Gantt adopta la siguiente forma.



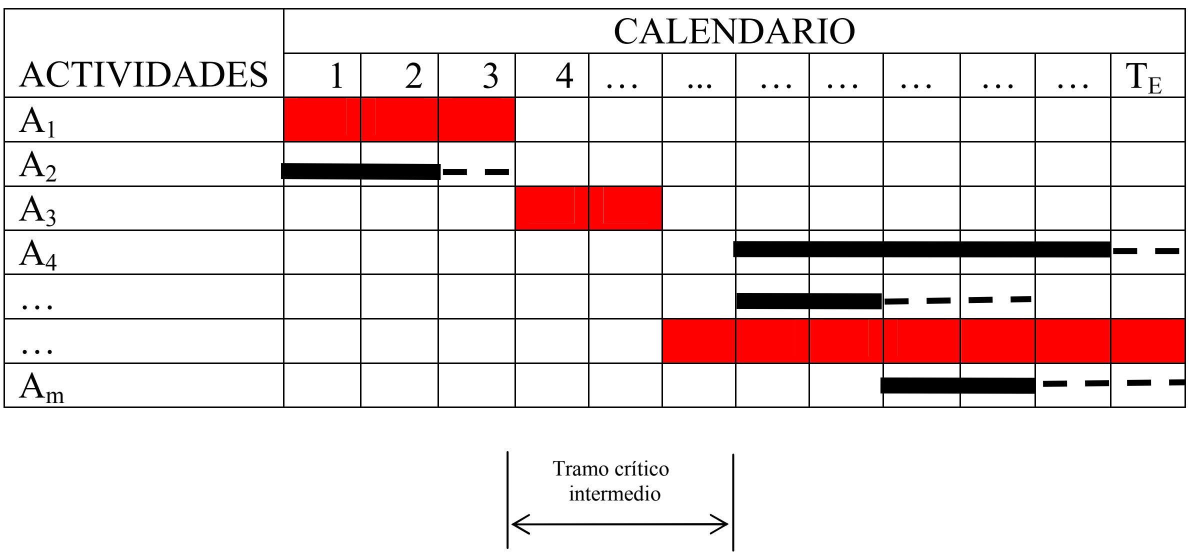
Grupo 2. Críticos de final.

Son aquellos que en el tramo final del diagrama de Gantt sólo existen actividades críticas. La estructura modelo del diagrama de Gantt adopta la siguiente forma.



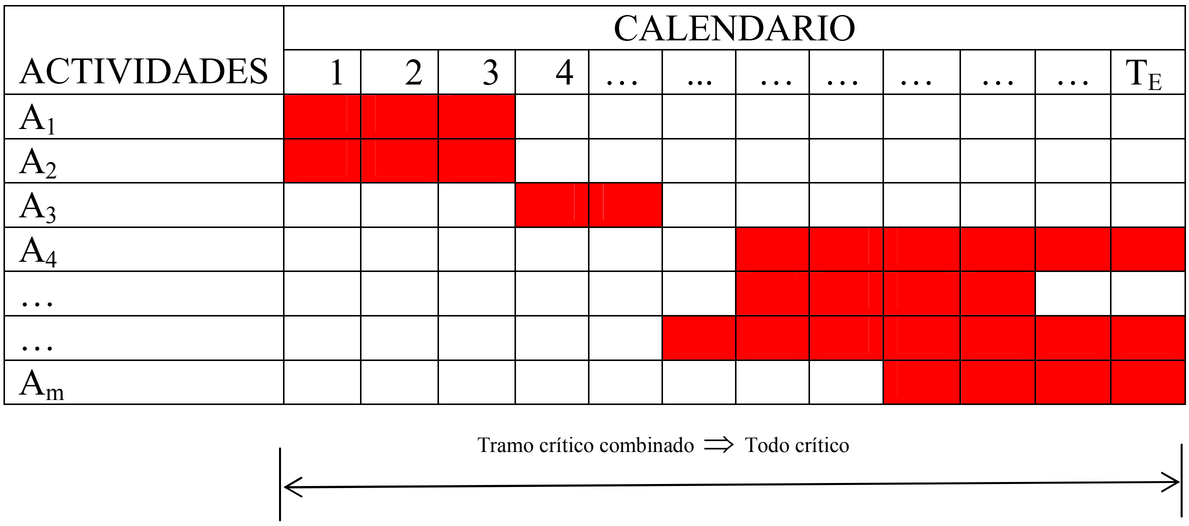
Grupo 3. Críticos intermedios.

Son aquellos que en un tramo intermedio del diagrama de Gantt sólo existen actividades críticas. La estructura modelo del diagrama de Gantt adopta la siguiente forma.



Grupo 4. Críticos combinados.

Son aquellos que se configuran como combinación entre los tres anteriores. Se debe tener en cuenta que, caso de simultanearse los tres modelos singulares anteriores todo el diagrama de Gantt sería crítico. La estructura modelo del diagrama de Gantt, en caso de coincidencia de los tres grupos, adopta la siguiente forma.



3.6.2. APLICACIÓN DEL ALGORITMO.

Para los grupos 1, 2 y 3. Modelos críticos de principio, final e intermedios.

1ª Posibilidad.

Aplicar el algoritmo tal como se ha descrito, sin corrección alguna, teniendo en cuenta que nunca podremos llegar a la nivelación ideal pero si a una óptima.

2ª Posibilidad.

Eliminamos del diagrama de Gantt los tramos inicial, final o intermedio, según sea el caso, donde sólo aparecen trabajos críticos y procedemos a aplicar el algoritmo, tal como se ha descrito, al resto del Gantt, con las consiguientes correcciones en los tiempos, carga diaria (C_d), carga media (C_m) y carga total (C_T), obteniendo los números índices de acuerdo con los valores anteriores. Igualmente, como ocurre con la posibilidad anterior, nunca podremos llegar a la nivelación ideal pero si a una óptima.

Si bien los resultados van a ser los mismos, elijo la primera posibilidad por dos razones:

1ª. No es necesario realizar corrección alguna en los cálculos.
2ª. Se ajusta más al marco y contexto de la nivelación.

Para el grupo 4. Modelos críticos combinados.

Si analizamos las posibilidades de combinación existentes entre los tres primeros grupos, se observa que se concretan en cuatro.

A. Modelos críticos de principio e intermedios.

ACTIVIDADES	CALENDARIO											
	1	2	3	4	…	...	…	…	…	…	…	T_E
A_1												
A_2												
A_3												
A_4												
…												
…												
A_m												

B. Modelos críticos de principio y final.

ACTIVIDADES	CALENDARIO											
	1	2	3	4	…	...	…	…	…	…	…	T_E
A_1												
A_2												
A_3												
A_4												
…												
…												
A_m												

C. Modelos críticos intermedios y final.

	CALENDARIO											
ACTIVIDADES	1	2	3	4	…	...	…	…	…	…	…	T_E
A_1												
A_2												
A_3												
A_4												
…												
…												
A_m												

D. Modelos críticos de principio, final e intermedios.

	CALENDARIO											
ACTIVIDADES	1	2	3	4	…	...	…	…	…	…	…	T_E
A_1												
A_2												
A_3												
A_4												
…												
…												
A_m												

Para los modelos A, B y C se procede de la misma forma que la indicada para los grupos 1, 2 y 3, con la única salvedad de que si se utiliza la segunda posibilidad hay que tener en cuenta que los tramos a eliminar son dos.

Por lo que respecta al modelo D las posibilidades de trabajo son nulas, al ser críticas todas las actividades.

CONCLUSIONES

1º. LOS NÚMEROS ÍNDICE DE TODOS LOS DIAS DEL CALENDARIO DEBEN TENER UN VALOR PRÓXIMO 1.
2º. LA DIFERENCIA DE LOS CUADRADOS DE LA CARGA DIARIA Y MEDIA ES LA MÍNIMA POSIBLE Y EN CONSECUENCIA SU VARIANZA.
3º. LA CARGA DIARIA DE MANO DE OBRA ES LO MÁS UNIFORME POSIBLE Y, CONSECUENTEMENTE, EL HISTOGRAMA DE CARGA TOTAL DIARIA DE MANO DE OBRA.

3.6.3. PROGRAMACIÓN IDEAL Y ÓPTIMA.

Una vez realizada la nivelación, procederé a la obtención de la programación óptima, objetivo final de esta Tesis Doctoral.

No puedo hablar de programación ideal puesto que el histograma de carga de mano de obra no será constante por lo indicado anteriormente, pero si que he conseguido una nivelación óptima.

Parto de la nivelación óptima y analizo las variaciones que tal nivelación ha provocado en el diagrama de Gantt de partida. Estas variaciones pueden ser en las duraciones de las actividades, en las holguras y en las relaciones de dependencia o precedencia.

Las variaciones en las duraciones de las actividades no afectarán a la duración final del proyecto, ya que cualquier incremento en la duración de una actividad está dentro de la holgura total de la misma.

Por lo que respecta a las holguras, las variaciones en las mismas, no afectarán a la duración de la programación inicial, puesto que no se supera, en ningún caso, la holgura total de la actividad.

Y, por último, las posibles modificaciones en las relaciones de dependencia o precedencia que puedan aparecer son compatibles con las iniciales que hemos obligado a mantener.

Por lo que respecta al camino o caminos críticos iniciales no sufrirán variación alguna, aunque aparezcan nuevos caminos críticos.

En consecuencia, introduciendo las variaciones indicadas en la red de programación primitiva obtendremos:

LA PROGRAMACIÓN ÓPTIMA DE LA OBRA, QUE LO SERÁ EN CUANTO A SU COSTE TOTAL SE REFIERE, AL NO VARIAR EL COSTE DE MANO DE OBRA NO CAMBIA EL COSTE DIRECTO Y EL COSTE TOTAL DE LA OBRA SE MANTIENE EN EL MÍNIMO, PUESTO QUE HE PARTIDO DE LA RED DE COSTE MÍNIMO, NO VARIANDO EL TIEMPO INICIAL PROGRAMADO PARA LA EJECUCIÓN DE LA OBRA.

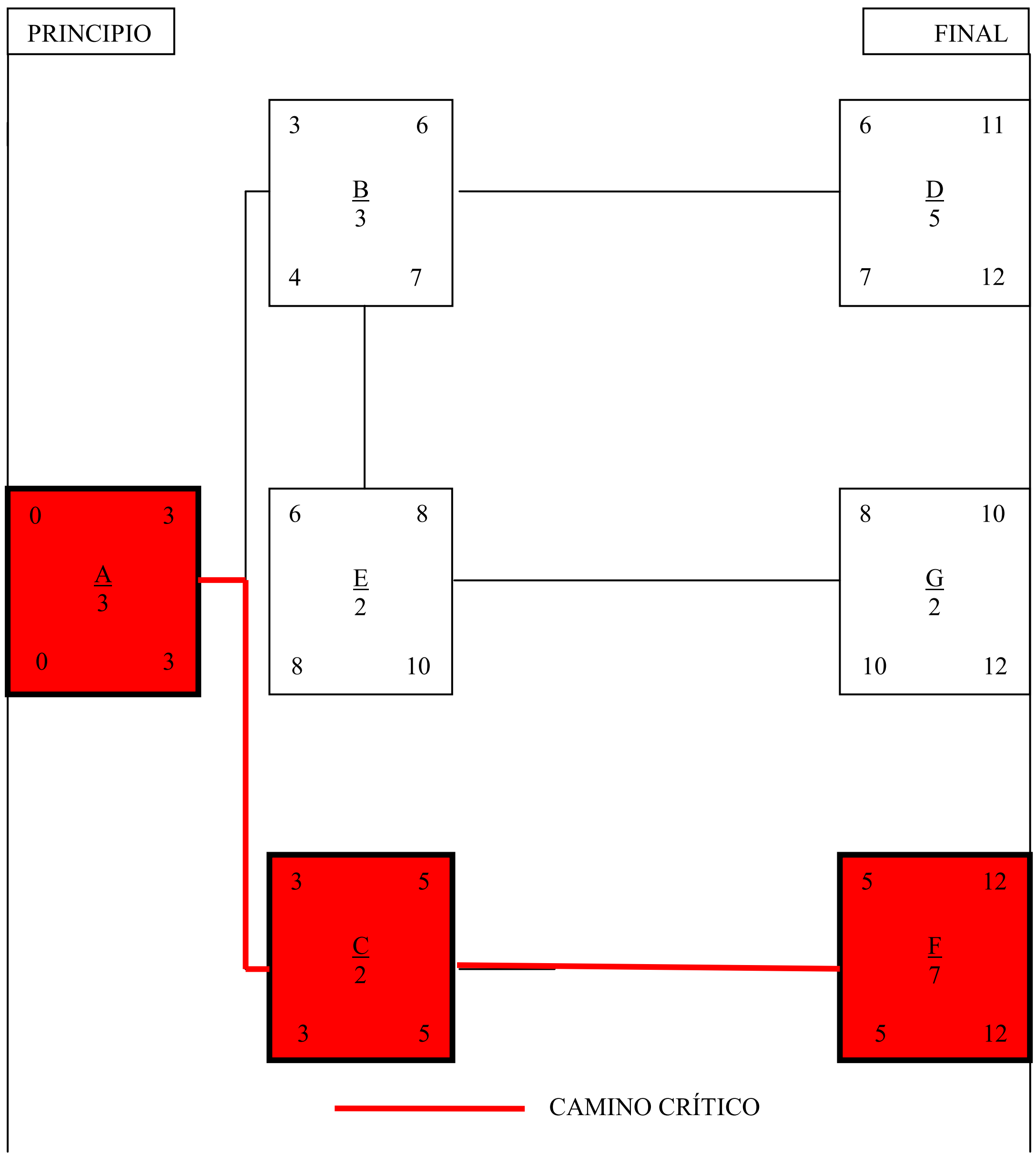
3.6.4 APLICACIÓN 2.

CASO A

Partiendo de la red siguiente, cuyo coste total es mínimo, voy a obtener la programación óptima para una nivelación de recursos de mano de obra ideal u óptima, siendo el número de operarios disponibles para ejecutar cada actividad los siguientes:

Actividad	A	B	C	D	E	F	G
Nº de operarios	4	2	5	8	4	2	3

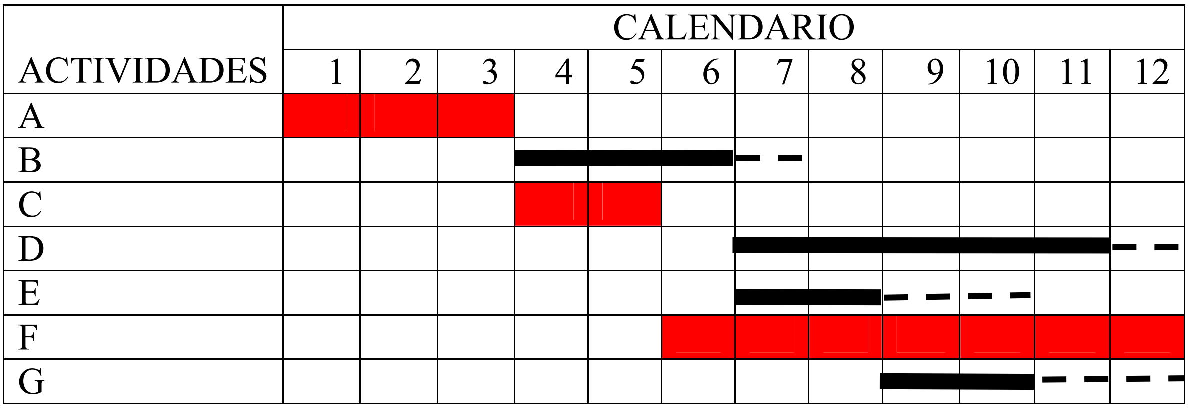
1. RED DE PARTIDA



Actividad	A	B	C	D	E	F	G
Holgura total	0	1	0	1	2	0	2
Holgura libre	0	0	0	0	0	0	0

2. DIAGRAMA DE GANTT

Tiempos más pronto de comienzo
Tiempos más pronto de terminación
Holguras totales



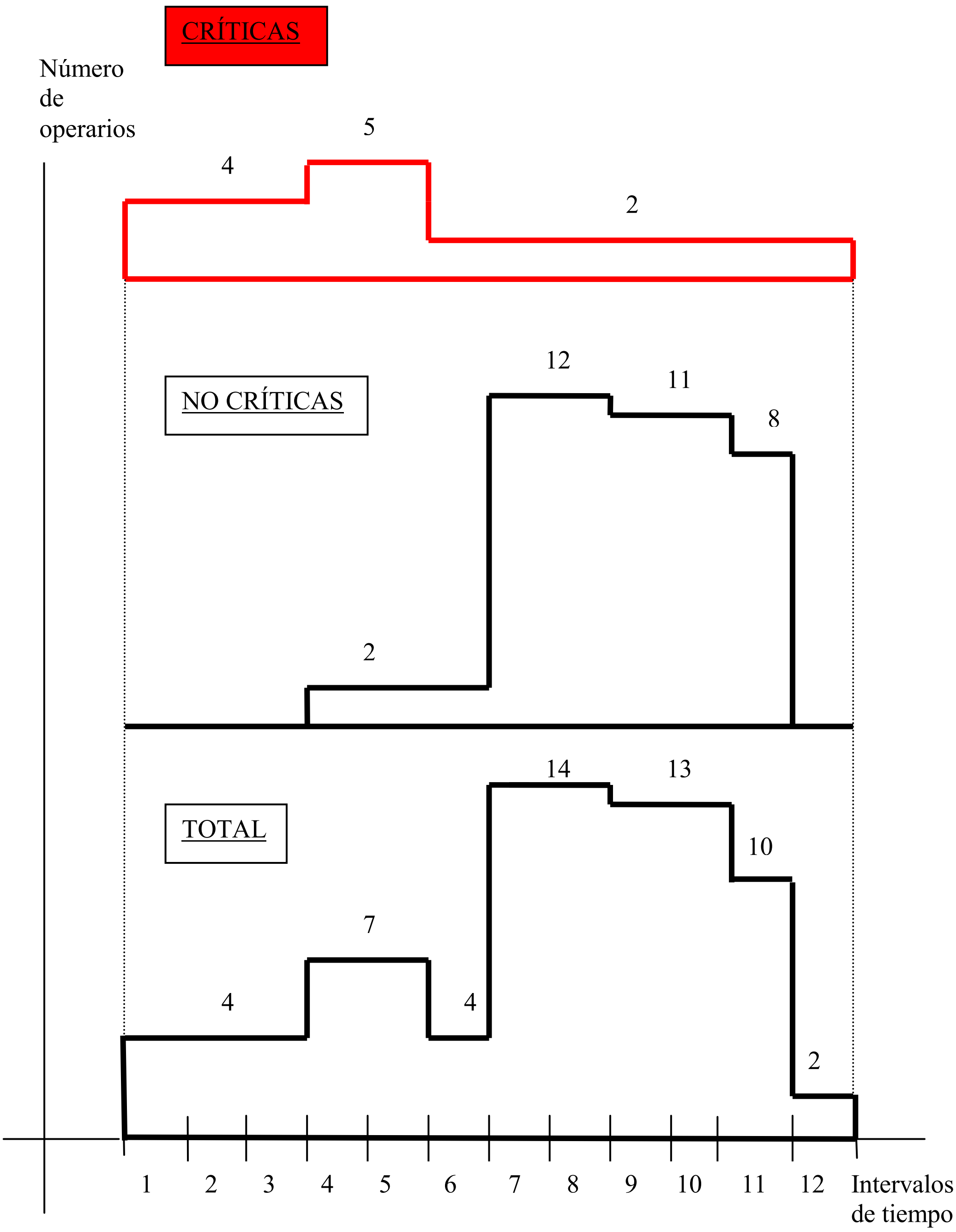
Se trata de un caso singular crítico de principio.

