



**MODELACIÓN PARA LA PROGRAMACIÓN DE PERSONAL EN
EMPRESAS DE CONSULTORÍA, AUDITORÍA E INTERVENTORÍA.**

Ing. KATHERINE MORENO CAICEDO
Ing. KENNEDY MAURICIO CAPTUAYO NOVOA

FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
BOGOTÁ, D.C.
2019



**MODELACIÓN PARA LA PROGRAMACIÓN DE PERSONAL EN
EMPRESAS DE CONSULTORÍA, AUDITORÍA E INTERVENTORÍA.**

Ing. KATHERINE MORENO CAICEDO
Ing. KENNEDY MAURICIO CAPTUAYO NOVOA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
MAGISTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Ing. JUAN PABLO CABALLERO VILLALOBOS, PhD
Ing. JOSE FERNANDO JIMENEZ GORDILLO, PhD

FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
BOGOTÁ, D.C.
2019

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	7
CAPÍTULO 1	8
CONTEXTUALIZACIÓN AL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE PERSONAS	8
1.1 INTRODUCCIÓN	8
1.2 PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE PERSONAS	8
1.3 PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE PERSONAS EN EMPRESAS DE AUDITORÍA, CONSULTORÍA E INTERVENTORÍA	10
1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	14
1.5 OBJETIVOS	15
1.6 JUSTIFICACIÓN	16
1.7 METODOLOGÍA	17
1.8 COHERENCIA CON TEMÁTICAS DE LA MAESTRÍA	18
1.9 RESUMEN	18
CAPÍTULO 2	19
REVISIÓN LITERARIA: PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE PERSONAS	19
2.1 INTRODUCCIÓN	19
2.2 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE PERSONAS	19
2.3 REVISIÓN LITERARIA	23
2.4 RESUMEN	31
CAPÍTULO 3	33
DESARROLLO DEL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE PERSONAS EN SISTEMAS DE AUDITORÍA CONSULTORÍA E INTERVENTORÍA	33
3.1 INTRODUCCIÓN	33
3.2 PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE PERSONAS EN EMPRESAS DE AUDITORÍA, CONSULTORÍA E INTERVENTORÍA (MODELO MATEMÁTICO)	34

3.3 ALGORITMOS GENÉTICOS	42
3.4 RESUMEN	58
CAPÍTULO 4	60
ESTUDIO DE CASO: ICONTEC Y TGS GLOBAL	60
4.1 INTRODUCCIÓN	60
4.2 ESTUDIO DE CASO (ICONTEC – TGS GLOBAL)	60
4.3 RESUMEN	73
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	74
GLOSARIO	76
BIBLIOGRAFÍA	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa conceptual de los requerimientos del problema de programación para servicios de auditoría, consultoría e interventoría	12
Figura 2. Soluciones al problema de programación de personas	13
Figura 3. Metodología	18
Figura 4. Características de algunos de los problemas del scheduling	22
Figura 5. Características y restricciones	23
Figura 6. Aplicación del modelo matemático Gantt	40
Figura 7. Diagrama de flujo de algoritmo genético (GA)	42
Figura 8. Pseudocódigo del algoritmo genético (GA)	43
Figura 9. Diagrama de flujo de algoritmo de población inicial	45
Figura 10. Codificación del cromosoma	47
Figura 11. Función fitness	47
Figura 12. Pseudocódigo método de selección	48
Figura 13. Ilustración de cruce de punto único	48
Figura 14. Probabilidad de cruce	49
Figura 15. Ilustración de mutación de intercambio	50
Figura 16. Probabilidad de mutación	51
Figura 17. Diagrama de Gantt metaheurística	55
Figura 18. Resultado algoritmo / histórico – costos de asignación	56
Figura 19. Resultado algoritmo / histórico – ocupación	57
Figura 20. Resultado algoritmo / histórico – traslados	58
Figura 21. Costo por iteración de asignación de ICONTEC generado por el algoritmo genético	61
Figura 22. Porcentaje de uso de recurso con contrato directo con ICONTEC	62
Figura 23. Porcentaje de uso de traslados con ICONTEC	63
Figura 24. Costo de asignación histórico vs algoritmo genético caso ICONTEC	64
Figura 25. Ocupación interna histórico vs algoritmo genético caso ICONTEC	65
Figura 26. Traslados entre sucursales a histórico vs algoritmo genético caso ICONTEC	66
Figura 27. Costo por iteración de asignación de TGS GLOBAL generado por el algoritmo genético	67
Figura 28. Porcentaje de uso de recurso con contrato directo con TGS	68
Figura 29. Porcentaje de traslados para TGS	69
Figura 30. Costo de asignación histórico vs algoritmo genético caso TGS	70
Figura 31. Ocupación interna histórico vs algoritmo genético caso TGS	70
Figura 32. Traslados entre sucursales a histórico vs algoritmo genético caso TGS	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Artículos evaluados	24
Tabla 2. Clasificación por grupos de artículos	29
Tabla 3. Requerimiento cliente	37
Tabla 4. Características de los recursos disponibles	38
Tabla 5. Costos de traslados entre sucursales	38
Tabla 6. Resultados de instancias en modelo matemático	40
Tabla 7. Verificación de instancias relacionada en el modelo matemático ejecutadas por la metaheurística.	51
Tabla 8. Resumen instancia de prueba	52
Tabla 9. Costo de asignación	55
Tabla 10. Uso de capacidad	56
Tabla 11. Número de traslados necesarios	56
Tabla 12. Costo de asignación histórico ICONTEC	60
Tabla 13. Costo de asignación histórico TGS	66

RESUMEN

En este trabajo, se propone una solución al problema de programación de personas, aplicado en un ambiente de servicios de auditoría, interventoría y consultoría. Inicialmente, se realiza una revisión literaria donde se detalla en qué consiste el problema. Posteriormente, se presenta una propuesta de solución basada en un modelo matemático que minimiza el costo total de la programación. Seguidamente, se aplica el método metaheurístico de algoritmos genéticos que comparte el mismo objetivo propuesto en el modelo matemático.

La propuesta de solución se aplica a dos casos de estudio desarrollados en las empresas ICONTEC y TGS GLOBAL, en instancias correspondientes a un período de seis meses. De igual manera, se evalúa el algoritmo por medio de la ejecución de las instancias seleccionadas en el modelo matemático. Finalmente, se proporcionan indicadores para evaluar los resultados del algoritmo genético frente a los casos de referencia.

Los resultados experimentales demuestran que el modelo matemático y el algoritmo genético han logrado una mejora significativa con respecto a los resultados reales. Los métodos propuestos obtienen nuevas soluciones que se ajustan a las restricciones indicadas y disminuyen el costo total. El modelo matemático puede ser aplicado en instancias pequeñas, mientras el algoritmo genético se puede emplear para instancias más grandes, permitiendo un mayor alcance en el tiempo.

CAPÍTULO 1

CONTEXTUALIZACIÓN AL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE PERSONAS

1.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente capítulo es presentar la contextualización y antecedentes del problema de programación de personas. Por lo tanto, inicialmente, se describe la importancia de este problema, como un proceso de toma de decisiones a mediano y largo plazo en las organizaciones. Posteriormente, se hace una descripción de las características y adicionalmente se presentan los objetivos y dificultades dentro del proceso de toma de decisiones.

Seguidamente, se presenta el problema considerando la definición, restricciones, aplicaciones y los métodos de solución empleados por algunos autores. Luego, se definen los desafíos del problema, resaltando la temática a estudiar en el presente trabajo. Finalmente, se da a conocer un mapa conceptual que ilustra los requerimientos básicos teniendo en cuenta su aplicación dentro de los sistemas de programación, específicamente en servicios de auditoría, consultoría e interventoría.

1.2 PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE PERSONAS

La programación de personas se caracteriza por la organización de los horarios de trabajo y la asignación del personal a los turnos con el propósito de cubrir la demanda de tareas que varían con el tiempo (Pinedo, 2005). En servicios, las operaciones a menudo son prolongadas e irregulares y los requisitos del personal fluctúan con el tiempo. Dicho problema es conocido en la literatura como Workforce Scheduling (WS).

Dentro de las áreas de aplicación del WS, se pueden mencionar: la programación de operadores en un centro de llamadas; la programación del personal de soporte

domiciliario; personal de servicios de salud; personal técnico o de mantenimiento; personal docente; la programación de tripulación que ocurre en las aerolíneas; entre otros (Xie, Potts y Bektas, 2017).

El WS tiene diversos objetivos que pueden variar según su área de aplicación. Entre estos objetivos se pueden encontrar: minimizar el número de personas necesarias para realizar un determinado número de tareas; minimizar el costo total de ejecución; maximizar el número de tareas a realizar en un periodo de tiempo; entre otros (Pinedo, 2005).

Posteriormente, para la solución del problema de programación de personas, se presentan dos categorías de solución: métodos exactos y métodos metaheurísticos. A continuación, se proporcionan algunos ejemplos y aplicaciones de cada caso.

Métodos exactos

Los métodos exactos se definen como una búsqueda exhaustiva dentro del conjunto de todas las soluciones potenciales, mediante la modificación de las valoraciones de los nodos vecinos a través de expresiones matemáticas exactas (Daniel y Molinero, 1998). Dichos métodos están basados en técnicas de optimización tales como programación lineal entera mixta; ramificación y acotamiento, programación dinámica; entre otras (Viveros y Rivera, 2017). En los enfoques de programación matemática, se formulan como programas lineales, programas enteros lineales o programas matemáticos generales. A continuación, se describen algunos de los métodos de esta categoría encontrados en la literatura.