3. DIAGRAMA DE GANTT DE DISTRIBUCIÓN DE RECURSOS

Carga diaria de mano de obra de las actividades críticas (C_d^c)
Carga diaria de mano de obra de las actividades no críticas (C_d^{nc})
Carga diaria total de mano de obra (C_d)

ACTIVIDADES	CALENDARIO												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							8	8	8	8	8	--	40
E							4	4	--	--			8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									3	3	--	--	6
C_d^c	4	4	4	5	5	2	2	2	2	2	2	2	36
C_d^{nc}	0	0	0	2	2	2	12	12	11	11	8	0	60
C_d	4	4	4	7	7	4	14	14	13	13	10	2	**96**

4. HISTOGRAMAS DE CARGA



5. CÁLCULOS PREVIOS

a) Carga media diaria de mano de obra (C_m).

$$C_m = C_R/T_E$$

Siendo:

C_R la cantidad total de recursos de mano de obra necesarios para ejecutar todos los trabajos. En el presente caso, 96 operarios.
T_E el tiempo total programado para ejecutar todos los trabajos. En el presente caso, 12 días.
En consecuencia:

$$C_m = C_R/T_E = 96 \text{ operarios}/12 \text{ días} = 8 \text{ operarios/día}$$

b) Suma de los cuadrados de la carga media diaria ($\sum C_m^2$).

$$\sum C_m^2 = 12 \times 8^2 = 768$$

c) Carga diaria (C_d) y suma de los cuadrados de las cargas diarias ($\sum C_d^2$), que se indican en el siguiente cuadro.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							8	8	8	8	8	--	40
E							4	4	--	--	--	--	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									3	3	--	--	6
C_d	4	4	4	7	7	4	14	14	13	13	10	2	**96**
C_d^2	16	16	16	49	49	16	196	196	169	169	100	4	**996**
C_m	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	**96**
C_m^2	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	**768**

6. OBJETIVO

Pretendo, partiendo de la situación actual, con la distribución de recursos indicada en la tabla y en los histogramas de carga anteriores, **disminuir o aumentar la carga diaria hasta que sea igual a la carga diaria media, lo que implica que la diferencia de sus cuadrados será nula y, en consecuencia, su varianza**, obteniendo una nivelación de recursos de mano de obra **ideal**, al ser su histograma uniforme.

7. APLICACIÓN DEL ALGORITMO **MIMO**

a) Definimos el índice diario de mano de obra.

$$i = C_m^2/C_d^2$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							8	8	8	8	8	--	40
E							4	4	--	--	--	--	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									3	3	--	--	6
C_d	4	4	4	7	7	4	14	14	13	13	10	2	**96**
C_d^2	16	16	16	49	49	16	196	196	169	169	100	4	**996**
C_m	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	**96**
C_m^2	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	**768**
i	4	4	4	1,30	1,30	4	0,32	0,32	0,37	0,37	0,64	16	

b) Mantengo las cargas diarias de las actividades críticas y columnas de número índice igual a la unidad, cronológicamente y de izquierda a derecha, elijo la columna de menor número índice y de esa columna la actividad que tenga mayor holgura.

En este caso corresponde a la columna 7, fila E.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							8	8	8	8	8	--	40
E							4	4	--	--	--	--	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									3	3	--	--	6
i	4	4	4	1,30	1,30	4	0,32	0,32	0,37	0,37	0,64	16	

c) La mencionada columna dispone de una carga diaria de 14 operarios, siendo la media de 8 operarios, por lo que disminuyo la carga diaria en 6 operarios.
Para ello elimino los 4 operarios del trabajo E, que traspaso al primer día de holgura de ese trabajo, es decir al día 9.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							8	8	8	8	8	--	40
E							0	4	4	--	--	--	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									3	3	--	--	6
C_d	4	4	4	7	7	4	10	14	17	13	10	2	**96**

Con esta operación he reducido la carga diaria del día 7 a 10 operarios, por lo que aún le sobran 2 operarios para que se iguale a la carga media.
Con el fin de conseguir esa igualdad, me mantengo en la misma columna, la de menor número índice inicial y busco su intersección con la siguiente actividad de mayor holgura, que es la D.
Aunque, después de traspasar los 4 operarios, el índice del día 7 cambiará, sigo considerando el índice inicial (0,32) de la columna elegida en un principio hasta igualar la carga diaria a la media o hasta que no se pueda seguir operando con la columna elegida, a lo que llamo **"agotar el día".**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							8	8	8	8	8	--	40
E							0	4	4	--	--	--	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									3	3	--	--	6
i	4	4	4	1,30	1,30	4	0,32	0,32	0,37	0,37	0,64	16	

La casilla intersección está cargada con 8 operarios de los cuales 2 los traspaso a su primer día de holgura, al 12, con lo cual la carga de mano de obra del día 7 será de 8 operarios e igual a la carga media, habiéndose agotado el día y pasando la **actividad D a crítica**.
Derivado de la operación anterior, los índices de algunas columnas varían, como es el caso de las columnas 7, 9 y 12, siendo la distribución del Gantt de recursos, después de esta primera operación, la siguiente:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							6	8	8	8	8	2	40
E							0	4	4	--	--	--	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									3	3	--	--	6
C_d	4	4	4	7	7	4	8	14	17	13	10	4	**96**
C_d^2	16	16	16	49	49	16	64	196	289	169	100	16	**996**
C_m	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	**96**
C_m^2	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	**768**
i	4	4	4	1,30	1,30	4	1	0,32	0,22	0,37	0,64	4	

Se observa que $\sum C_d^2$ no ha variado, pasando a 1 el número índice correspondiente al día 7.

d) A partir de la nueva distribución de los recursos de mano de obra, procedo de forma análoga a lo indicado anteriormente.

Mantengo las cargas diarias de las actividades críticas y columnas de número índice igual a la unidad, cronológicamente y de izquierda a derecha, elijo la columna de menor número índice y de esa columna la actividad que tenga mayor holgura.
Elijo la columna correspondiente al día 9 (menor índice) y la fila correspondiente a la actividad E (mayor holgura).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							6	8	8	8	8	2	40
E							0	4	4	--	--	--	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									3	3	--	--	6
i	4	4	4	1,30	1,30	4	1	0,32	0,22	0,37	0,64	4	

La casilla intersección está cargada con 4 operarios que traspaso a su primer día de holgura, con lo cual la carga de mano de obra del día 9 será de 13 operarios.
Manteniendo la columna de menor índice busco la intersección con la actividad de mayor holgura. En este caso la correspondiente a la actividad G.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							6	8	8	8	8	2	40
E							0	4	4	--	--	--	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									3	3	--	--	6
i	4	4	4	1,30	1,30	4	1	0,32	0,22	0,37	0,64	4	

La casilla intersección está cargada con 3 operarios, que traspaso a su primer día de holgura, con lo cual la carga de mano de obra del día 9 será de 10 operarios, quedando agotado el día al ser el resto de actividades críticas.
En consecuencia la nueva distribución de recursos de mano de obra y sus números índices quedarán como sigue:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							6	8	8	8	8	2	40
E							0	4	0	4	--	--	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									0	3	3	--	6
C_d	4	4	4	7	7	4	8	14	10	17	13	4	**96**
C_d^2	16	16	16	49	49	16	64	196	100	289	169	16	**996**
C_m	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	**96**
C_m^2	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	**768**
i	4	4	4	1,30	1,30	4	1	0,32	0,64	0,22	0,37	4	

Se observa que $\sum C_d^2$ no ha variado.

e) Análogamente:

Columna de menor índice: la 10.
Fila de mayor holgura: la E.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							6	8	8	8	8	2	40
E							0	4	0	4	--	--	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									0	3	3	--	6
i	4	4	4	1,30	1,30	4	1	0,32	0,64	0,22	0,37	4	

La casilla intersección está cargada con 4 operarios que traspaso a su primer día de holgura, que es el 11, con lo cual la carga de mano de obra del día 10 será de 13 operarios.
Mantengo la columna de menor índice y busco la intersección con la actividad de mayor holgura. En este caso la correspondiente a la actividad G, cuya intersección está cargada con 3 operarios, que traspaso a su primer día de

holgura, es decir al 12, pasando la actividad **G a ser crítica**, habiéndose agotado el día.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							6	8	8	8	8	2	40
E							0	4	0	4	--	--	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									0	3	3	--	6
i	4	4	4	1,30	1,30	4	1	0,32	0,64	0,22	0,37	4	

La tabla de distribución y sus números índice, quedará como sigue.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							6	8	8	8	8	2	40
E							0	4	0	0	4	--	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									0	0	3	3	6
C_d	4	4	4	7	7	4	8	14	10	10	17	7	**96**
C_d^2	16	16	16	49	49	16	64	196	100	100	289	49	**960**
C_m	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	**96**
C_m^2	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	**768**
i	4	4	4	1,30	1,30	4	1	0,32	0,64	0,64	0,22	1,30	

f) Repitiendo el proceso.

Columna de menor índice: la 11.
Fila de mayor holgura: la E.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							6	8	8	8	8	2	40
E							0	4	0	0	4	--	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									0	0	3	3	6
i	4	4	4	1,30	1,30	4	1	0,32	0,64	0,64	0,22	1,30	

Cantidad a traspasar: 1 a la columna 12.
Se agota el día.
La actividad **G pasa a ser crítica.**
Nueva tabla de distribución.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∑
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							6	8	8	8	8	2	40
E							0	4	0	0	3	1	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G									0	0	3	3	6
C_d	4	4	4	7	7	4	8	14	10	10	16	8	**96**
C_d^2	16	16	16	49	49	16	64	196	100	100	256	64	**942**
C_m	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	**96**
C_m^2	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	**768**
i	4	4	4	1,30	1,30	4	1	0,32	0,64	0,64	0,25	1	

Con ello he finalizado el primer barrido del calendario o primera iteración.

Si pretendo realizar una segunda iteración o un segundo barrido del calendario, observo que no es posible, puesto que no existe intersección de columnas con filas que dispongan de holgura, a excepción de las columnas 4, 5, 6 y 7 con la fila correspondiente a la actividad B, pero el único día de holgura de la actividad B corresponde al día 7 y tiene un número índice de 1, por lo que no puede absorber ningún operario.

En consecuencia, la distribución anterior, parece ser la óptima, al no admitir ninguna iteración más. No obstante la actividad E está partida, por lo que no cumple la hipótesis de partida. Por ello no sufrirá variación con respecto a su ubicación inicial, lo que equivale a traspasar la carga con menor índice (0,25) del día 11, al índice inmediatamente superior del día 12 y esta carga total de 4 operarios al índice inmediatamente superior, que corresponde al día 7. En definitiva la tabla de distribución de recursos de mano de obra quedará de la siguiente forma:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							6	8	8	8	8	2	40
E							4	4	--	--	--	--	8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G											3	3	6
$\mathbf{C_d}$	4	4	4	7	7	4	12	14	10	10	13	7	**96**
$\mathbf{C_d^2}$	16	16	16	49	49	16	144	196	100	100	169	49	**920**
$\mathbf{C_m}$	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	**96**
$\mathbf{C_m^2}$	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	**768**
i	4	4	4	1,30	1,30	4	0,44	0,32	0,64	0,64	0,37	1,30	

La distribución anterior, al no admitir ninguna iteración más, puedo afirmar que **es óptima pero no ideal, pues esta última no existe al haber tramos ocupados SOLO por actividades críticas.**

Distribución de los recursos de mano de obra, nivelados, en función del tipo de actividades:

ACTIVIDADES	CALENDARIO												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum$
A	4	4	4										12
B				2	2	2	--						6
C				5	5								10
D							6	8	8	8	8	2	40
E							4	4	--	--			8
F						2	2	2	2	2	2	2	14
G											3	3	6
C_d^c	4	4	4	5	5	2	8	10	10	10	13	7	82
C_d^{nc}	0	0	0	2	2	2	4	4	0	0	0	0	14
C_d	4	4	4	7	7	4	12	14	10	10	13	7	**96**

En consecuencia hemos llegado a la **NIVELACIÓN ÓPTIMA DEL RECURSO DE MANO DE OBRA**, puesto que:

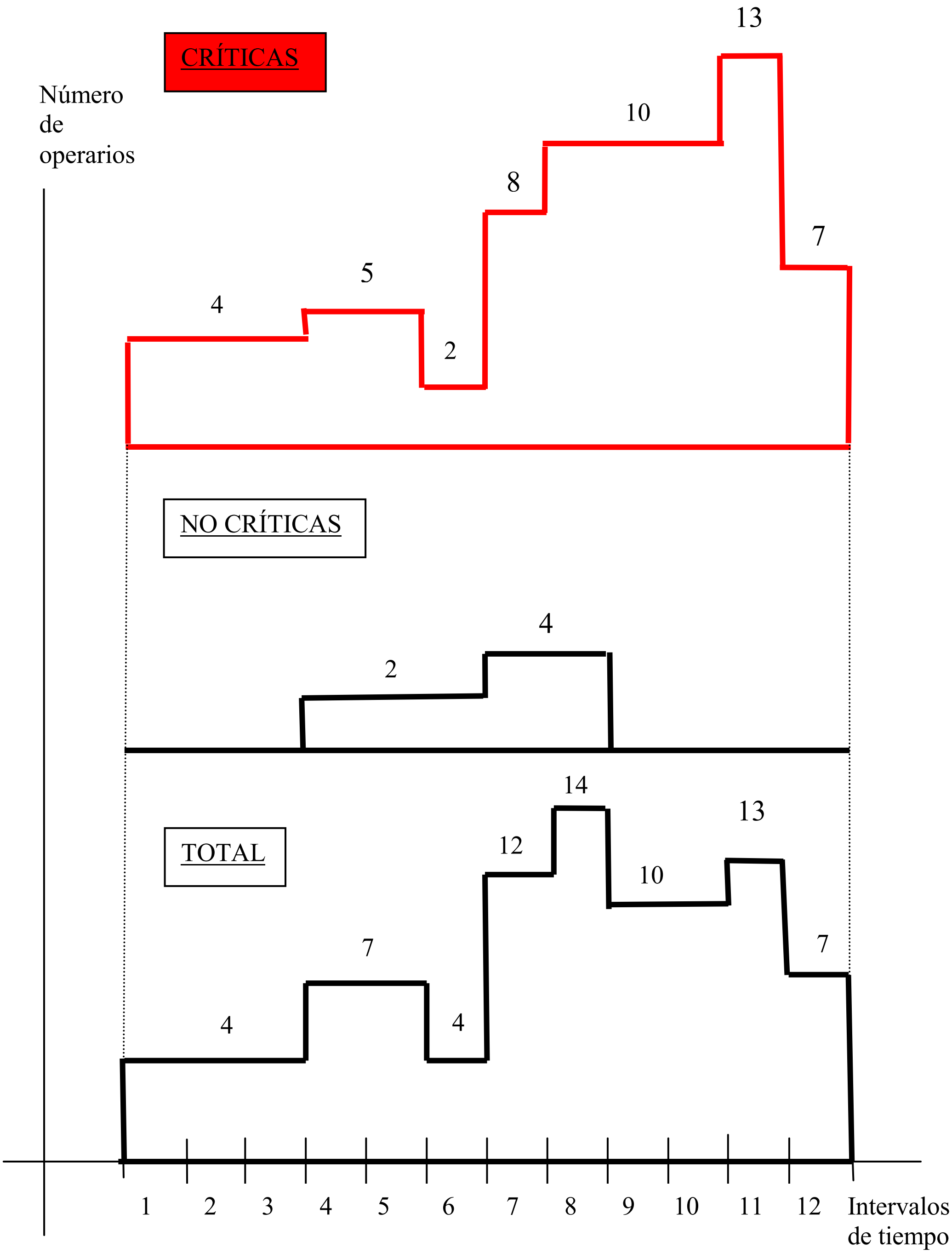
1º. **LOS NÚMEROS ÍNDICE DE TODOS LOS DIAS DEL CALENDARIO DEBEN TENER UN VALOR PRÓXIMO A 1.**

2º. LA DIFERENCIA DE LOS CUADRADOS DE LA CARGA DIARIA Y MEDIA ES LA MÍNIMA POSIBLE Y EN CONSECUENCIA SU VARIANZA.

3º. LA CARGA DIARIA DE MANO DE OBRA ES LO MÁS UNIFORME POSIBLE Y, CONSECUENTEMENTE, EL HISTOGRAMA DE CARGA TOTAL DIARIA DE MANO DE OBRA.

Por lo que los histogramas de carga de mano de obra, son los siguientes:

HISTOGRAMAS DE CARGA



8. NUEVA RED DERIVADA DE LA NIVELACIÓN

No se debe olvidar que el objetivo final es el diseño óptimo de una red a partir de una nivelación de recursos personales constante o, en este caso, lo más uniforme posible.

La nivelación de recursos de mano de obra puede modificar la duración de las actividades y, en consecuencia, sus holguras así como las relaciones de precedencias o dependencia entre los distintos trabajos.

a) Duraciones.
En este caso y por lo que se refiere a las duraciones de las actividades, la única variación corresponde a la actividad D que pasa a durar 6 días, al haber consumido su día de holgura.

b) Relaciones de precedencia.
En la red primitiva la **actividad G** comenzaba el día 8 y dependía de la actividad E. Ahora, además, comienza 10 días después de iniciarse los trabajos.
La actividad D, al pasar a crítica pasará a comenzar 1 día después de terminar C.
Si bien las relaciones de dependencia han sido modificadas, todas las modificaciones son compatibles con las primitivas al no haber superado, en ningún caso, las holguras de las actividades.

c) Holguras.
Se mantienen las holguras de las actividades B y E, **pasando a ser críticas la D y G**.

HOLGURAS INICIALES

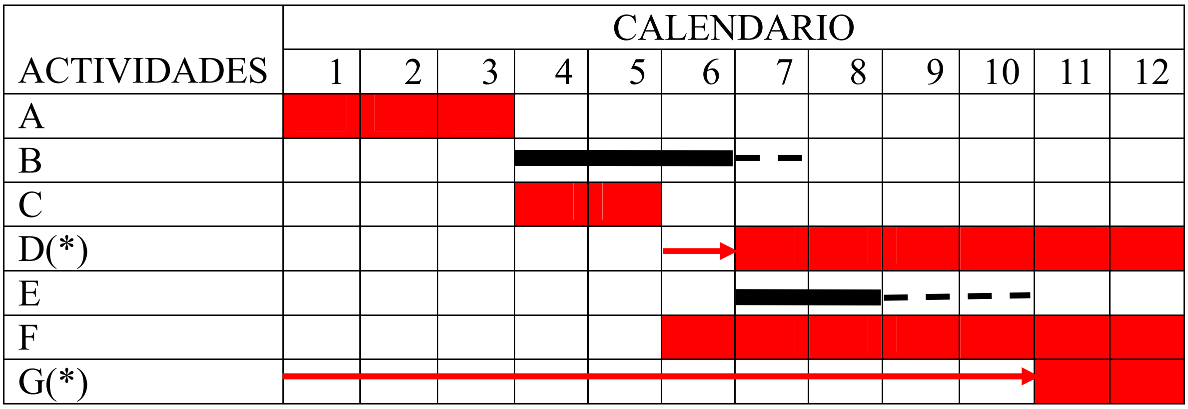
Actividad	A	B	C	D	E	F	G
Holgura total	0	1	0	1	2	0	2
Holgura libre	0	0	0	0	0	0	0

HOLGURAS FINALES

Actividad	A	B	C	D	E	F	G
Holgura total	0	1	0	0	2	0	0
Holgura libre	0	0	0	0	0	0	0

En consecuencia el diagrama de Gantt correspondiente a la red óptima, para una nivelación de recursos personales óptima, sería el siguiente:

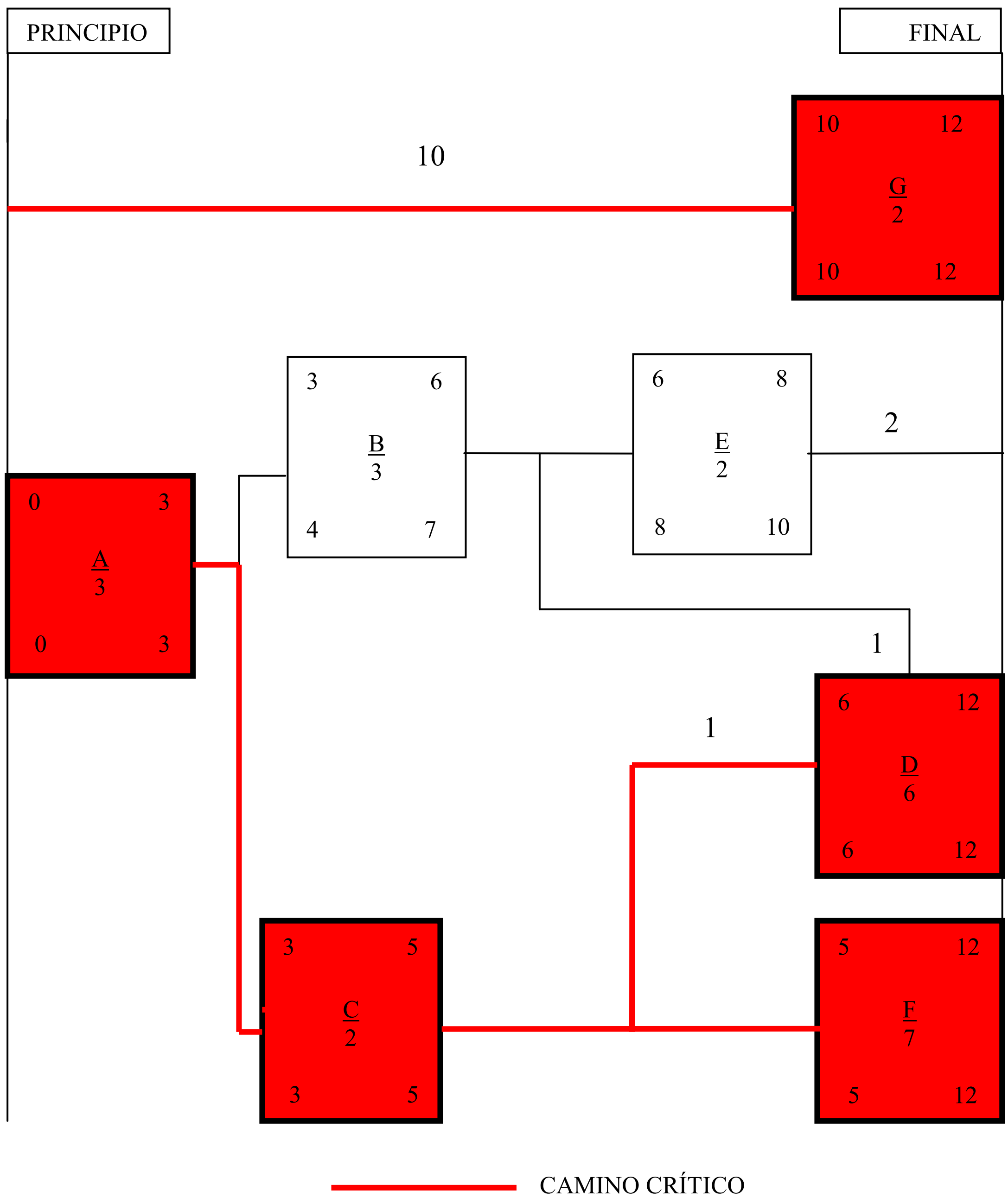
DIAGRAMA DE GANTT CORRESPONDIENTE A LA RED ÓPTIMA



(*) Se ha consumido su holgura.

Introduciendo las variaciones indicadas, tanto de holguras como de relaciones de dependencia, obtendremos la red óptima.

RED DE PRECEDENCIAS ÓPTIMA PARA UNA NIVELACIÓN DE RECURSOS DE MANO DE OBRA ÓPTIMO



CONCLUSIONES

1º. NO VARIA LA DURACIÓN DEL PROYECTO Y EN CONSECUENCIA SU PROGRAMACIÓN INICIAL.

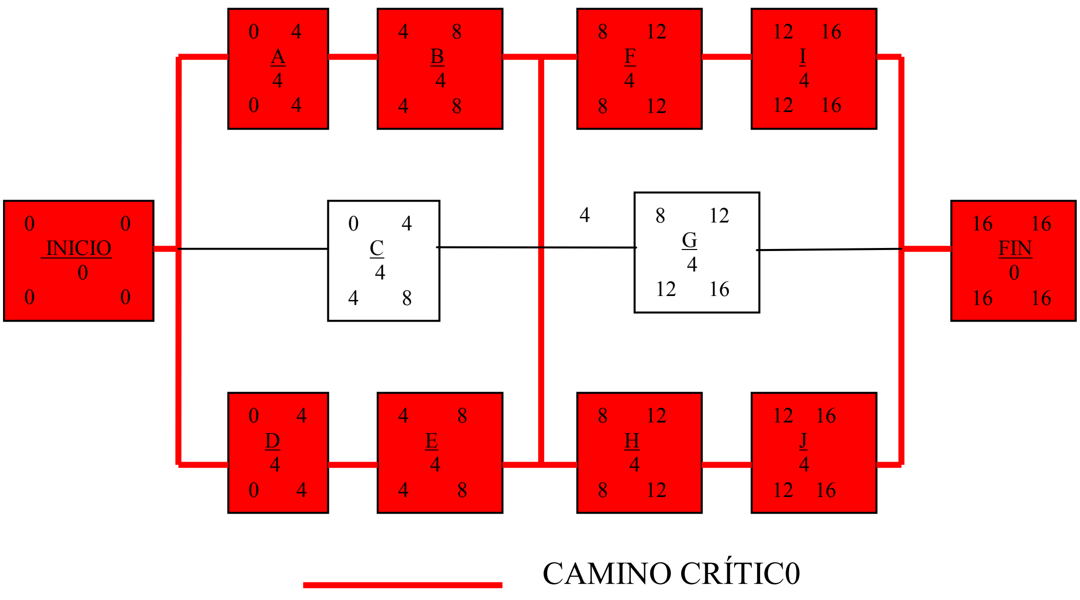
2º. AL NO VARIAR EL COSTE DE MANO DE OBRA NO CAMBIA EL COSTE DIRECTO Y EL COSTE TOTAL DE LA OBRA ES EL MÍNIMO, PUESTO QUE HE PARTIDO DE LA RED DE COSTE MÍNIMO.

CASO B

Parto de la red siguiente, cuyo coste total es mínimo y voy a obtener la programación óptima para una nivelación de recursos de mano de obra constante, siendo el número de operarios disponibles para ejecutar cada actividad los siguientes:

Actividades	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Nº de operarios	30	20	50	40	10	30	60	20	10	10

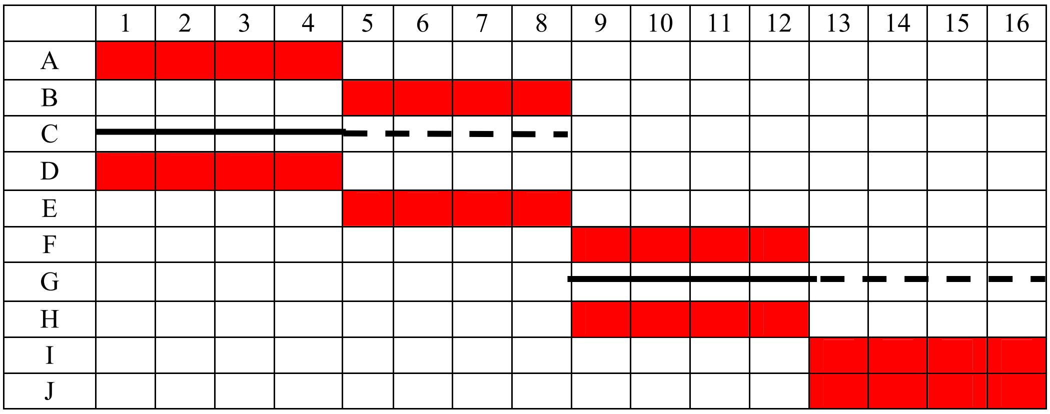
1. RED DE PARTIDA



Actividades	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Holgura total	0	0	4	0	0	0	4	0	0	0
Holgura libre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2. DIAGRAMA DE GANTT

Tiempos más pronto de comienzo
Tiempos más pronto de terminación
Holguras totales



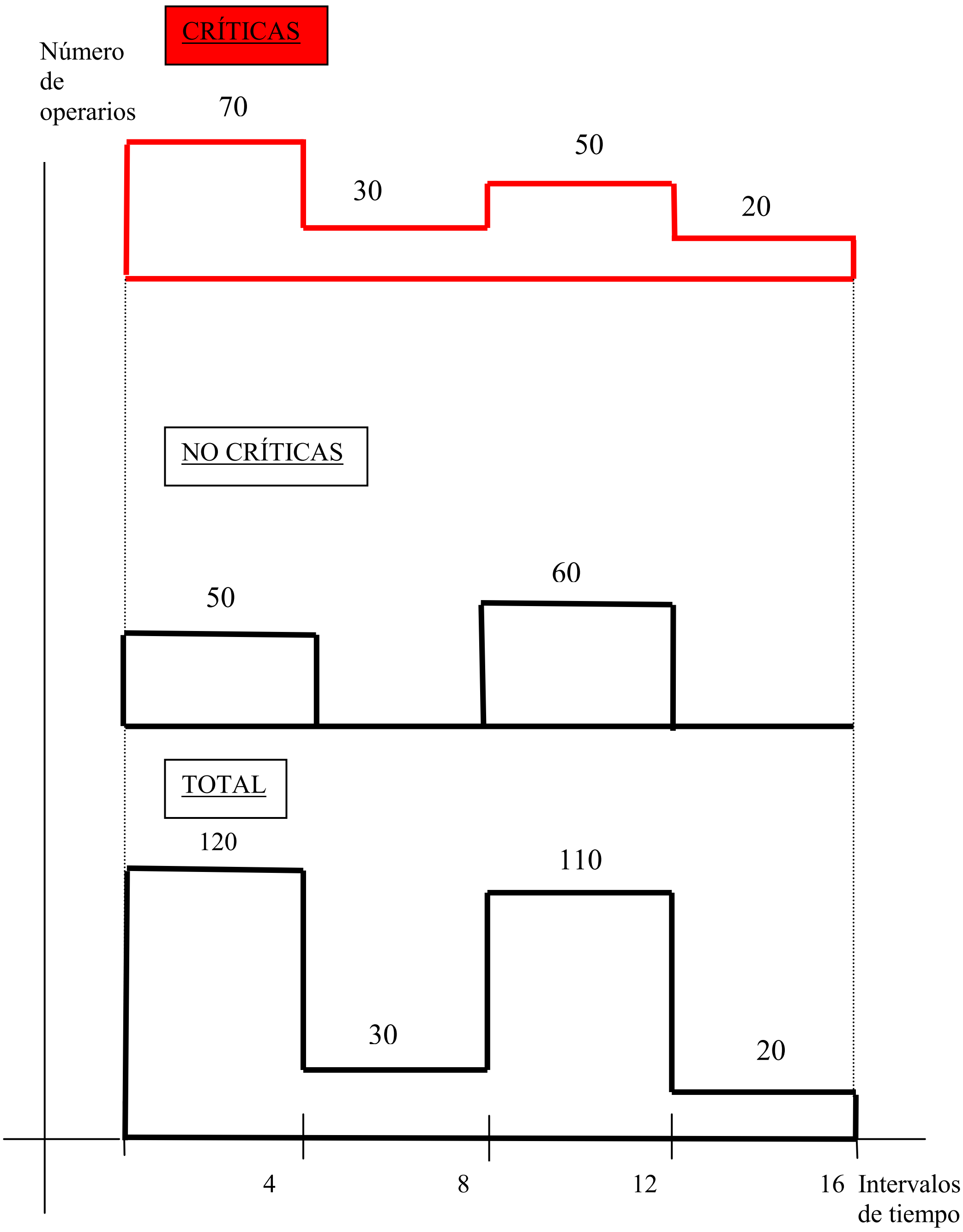
Se trata de un caso singular crítico intermedio y de final.

3. DIAGRAMA DE GANTT DE DISTRIBUCIÓN DE RECURSOS

Carga diaria de mano de obra de las actividades críticas (C_d^c)
Carga diaria de mano de obra de las actividades no críticas (C_d^{nc})
Carga diaria total de mano de obra (C_d)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\sum$
A	30	30	30	30													120
B					20	20	20	20									80
C	50	50	50	50	--	--	--	--									200
D	40	40	40	40													160
E					10	10	10	10									40
F									30	30	30	30					120
G									60	60	60	60	--	--	--	--	240
H									20	20	20	20					80
I													10	10	10	10	40
J													10	10	10	10	40
C_d^c	70	70	70	70	30	30	30	30	50	50	50	50	20	20	20	20	680
C_d^{nc}	50	50	50	50	--	--	--	--	60	60	60	60	--	--	--	--	440
C_d	120	120	120	120	30	30	30	30	110	110	110	110	20	20	20	20	1120

4. HISTOGRAMAS DE CARGA



5. CÁLCULOS PREVIOS

a) Carga media diaria de mano de obra (C_m).

$$C_m = C_R/T_E$$

Siendo:

C_R la cantidad total de recursos de mano de obra necesarios para ejecutar todos los trabajos. En el presente caso, 1120 operarios.

T_E el tiempo total programado para ejecutar todos los trabajos. En el presente caso, 16 días.

En consecuencia:

$$C_m = C_R/T_E = 1120 \text{ operarios}/16 \text{ días} = 70 \text{ operarios/día}$$

b) Suma de los cuadrados de la carga media diaria ($\sum C_m^2$).

$$\sum C_m^2 = 16 \times 70^2 = 78400$$

c) Carga diaria (C_d) y suma de los cuadrados de las cargas diarias ($\sum C_d^2$), que se indican en el siguiente cuadro.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\sum$
A	30	30	30	30													120
B					20	20	20	20									80
C	50	50	50	50	--	--	--	--									200
D	40	40	40	40													160
E					10	10	10	10									40
F									30	30	30	30					120
G									60	60	60	60	--	--	--	--	240
H									20	20	20	20					80
I													10	10	10	10	40
J													10	10	10	10	40
C_d	120	120	120	120	30	30	30	30	110	110	110	110	20	20	20	20	**1120**
C_d^2	14400	14400	14400	14400	900	900	900	900	12100	12100	12100	12100	400	400	400	400	**111200**
C_m	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	**1120**
C_m^2	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	**78400**

6. OBJETIVO

Pretendo, partiendo de la situación actual, con la distribución de recursos indicada en la tabla y en los histogramas de carga anteriores, **disminuir o aumentar la carga diaria hasta que sea igual a la carga diaria media, lo que implica que la diferencia de sus cuadrados será nula y, en consecuencia, su varianza**, obteniendo una nivelación de recursos de mano de obra **ideal**, al ser su histograma uniforme.

7. APLICACIÓN DEL ALGORITMO **MIMO**

a) Defino el índice diario de mano de obra.

$$i = C_m^2/C_d^2$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\sum$
A	30	30	30	30													120
B					20	20	20	20									80
C	50	50	50	50	--	--	--	--									200
D	40	40	40	40													160
E					10	10	10	10									40
F									30	30	30	30					120
G									60	60	60	60	--	--	--	--	240
H									20	20	20	20					80
I													10	10	10	10	40
J													10	10	10	10	40
C_d	120	120	120	120	30	30	30	30	110	110	110	110	20	20	20	20	**1120**
C_d^2	14400	14400	14400	14400	900	900	900	900	12100	12100	12100	12100	400	400	400	400	**111200**
C_m	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	**1120**
C_m^2	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	**78400**
i	0,34	0,34	0,34	0,34	5,44	5,44	5,44	5,44	0,40	0,40	0,40	0,40	12,25	12,25	12,25	12,25	

b) Mantengo las cargas diarias de las actividades críticas y columnas de número índice igual a la unidad, cronológicamente y de izquierda a derecha, elijo la columna de menor número índice y de esa columna la actividad que tenga mayor holgura.
En el presente caso, columna 1 (0,34) y fila C.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	∑
A	30	30	30	30													120
B					20	20	20	20									80
C	50	50	50	50	--	--	--	--									200
D	40	40	40	40													160
E					10	10	10	10									40
F									30	30	30	30					120
G									60	60	60	60	--	--	--	--	240
H									20	20	20	20					80
I													10	10	10	10	40
J													10	10	10	10	40
i	0,34	0,34	0,34	0,34	5,44	5,44	5,44	5,44	0,40	0,40	0,40	0,40	12,25	12,25	12,25	12,25	

c) La mencionada columna dispone de una carga diaria de 120 operarios, siendo la media de 70 operarios, por lo que disminuyo la carga diaria en 50 operarios.
Para ello eliminaremos los 50 operarios del trabajo C, que traspaso al primer día de holgura de ese trabajo, es decir al día 5.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	∑
A	30	30	30	30													120
B					20	20	20	20									80
C	0	50	50	50	50	--	--	--									200
D	40	40	40	40													160
E					10	10	10	10									40
F									30	30	30	30					120
G									60	60	60	60	--	--	--	--	240
H									20	20	20	20					80
I													10	10	10	10	40
J													10	10	10	10	40
C_d	70	120	120	120	80	30	30	30	110	110	110	110	20	20	20	20	1120

Con esta operación he reducido la carga diaria del día 1 a 70 operarios, igual a la carga media.
Derivado de la operación anterior, los índices de algunas columnas varían, como es el caso de las columnas 1 y 5, pasando a ser respectivamente, 1 y 0,76.
Repito la misma operación con las columnas 2, 3 y 4.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\sum$
A	30	30	30	30													120
B					20	20	20	20									80
C	50	50	50	50	--	--	--	--									200
D	40	40	40	40													160
E					10	10	10	10									40
F									30	30	30	30					120
G									60	60	60	60	--	--	--	--	240
H									20	20	20	20					80
I													10	10	10	10	40
J													10	10	10	10	40
i	0,34	0,34	0,34	0,34	5,44	5,44	5,44	5,44	0,40	0,40	0,40	0,40	12,25	12,25	12,25	12,25	

Con ello la nueva distribución de recursos y los nuevos números índice es la siguiente.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\sum$
A	30	30	30	30													120
B					20	20	20	20									80
C	0	0	0	0	50	50	50	50									200
D	40	40	40	40													160
E					10	10	10	10									40
F									30	30	30	30					120
G									60	60	60	60	--	--	--	--	240
H									20	20	20	20					80
I													10	10	10	10	40
J													10	10	10	10	40
C_d	70	70	70	70	80	80	80	80	110	110	110	110	20	20	20	20	**1120**
C_d^2	4900	4900	4900	4900	6400	6400	6400	6400	12100	12100	12100	12100	400	400	400	400	**95200**
C_m	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	**1120**
C_m^2	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	**78400**
i	1	1	1	1	0,76	0,76	0,76	0,76	0,40	0,40	0,40	0,40	12,25	12,25	12,25	12,25	

La actividad **C pasa a ser crítica**.

d) Siguiendo con el mismo razonamiento la columna con menor índice es la 9 (0,40) y la fila de mayor holgura la G.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	∑
A	30	30	30	30													120
B					20	20	20	20									80
C	0	0	0	0	50	50	50	50									200
D	40	40	40	40													160
E					10	10	10	10									40
F									30	30	30	30					120
G									60	60	60	60	--	--	--	--	240
H									20	20	20	20					80
I													10	10	10	10	40
J													10	10	10	10	40
i	1	1	1	1	0,76	0,76	0,76	0,76	0,40	0,40	0,40	0,40	12,25	12,25	12,25	12,25	