Hui Nie, (2013) presenta un modelo de programación lineal de enteros mixtos (MILP), para la planificación de personal con múltiples habilidades, aplicado en actividades de construcción. Brusco, (2008) propone un algoritmo exacto para el problema de asignación de personal aplicado a un problema real, con el fin de definir políticas de capacitación. Finalmente, Gamze y Xinhui, (2017) proponen un enfoque de solución, empleando modelos matemáticos con aplicación en la programación de personal en un centro de llamadas.

Métodos Metaheurísticos

Los métodos metaheurísticos son métodos diseñados para resolver problemas de optimización combinatoria en caso de que los heurísticos clásicos no sean efectivos. Por ello, el método metaheurístico proporciona un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos, combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial; la evolución biológica y los mecanismos estadísticos (Viveros y Rivera, 2017). La mayor ventaja que tiene este método frente a otros radica en su gran flexibilidad que permite usarlos para abordar una amplia gama de problemas (Schwarze y Voss, 2015).

Adicionalmente, los métodos metaheurísticos han sido empleados en los siguientes ejemplos: Lourenco, Paixao y Portugal, (2001) presentan métodos de búsqueda local, para el problema de programación de personal, aplicados a una empresa que diseña rutas de buses. Algethami, Martínez y Landa, (2018) presentan un algoritmo genético adaptativo de múltiples cruces para abordar la configuración combinada de los problemas de programación de personal. Por último, Bertels y Fahle, (2006) combinan dos enfoques, los cuales: abordan la programación de restricciones para obtener una solución viable y en una segunda etapa se aplican dos metaheurísticas que incluyen recocido simulado y búsqueda tabú.

1.3 PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE PERSONAS EN EMPRESAS DE AUDITORÍA, CONSULTORÍA E INTERVENTORÍA

Con el propósito de contextualizar los requerimientos básicos del problema de programación de personas y su aplicación dentro de los sistemas de servicios de auditoría, consultoría e interventoría, se presenta un mapa conceptual en la figura 1. En el cual se mencionan las características que implica, agrupado por personas, tareas y tiempos.

Capítulo 1. Contextualización al problema de programación de personas

Figura 1. Mapa conceptual de los requerimientos del problema de programación para servicios de auditoría, consultoría e interventoría



Fuente: Elaboración Propia.

Teniendo en cuenta lo anterior y con el fin de lograr una mejor comprensión del problema se plantea un ejemplo sencillo que integra las características mencionadas:

Dado un conjunto de clientes C1, C2, y C3 cada uno con un tiempo de ejecución de 4, 2, y 6 días respectivamente (incluyendo posibles traslados) y teniendo en cuenta que las tareas deben ser ejecutadas en un periodo comprendido del día 1 al día 10. Las habilidades necesarias para la prestación del servicio son: C1 requiere: H1 y H2. C2 requiere: H1 Y H3 y C3 requiere: H2 Y H3. Además, para satisfacer esta demanda, se cuenta con 4 personas: la persona P1 cuenta con las habilidades: H1, H2 y H3. La persona P2: H3. La persona P3: H2 y H3 y la persona P4: H1. Cada persona tiene un costo asociado por día: P1: \$10, P2: \$6, P3: \$8 y P4: \$4. Se debe tener en cuenta que C1 y C2 se encuentran en un punto geográfico X1 y C3 en X2.

Así mismo, cada persona se encuentra ubicada en cuatro sucursales diferentes: P1 Y P2 en el punto geográfico X1 y P3 y P4 en X2, lo que implica un costo asociado al posible traslado para la ejecución de los servicios. Para este ejemplo, se asume que

Capítulo 1. Contextualización al problema de programación de personas

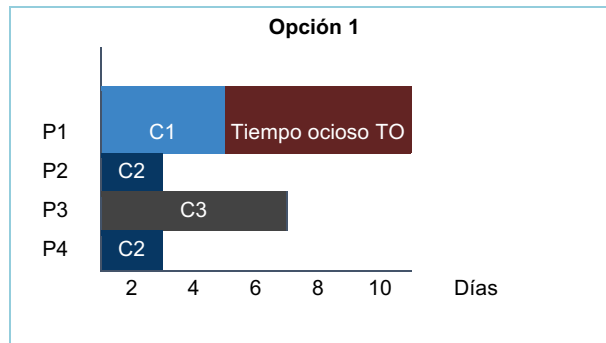
los costos de traslado son los mismos para todas las personas y corresponden a \$3. Adicionalmente, P1 y P3 cuentan con un contrato directo, lo que implica que estos generan un costo por día independiente del número de tareas que realicen. Por el contrario, P2 y P4 solo generan costos por el número de días en prestación de servicio.

El objetivo es encontrar la programación de personas, de tal forma que el costo sea mínimo y se logre satisfacer las restricciones dadas, dentro de la ventana de tiempo establecida. Tres posibles soluciones a este problema se representan en la figura 2.

Figura 2. Soluciones al problema de programación de personas

TIEMPO (Días)	CLIENTES			.	PERSONAS			
	4	2	6		P1	P2	P3	P4
C1	C2	C3	.	H1	H3	H2	H1	
H1	H1	H2	.	H2		H3		
H2	H3	H3	.	H3				
H3								

A continuación, se presentan algunas opciones de solución:



La opción 1 representa un costo total de: \$190

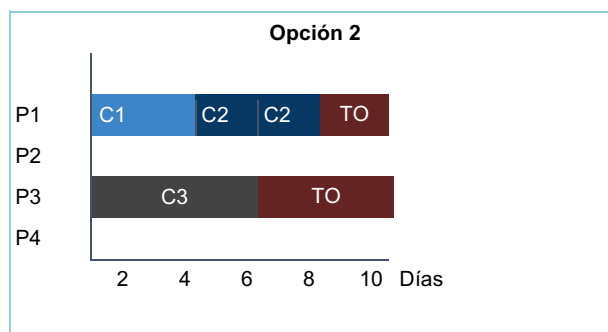
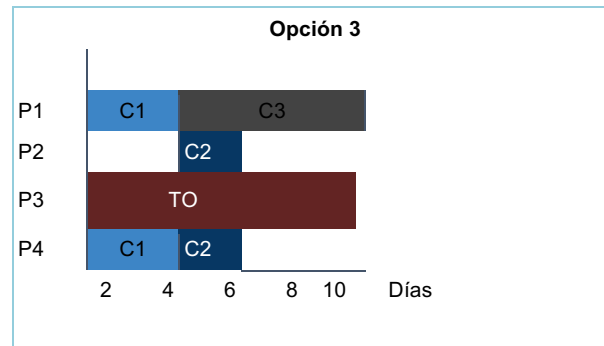


Figura 2. Soluciones al problema de programación de personas

La opción 2 representa un costo total de: \$160



La opción 3 representa un costo total de: \$199

Fuente: Elaboración Propia.

Como se muestra en las soluciones anteriores, los costos totales pueden variar de acuerdo con las decisiones de asignación de personal en función de cumplir con las características y requerimientos de los clientes. Actualmente, estas decisiones son tomadas por personas, es decir, por cada cliente de manera individual sin contemplar diferentes opciones de programación.

Las características indicadas y el ejemplo anterior permiten mencionar algunos desafíos para la completa y eficiente solución del planteamiento. A pesar de que el problema de programación de personas ha sido una cuestión de alto interés de investigación, dentro de los desafíos se encuentran: la posibilidad de contar con diferentes tipos de contrato de las personas que inciden en los costos de asignación; la segmentación de los recursos teniendo en cuenta sus habilidades y disponibilidad de tiempo (Parada, Bautista y Ortiz, 2013). Por último, no contemplar eventos que pueden interferir en el cumplimiento del cronograma tales como la cancelación de tareas; pérdida de recursos; llegada de tareas no contempladas; entre otros (Hartmann y Briskorn, 2010).

Para finalizar, los desafíos mencionados anteriormente permiten identificar varias oportunidades de investigación. Sin embargo, esta investigación se concentra en generar una propuesta que permita una reducción en los costos operacionales que

implican la programación de personas y a su vez, contemplar los aspectos estudiados hasta el momento como son: límite de personas para asignar, habilidades, disponibilidad y los tiempos límite para ejecutar tareas.

1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

El problema de programación de personas ha sido aplicado en servicios de salud, sistemas de transporte, centros de llamadas, servicios de aeronaves entre otros. Sin embargo, en lo investigado hasta el momento, no se encuentran casos aplicados en modelos de negocio en servicios de auditoría, consultoría e interventoría, que tengan impacto en los costos operacionales al momento de ejecutar las tareas. Por consiguiente, se propone la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible plantear un modelo de programación con las características del problema de programación de personas, que permita integrar el modelo operativo en los sistemas de planeación y programación de servicios de auditoría, interventoría y consultoría?

Para resolver la pregunta de investigación es necesario formular algunas sub-preguntas relacionadas con su solución. Estas son:

- ¿Cómo se puede mejorar el proceso de planeación y programación en empresas que prestan servicios de auditoría, consultoría e interventoría, aplicando los conceptos desarrollados por el problema de programación de personas?
- ¿La aplicación de un método metaheurístico permite brindar una solución al problema, aplicado en ambientes de programación de personas en servicios de auditoría, interventoría y consultoría?

1.5 OBJETIVOS

Para dar solución a las preguntas anteriores se plantean algunos objetivos, es importante aclarar que en la planeación y programación personas en servicios de

auditoría, interventoría y consultoría, las tareas corresponden a los servicios de comprobación, revisión y cumplimiento de normas en los clientes.

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un método para la asignación de personas que satisfaga las características propias del modelo operativo de las empresas ICONTEC Y TGS GLOBAL para la prestación de los servicios de auditoría consultoría e interventoría buscando disminuir los costos operacionales.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer y/o identificar un modelo matemático para describir adecuadamente el problema de asignación de personas para las empresas de auditoría, interventoría y consultoría ICONTEC y TGS GLOBAL.
- Implementar un método que brinde soluciones al problema de asignación de personas a empresas dedicadas a la prestación de servicios de auditoría, interventoría y consultoría en ICONTEC y TGS GLOBAL.
- Elaborar un estudio de caso para cada una de las empresas ICONTEC y TGS GLOBAL para aplicar el método de solución propuesto.

1.6 JUSTIFICACIÓN

En los sistemas de planeación y programación de personas en servicios, la eficiencia del uso de este recurso tiene un impacto significativo en los costos operacionales y por ende en la rentabilidad de estos (Maghsoudlou, Afshar-Nadjafi, y Niaki, 2016). Esta eficiencia implica lograr el aprovechamiento de las personas que representen bajos costos operacionales, divulgar la programación a los clientes con suficiente antelación, con el fin de evitar posibles cancelaciones y conocer la capacidad operativa para la prestación de los servicios, de esta manera evitar tiempos ociosos o sobrecarga laboral.

El desarrollo del presente trabajo permite conocer con anticipación las personas necesarias a contratar y las habilidades requeridas, aportando de esta manera a la

disminución del índice de rotación de personal en Colombia. Adicionalmente, permite identificar las áreas en las que se requiere un mayor número de personas con determinada habilidad. Lo anterior, implica un beneficio al tener mayor certeza de los planes de formación a emprender. Así mismo, cada persona a través de su formación y desarrollo integral contará con la oportunidad de poner en ejecución sus capacidades y talentos, contribuyendo de manera efectiva en la generación de valor para las organizaciones en las que se presten servicios.

La programación de personas ha sido por mucho tiempo, un área de alto interés en investigación. Sin embargo, pocos casos presentan la aplicación del problema en modelos operativos de planeación y programación de servicios de auditoría, consultoría e interventoría. Por consiguiente, este trabajo busca aportar casos de estudio en dos organizaciones que emplean este modelo, en los que se pueda hacer evidente una mejora frente a la situación actual.

Los resultados de este trabajo podrán ser aplicados a casos de estudio en modelos operativos que cuenten con las características del modelo de programación tanto de auditoría como consultoría o interventoría o cualquier otro servicio. Esta investigación, puede además ser aplicada en modelos en los que los recursos sean personas y se cuente con un horizonte de tiempo definido. Además, esta investigación podrá servir de apoyo para la consulta de los antecedentes y características con mayor relevancia en las investigaciones desarrolladas en torno al problema planteado.

1.7 METODOLOGÍA

A continuación, se describe la metodología a emplear para alcanzar cada uno de los objetivos específicos:

Capítulo 1. Contextualización al problema de programación de personas

Figura 3. Metodología

OBJETIVO ESPECÍFICO	ACTIVIDAD	PASOS	RESULTADOS OBTENIDOS
Proponer y/o identificar un modelo matemático para describir adecuadamente el problema de asignación de personas para las empresas ICONTEC y TGS GLOBAL	Plantear el modelo matemático.	Definir los parámetros y variables del problema. Plantear las restricciones del problema con base en las características de este. Plantear la función objetivo.	Modelo matemático del problema de programación de personas en servicios de auditoría consultoría e interventoría.
Implementar un método que brinde soluciones al problema de programación de personas en sistemas de planeación y programación de servicios de auditoría, interventoría y consultoría.	Desarrollar la metaheurística algoritmos genéticos.	Realizar una revisión bibliográfica de la aplicación de los algoritmos genéticos al problema de programación de personas. Definir los parámetros de la metaheurística. Implementar el algoritmo en el lenguaje de programación JAVA, usando el software Eclipse. Aplicación de la metodología backtesting. Definir la instancia del problema a ejecutar.	Metaheurística algoritmos genéticos como solución del problema en programación de personas. Instancia por ejecutar del problema. Indicadores para evaluar la eficiencia del algoritmo.
Elaborar un estudio de caso para cada una de las empresas ICONTEC y TGS GLOBAL para aplicar el método de solución propuesto.	Desarrollar un estudio de caso en las empresas TGS e ICONTEC.	Recopilar la información de cada empresa. Aplicar el método metaheurístico: algoritmo genético a las instancias de cada empresa. Presentar un análisis de los resultados obtenidos.	Resultados de las ejecuciones de las instancias para TGS e ICONTEC. Análisis de los resultados de las instancias.

Fuente: Elaboración Propia.

1.8 COHERENCIA CON TEMÁTICAS DE LA MAESTRÍA

El énfasis escogido con relación al programa académico, Maestría en Ingeniería Industrial es Producción y Tecnología. La temática está relacionada con la identificación y solución de problemas de optimización en servicios. La propuesta está

encaminada a desarrollar un modelo que permita mejorar la planeación y administración de los recursos, aplicado en dos empresas cuya actividad económica está basada en la asignación de personal para la prestación de servicios.

La modalidad de maestría seleccionada es de profundización debido a que se realizará la aplicación de estudio de caso, brindando una posible solución al problema de asignaciones de recursos para la prestación de servicios de auditoría, interventoría y consultoría.

1.9 RESUMEN

En este capítulo, se presentó la descripción, características, objetivos y algunos casos de aplicación del problema de programación de personas. Adicionalmente, se destacó su importancia e impacto en las organizaciones y diversos campos de aplicación. Además, se describen las características del problema y se desarrolló un ejemplo sencillo, a partir de lo anterior se presentó un diagnóstico de las oportunidades de investigación, identificando la de mayor importancia para los objetivos de la investigación. Una vez hecha esta relación, en la siguiente sección se presentará la definición, formulación matemática, características y métodos de solución.

CAPÍTULO 2

REVISIÓN LITERARIA: PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE PERSONAS

2.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se realizó la contextualización del problema de programación de personas, identificando sus necesidades y desafíos. Teniendo en cuenta los aspectos anteriormente identificados, se propone presentar un modelo de optimización que cumpla las características en los sistemas de programación en servicios de auditoría, consultoría e interventoría.

El objetivo del presente capítulo es realizar una revisión literaria sobre el problema de programación de personas, identificando las características; restricciones; consideraciones y los métodos de solución utilizados. Para esta revisión literaria, se establece una metodología que busca seleccionar los artículos encontrados con relación a las características que han abordado los diferentes autores acerca del problema planteado. De igual manera, esta metodología se emplea con la intención de identificar la evolución de la investigación y señalar las limitaciones que aún se presentan.

2.2 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE PERSONAS

La asignación de la fuerza laboral y la programación del personal: Workforce Scheduling (WS), se ocupan de la organización de los horarios de trabajo y la asignación de personal a los turnos para cubrir la demanda de recursos que varían con el tiempo (Pinedo, 2008). Cuando la programación incluye desplazamientos se asocia a un problema de enrutamiento, la combinación de estos problemas de denomina: Workforce Scheduling and Routing Problem (WSRP) ambos conocidos

como NP-Hard (Lassaigne y Rougemont, 2012). Los problemas WS y WSRP contienen restricciones particulares que permiten considerar casos especiales dentro de los problemas de scheduling como se describe en la figura 4.

El WSRP cubre dos aspectos: el primero es la programación, que consiste en asignar personal a las visitas o tareas para cumplir con demandas de trabajo con requisitos específicos y el enrutamiento, el cual consiste en generar rutas, con el propósito de permitir a las personas atender a los clientes en diferentes ubicaciones dentro de un tiempo determinado, cuyo objetivo es minimizar los costos operativos mientras se cumple con los requisitos dados por los clientes, personas y la organización que realiza las programaciones.

El WSRP puede incluir las siguientes características:

- **Ventanas de tiempo:** se refieren a que existen períodos específicos para la ejecución de una tarea o prestación del servicio.
- **Habilidades y cualidades:** representan el filtro que se realiza para definir si una persona puede o no realizar una tarea. En este sentido, existen dos escenarios, el primero es aquel en el que todas las personas están habilitadas para todas las tareas, es decir, comparten las mismas habilidades. Mientras que en la segunda las personas tienen diversas habilidades.
- **Tiempo de duración:** corresponde al tiempo empleado para ejecutar la tarea. Dicho tiempo puede variar dependiendo de la persona que lo realiza, o bien, puede ser asumido independientemente de la persona que ejecute la tarea.
- **Disponibilidad del personal:** está relacionada con la limitación en términos de tiempo de las personas. Por consiguiente, es posible que se presenten periodos inhábiles como vacaciones, días no laborales o por preferencias manifestadas por el personal.
- **Trabajo en equipo:** de acuerdo con la naturaleza de la tarea, es necesario conformar conjuntos de personas que cumplan con todos los requisitos o restricciones.
- **Clusters:** hace referencia a la agrupación de personas en diferentes zonas geográficas con el fin de cumplir determinada demanda.