La casilla intersección está cargada con 60 operarios, de los cuales traspaso 40 a su primer día de holgura, que es el 13.
Análogamente hago con los días 10, 11 y 12.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	∑
A	30	30	30	30													120
B					20	20	20	20									80
C	0	0	0	0	50	50	50	50									200
D	40	40	40	40													160
E					10	10	10	10									40
F									30	30	30	30					120
G									60	60	60	60	--	--	--	--	240
H									20	20	20	20					80
I													10	10	10	10	40
J													10	10	10	10	40
i	1	1	1	1	0,76	0,76	0,76	0,76	0,40	0,40	0,40	0,40	12,25	12,25	12,25	12,25	

Con ello, la nueva distribución de recursos y sus números índices será:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	∑
A	30	30	30	30													120
B					20	20	20	20									80
C	0	0	0	0	50	50	50	50									200
D	40	40	40	40													160
E					10	10	10	10									40
F									30	30	30	30					120
G									20	20	20	20	40	40	40	40	240
H									20	20	20	20					80
I													10	10	10	10	40
J													10	10	10	10	40
C_d	70	70	70	70	80	80	80	80	70	70	70	70	60	60	60	60	**1120**
C_d^2	4900	4900	4900	4900	6400	6400	6400	6400	4900	4900	4900	4900	3600	3600	3600	3600	**79200**
C_m	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	**1120**
C_m^2	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900	**78400**
i	1	1	1	1	0,76	0,76	0,76	0,76	1	1	1	1	1,36	1,36	1,36	1,36	

La actividad **G pasa a ser crítica y en consecuencia toda la red.**

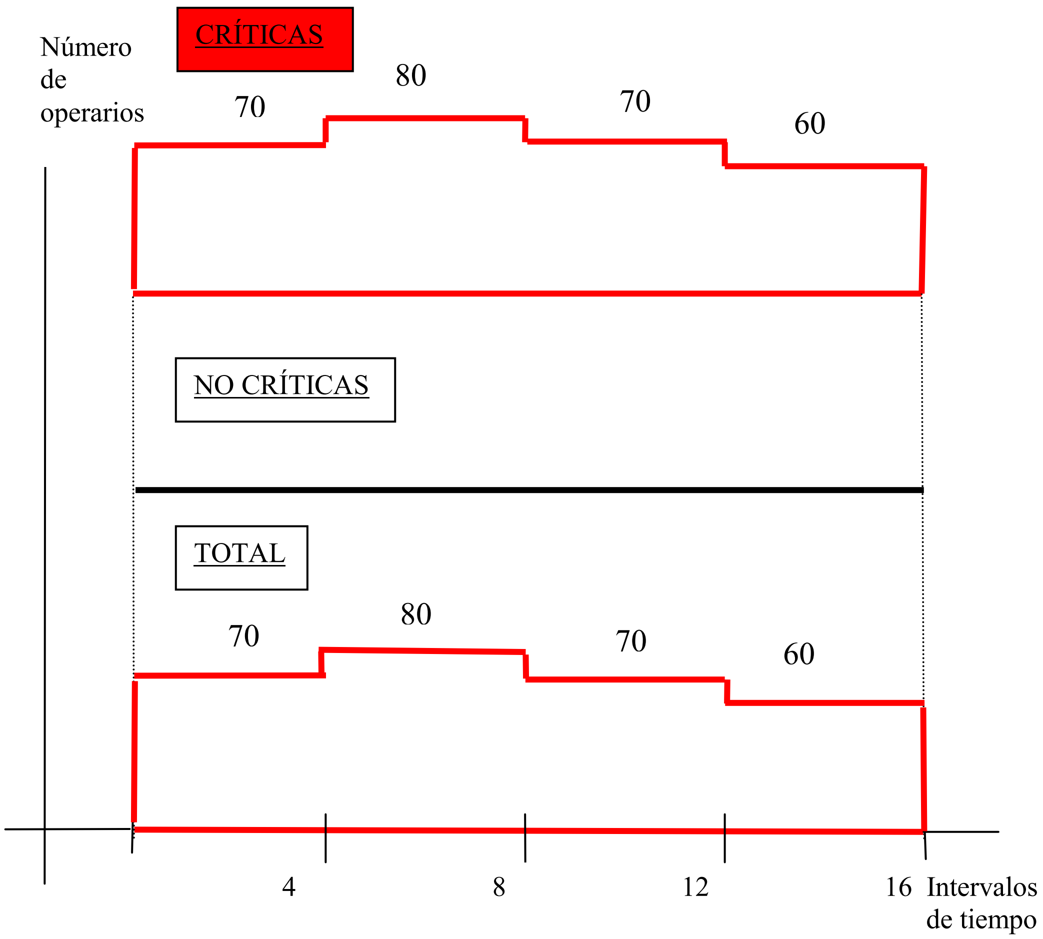
Si pretendiera hacer otro barrido del calendario o una segunda iteración, no sería posible puesto que toda la red es crítica.

En consecuencia he finalizado el proceso y la distribución definitiva de los recursos de mano de obra, nivelados es la siguiente.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\sum$
A	30	30	30	30													120
B					20	20	20	20									80
C					50	50	50	50									200
D	40	40	40	40													160
E					10	10	10	10									40
F									30	30	30	30					120
G									20	20	20	20	40	40	40	40	240
H									20	20	20	20					80
I													10	10	10	10	40
J													10	10	10	10	40
C_d^c	70	70	70	70	80	80	80	80	70	70	70	70	60	60	60	60	1120
C_d^{nc}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\mathbf{C_d}$	70	70	70	70	80	80	80	80	70	70	70	70	60	60	60	60	**1120**

Por lo que los histogramas de carga de mano de obra son los siguientes.

HISTOGRAMAS DE CARGA



En consecuencia he llegado a la **NIVELACIÓN ÓPTIMA DEL RECURSO DE MANO DE OBRA**, puesto que:

1º. **LOS NÚMEROS ÍNDICE DE TODOS LOS DIAS DEL CALENDARIO DEBEN TENER UN VALOR PRÓXIMO A 1.**

2º. LA DIFERENCIA DE LOS CUADRADOS DE LA CARGA DIARIA Y MEDIA ES LA MÍNIMA POSIBLE Y EN CONSECUENCIA SU VARIANZA.

3º. LA CARGA DIARIA DE MANO DE OBRA ES LO MÁS UNIFORME POSIBLE Y, CONSECUENTEMENTE, EL HISTOGRAMA DE CARGA TOTAL DIARIA DE MANO DE OBRA.

8. NUEVA RED DERIVADA DE LA NIVELACIÓN

No hay que olvidar que el objetivo final es el diseño óptimo de una red a partir de una nivelación de recursos personales constante o, en este caso, lo más uniforme posible.

La nivelación de recursos de mano de obra puede modificar la duración de las actividades y, en consecuencia, sus holguras así como las relaciones de precedencias o dependencia entre los distintos trabajos.

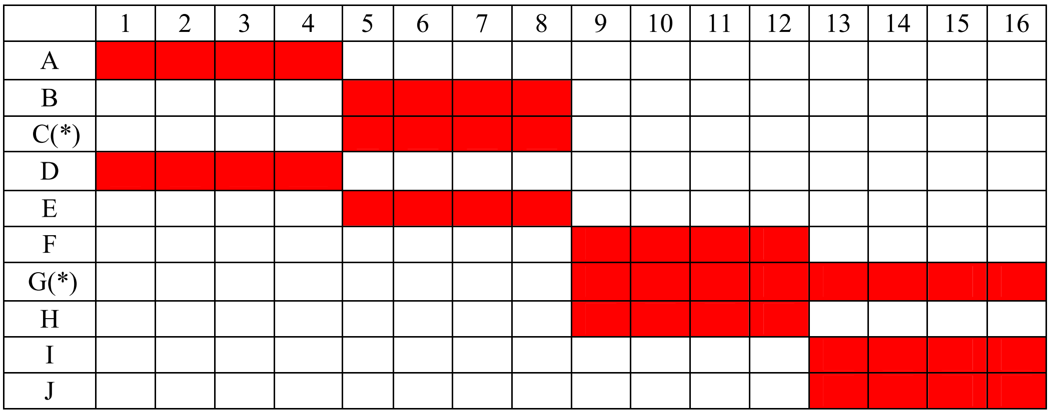
a) Duraciones.
En este caso y por lo que se refiere a las duraciones de las actividades, la única variación corresponde a la actividad G, que pasa a durar 8 días.

b) Relaciones de precedencia.
La actividad C, que era inicial, pasa a comenzar 4 días después de haberse iniciado los trabajos.
Desaparecen los 4 días que tenía que esperar G para comenzar, en relación con el final de C.
Si bien las relaciones de precedencia han sido modificadas, todas las modificaciones son compatibles con las primitivas al no haber superado, en ningún caso, las holguras de las actividades.

c) Holguras.
Todas las actividades pasan a ser críticas.

En consecuencia el diagrama de Gantt correspondiente a la red óptima, para una nivelación de recursos personales óptima, será la siguiente:

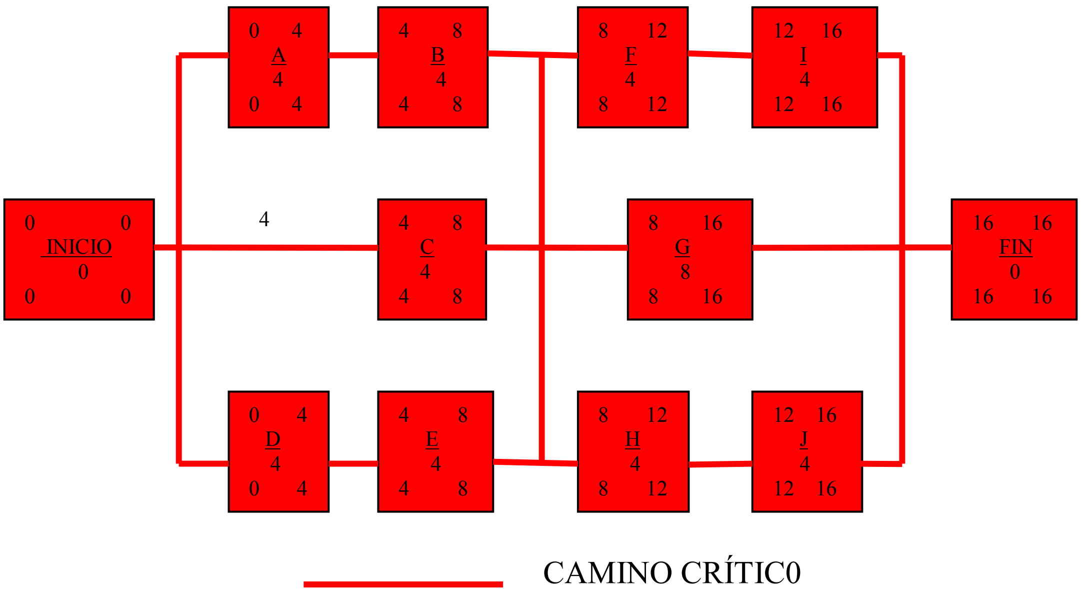
DIAGRAMA DE GANTT CORRESPONDIENTE A LA RED ÓPTIMA



(*) Se consume su holgura.

Introduciendo las variaciones indicadas, tanto de holguras como de relaciones de dependencia, obtendremos la red óptima.

RED DE PRECEDENCIAS ÓPTIMA PARA UNA NIVELACIÓN DE RECURSOS DE MANO DE OBRA ÓPTIMO



CONCLUSIONES

1º. NO VARIA LA DURACIÓN DEL PROYECTO Y EN CONSECUENCIA SU PROGRAMACIÓN INICIAL.

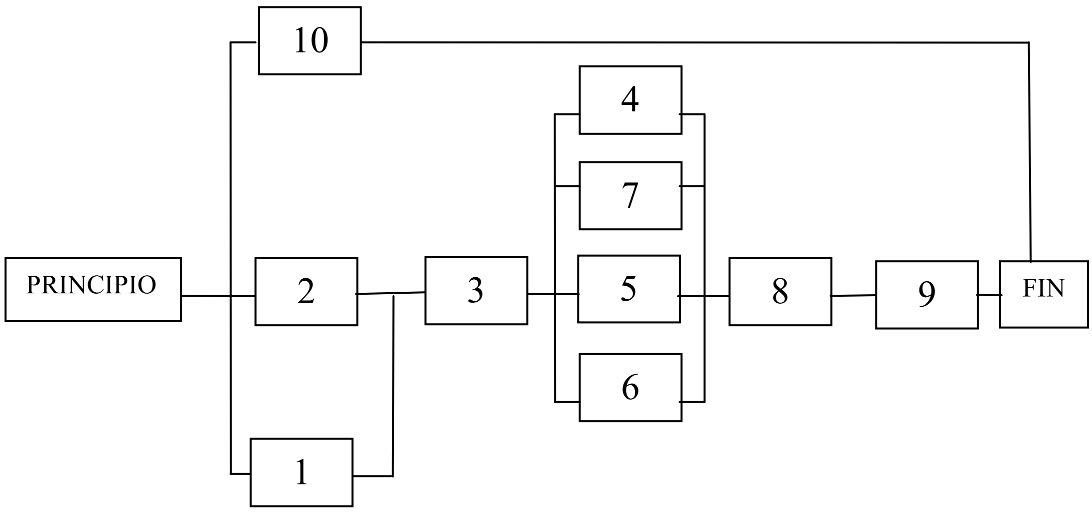
2º. AL NO VARIAR EL COSTE DE MANO DE OBRA NO CAMBIA EL COSTE DIRECTO Y EL COSTE TOTAL DE LA OBRA ES EL MÍNIMO, PUESTO QUE HE PARTIDO DE LA RED DE COSTE MÍNIMO.

CAPÍTULO 4
METODOLOGÍA GENERAL PARA SU APLICACIÓN A LA EDIFICACIÓN

Voy a proceder a exponer la metodología general para aplicar la teoría desarrollada a un edificio, tomando como base de partida una red de programación directora óptima, formada por los siguientes capítulos[18]:

1. Actuaciones previas.
2. Acondicionamiento del terreno y Cimentación.
3. Estructuras.
4. Fachadas y particiones.
5. Instalaciones.
6. Aislamientos e impermeabilización.
7. Cubierta.
8. Revestimientos.
9. Señalización y equipamiento.
10. Seguridad y Salud.

RED DIRECTORA DE PARTIDA



A partir de la red directora se pueden seguir dos caminos, en función de los objetivos que se marque el programador.

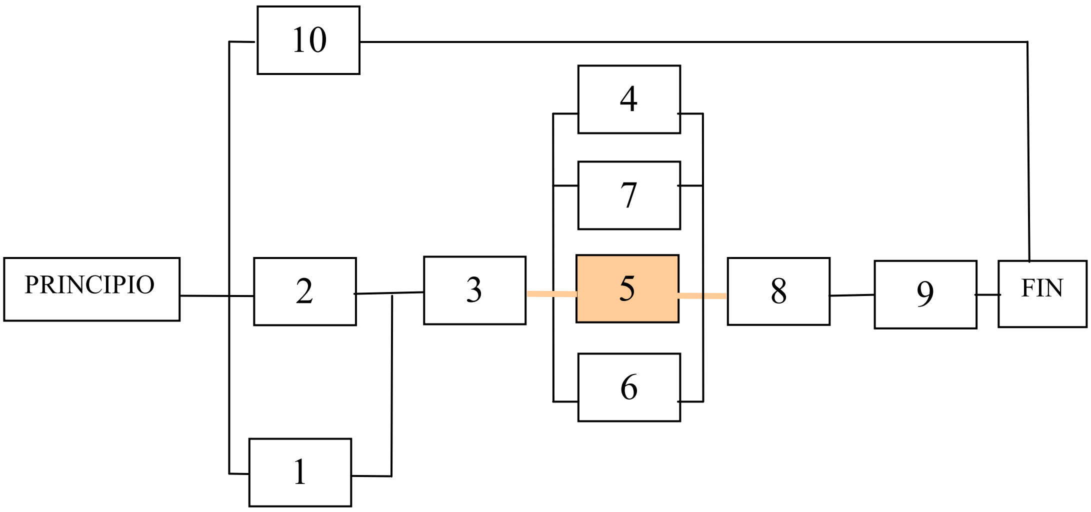
1.- Si el objetivo es **NIVELAR LA MANO DE OBRA DE UN CAPÍTULO** o parte de la obra, se procederá de la siguiente forma.

a) Se aislará de la red la parte de obra o capítulo que se quiera nivelar, creando lo que llamo un subprograma puente, que abarcará desde la fecha

---

[18] Según Base de datos de Construcción 2007/2008 de la Comunitat Valenciana. Instituto Valenciano de la Edificación.

más pronto de comienzo de la actividad o actividades con que se inicie, hasta la fecha más tarde de terminación de la actividad o actividades con que termine.
Si de la obra, cuya red directora se ha indicado anteriormente, quisiera nivelar el capítulo de instalaciones, por ejemplo, se aisla el mismo de la red directora, creando el subprograma puente Instalaciones.



Si, a su vez, del subprograma Instalaciones se quiere nivelar un oficio determinado, se van creando "subprogramas puente 1, 2, 3,…." únicamente con el oficio que se quiere nivelar su mano de obra.
Así nos aparecerá:

Subprograma puente 1. Fontanería.

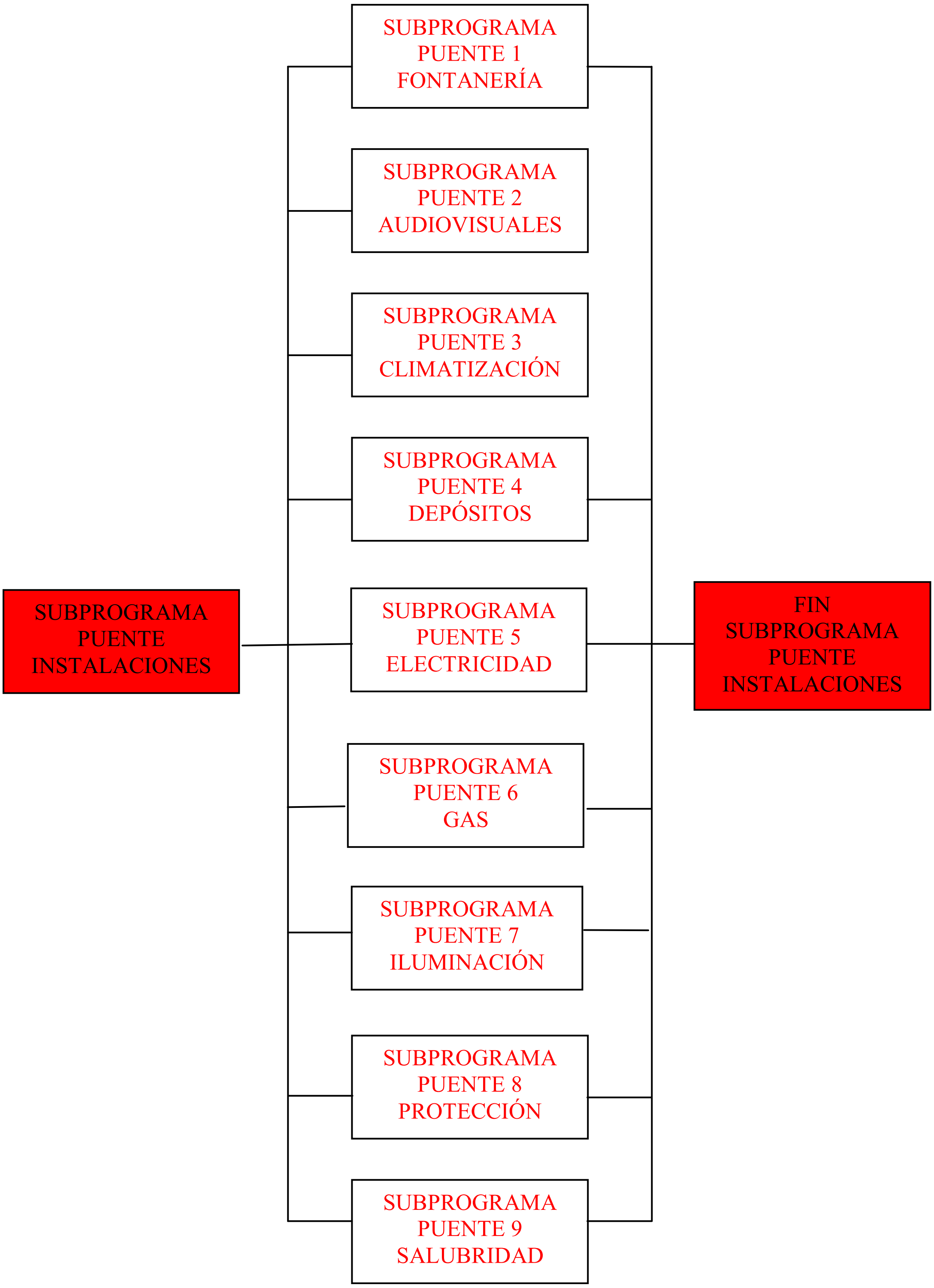
Subprograma puente 2. Audiovisuales.