Figura 4. Características de algunos de los problemas del scheduling

Problemas de scheduling	Tipo de empresa	Características
Flow shop	Empresas de producción	<ol style="list-style-type: none"> 1. Presenta m máquinas en serie. 2. Cada trabajo debe pasar por las m máquinas. 3. Todos los trabajos siguen la misma ruta. 4. Alto volumen de producto. 5. Baja variedad de producto. 6. Equipos de propósito específico.
Job shop	Empresas de producción	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se presenta m máquinas en un taller. 2. Cada trabajo tiene una propia ruta. 3. Se clasifican en trabajos que pasa como máximo una vez por cada máquina y otros que pueden pasar más de una vez por cada máquina. 4. Alta variedad de producto. 5. Bajo volumen de producción. 6. Equipos y máquinas de propósito general.
Workforce Scheduling	Empresas de servicios	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se presentan m tareas a realizar y n cantidad de personas disponibles. 2. Cada actividad utiliza una o varias personas. 3. Existe una ventana de tiempo para la ejecución de cada tarea 4. Cada persona cuenta con un tiempo disponible. 5. Una persona no puede ser utilizada por dos tareas al mismo tiempo.
workforce scheduling and routing problem WSRP		<ol style="list-style-type: none"> 1. Se presentan m tareas a realizar y n cantidad de personas disponibles. 2. Cada actividad utiliza una o varias personas. 3. Existe una ventana de tiempo para la ejecución de cada tarea. 4. Cada persona cuenta con un tiempo disponible. 5. Una persona no puede ser utilizada para dos tareas al mismo tiempo. 6. Las tareas pueden ser realizadas en diferentes puntos geográficos. 7. Pueden existir localizaciones en las que se agrupan las personas. 8. Se consideran desplazamientos para la ejecución de las tareas.

Fuente: Elaboración Propia.

Entre algunos de los objetivos del WSRP se encuentran: minimizar el tiempo total de viajes de las personas; minimizar el costo de la programación; minimizar el costo de contratar personal ocasional; garantizar el uso eficiente del personal; entre otros.

Capítulo 2. Revisión literaria: problema de programación de personas

A continuación, en la figura 5 se describen las características y restricciones presentadas en la programación de personal en servicios de auditoría, consultoría e interventoría. Una de las características diferenciales tiene que ver con el tipo de vinculación de las personas con la organización prestadora del servicio. Esto se refiere a las diferentes condiciones de contratación que afectan la decisión de la realización de la programación, por otra parte, en este tipo de problema se define un tiempo de duración del servicio que incluye los posibles desplazamientos que se requieran realizar.

Figura 5. Características y restricciones

CARACTERÍSTICAS Y RESTRICCIONES
Las personas pueden contar con diferentes tipos de vinculación con la empresa encargada de realizar las asignaciones.
Existen diferentes puntos geográficos para la prestación de los servicios. Así mismo existen clusters de personas de acuerdo con la demanda de servicios.
Los servicios pueden ser ejecutados dentro de una ventana de tiempo.
Los costos de traslados deben ser considerados en la asignación. Sin embargo, el tiempo de traslado será contemplado en el total del tiempo requerido para hacer la tarea ya que se conocen previamente los posibles sitios de visita. Por lo que los costos por tiempos de traslado son despreciables en este caso.
Las personas pueden contar con una o más habilidades.
Los clientes pueden requerir una o más habilidades.
Los tiempos de duración de cada servicio pueden ser diferentes. Sin embargo, estos no varían en función de la persona a asignar.
No es posible emplear una persona para realizar más de un servicio en un solo momento.
De acuerdo con el tipo de contrato la disponibilidad de las personas puede variar, así como su costo por realizar la tarea.

Fuente: Elaboración Propia.

2.3 REVISIÓN LITERARIA

En esta sección se revisa la literatura relacionada con el WSRP, en ella se identifican artículos relacionados con los objetivos del problema, características y restricciones generales, consideraciones especiales y la solución del problema en cada uno de los artículos. Como resultado de la revisión literaria se presenta un estado del arte, que

ayuda a identificar cada uno de los aspectos claves considerados hasta el momento en busca de brindar una solución al problema.

2.3.1 METODOLOGÍA DE REVISIÓN LITERARIA

La revisión literaria se desarrolló bajo la búsqueda de diferentes artículos de revistas y conferencias publicadas desde 2000. Estos artículos fueron encontrados en bases de datos, como son: Sciencedirect, IEEE Xplore, Springerlink y Proquest. La búsqueda se realizó entre julio de 2017 y diciembre de 2018 y fue basada en el filtro de las siguientes palabras claves: Scheduling, Workforce planning, Workforce y Scheduling, Routing. Como se muestra en la figura 4, los artículos de esta revisión literaria pueden clasificarse de acuerdo con las características del problema.

Al realizar la búsqueda los criterios de inclusión fueron: problemas de programación de personas mediante cronogramas, métodos exactos y métodos metaheurísticos para resolver problemas de programación de personas en diferentes puntos geográficos y aquellos casos en los que se requieren habilidades específicas. Los criterios de exclusión fueron: aquellos en los que las tareas cuentan con una relación de precedencia y aquellos que se abordaron desde el punto de vista organizacional. Inicialmente, se identificaron 57 artículos significativos para el desarrollo del trabajo teniendo en cuenta los criterios mencionados, en total se seleccionaron 29 artículos.

La tabla 1, se muestra un compendio de artículos evaluados que han abordado el problema de programación de personas. En la primera parte de la tabla, se presentan los siguientes objetivos propuestos por cada autor: minimizar el tiempo total de viajes de las personas, minimizar el costo de la programación, minimizar el costo de contratar personal ocasional, garantizar el uso eficiente del personal entre otros mencionados allí. Para la segunda parte, en la descripción del problema se presentan algunas consideraciones especiales como: ventanas de tiempo, habilidades y cualidades, tiempo de duración, trabajo en equipo, clúster. Finalmente, en la tercera parte de la tabla, se identifican los métodos de solución empleados, descritos en el capítulo 1 como: métodos exactos y metaheurísticos.

Capítulo 2. Revisión literaria: problema de programación de personas

Tabla 1. Artículos evaluados

	1. Objetivo	2. Descripción del problema	Método de solución
Dodin y Chan, (1991)	•	• •	•
Xu y Chiu (2001)	•	• •	•
Daskalaki et al. (2004)	•	• • •	•
Lim, Rodrigues y Song (2004).	•	• • •	• •
Corominas A, Pastor R, Rodríguez E (2006)	•	• • •	•
Tang, Hooks, Tomastik (2007)	•	• • • •	•
Lin, C.-M., & Gen, M. (2008)	• •	• •	•
Jia Z, Gong L (2008)	• •	• • •	• •
Murakami K, Tasan SO, Gen M, Oyabu T (2010)	•	• •	•
Kang, D., Jung, J., y Bae, D.-H. (2011)	•	• • • •	•
Younas I, Kamrani F, Schulte C, Ayani R (2011)	•	• • • •	• •
Xian-ying (2012)	•	• • • •	• •
Ammar, Elkosantini y Pierreval, (2012)	•	• • • •	• •
Wang y Kong, (2012)	• •	• • •	•
Zhang y Xu, (2012)	•	• • • •	•
Da Silva, Bahiense, Satoru Ochi y Boaventura-Netto, (2012)	• • •	• • • • •	• •
Rasmussen, Justesen, Dohn y Larsen (2012)	•	• • • •	• •
Shao, Bard y Jarrah (2012)	•	• • • • •	•
Mutlu et al.2013	•	• • • •	•
Schwarze y Voss, 2015	•	• •	•
Attia, E.-A., Duquenne, P., y Le-Lann, J.-M. (2014).	•	• • • •	•
Xu, Z, Ming, X. G., Zheng, M., Li, M., He, L. y Song, W. (2015).	• •	• • • • •	•
Braekers, Hartl, Parragh,(2016)	• •	• • • •	•
Yalçındag, Cappanera, Scutellà, Sahin y Matta (2016)	•	• • • •	• •
Binart, Dejax, Gendreau y Semet (2016)	•	• • • •	•
Bouajaja, S., & Dridi, N. (2017)	• •	• • • • •	• •
araskevopoulos, D. C., Laporte, G., Repoussis, P. P., & Tarantilis, C. D. (2017)	•	• • • • •	• •
Saha, B., y Srinivasan, A. (2018)	•	• • • • •	•
Djedovic, Karabegovic, Avdagic, Zikrija, Samir (2018)	•	• •	•

Fuente: Elaboración Propia

2.3.2 ESTADO DEL ARTE DE REVISIÓN LITERARIA

La revisión literaria permite identificar los artículos que diversos autores han trabajado en torno al WSRP. De tal manera que el resumen de los estudios agrupados se muestra en la tabla 2. A continuación se relacionan algunas características y restricciones abordadas.

- **Ventanas de tiempo:** en relación con los tiempos de inicio y fin permitidos para una tarea Binart, Dejax, Gendreau y Semet, (2016), presentan dos tipos de tareas: las de carácter obligatorio y las voluntarias. Las obligatorias cuentan con una ventana de tiempo que debe ser respetada. Las voluntarias pueden ser o no realizadas y se asignan una vez se planifican las obligatorias. Por otra parte, una de las restricciones indicadas por Rasmussen, Justesen, Dohn y Larsen, (2012), está relacionada con las ventanas de tiempo. Rasmussen, Justesen, Dohn y Larsen, (2012), establecen que se deben respetar las ventanas de tiempo de viaje requerido y de ejecución de la actividad.