Subprograma puente 3. Climatización.

Subprograma puente 4. Depósitos.

Etc., Etc.

<u>ESQUEMA DEL SUBPROGRAMA PUENTE INSTALACIONES</u>



b) Una vez aislado el subprograma puente correspondiente, su red se transformará en un Gantt equivalente, configurado por las distintas unidades de obra, cuyo calendario comenzará en la fecha más pronto de comienzo de la actividad o actividades iniciales del subprograma puente y terminará en la fecha más tarde de terminación de la actividad o actividades finales del subprograma puente.

c) En el Gantt anterior y para cada categoría de operarios intervinientes en la unidad de obra, se asignará y distribuirá, diariamente, el número de operarios que intervienen, resultando un Gantt para cada una de las categorías.

d) Se procede seguidamente a su nivelación con la aplicación del algoritmo **MIMO**.

e) Una vez nivelada la mano de obra, se procede a configurar la nueva red, con las variaciones derivadas de la nivelación, con lo que finaliza el proceso.

2.- Si el objetivo es **NIVELAR LA MANO DE OBRA DE TODA LA RED DIRECTORA. TOTALIDAD DE LA OBRA.**

Podemos acometer el problema de dos formas:

1.- Operando según lo descrito en el apartado anterior, considerando cada capítulo como un subprograma puente, para finalizar ensamblándolos todos.

2.- Acometiendo toda la obra, a partir de la programación de la totalidad de la red directora.

En este caso procederemos de la siguiente forma:

a) La programación óptima correspondiente a la red directora, se pasa a un gráfico de Gantt equivalente, con indicación de todas las unidades de obra a ejecutar.

c) En el Gantt anterior y para cada categoría de operarios intervinientes en la unidad de obra, se asignará y distribuirá, diariamente, el número de operarios que intervienen, resultando un Gantt para cada una de las categorías.

d) Se procede seguidamente a su nivelación con la aplicación del algoritmo **MIMO**.

e) Una vez nivelada la mano de obra, se procede a configurar la nueva red, con las variaciones derivadas de la nivelación, con lo que finaliza el proceso.

Se recomienda la primera forma por las siguientes razones:

1.- Mayor operatividad.

2.- Mayor practicidad.

3.- Más facilidad en el manejo de la documentación que se genera.

4.- Mayor claridad en la información.

CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES

La investigación desarrollada la finalizo con una exposición de las conclusiones, a partir de los objetivos que me había marcado en un principio.

Desde inicios del siglo XX, hasta la fecha, la problemática de los recursos ha sido ampliamente estudiada, y en concreto la de los recursos humanos o personales en su sentido más amplio, incluido el sector de la edificación.

Se han realizado y siguen realizándose muchos y excelentes trabajos sobre la mano de obra interviniente en la Edificación, con notables aportaciones, en especial relacionadas con los rendimientos de la mano de obra, producción, productividad, métodos y sistemas para mejorar el rendimiento, distribución de recursos, etc., etc., pero más bien escasos son los trabajos y aportaciones en lo que a su nivelación ideal, definida en este trabajo, se refiere.

En la práctica cotidiana, se realiza la programación de las obras, en el mejor de los casos y especialmente en la pequeña y mediana empresa, partiendo de unos recursos disponibles, que se intentan distribuir lo más uniformemente posible a lo largo de la duración que nos fija la programación del proyecto, sin ningún tratamiento posterior, lo que no es suficiente para evitar los retrasos en la ejecución de los distintos trabajos, en las fechas de los hitos intermedios y consecuentemente en el tiempo final de ejecución de la obra, con los correspondientes incrementos de los costes.

Esta Tesis Doctoral, ha pretendido aportar un modelo que pueda llevarse a la práctica, para solucionar los problemas descritos anteriormente, con especial atención a la nivelación de la mano de obra, poniendo a disposición del sector de la Edificación una herramienta, novedosa, práctica, eficaz y útil.

CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

1ª. Se ha desarrollado un algoritmo heurístico llamado MÉTODO DE LOS ÍNDICES DE MANO DE OBRA (**MIMO)** que nos permite nivelar la mano de obra de una forma ideal para el caso general y óptima para casos singulares.

2ª. Se aporta la modelización y procesado del algoritmo, para el caso general y los singulares.

3ª. Se obtiene la programación ideal y óptima de la obra a partir de la nivelación de la mano de obra, según se trate de los casos generales o singulares.

CONCLUSIÓN GENERAL

SE ESTABLECE EL PROCESO PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE UNA RED DE PROGRAMACIÓN DE OBRAS DE EDIFICACIÓN, COMO CONSECUENCIA DE UNA NIVELACIÓN Y DISTRIBUCIÓN PREVIA DE RECURSOS PERSONALES CONSTANTE.

COROLARIO

La nivelación de recursos de un proyecto ha sido, es y será por siempre un problema subjetivo, un problema que nunca tendrá una solución única y que siempre estará sujeta a la subjetividad del modelador.

¿Como puede considerarse subjetiva la resolución de un problema?

Optimizar es minimizar o maximizar una función objetivo, en base a determinadas restricciones impuestas por el entorno y/o por la propia rigidez del modelo.

Y aquí radica la subjetividad, en la determinación del la función objetivo que deseamos optimizar, en determinar nuestro ideal y llevar nuestro modelo a conseguirlo. Un mismo modelo con idénticas restricciones acepta diferentes óptimos según la función objetivo que optimizamos, y viceversa, con una misma función objetivo también tendremos diferentes óptimos según las restricciones que impongamos.

En mi caso, **mi "Ideal", mi función objetivo** es conseguir una obra que se ejecute con una distribución de recursos personales constante a lo largo de toda la duración del proyecto. Y ése es el ideal que optimiza mi modelo.

No entro a valorar la bondad de mi ideal, de mi función objetivo, **SIMPLEMENTE LO CONSIGO**. Pero lo verdaderamente importante del modelo es que puede ser extrapolado a otras funciones objetivo con diferentes distribuciones ideales como pueden ser las normales, las Beta, las exponenciales, etc.

Y en ese campo espero desarrollar mis futuros proyectos de investigación.

CAPÍTULO 6
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>

ESPECÍ FICA

LIBROS

ACKOFF, R. y SASIENI, M. *"Fundamentos de la investigación de operaciones"*. Limusa-Wiley. Méjico, 1971.

BATTERSBY, A. *"Planificación y programación de proyectos complejos"*. Ariel. Barcelona, 1970.

BENSON, B. *"Métodos de ruta crítica para construcción de edificios"*. C.E.C.S.A. Méjico, 1974.

CARVAJAL, E. *"Uniproducto o multiproducto"*. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla y Las Palmas. Sevilla, 1992.

CARVAJAL, E. *"El redimensionado de coste en arquitectura. Modelos P2CT y P2CR"*. Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía. Sevilla, 1992.

CARVAJAL, E. *"Las funciones básicas de la* producción *en la construcción"*. Centro Internacional para la Conservación del Patrimonio. CICOP. Sevilla, 2001.

ESCUDERO, L.F. *"Asignación óptima de recursos"*. Deusto. Bilbao, 1977.

FERNÁNDEZ, J.M. *"Economía y gestión de la empresa"*. ICE. Madrid, 1981.

HARRIS, F. y Mc CAFFER, R.*"Modern Construction Management"*. BSP. PROFESSIONAL BOOKS. Oxford, 1989.

HARRIS, R. *"Procedence and arrow networking techniques for construcción"*. J. Willey. LIMUSA. Méjico, 1983.

KAUFMANN, A. y DESBAZEILLE, G. *"Método del camino crítico"*. Sagitario. Barcelona, 1965.

LOVA, A. y TORMOS, P. *"Gestión de Proyectos: Algoritmos y Software"*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 1999.

MAROTO, C. y TORMOS, P. *“Técnicas de programación y control de proyectos: Prácticas”.*Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 1992.

MARTINO, R.L. *“Asignación y programación de recursos, administración y control de proyectos”*. Editora Técnica. Méjico, 1967.

MATEOS, J. *“La Programación en la Construcción”.* Bellisco. Madrid, 2003.

MEDINA, F.J. *“Técnicas de redes. Tomo I”*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 1997.

O´BRIEN, J. *“CPM in Construction Management”*. Mc GRAW-HILL. Nueva York, 1965.

OLIVER, J. *“Planificación y Programación de obras”*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 1994.

ORTIGUEIRA, M. *“Programación Reticular”*. ICE. Madrid, 1976.

SANTANA, G. *“Planificación y control de obras de construcción”*. Paraninfo. Madrid, 1988.

ROMERO, C. *“Técnicas de Programación y Control de Proyectos”*. Pirámide. Madrid, 2002.

THOMPSON, P. *“Organisation and Economics of construction”*. McGRAW-HILL. Londres, 1981.

WIEST, J.D. y LEVY, F. *“Técnicas PERT y CPM”*. Paraninfo. Madrid, 1972.

ARTÍCULOS

CARVAJAL, E. *“Consideraciones sobre los recursos para el proceso productivo obra”*. Revista Aparejadores del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla, nº 14, 1984.

CAÑAS, J.A. y DIOS, R. *“Una nota sobre la corrección de holguras en la nivelación de recursos”*. Revista Estadística Española, nº 106, 1985.

COMPANYS, R. *“Programación y control de proyectos con recursos limitados”*. Revista de Estudios Empresariales, nº 2, 1965.

ROMERO, C. *"Compromiso óptimo en la ejecución de Proyectos"*. Revista de Economía Política, nº 74, 1976.

TESIS DOCTORALES

MARTÍNEZ, E. *"Introducción de penalizaciones de giro en los problemas de rutas por arcos sobre grafos mixtos"*. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Matemática Aplicada, 2002.

QUINTANILLA, M. *"Técnicas exactas y heurísticas para la asignación de una plantilla de trabajadores a una planificación establecida"*. Universitat de València. Departament d´Estadística i Investigació Operativa, 1994.

SOLER FERNÁNDEZ, D. *"Problemas de rutas por arcos con giros prohibidos.* Universitat de València. Departament d´Estadística i Investigació Operativa, 1995.

TORMOS, P. *"Programación de Proyectos con Recursos Limitados: Técnicas Heurísticas basadas en Reglas de Prioridad".* Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Estadística e Investigación Operativa, 1996.

OTRA BIBLIOGRAFÍA

ECO, H. *"Cómo se hace una tesis: técnicas y procedimientos de estudio, investigación y escritura"*. Gedisa. Barcelona, 1992.

PRATS, J. *"Técnicas y recursos para la elaboración de Tesis Doctorales: Bibliografía y orientaciones metodológicas".* Universitat de Barcelona. Departament de Didàctica de les Ciències Socials, 2004.

TAMAYO Y TAMAYO, M. *"Aprender a investigar. Módulo 5. El proyecto de investigación".* ICFES. Santa Fe de Bogotá, 1999.

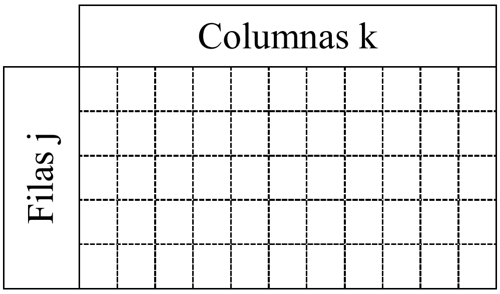
ANEXO
MODELIZACIÓN Y PROCESADO

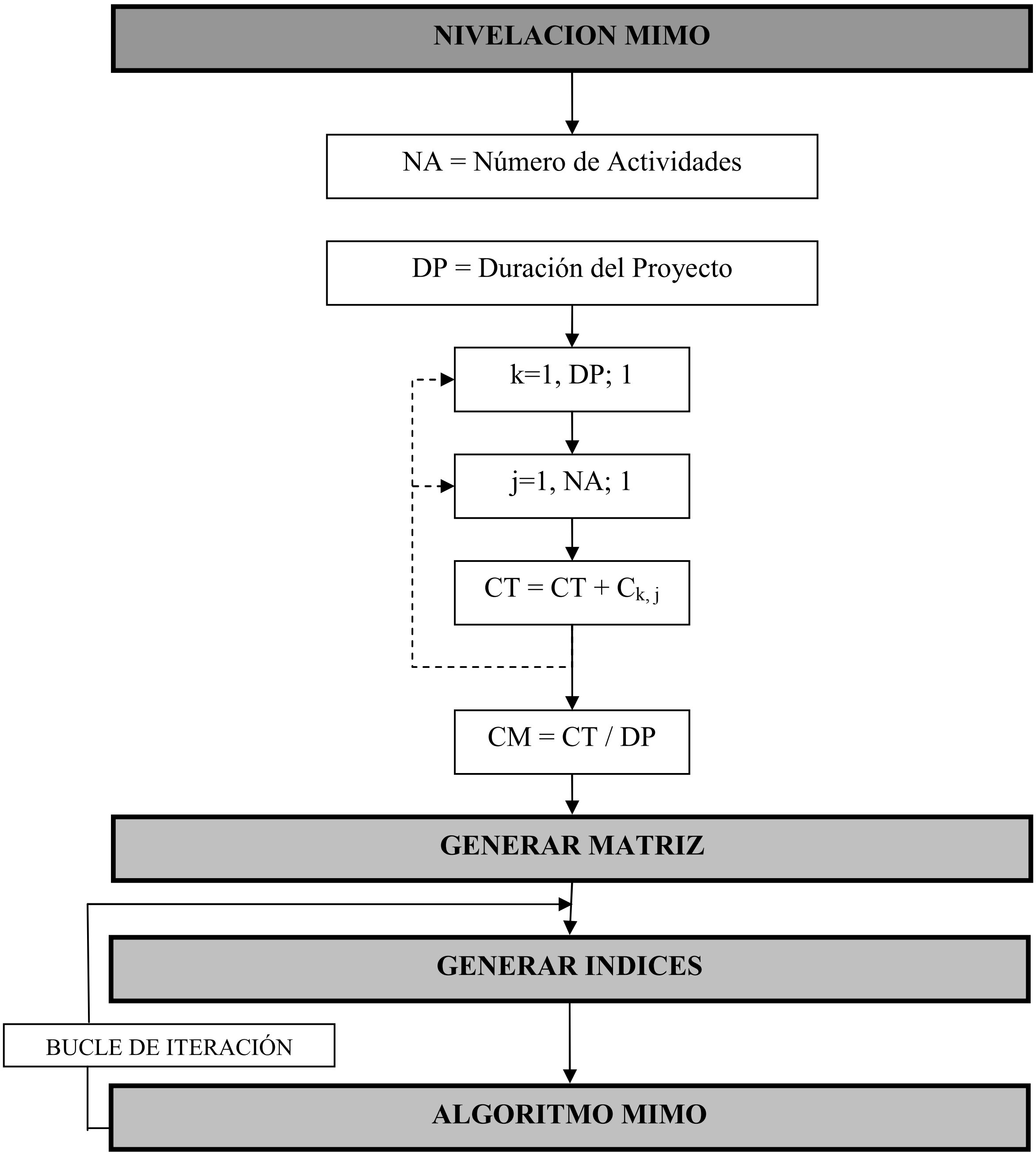
1. Diagrama de flujo.

2. Código fuente.

3. Entorno de trabajo de trabajo. Aplicación 3.

1. DIAGRAMA DE FLUJO.





GENERAR MATRIZ

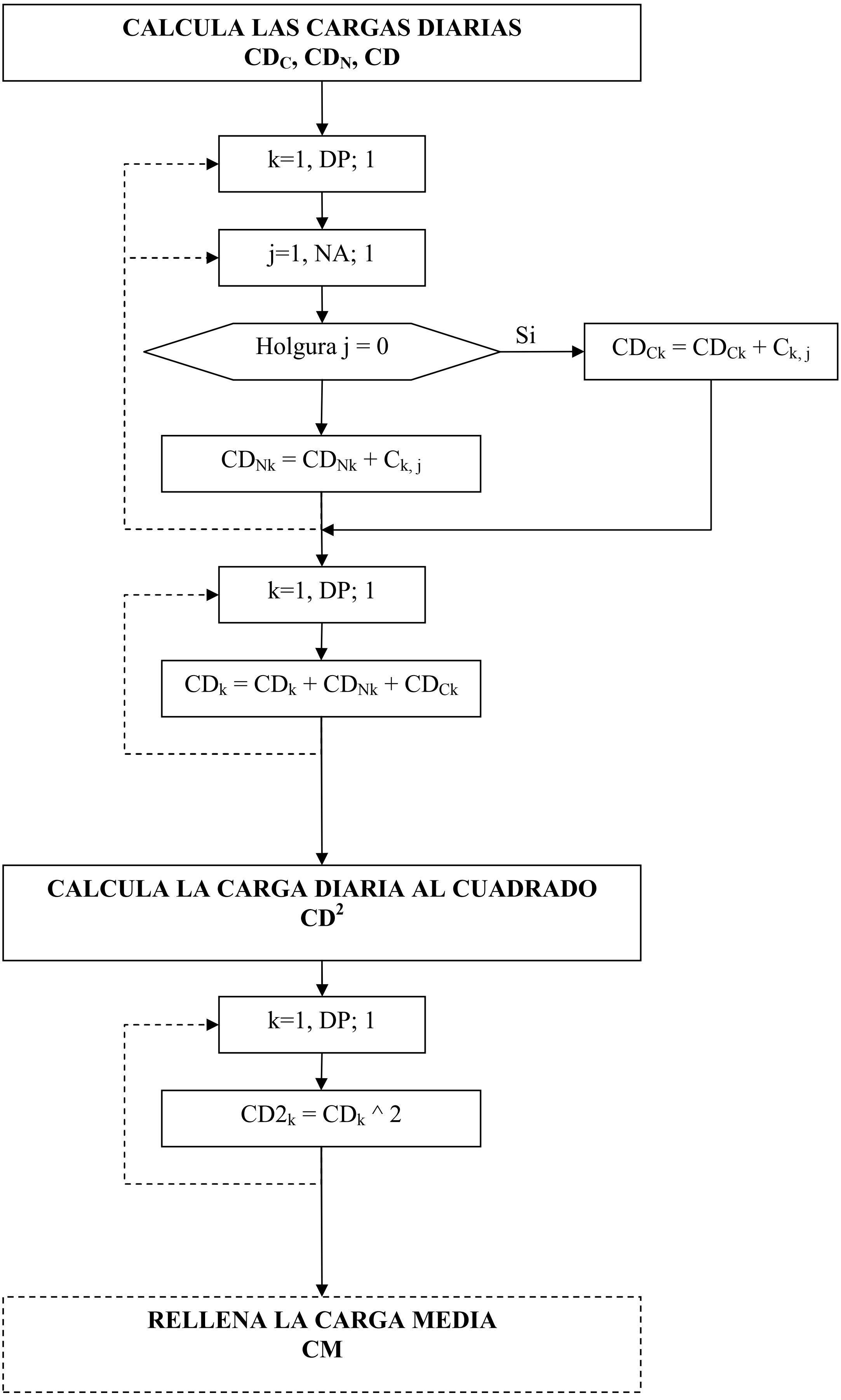
CALCULA LAS CARGAS DIARIAS
CD_C, CD_N, CD