Con el objetivo de minimizar el tiempo de ejecución y el número de personas para ejecutar las tareas Lim, Rodrigues y Song, (2004), definen la ventana de tiempo por un tiempo “temprano” y un tiempo “tarde”. La persona solo iniciará la tarea después de la hora temprana y terminará antes de la hora tardía. En caso de que llegue antes de la hora temprana deberá esperar.

Por otra parte, para Zamorano, Emilio, y Raik, (2017), cada cliente puede establecer un plazo para la ejecución de la visita. De esta manera, los clientes pueden especificar los días permitidos. En este caso, las ventanas de tiempo pueden abarcar horas o días.

- **Habilidades y cualidades:** hacer coincidir a personas calificadas con la disponibilidad para realizar una tarea requiere decisiones que deben considerar ciertas restricciones. Así mismo, una decisión equivocada puede dar como resultado una pérdida significativa de valor debido a la falta de personal; la falta de calificación o la sobre calificación del personal asignado y

la alta rotación de trabajadores asignados a tareas que no corresponden a su especialidad. (Naveh, Richter, Altshuler, Gresh y Connors, 2007).

Considerando lo anterior, Algethami, Pinheiro y Landa, (2016), presentan el WSRP aplicado en la prestación del servicio del cuidado de la salud en el hogar. En este caso, es necesario agrupar el personal de acuerdo con la disciplina en la que se desempeñan, cuyo objetivo es lograr satisfacer las necesidades de los pacientes y a su vez lograr minimizar el costo operativo.

Por otra parte, Xie, Potts y Bektas, (2017), definen dos tipos de habilidades; una de ellas corresponde a la especialidad de la persona; la otra está relacionada con su nivel de experiencia. De manera similar, Kovacs, Parragh, Doerner y HartlKovacs, (2012) caracterizan las personas como técnicos que disponen de una serie de habilidades en diferentes niveles, cada tarea exige técnicos que proporcionen las habilidades adecuadas de al menos uno de los niveles exigidos.

Chen et al. (2015) relacionan las habilidades y la experiencia con el tiempo total de ejecución del servicio, de tal forma que a mayor experiencia menor tiempo de duración, lo que permite ejecutar un mayor número de tareas y por lo tanto, maximizar la utilidad.

De igual manera, Norman, Tharmmaphornphilas, Needy, Bidanda y Warner, (2002) relacionan la productividad de las personas con el uso de sus habilidades. Sin embargo, no solo se tienen en cuenta las habilidades técnicas, también se incluye habilidades humanas y se permite la capacidad de cambiar los niveles de habilidades de los trabajadores al brindarles capacitaciones.

- **Tiempo de duración:** el tiempo de cada tarea y su previo conocimiento, representa una característica relevante para el WSRP, con respecto a ello, Binart, Dejax, Gendreau y Semet, (2016), presentan un problema de enrutamiento del servicio de campo con tiempos de viaje y duración de ejecución estocástica. Ammar, Elkosantini y Pierreval, (2012) hacen énfasis en

los problemas de asignaciones en donde hay un conjunto de tareas independientes con diferentes duraciones de procesamiento. Por otra parte, Corominas, Pastor, Rodríguez, (2006) proponen un método heurístico para asignar tareas a personas con múltiples habilidades en la industria de servicios. Esta asignación debe cumplir con que el porcentaje de tiempo de trabajo, dedicado por cada trabajador a cada tipo de tarea o por lo menos que este sea cercano a los valores de referencia.

Wang y Kong, (2012), presentan un estudio desarrollado en una empresa dedicada a la prestación de servicios en el sector público. La formulación tiene como requisito realizar la visita con una frecuencia mensual en un periodo de vigencia específico determinado por cliente. Para Zhang y Xu, (2012), la asignación se realiza teniendo en cuenta la disponibilidad del cliente y el número de tareas por realizar, específicamente en donde el tipo de tareas considera la necesidad de asignar varias personas en menos de cuarenta horas semanales.

- **Disponibilidad de personal:** los días libres programados determinan cómo se programan los días de descanso para cada persona durante el horizonte de planificación Veldhoven et al. (2016). Con relación al tema, Cuevas, Ferrer, Muñoz y Klapp, 2016 formulan el problema de asignación de personal con múltiples habilidades, teniendo en cuenta que los turnos de trabajo pueden variar durante ciertos periodos de tiempo. Por lo tanto, tienen en cuenta los periodos en los que las personas no se encuentran disponibles.

De acuerdo a Van den Bergh, Belien, De Bruecker, Demeulemeester y De Boeck,(2013) estos indican que la disponibilidad del personal en la construcción de un cronograma de trabajo implica la programación de días libres con el objetivo de establecer las horas de trabajo del día y los días laborales de la semana para cada persona, teniendo en cuenta cierta flexibilidad en los tiempos de inicio;fin; duración de la ejecución y ciertas ventanas de descanso.

Finalmente, Rong, A. (2010) consideran el caso en el que los servicios se prestan de manera continua durante cierto periodo de tiempo. Además, con el fin de mantener la productividad del personal, consideran requisitos de descanso; los fines de semana que deben respetarse y equilibrarse.

- **Trabajo en equipo:** con relación a esta característica, Li et al. (2009) presentan restricciones de trabajo en equipo donde cada grupo de personas se reúne en una ubicación establecida. Adicionalmente, la tarea no puede iniciar hasta que no se encuentren todas las personas que integran el equipo. Castillo-Salazar et al. (2015), contemplan la sincronización de varias personas para lograr culminar tareas que dependen del tiempo. De manera similar, Kovacs, Parragh, Doerner y HartlKovacs (2012). presentan un problema de asignación de técnicos de servicios, en el cual se contemplan los dos escenarios: ejecutar los servicios con la posibilidad de conformar equipos o sin que esto sea posible.

Este aspecto también es estudiado por Cordeau et al. (2010) que consideran un problema técnico y de programación de tareas que surge en una empresa de telecomunicaciones. Estos autores se centran en la construcción de equipos y la asignación de tareas a equipos sin considerar los costos de enrutamiento entre tareas. En un problema similar, Zamorano, Emilio, y Raik, (2017) presentan la posibilidad de que el cliente pueda solicitar varios servicios, en este caso es necesario enviar varias personas que estén en la capacidad de realizar cada uno de los servicios solicitados. Estos equipos deben permanecer desde el inicio hasta el final del servicio.

Swangnop y Chaovalitwongse (2014), consideran esencial la construcción de equipos de trabajo para la ejecución de ciertas tareas de acuerdo con el área de aplicación del problema, con respecto a esto, presentan algunos ejemplos como: servicios médicos o servicios técnicos en los que la conformación de equipos es absolutamente necesaria por la complejidad de las tareas a realizar y la necesidad de diversas especialidades.

- **Clúster:** Para Bailey, Garner y Hobbs, (2007) las personas a programar están clasificadas por grupos de acuerdo con sus niveles de habilidad, de acuerdo a estos niveles, se conforman los equipos de trabajo que pueden estar sectorizados de acuerdo con dichas características.

Algunos autores han planteado el WSRP con múltiples objetivos por resolver, algunos de ellos son: minimizar el costo de asignación de personal; maximizar el excedente de personal manteniendo la función de costo y minimizar la variación del personal excedente en diferentes periodos (Cuevas, Ferrer, Muñoz y Klapp, 2016). Por otra parte, Breakers, K (2016) establecen como objetivos minimizar los costos operativos y maximizar el nivel de servicio ofrecido a sus clientes teniendo en cuenta sus preferencias.

Con relación a lo anterior, Garaix, Gondran, Lacomme, Mura y Tchernev, (2016) estos plantean los siguientes objetivos: realizar el total de tareas mientras se minimiza el número de tareas no asignadas; minimizar la distancia de viaje; el costo de los trabajadores y maximizar la satisfacción de las preferencias de los clientes y los trabajadores. Asimismo, Valls y Quintanilla (2009), plantean como objetivo principal obtener una programación que cumpla con la ventana de tiempo establecida para cada cliente. Los objetivos secundarios están relacionados con el nivel de criticidad de la tarea; el equilibrio en la carga de trabajo y lograr una asignación eficiente desde el punto de vista de la especialidad de cada persona.

Finalmente, Belfares, Klibi, Lo, y Guitouni, (2007) presentan como objetivo encontrar la asignación adecuada de personas para determinadas tareas y a su vez asignar a cada persona la mayor cantidad de tareas posibles. De manera similar, Murakami, Tasan, Gen, Oyabu, (2010), presentan como objetivos la asignación de manera óptima las personas a las tareas, a la vez que se minimizan los costos totales, adicionando una restricción de prioridad de tareas.

Capítulo 2. Revisión literaria: problema de programación de personas

Tabla 2. Clasificación por grupos de artículos

Característica	Autor
Ventanas de tiempo	Binart, Dejax, Gendreau y Semet, (2016) Rasmussen, Justesen, Dohn y Larsen, (2012), Lim, Rodrigues y Song, (2004) Zamorano, Emilio, y Raik, (2017)
Habilidades y cualidades	Naveh, Richter, Altshuler, Gresh y Connors, (2007) Algethami, Pinheiro y Landa, (2016), Xie, Potts y bektas (2017) Kovacs, Parragh, Doerner y HartlKovacs Chen et al. (2015) Norman, Tharmmaphornphilas, Needy, Bidanda y Warner, (2002)
Tiempo de duración	Binart, Dejax, Gendreau y Semet, (2016) Ammar, Elkosantini y Pierreval, (2012) Corominas, Pastor, Rodríguez, (2006) Wang y Kong, (2012) Zhang y Xu, (2012)
Disponibilidad de personal	Veldhoven et al. (2016) Cuevas, Ferrer, Muñoz y Klapp, 2016 Van den Bergh, Belien, De Bruecker, Demeulemeester y De Boeck,(2013) Rong, A. (2010)
Trabajo en equipo	Li et al. (2009) Castillo-Salazar et al. (2015) Kovacs et al. (2012) Cordeau et al. (2010) Zamorano y Stolletz (2017) Swangnop y Chaovaitwongse (2014)
Clusters:	Bailey, Garner y Hobbs, (2007)
Multiobjetivo	Cuevas, Ferrer, Muñoz y Klapp, 2016 Braekers, K (2016) Garaix, Gondran, Lacomme, Mura y Tchernev, (2016) Valls y Quintanilla (2009) Belfares, Klibi, Lo, y Guitouni, (2007) Murakami, Tasan, Gen, Oyabu, (2010)

Fuente: Elaboración Propia.