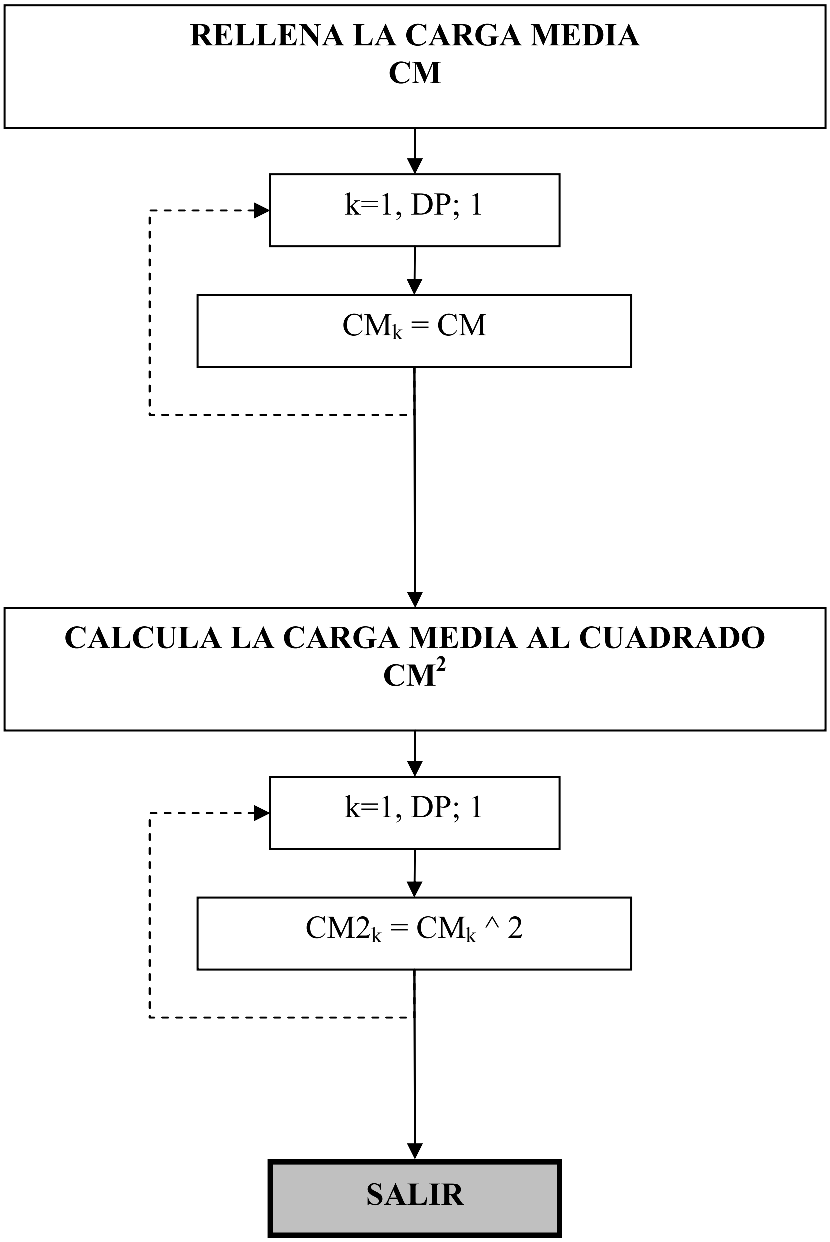
CALCULA LA CARGA DIARIA AL CUADRADO
CD^2

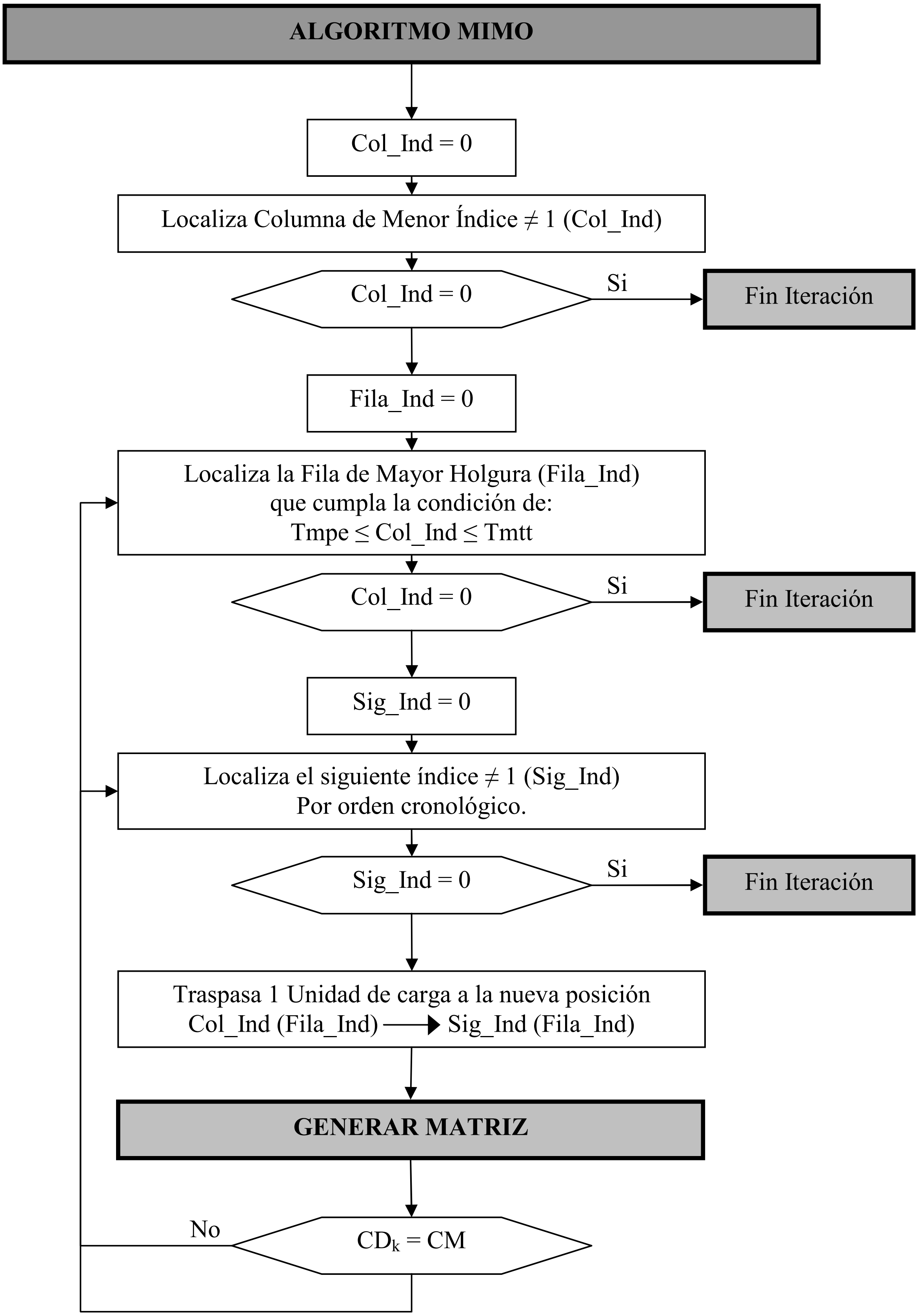
RELLENA LA CARGA MEDIA
CM

CALCULA LA CARGA MEDIA AL CUADRADO
CM^2

SALIR


CALCULA LAS CARGAS DIARIAS
CD_C, CD_N, CD
k=1, DP; 1
j=1, NA; 1
Holgura j = 0
Si
$CD_{Ck} = CD_{Ck} + C_{k, j}$
$CD_{Nk} = CD_{Nk} + C_{k, j}$
k=1, DP; 1
$CD_k = CD_k + CD_{Nk} + CD_{Ck}$
CALCULA LA CARGA DIARIA AL CUADRADO
CD^2
k=1, DP; 1
$CD2_k = CD_k$ ^ 2
RELLENA LA CARGA MEDIA
CM


RELLENA LA CARGA MEDIA
CM
k=1, DP; 1
$CM_k = CM$
CALCULA LA CARGA MEDIA AL CUADRADO
CM^2
k=1, DP; 1
$CM2_k = CM_k$ ^ 2
SALIR


ALGORITMO MIMO
Col_Ind = 0
Localiza Columna de Menor Índice ≠ 1 (Col_Ind)
Col_Ind = 0
Si
Fin Iteración
Fila_Ind = 0
Localiza la Fila de Mayor Holgura (Fila_Ind)
que cumpla la condición de:
Tmpe ≤ Col_Ind ≤ Tmtt
Col_Ind = 0
Si
Fin Iteración
Sig_Ind = 0
Localiza el siguiente índice ≠ 1 (Sig_Ind)
Por orden cronológico.
Sig_Ind = 0
Si
Fin Iteración
Traspasa 1 Unidad de carga a la nueva posición
Col_Ind (Fila_Ind) → Sig_Ind (Fila_Ind)
GENERAR MATRIZ
No
CDk = CM

2. CÓDIGO FUENTE.

```
Imports System.Math
Public Class Form1
Dim Duracion_Maxima As Integer
Dim Carga_Media As Integer
Dim Ancho_Gantt = 30
Dim Calcular_Indices As Integer = 1
Dim Nombre_Archivo As String
Dim Respuesta As MsgBoxResult
Private Sub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.
EventArgs) Handles MyBase.Load
DataGridView2.Rows.Insert(0, "Carga Diaria Act. Críticas", "CD sc")
DataGridView2.Rows.Insert(1, "Carga Diaria Act. No Críticas", "CD nc")
DataGridView2.Rows.Insert(2, "Carga Diaria Total", "Cd")
DataGridView2.Rows.Insert(3, "Carga Diaria Cuadrado", "Cd2")
DataGridView2.Rows.Insert(4, "Carga Media", "Cm")
DataGridView2.Rows.Insert(5, "Carga Media Cuadrado", "Cm2")
DataGridView2.Rows.Insert(6, "Indice de carga", "i")
End Sub
Private Sub SplitContainer1_SplitterMoved(ByVal sender As System.Object,
ByVal
e As System.Windows.Forms.SplitterEventArgs) Handles SplitContainer1.
SplitterMoved
SplitContainer3.SplitterDistance = SplitContainer1.SplitterDistance
End Sub
Private Sub SplitContainer3_SplitterMoved(ByVal sender As Object, ByVal e
As
System.Windows.Forms.SplitterEventArgs) Handles
SplitContainer3.SplitterMoved
SplitContainer1.SplitterDistance = SplitContainer3.SplitterDistance
End Sub
Private Sub SplitContainer2_SplitterMoved(ByVal sender As Object, ByVal e
As
System.Windows.Forms.SplitterEventArgs) Handles
SplitContainer2.SplitterMoved
DataGridView2.Columns(0).Width = SplitContainer2.SplitterDistance -
DataGridView2.RowHeadersWidth - 52
End Sub
Private Sub GenerarToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object,
ByVal e As System.EventArgs) Handles GenerarToolStripMenuItem.Click
Dim i As Integer
Dim Carga_Total As Integer
Call Generar_Gantt()
' Calcula la carga media diaria
For i = 1 To DataGridView1.RowCount
Carga_Total = Carga_Total + DataGridView1.Item(4, i - 1).Value *
```

```
DataGridView1.Item(2, i - 1).Value
Next
Carga_Media = Carga_Total / Duracion_Maxima
Call Rellena_Tabla_MIMO()
Call Rellena_Tabla_MIMO_Indices()
End Sub
Sub Generar_Gantt()
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Duracion_Maxima = 0
If DataGridView1.RowCount = 1 Then Beep() : Exit Sub
For i = 1 To DataGridView1.RowCount - 1
Duracion_Maxima = Max(Duracion_Maxima, DataGridView1.Item(2, i - 1).
Value + DataGridView1.Item(3, i - 1).Value + DataGridView1.Item(5, i -
1).Value-1)
Next
DataGridView3.ColumnCount = Duracion_Maxima
DataGridView3.RowCount = DataGridView1.RowCount
DataGridView3.ColumnHeadersHeightSizeMode =
DataGridViewColumnHeadersHeightSizeMode.DisableResizing
DataGridView3.AllowUserToResizeRows = False
DataGridView3.ReadOnly = True
DataGridView3.RowHeadersVisible = False
DataGridView3.Update()
' Limpia la Matriz
For i = 1 To Duracion_Maxima
For j = 1 To DataGridView3.RowCount
DataGridView3.Item(i - 1, j - 1).Value = ""
DataGridView3.Item(i - 1, j - 1).Style.BackColor = Color.White
Next
Next
For i = 1 To DataGridView1.RowCount
' Define el Calendario
For j = 1 To Duracion_Maxima
DataGridView3.Columns(j - 1).HeaderText = Str(j)
DataGridView3.ColumnHeadersDefaultCellStyle.Alignment =
DataGridViewContentAlignment.MiddleCenter
DataGridView3.Columns(j - 1).Width = Ancho_Gantt
Next
' Define las Cargas
For j = DataGridView1.Item(3, i - 1).Value To DataGridView1.Item(2, i - 1).
Value + DataGridView1.Item(3, i - 1).Value + DataGridView1.Item(5, i -
1).Value -1
DataGridView3.Item(j - 1, i - 1).Style.Alignment =
DataGridViewContentAlignment.MiddleRight
Select Case DataGridView1.Item(5, i - 1).Value
Case 0
```

```
DataGridView3.Item(j - 1, i - 1).Style.BackColor = Color.Red
Case Else
Select Case j
Case Is < DataGridView1.Item(2, i - 1).Value + DataGridView1.Item
(3, i - 1).Value
DataGridView3.Item(j - 1, i - 1).Style.BackColor = Color.Blue
Case Else
DataGridView3.Item(j - 1, i - 1).Style.BackColor = Color.
LightBlue
End Select
End Select
Select Case j
Case Is < DataGridView1.Item(2, i - 1).Value + DataGridView1.Item(3, i -
1).Value
DataGridView3.Item(j - 1, i - 1).Value = DataGridView1.Item(4, i - 1).
Value
Case Else
DataGridView3.Item(j - 1, i - 1).Value = "--"
End Select
Next
Next
End Sub
' ********************************************
' Comienza la Iteración del Algoritmo M.I.M.O.
' ********************************************
Private Sub OperarToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object,
ByVal e As System.EventArgs) Handles OperarToolStripMenuItem.Click
Call Rellena_Tabla_MIMO()
Call Rellena_Tabla_MIMO_Indices()
Call Algoritmo_MIMO()
End Sub
Sub Rellena_Tabla_MIMO()
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim Carga_Diaria As Integer
If DataGridView1.RowCount <= 1 Then Beep() : Exit Sub
If DataGridView3.RowCount <= 1 Then Beep() : Exit Sub
DataGridView4.ColumnCount = Duracion_Maxima
DataGridView4.RowCount = 7
DataGridView4.RowHeadersVisible = False
DataGridView4.ColumnHeadersVisible = False
' Limpia la Matriz
For i = 1 To Duracion_Maxima
For j = 1 To DataGridView4.RowCount - 1
DataGridView4.Item(i - 1, j - 1).Value = 0
DataGridView4.Item(i - 1, j - 1).Style.Alignment =
DataGridViewContentAlignment.MiddleRight
```

```
Next
Next
' establece el ancho de las Columnas
For i = 1 To Duracion_Maxima
DataGridView4.Columns(i - 1).Width = Ancho_Gantt
Next
For i = 1 To Duracion_Maxima
For j = 1 To DataGridView1.RowCount
Carga_Diaria = DataGridView1.Item(4, j - 1).Value
Select Case DataGridView3.Item(i - 1, j - 1).Style.BackColor
Case Color.Red
DataGridView4.Item(i - 1, 0).Style.ForeColor = Color.Red
DataGridView4.Item(i - 1, 0).Value = DataGridView4.Item(i - 1, 0).
Value + DataGridView3.Item(i - 1, j - 1).Value
Case Is <> Color.White
If DataGridView3.Item(i - 1, j - 1).Value.ToString <> "--" Then
If DataGridView3.Item(i - 1, j - 1).Value > 0 Then
DataGridView4.Item(i - 1, 1).Style.ForeColor = Color.Blue
DataGridView4.Item(i - 1, 1).Value = DataGridView4.Item(i - 1, 1)
.Value + DataGridView3.Item(i - 1, j - 1).Value
End If
End If
End Select
Next
Next
' Rellena Fila de carga Diaria
For i = 1 To Duracion_Maxima
DataGridView4.Item(i - 1, 2).Style.Alignment =
DataGridViewContentAlignment.MiddleRight
DataGridView4.Item(i - 1, 2).Value = DataGridView4.Item(i - 1, 0).Value +
DataGridView4.Item(i - 1, 1).Value
Next
' Rellena Fila de carga Diaria al Cuadrado
For i = 1 To Duracion_Maxima
DataGridView4.Item(i - 1, 3).Style.Alignment =
DataGridViewContentAlignment.MiddleRight
DataGridView4.Item(i - 1, 3).Value = DataGridView4.Item(i - 1, 2).Value ^ 2
Next
' Rellena Fila de carga Media Diaria
For i = 1 To Duracion_Maxima
DataGridView4.Item(i - 1, 4).Style.Alignment =
DataGridViewContentAlignment.MiddleRight
DataGridView4.Item(i - 1, 4).Value = Carga_Media
Next
' Rellena Fila de carga Media Diaria al Cuadrado
For i = 1 To Duracion_Maxima
DataGridView4.Item(i - 1, 5).Style.Alignment =
```

```
DataGridViewContentAlignment.MiddleRight
DataGridView4.Item(i - 1, 5).Value = DataGridView4.Item(i - 1, 4).Value ^ 2
Next
DataGridView4.Refresh()
End Sub
Sub Rellena_Tabla_MIMO_Indices()
Dim i As Integer
If DataGridView1.RowCount <= 1 Then Exit Sub
If DataGridView3.RowCount <= 1 Then Exit Sub
' Rellena Fila del Indice diaro de Mano de Obra
For i = 1 To Duracion_Maxima
DataGridView4.Item(i - 1, 6).Style.Alignment =
DataGridViewContentAlignment.MiddleRight
DataGridView4.Item(i - 1, 6).Value = FormatNumber(DataGridView4.Item(i - 1
, 5).Value / DataGridView4.Item(i - 1, 3).Value, 2)
Next
DataGridView4.Refresh()
End Sub
Sub Algoritmo_MIMO()
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim Indice As Double = 1 * 10 ^ 100
Dim Indice_2 As Double = 0
Dim Inicio As Integer
Dim Holgura As Integer
Dim Fin As Integer
Dim Col_Indice As Integer = 0
Dim Posición_siguiente_indice As Integer
Dim Fila_Indice As Integer
Dim Holgura_Maxima As Integer = 0
Dim Carga_Diaria As Integer
If DataGridView1.RowCount <= 1 Then Exit Sub
If DataGridView3.RowCount <= 1 Then Exit Sub
DataGridView4.Refresh()
' ***********************************
' Localiza la Columna de menor indice
' ***********************************
For i = 1 To Duracion_Maxima
If Indice > DataGridView4.Item(i - 1, 6).Value Then
Indice = DataGridView4.Item(i - 1, 6).Value
' Guarda el menor indice
Col_Indice = i
End If
Next
If Col_Indice = 0 Then Exit Sub
Do
' *****************************************************
```

```
' Localiza la Fila de mayor Holgura de la columna indice
' ************************************************************
Fila_Indice = 0 : Holgura_Maxima = 0
For i = 1 To DataGridView1.RowCount
Inicio = DataGridView1.Item(3, i - 1).Value
Fin = Inicio + DataGridView1.Item(2, i - 1).Value + DataGridView1.Item(5, i
    -   1).Value – 1
If Inicio <= Col_Indice And Fin > Col_Indice Then
Holgura = 0
For j = Inicio To Fin
If DataGridView3.Item(j - 1, i - 1).Value.ToString = "--" Then
Holgura = Holgura + 1
End If
Next
' Verifica la disponibilidad de la actividad en la Columna indice
Select Case DataGridView3.Item(Col_Indice - 1, i - 1).Value.ToString
Case Is <> "0", "--"
Carga_Diaria = DataGridView4.Item(Col_Indice - 1, 2).Value
If Carga_Diaria > Carga_Media And Holgura > Holgura_Maxima
Then
Holgura_Maxima = Holgura : Fila_Indice = i
End If
End Select
End If
Next
If Fila_Indice = 0 Then Exit Do
' *******************************************************
' Localiza el siguiente indice por orden cronologico
' *******************************************************
Posición_siguiente_indice = 0
i = Col_Indice + 1
Do
If DataGridView4.Item(i - 1, 6).Value <> 1 Then
Posición_siguiente_indice = i : Exit Do
End If
If i = Fin Then i = Inicio Else i = i + 1
Loop Until i = Col_Indice
If Posición_siguiente_indice = 0 Then Exit Do
Carga_Diaria = DataGridView4.Item(Col_Indice - 1, 2).Value
Do
' **********************************************
' Traspasa 1 Ud de carga al siguiente indice
' **********************************************
If DataGridView3.Item(Col_Indice - 1, Fila_Indice - 1).Value > 0 And
Carga_Diaria > Carga_Media Then
DataGridView3.Item(Col_Indice - 1, Fila_Indice - 1).Value =
DataGridView3.Item(Col_Indice - 1, Fila_Indice - 1).Value - 1
```

```
Carga_Diaria = Carga_Diaria - 1
Select Case DataGridView3.Item(Posición_siguiente_indice - 1,
Fila_Indice - 1).Value.ToString
Case "--", "0"
DataGridView3.Item(Posición_siguiente_indice - 1, Fila_Indice - 1).
Value = 1
Case Else
DataGridView3.Item(Posición_siguiente_indice - 1, Fila_Indice - 1).
Value = DataGridView3.Item(Posición_siguiente_indice - 1, Fila_Indice -
1).Value +1
End Select
Else
Exit Do
End If
Loop
Call Rellena_Tabla_MIMO()
Loop
Call Rellena_Tabla_MIMO_Indices()
End Sub
' *********************************
' MENUS de Archivos **************
' *********************************
Private Sub AbrirToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object,
ByVal
e As System.EventArgs) Handles AbrirToolStripMenuItem.Click
Dim i As Integer
Dim Archivo As String
Dim Carga_Total As Integer
OpenFileDialog1.Filter = "Access (*.mdb)|*.mdb"
OpenFileDialog1.FileName = Nombre_Archivo
If OpenFileDialog1.ShowDialog <> Windows.Forms.DialogResult.OK Then Exit
Sub
Nombre_Archivo = OpenFileDialog1.FileName
Archivo = Mid(Nombre_Archivo, Len(Nombre_Archivo) - 7, 8)
If Archivo <> "MIMO.mdb" Then FileCopy(Nombre_Archivo, "MIMO.mdb")
Try
Me.PlanTableAdapter.Fill(Me.MIMODataSet.Plan)
Me.Text = Nombre_Archivo
Catch ex As Exception
End Try
Me.Text = Nombre_Archivo
Call Generar_Gantt()
' Calcula la carga media diaria
For i = 1 To DataGridView1.RowCount
Carga_Total = Carga_Total + DataGridView1.Item(4, i - 1).Value *
DataGridView1.Item(2, i - 1).Value
Next
```