La revisión bibliográfica, permite evidenciar la existencia de un número de trabajos sobre el WSRP, que contemplan características tales como: habilidades de los recursos, tipos de tareas a realizar, tiempos de inactividad, ventanas de tiempo para la ejecución de las tareas, priorización de tareas y alternativas para efectuar las tareas, entre otros.

En la revisión literaria se identifican algunas oportunidades en cuanto a los métodos de solución en las que se pueden mencionar la posibilidad de garantizar que todos los recursos sean asignados a una o diversas localizaciones, considerar la posibilidad

de tener personas bajo diferentes tipos de contrato. Así mismo, se presentan oportunidades de estudio relacionadas con la disminución de costos de asignación y la sectorización de las personas empleando métodos metaheurísticos.

2.4 RESUMEN

En el presente capítulo se definió de forma más detallada en qué consiste el problema de programación de personas. De igual manera, se presentó una revisión literaria identificando las diferentes características, que abordan cada uno de los casos estudiados. En esta revisión, se identificó que este sigue siendo un trabajo en progreso y desarrollo por su amplia posibilidad de aplicación a diferentes sectores.

De la revisión literaria se puede concluir que cada artículo cuenta con diferentes circunstancias que pueden influenciar las decisiones de asignaciones, generando diferentes objetivos, restricciones, parámetros y métodos de solución. También, se concluye que no se han abordado todas las características que se pueden presentar al momento de asignar personas en empresas de servicios.

Por lo tanto, la revisión literaria impulsa a profundizar en la investigación, en busca de integrar características ya trabajadas y contemplar características nuevas, que se puedan presentar en modelos de negocio enfocados en la programación de personas en servicios de auditoría consultoría e interventoría.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE PERSONAS EN SISTEMAS DE AUDITORÍA CONSULTORÍA E INTERVENTORÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se presentó una revisión de la literatura sobre el problema de programación de personas y los requerimientos claves por tener en cuenta al plantear este problema en sistemas de auditoría, consultoría e interventoría. Considerando la contextualización del Capítulo 1 y la revisión literaria desarrollada en el Capítulo 2, en el presente capítulo se propone un modelo de optimización, que logre satisfacer las características en este contexto.

El objetivo de este capítulo es presentar una solución al problema en programación de personas en servicios de auditoría, consultoría e interventoría. El desarrollo del problema está dividido en tres partes: inicialmente, se presenta el modelo matemático validado por medio del software GAMS, ejecutando varias instancias con el fin de analizar los resultados obtenidos y la capacidad computacional del mismo. Posteriormente, se presenta una metaheurística, específicamente algoritmos genéticos, como propuesta de solución empleada en instancias de mayor tamaño, teniendo en cuenta que en la revisión bibliográfica se evidencia que este método de solución es uno de los más empleados. Finalmente, se realiza una comparación con una instancia obtenida de una organización dedicada a la programación de servicios de auditoría, consultoría e interventoría y se desarrollan las instancias del modelo matemático con el algoritmo genético. A partir de esta instancia, se definen los indicadores bajo los cuales serán evaluados los resultados.

3.2 PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE PERSONAS EN EMPRESAS DE AUDITORÍA, CONSULTORÍA E INTERVENTORÍA - MODELO MATEMÁTICO

En este trabajo se desarrollará una aplicación del problema WSRP aplicado en la prestación de servicios de auditoría, consultoría, e interventoría. Las características y supuestos son:

Características

- N tareas, para este caso son servicios de revisión en las organizaciones cliente.
- N recursos, para este caso son personas con habilidades y perfiles determinados.
- Tiempos de servicios determinísticos.
- Función objetivo: como se mencionó en el capítulo anterior, existen diferentes objetivos a resolver para el problema WSRP. Sin embargo, este trabajo se concentra en lograr una reducción de los costos de asignación de personas a los clientes.

Supuestos

- Cada cliente requiere al menos un perfil.
- Cada persona cuenta con al menos un perfil.
- Una vez se inicia la ejecución del servicio, no es posible interrumpirlo.
- Las personas pueden ser trasladadas entre diferentes puntos geográficos.
- Las personas se encuentran agrupadas por ubicación geográfica, cada ubicación recibe el nombre de sucursal.
- Cada persona cuenta con una capacidad de tiempo limitada.
- El costo por hora de cada persona varía de acuerdo con la cantidad de perfiles que tenga y el tipo de vinculación o contrato con la organización encargada de realizar la programación.

3.2.1 MODELO MATEMÁTICO

Teniendo en cuenta los siguientes conjuntos: K clientes, J sucursales, I personas, P perfiles, se pretende encontrar una asignación $w_{i,j,k,p}$ que cumpla con las siguientes condiciones:

- Las J sucursales cuentan con P perfiles disponibles para la asignación, sin embargo, es posible realizar traslados.
- Cada traslado de P entre J representa un costo asociado a los viáticos $ctr_{i,j}$ que es asumido por las empresas.
- Cada I persona debe contar con uno o más P perfiles $madv_{i,p}$ y la asignación como el tiempo trabajado, representa un costo por hora ctp_p estándar para todos los clientes.
- Cada I persona según su tipo de contrato cuenta con una capacidad limitada de horas para asignar chp_i .
- Existen J sucursales que deben dar cubrimiento a la demanda $de_{k,p}$ de cada uno de los clientes k .
- Cada k cliente debe determinar un tiempo de inicio, el cual determina la hora en el que se puede atender la visita y un tiempo de terminación $tfas_{k,p}$ que define la hora máxima en la que se puede prestar el servicio.
- Si un cliente no atiende una visita o la cancela este será penalizado con el mismo costo en caso de haber realizado la visita, de igual manera deberá solicitar el servicio como si fuese nuevo.

A continuación, se describen los conjuntos, parámetros, variables, restricciones y la función objetivo que modelan el problema:

Conjuntos:

K :	<i>clientes</i>
J :	<i>sucursales</i>
I :	<i>personas</i>
P :	<i>perfiles</i>

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

Parámetros:

$de_{k,p}$: horas necesarias del perfil p para el cliente k .

$madp_{i,p}$: matriz de parámetros: { 1. si la persona i cumple con el perfil p 0 e. o. c }

chp_i : capacidad en horas de la persona i

$tias_{k,p}$: tiempo de inicio de la ventana de asignación del cliente k en el perfil p .

$tfas_{k,p}$: tiempo de terminación de la ventana de asignación del cliente k en el perfil p

$ctr_{i,j}$: costo de traslado de la persona i a la sucursal j

ctp_p : costo de hora por perfil p

Variables:

$w_{i,j,k,p}$: {1 si se asigna la persona i a la sucursal j al cliente k del perfil p 0 e. o. c }
 $x_{i,j}$: {1 si se asigna el perfil i a la sucursal j 0 e. o. c }

$h_{i,j,k,p}$: inicio en tiempo de la persona i , sucursal j cliente k perfil p

$ti_{i,j,k,p}$: terminación en tiempo de la persona i , sucursal j cliente k perfil p

$N_{i,j,k,p}$: duración en la asignación de persona i sucursal j cliente k perfil p

$y_{i,j,k,p,m,b,e}$: {1 si la persona i hace el servicio del perfil p al cliente k en la sucursal j ;

Restricciones

Restricción 1: Garantiza que todas las personas p sean asignadas a una sucursal j .

$$\sum_{\forall j \in J} x_{i,j} = 1 ; \quad \forall i \in I \quad (1)$$

Restricción 2: Asegura que el perfil p corresponde a una única sucursal j .

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

$$\sum_{\forall p \in P} \sum_{\forall k \in K} w_{i,j,k,p} \leq M x_{i,j}; \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2)$$

Restricción 3: Garantiza que no sean asignados más perfiles de los disponibles en cada sucursal.

$$\sum_{\forall k \in K} \sum_{\forall p \in P} w_{i,j,k,p} \geq x_{i,j}; \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3)$$

Restricción 4: Garantiza que la asignación al cliente sea realizada en el periodo de inicio indicado por el mismo.

$$h_{i,j,k,p} \geq tias_{k,p} - M(1 - w_{i,j,k,p}); \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall p \in P \quad (4)$$

Restricción 5: Garantiza que la asignación al cliente sea terminada en el periodo de finalización indicado por el cliente.

$$t_{i,j,k,p} \leq tfas_{k,p} + M(1 - w_{i,j,k,p}); \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall p \in P \quad (5)$$

Restricción 6 y 7: Garantizan que se cumpla con la duración de cada asignación.

$$n_{i,j,k,p} = t_{i,j,k,p} - h_{i,j,k,p}; \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall p \in P \quad (6)$$

$$n_{i,j,k,p} \leq w_{i,j,k,p} * M; \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall p \in P \quad (7)$$

Restricción 8: Garantiza que la asignación del perfil p sea igual a las horas solicitadas por el cliente k .

$$\sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall j \in J} n_{i,j,k,p} = de_{k,p}; \quad \forall k \in K, \forall p \in P \quad (8)$$

Restricción 9: Permite asegurar que el perfil p corresponda al perfil solicitado por el cliente k .

$$w_{i,j,k,p} \leq madp_{i,p}; \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall p \in P, \forall j \in J \quad (9)$$

Restricción 10: Garantiza que no se supere el tiempo disponible para la asignación de cada perfil.

$$\sum_{\forall p \in P} \sum_{\forall k \in K} \sum_{\forall j \in J} n_{i,j,k,p} \leq chp_i; \quad \forall i \in I, (10)$$

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

Restricción 11: Garantiza que un perfil no pueda ser asignado a varios clientes.

$$H_{i,m,b,e} \geq T_{i,j,k,p} - M(1 - Y_{i,j,k,p,m,b,e}) \quad \forall i \in I, \forall j, m \in J, \forall b, k \in K, \forall j, m \in J, \forall p, e \in P \quad (11)$$

Restricción 12 a 17: Restricciones de no negatividad de cada una de las variables.

$$w_{i,j,k,p} \geq 0 \quad \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall p \in P \quad (12)$$

$$X_{i,j} \geq 0 \quad \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (13)$$

$$H_{i,j,k,p} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall p \in P \quad (14)$$

$$T_{i,j,k,p} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall p \in P \quad (15)$$

$$N_{i,j,k,p} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall p \in P \quad (16)$$

$$y_{i,j,k,p,m,b,e} \geq 0 \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j, m \in J, \forall b, k \in K, \forall j, m \in J, \forall p, e \in P \quad (17)$$

Con el objetivo de minimizar el costo de asignación de personal se propone la siguiente función objetivo:

$$\text{Minimizar } z: \sum_{\forall i \in I} \sum_{j \in J} ctr_{i,j} * x_{i,j} + \sum_{\forall i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{\forall k \in K} \sum_{p \in P} ctp_p * n_{i,j,k,p}$$

3.2.2 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático propuesto fue validado con el software GAMS, la ejecución se realizó en un computador MacBook Pro, procesador Intel Core i5 de 2.4 GHz y 4GB de memoria RAM. De igual manera, el código fuente se presenta en el anexo 1. A continuación, se presenta la validación preliminar:

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

Tabla 3. Requerimiento cliente

Sucursal (j)	Cliente (k)	Gerente de auditoría financiera GAF	Senior auditoría financiera SAF	Semi senior auditoría financiera SSAF	Profesional auditoría financiera PAF	Asistente auditoría financiera AAF
Bogotá	Cliente 1	2	6	0	0	10
Medellín	Cliente 2	2	0	8	6	0
Bogotá	Cliente 3	3	4	0	7	0

Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 4, se presentan los recursos disponibles para satisfacer los requerimientos presentados en la Tabla 3.

Tabla 4. Características de los recursos disponibles

Persona (i)	Perfil (p)	Sucursal (j)	Contrato (o)	Costo de asignación \$/hora
AM Andrea Montañez	Gerente de auditoría financiera GAF	Bogotá	Directo	\$50,000
MS Marcela Suarez	Senior auditoría financiera SAF	Bogotá	Directo	\$22,000
MS Marcela Suarez	Semi senior auditoría financiera SSAF	Bogotá	Directo	\$19,000
JR Jair Ramírez	Profesional auditoría financiera PAF	Medellín	Indirecto	\$17,000
JR Jair Ramírez	Asistente auditoría financiera AAF	Medellín	Indirecto	\$10,000

Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 5, se indican los costos estimados para los traslados de personas entre sucursales, en caso de ser necesarios.

Tabla 5. Costos de traslados entre sucursales

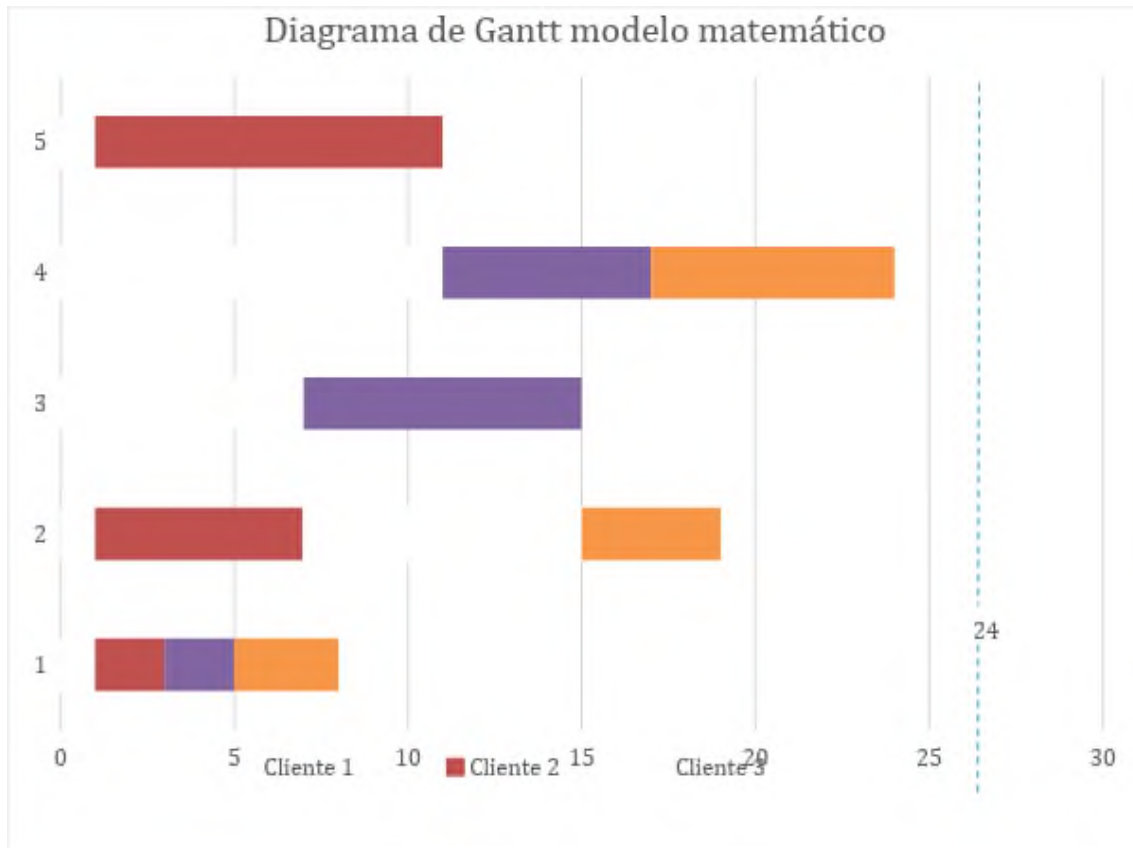
Persona (i)	Bogotá	Medellín	Atlántico
AM Andrea Montañez	\$30,000	\$300,000	\$300,000
MS Marcela Suarez	\$10,000	\$100,000	\$100,000
JR Jair Ramírez	\$92,000	\$20,000	\$92,000

Fuente: Elaboración Propia.

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

Los resultados obtenidos para este ejemplo se muestran en la figura 6.

Figura 6. Aplicación del modelo matemático Gantt



Fuente: Elaboración Propia.

El diagrama de Gantt permite demostrar que el modelo matemático cumple con las características de asignación y las restricciones planteadas. De igual forma, cada barra corresponde al servicio a realizar a cada cliente y el perfil al cual fue asignado. Adicionalmente, se muestra la hora de inicio y fin de cada asignación durante el periodo establecido, así como el tiempo total de la ejecución de las tareas.

Para identificar el comportamiento del modelo matemático con diferentes datos, se desarrollaron 8 instancias adicionales, las cuales fueron obtenidas de los resultados de la programación de una de las empresas. Posteriormente, se fueron agregando datos a cada uno de los conjuntos, observando que el tiempo computacional aumentó hasta finalmente no generar ningún resultado. Los resultados de las instancias se

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

presentan en el anexo 2. El análisis de los resultados obtenidos en las instancias desarrolladas se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de instancias en modelo matemático

Instancia	Número de (i) persona	Número de (p) perfiles	Número de (k)clientes	Costo de asignación	Tiempo de procesamiento en (s)	¿La asignación cumple con los perfiles solicitados?	¿La asignación cumple con los periodos establecidos?
1	3	5	4	\$3.110.000	53	SI	SI
2	3	5	5	\$2.995.000	57	SI	SI
3	3	5	7	\$2.600.000	62	SI	SI
4	4	6	7	\$2.597.000	1524	SI	SI
5	4	7	7	\$3.017.000	1920	SI	SI
6	3	5	9	\$2.023.000	2015	SI	SI
7	4	6	9	\$2.623.000	2102	SI	SI
8	4	7	9	\$2.743.000	2700	SI	SI

Fuente: Elaboración Propia.

Las instancias desarrolladas permiten concluir que: el modelo matemático propuesto cumple con las características del problema WSRP aplicado en servicios de auditoría, consultoría e interventoría. Aunque los tiempos de procesamiento son altos, el modelo matemático puede ser empleado como una herramienta para evaluar las mejores opciones de programación de servicios a corto plazo.