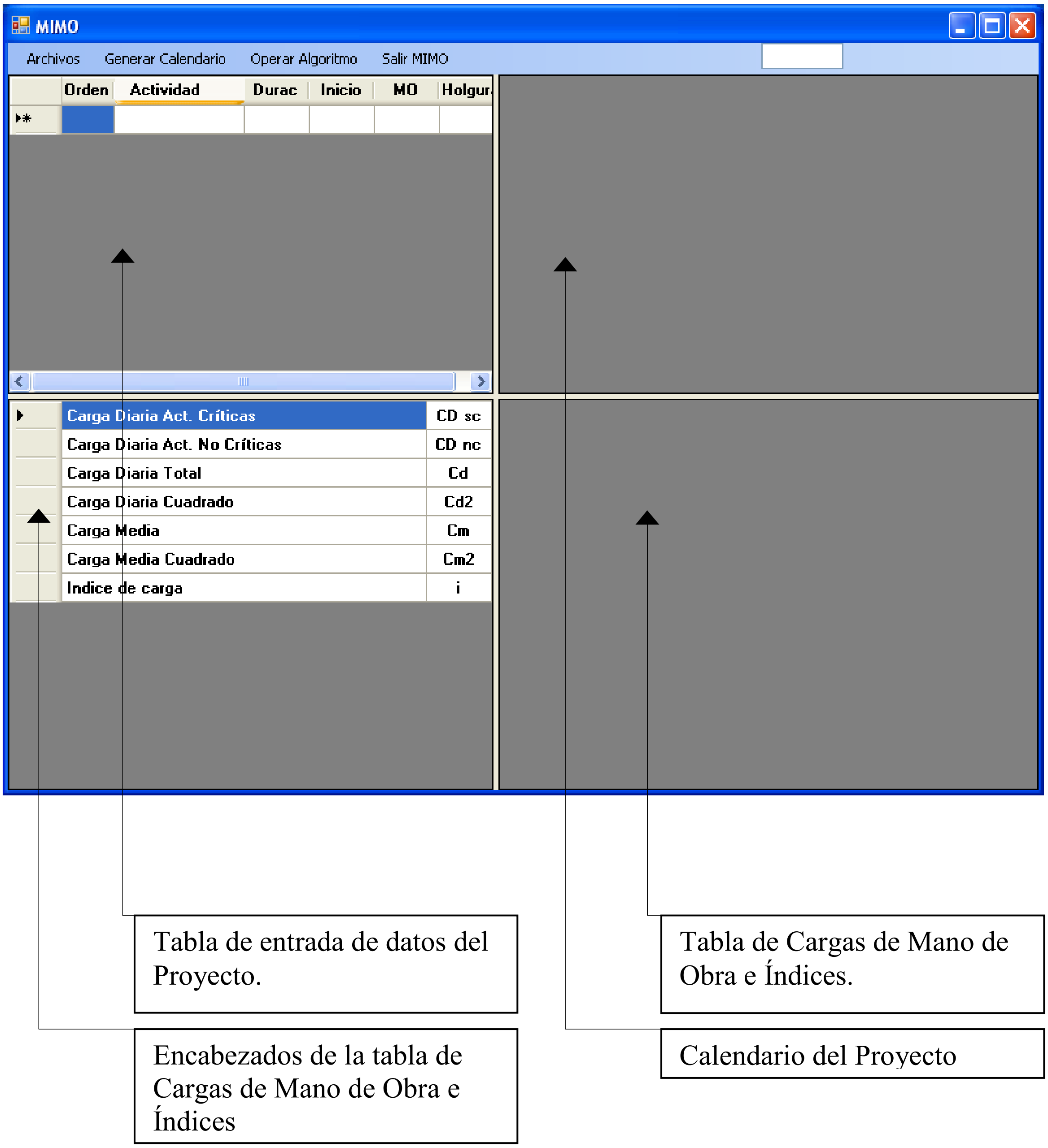
```
Carga_Media = Carga_Total / Duracion_Maxima
Call Rellena_Tabla_MIMO()
Call Rellena_Tabla_MIMO_Indices()
End Sub
Private Sub GuardarComoToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.↙
Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ↙
GuardarComoToolStripMenuItem.↙
Click↙
SaveFileDialog1.Filter = "Access (*.mdb)|*.mdb"
If SaveFileDialog1.ShowDialog = Windows.Forms.DialogResult.OK Then
Nombre_Archivo = SaveFileDialog1.FileName
Me.Text = Nombre_Archivo
Me.Validate()
Me.PlanBindingSource.EndEdit()
Me.MIMODataSet.AcceptChanges()
Try
Me.PlanTableAdapter.Update(Me.MIMODataSet.Plan)
Catch ex As Exception
MsgBox("Se ha producido el siguiente error" + Chr(13) + ex.ToString,
MsgBoxStyle.OkOnly, "Guardar")
End Try
FileCopy("MIMO.mdb", Nombre_Archivo)
MsgBox("Matriz Guardada correctamente.", MsgBoxStyle.OkOnly, "Guardar")
End If
End Sub
Private Sub SalirMIMOToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As↙
System.Object,
ByVal e As System.EventArgs) Handles SalirMIMOToolStripMenuItem.Click
Respuesta = MsgBox("Realmente quieres SALIR?", MsgBoxStyle.YesNo, ↙
"Salir")
Select Case Respuesta
Case MsgBoxResult.Yes
Me.Close()
Case MsgBoxResult.No
Exit Sub
End Select
End Sub
Private Sub NuevoToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object,↙
ByVal e As System.EventArgs) Handles NuevoToolStripMenuItem.Click
End Sub
End Class
```

Observación: ↙ indica continuidad de línea.

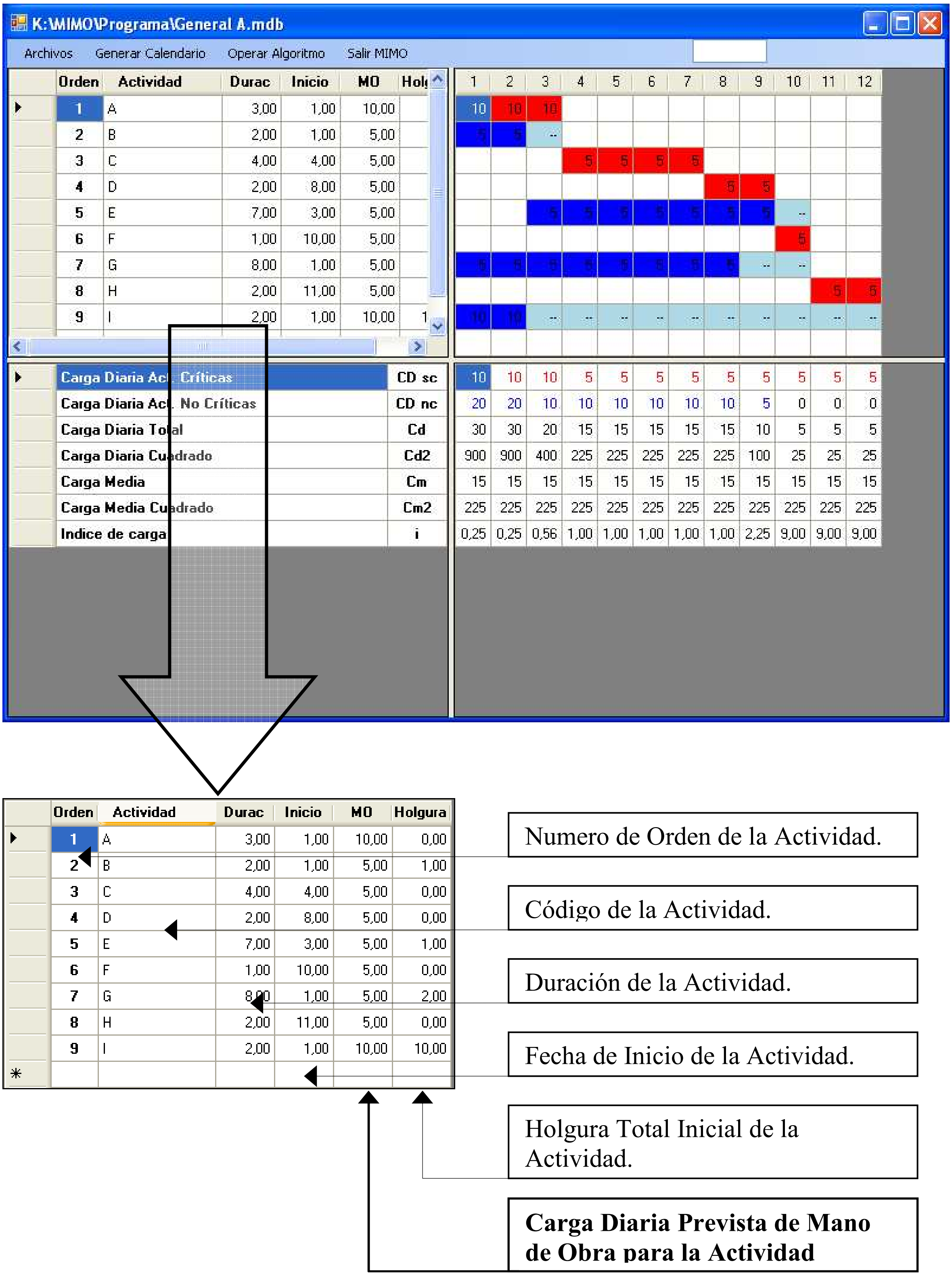
3. ENTORNO DE TRABAJO. APLICACIÓN 3.

Para la aplicación, se toma la desarrollada en "Aplicación 1. Caso A" del apartado 3.5.5.

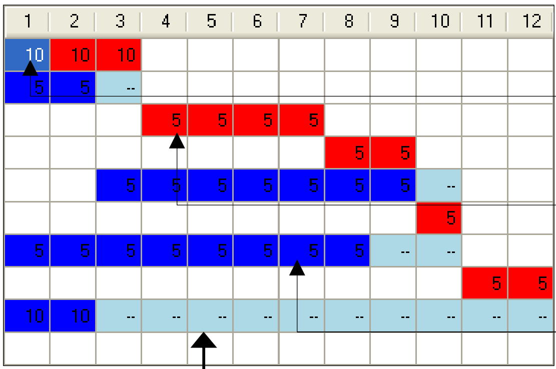
Pantalla Inicial



Caso A.



K:\MIMO\Programa\General A.mdb
Archivos
Generar Calendario
Operar Algoritmo
Salir MIMO
Carga Diaria Act. Críticas
Carga Diaria Act. No Críticas
Carga Diaria Total
Carga Diaria Cuadrado
Carga Media
Carga Media Cuadrado
Indice de carga
Orden
Actividad
Durac
Inicio
MO
Holgura
Numero de Orden de la Actividad.
Código de la Actividad.
Duración de la Actividad.
Fecha de Inicio de la Actividad.
Holgura Total Inicial de la Actividad.
Carga Diaria Prevista de Mano de Obra para la Actividad



Celda activa.

Actividad Crítica cargada con 10 Operarios en fila 3 columna 4.

Actividad NO Crítica cargada con 5 Operarios en fila 7 columna 7.

Día de Holgura Total de la Programación Inicial Optima Tiempo / Coste.

CD sc	10	10	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
CD nc	20	20	10	10	10	10	10	10		0	0	0
Cd	30	30	20	15	15	15	15	15	10	5	5	5
Cd2	900	900	400	225	225	225	225	225	100	25	25	25
Cm	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Cm2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225
i	0,25	0,25	0,56	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,25	9,00	9,00	9,00

Carga de mano de Obra de Actividades Críticas para la Columna 9

Carga de mano de Obra de Actividades NO Críticas para la Columna 7

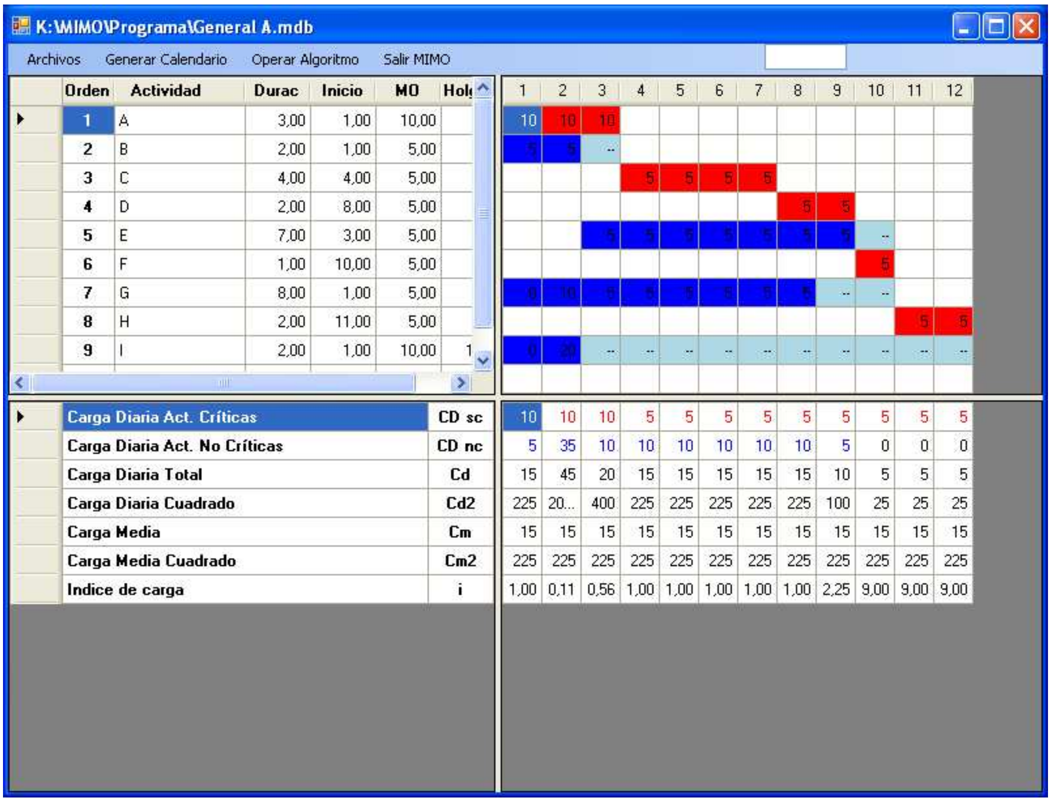
Carga de mano de Obra de Actividades Critica y NO Críticas para la Columna 6

Carga de mano de Obra de Actividades Criticas y NO Críticas al cuadrado para la Columna 5

Carga Media de mano de Obra de todas las Actividades a la que tenderemos a aproximarnos de forma asintótica.

Indice de Carga de Mano de Obra para la columna 2.

Iteración 1



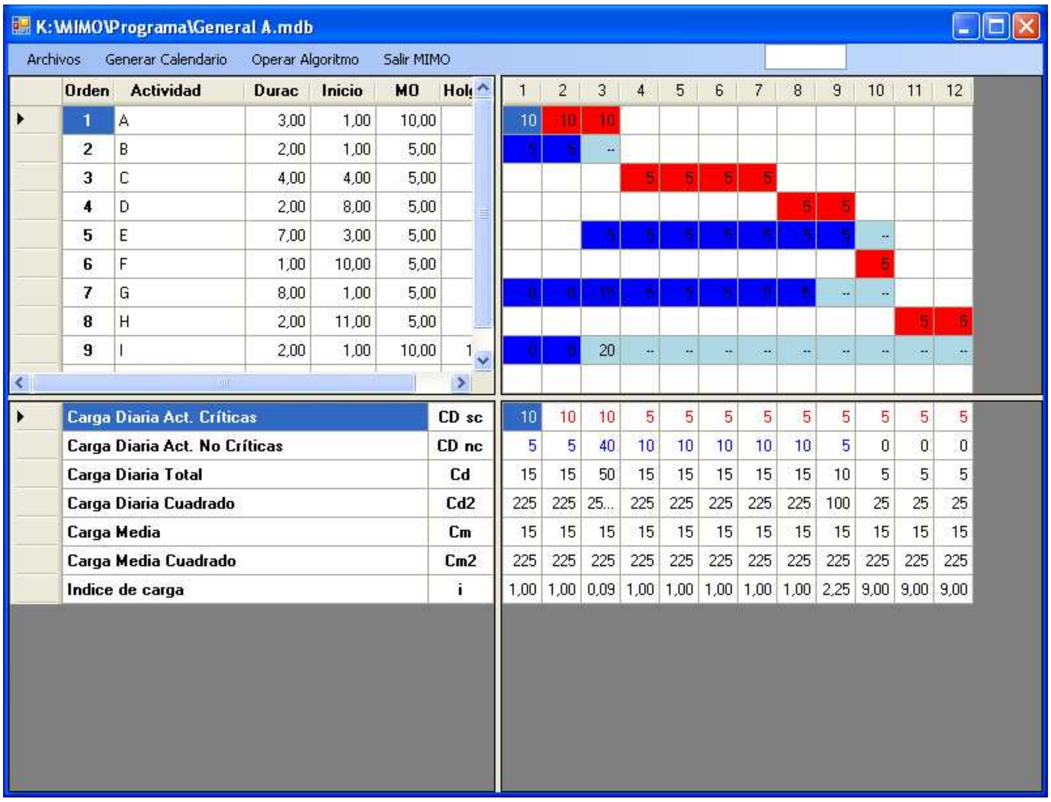
K:\MIMO\Programa\General A.mdb

Archivos | Generar Calendario | Operar Algoritmo | Salir MIMO

Orden	Actividad	Durac	Inicio	MO	Hol	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	A	3,00	1,00	10,00		10	10	10									
2	B	2,00	1,00	5,00		5	5	--									
3	C	4,00	4,00	5,00					5	5	5	5					
4	D	2,00	8,00	5,00									5	5			
5	E	7,00	3,00	5,00				5	5	5	5	5	5	5	--		
6	F	1,00	10,00	5,00											5		
7	G	8,00	1,00	5,00		0	10	5	5	5	5	5	5	--	--		
8	H	2,00	11,00	5,00												5	5
9	I	2,00	1,00	10,00	1	0	20	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Carga Diaria Act. Críticas	CD sc	10	10	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Carga Diaria Act. No Críticas	CD nc	5	35	10	10	10	10	10	10	5	0	0	0
Carga Diaria Total	Cd	15	45	20	15	15	15	15	15	10	5	5	5
Carga Diaria Cuadrado	Cd2	225	20...	400	225	225	225	225	225	100	25	25	25
Carga Media	Cm	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Carga Media Cuadrado	Cm2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Indice de carga	i	1,00	0,11	0,56	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,25	9,00	9,00	9,00

Iteración 2



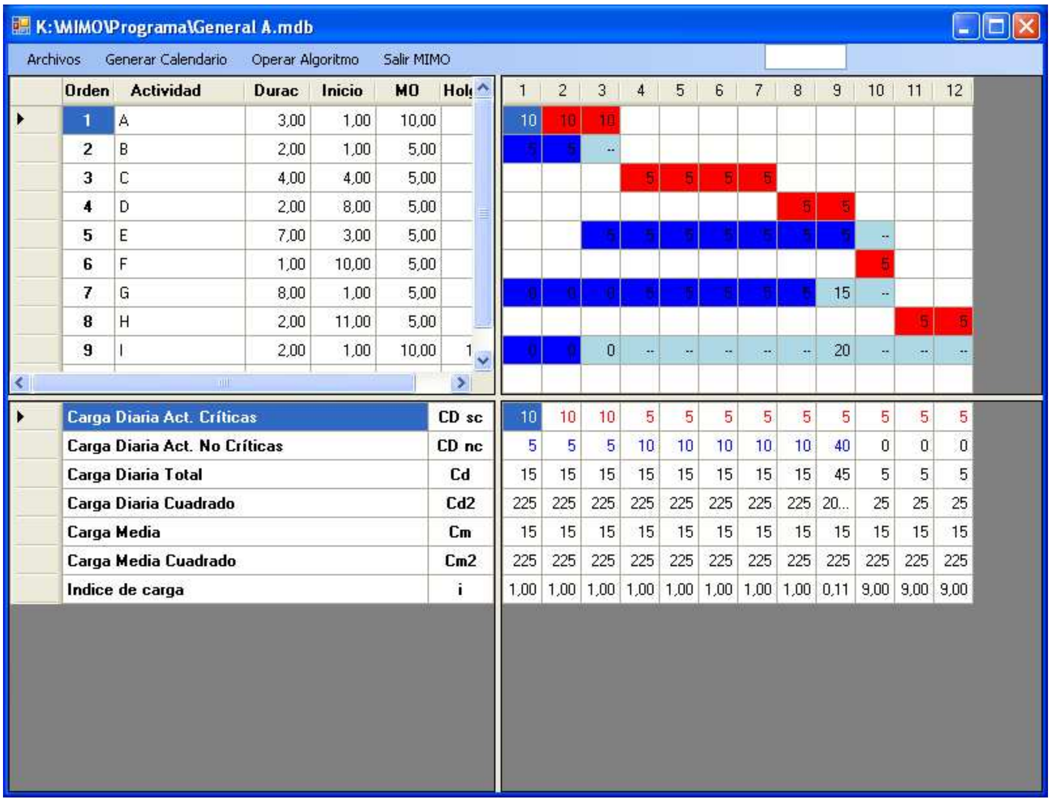
K:\MIMO\Programa\General A.mdb

Archivos | Generar Calendario | Operar Algoritmo | Salir MIMO

Orden	Actividad	Durac	Inicio	MO	Hol	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	A	3,00	1,00	10,00		10	10	10									
2	B	2,00	1,00	5,00		5	5	--									
3	C	4,00	4,00	5,00					5	5	5	5					
4	D	2,00	8,00	5,00									5	5			
5	E	7,00	3,00	5,00				5	5	5	5	5	5	5	--		
6	F	1,00	10,00	5,00											5		
7	G	8,00	1,00	5,00		0	0	10	5	5	5	5	5	--	--		
8	H	2,00	11,00	5,00												5	5
9	I	2,00	1,00	10,00	1	0	0	20	--	--	--	--	--	--	--	--	--

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Carga Diaria Act. Críticas	CD sc	10	10	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Carga Diaria Act. No Críticas	CD nc	5	5	40	10	10	10	10	10	5	0	0	0
Carga Diaria Total	Cd	15	15	50	15	15	15	15	15	10	5	5	5
Carga Diaria Cuadrado	Cd2	225	225	25...	225	225	225	225	225	100	25	25	25
Carga Media	Cm	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Carga Media Cuadrado	Cm2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Indice de carga	i	1,00	1,00	0,09	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,25	9,00	9,00	9,00

Iteración 3



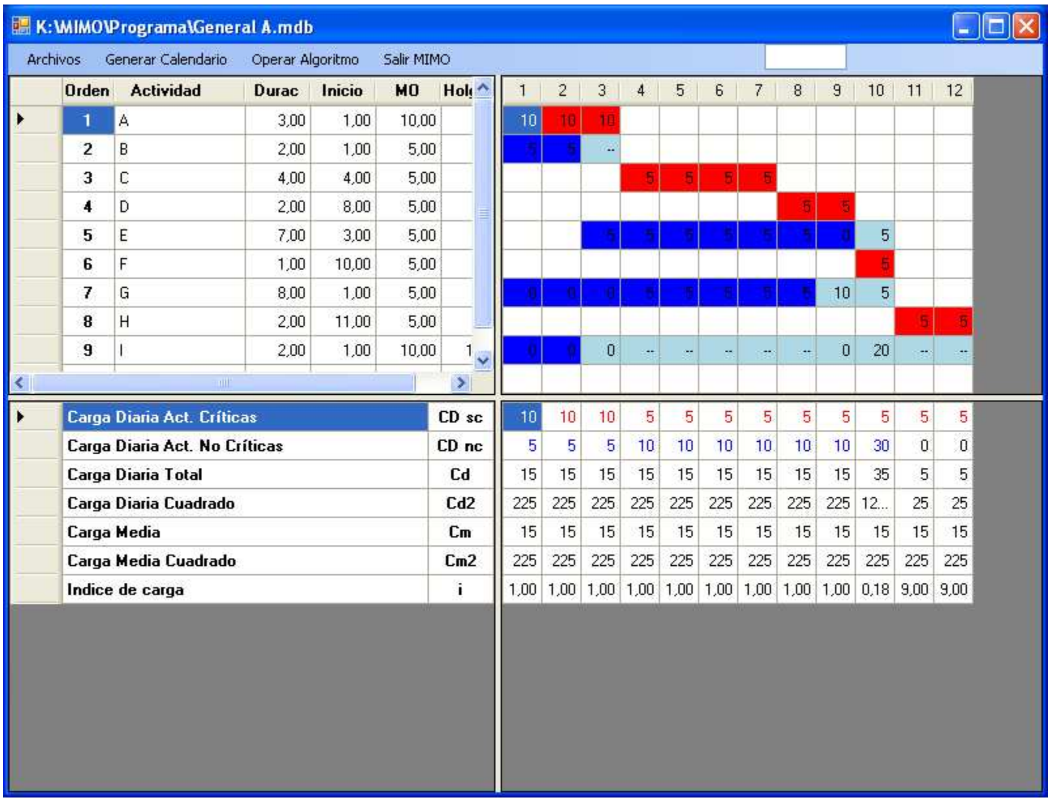
K:\MIMO\Programa\General A.mdb

Archivos | Generar Calendario | Operar Algoritmo | Salir MIMO

Orden	Actividad	Durac	Inicio	MO	Hol	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	A	3,00	1,00	10,00		10	10	10									
2	B	2,00	1,00	5,00		5	5	--									
3	C	4,00	4,00	5,00					5	5	5	5					
4	D	2,00	8,00	5,00									5	5			
5	E	7,00	3,00	5,00				5	5	5	5	5	5	5	--		
6	F	1,00	10,00	5,00											5		
7	G	8,00	1,00	5,00		0	0	0	5	5	5	5	5	15	--		
8	H	2,00	11,00	5,00												5	5
9	I	2,00	1,00	10,00	1	0	0	0	--	--	--	--	--	20	--	--	--

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Carga Diaria Act. Críticas	CD sc	10	10	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Carga Diaria Act. No Críticas	CD nc	5	5	5	10	10	10	10	10	40	0	0	0
Carga Diaria Total	Cd	15	15	15	15	15	15	15	15	45	5	5	5
Carga Diaria Cuadrado	Cd2	225	225	225	225	225	225	225	225	20...	25	25	25
Carga Media	Cm	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Carga Media Cuadrado	Cm2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Indice de carga	i	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,11	9,00	9,00	9,00

Iteración 4



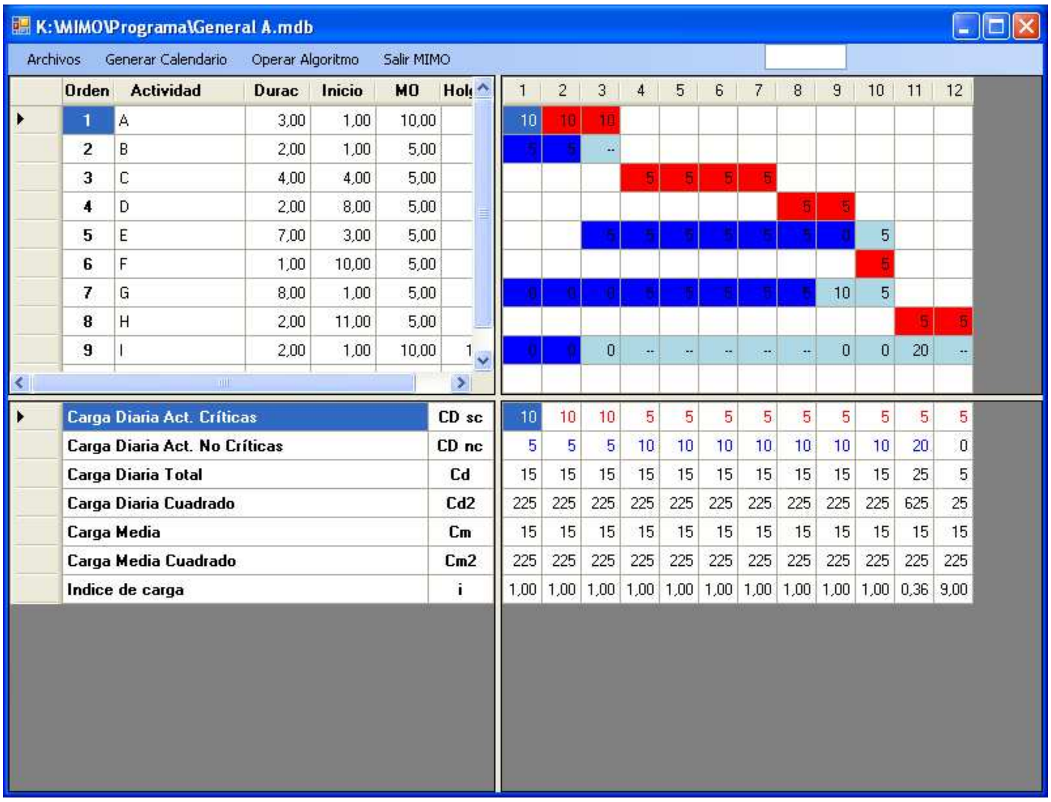
K:\MIMO\Programa\General A.mdb

Archivos | Generar Calendario | Operar Algoritmo | Salir MIMO

Orden	Actividad	Durac	Inicio	MO	Hol	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	A	3,00	1,00	10,00		10	10	10									
2	B	2,00	1,00	5,00		5	5	--									
3	C	4,00	4,00	5,00					5	5	5	5					
4	D	2,00	8,00	5,00									5	5			
5	E	7,00	3,00	5,00				5	5	5	5	5	5	0	5		
6	F	1,00	10,00	5,00											5		
7	G	8,00	1,00	5,00		0	0	0	5	5	5	5	5	10	5		
8	H	2,00	11,00	5,00												5	5
9	I	2,00	1,00	10,00	1	0	0	0	--	--	--	--	--	0	20	--	--

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Carga Diaria Act. Críticas	CD sc	10	10	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Carga Diaria Act. No Críticas	CD nc	5	5	5	10	10	10	10	10	10	30	0	0
Carga Diaria Total	Cd	15	15	15	15	15	15	15	15	15	35	5	5
Carga Diaria Cuadrado	Cd2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	12...	25	25
Carga Media	Cm	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Carga Media Cuadrado	Cm2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Indice de carga	i	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,18	9,00	9,00

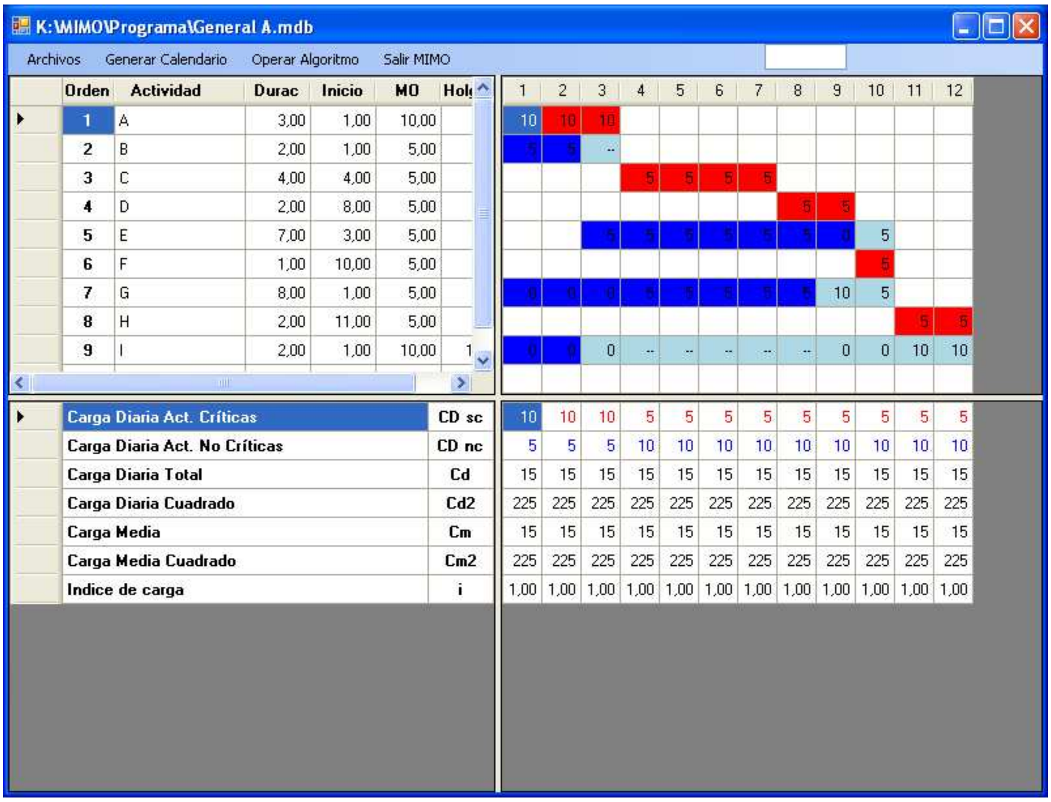
Iteración 5



Orden	Actividad	Durac	Inicio	MO	Hol	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	A	3,00	1,00	10,00		10	10	10									
2	B	2,00	1,00	5,00		5	5	--									
3	C	4,00	4,00	5,00					5	5	5	5					
4	D	2,00	8,00	5,00									5	5			
5	E	7,00	3,00	5,00				5	5	5	5	5	5	0	5		
6	F	1,00	10,00	5,00											5		
7	G	8,00	1,00	5,00		0	0	0	5	5	5	5	5	10	5		
8	H	2,00	11,00	5,00												5	5
9	I	2,00	1,00	10,00	1	0	0	0	--	--	--	--	--	0	0	20	--

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Carga Diaria Act. Críticas	CD sc	10	10	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Carga Diaria Act. No Críticas	CD nc	5	5	5	10	10	10	10	10	10	10	20	0
Carga Diaria Total	Cd	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	25	5
Carga Diaria Cuadrado	Cd2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	625	25
Carga Media	Cm	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Carga Media Cuadrado	Cm2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Indice de carga	i	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,36	9,00

Iteración 6 y última



Orden	Actividad	Durac	Inicio	MO	Hol	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	A	3,00	1,00	10,00		10	10	10									
2	B	2,00	1,00	5,00		5	5	--									
3	C	4,00	4,00	5,00					5	5	5	5					
4	D	2,00	8,00	5,00									5	5			
5	E	7,00	3,00	5,00				5	5	5	5	5	5	0	5		
6	F	1,00	10,00	5,00											5		
7	G	8,00	1,00	5,00		0	0	0	5	5	5	5	5	10	5		
8	H	2,00	11,00	5,00												5	5
9	I	2,00	1,00	10,00	1	0	0	0	--	--	--	--	--	0	0	10	10

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Carga Diaria Act. Críticas	CD sc	10	10	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Carga Diaria Act. No Críticas	CD nc	5	5	5	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Carga Diaria Total	Cd	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Carga Diaria Cuadrado	Cd2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Carga Media	Cm	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Carga Media Cuadrado	Cm2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Indice de carga	i	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00