Del modelo presentado se puede concluir que: logra cumplir correctamente con la asignación de los perfiles requeridos por el cliente, de igual manera, brinda cumplimiento a los tiempos mínimos y máximos de inicio y finalización establecidos por los clientes.

En la tabla 6, se muestran los tiempos de procesamiento para cada instancia, evidenciando un aumento en el tiempo a medida que se ingresa un mayor número de datos. Con un tiempo total mayor a 2000 segundos se ejecuta una instancia de 9 clientes con 4 personas y 7 perfiles ubicados en tres sucursales. Además, se presentan los valores de la función objetivo de cada instancia.

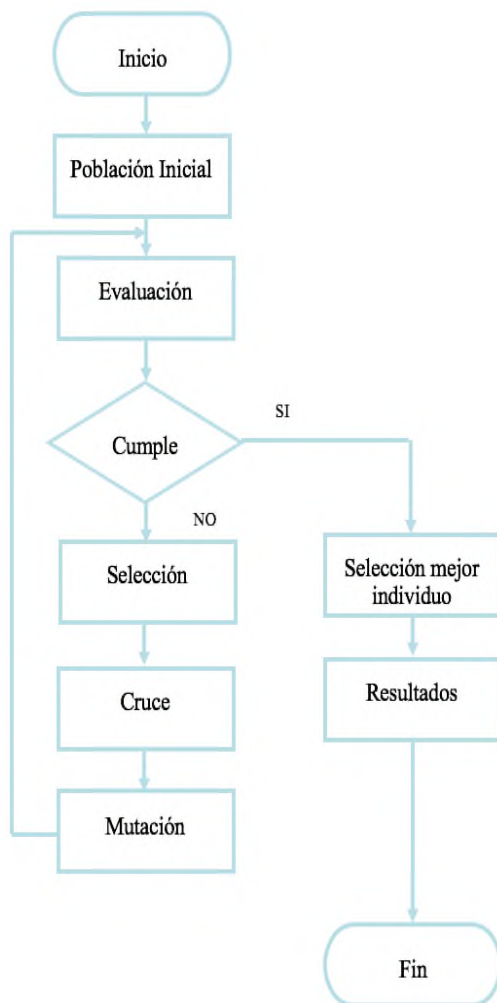
Los resultados de las instancias con relación al tiempo computacional y la limitación de datos para cada conjunto justifican proponer la aplicación de un método metaheurístico, que permita generar los resultados del modelo matemático, con tiempos de procesamiento menores en instancias de mayor tamaño, teniendo en cuenta que se proyecta una programación de personas para mínimo 90 días de utilización de recursos.

3.3 ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos como indica el flujograma de la figura 7, se caracterizan por tener una población inicial, evaluada por medio de una función fitness. Si el resultado de la función cumple con los requerimientos solicitados se selecciona esta población, de lo contrario se procede a seleccionar individuos de la población inicial y se cruzan entre sí, dando origen a los individuos de la nueva generación. Durante el proceso de cruce puede presentarse la mutación del nuevo individuo. Si esta mutación es mala el nuevo hijo morirá al nacer, pero si es beneficiosa se irá transmitiendo en las generaciones futuras. Los individuos que surgen del cruce y de la mutación se evalúan con la función fitness, asegurando que cumplan con los requerimientos solicitados hasta completar el criterio de parada. (Arranz de la Peña y Parra Truyol, 2007)

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

Figura 7. Diagrama de flujo de algoritmo genético (GA)



Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 7 se presenta el pseudocódigo donde se muestra cada uno de los pasos por llevar a cabo en el algoritmo genético propuesto. Posteriormente, en la sección 3.3.1 se presentarán detalladamente cada uno de estos pasos.

Figura 8. Pseudocódigo del algoritmo genético (GA)

```
INICIO /*Algoritmo genético*/
  Paso 1 generar la población inicial
  Paso 2 representación de la solución (cromosoma)
  Paso 3 Fitness
  MIENTRAS NO terminado HACER
    INICIO /*Producir nueva generación*/
      PARA Tamaño población / 2 HACER
        INICIO /*Ciclo reproductivo*/
          Paso 4 Selección
          Paso 5 cruce
          Paso 6 Probabilidad de cruce
          Paso 7 Mutación
          Paso 8 Probabilidad de mutación
          Paso 9 Criterio de parada
        FIN /*Ciclo reproductivo*/
      SI La población ha convergido ENTONCES
        Terminado = VERDADERO
      FIN /*Producir nueva generación*/
    FIN /*Algoritmo genético*/
```

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.1 DISEÑO DEL ALGORITMO GENÉTICO PROPUESTO

Los algoritmos genéticos han demostrado ser efectivos para resolver problemas de optimización en varios campos. Para el caso de problema de programación de personas, proporcionan ventajas tales como: la posibilidad de generar búsquedas multipunto, lo cual, aumenta el espacio de búsqueda, proporciona resultados en tiempos de ejecución cortos y pueden proporcionar diferentes soluciones de manera simultánea. El algoritmo genético propuesto se desarrolló teniendo en cuenta los siguientes 9 pasos:

Paso 1. Crear la población inicial

La creación de la población inicial se realizó mediante el algoritmo descrito en la figura 9, el cual, tiene como objetivo determinar el orden óptimo de los clientes de acuerdo

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

con sus restricciones. En la actividad número 1 del algoritmo, se toman los datos de entrada como:

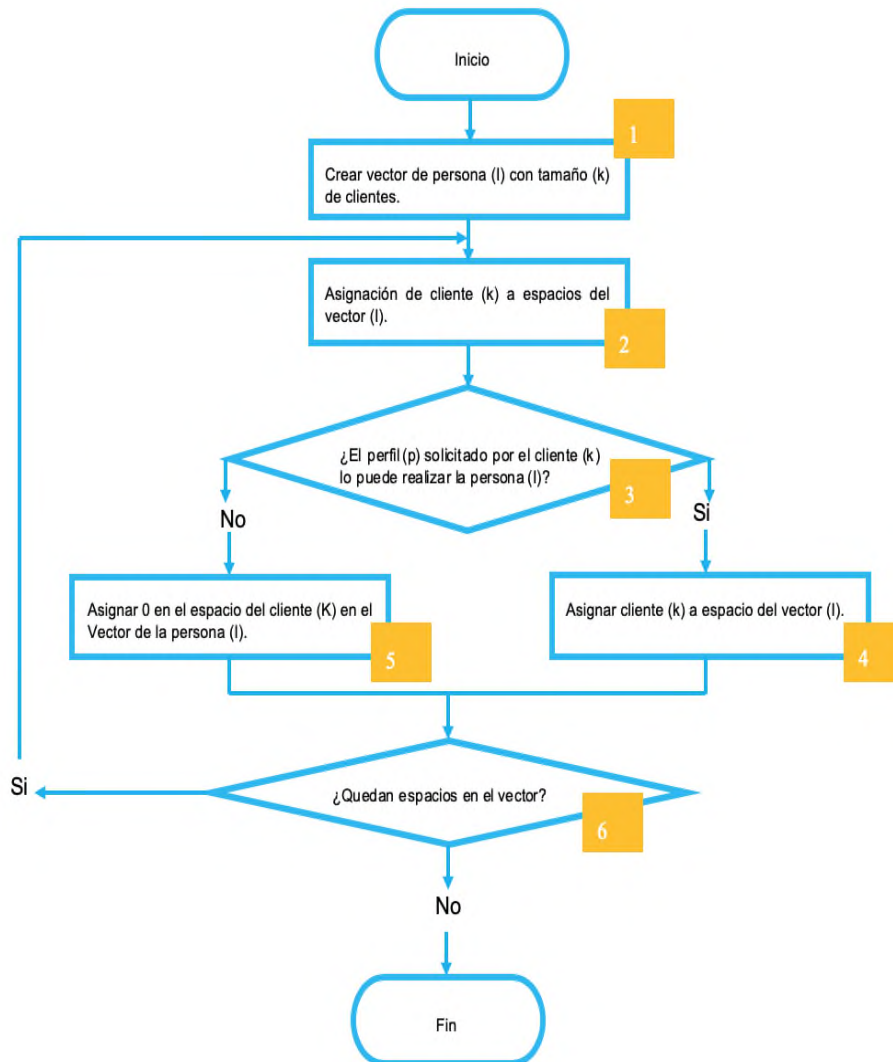
- Número de personas y perfiles disponibles por la empresa prestadora del servicio.
- Número de clientes.
- Perfiles requeridos y número de horas requeridas por cada cliente.

Con los anteriores datos, se procede a crear el vector con el tamaño del número de clientes ingresados. Al tener el tamaño del vector, cada cliente se representará por medio de un número y se asigna de manera aleatoria a los espacios del vector como se identifica en la actividad dos.

Para verificar la factibilidad del cromosoma, se desarrollan las tareas 3, 4 y 5, las cuales se encargan de no permitir que sean asignados perfiles que no corresponden a un cliente o que se asigne más clientes de los existentes. Este algoritmo se repite hasta completar el número del tamaño de la población inicial escogido.

El tamaño de la población hace referencia al número de cromosomas que se debe tener en la población para una generación determinada. De esta manera, cuan mayor es la población, más fácil es explorar el espacio de búsqueda. (Arranz de la Peña y Parra Truyol, 2007). Teniendo en cuenta que una población inicial grande requiere un consumo alto de memoria y tiempo de procesamiento, algunos autores como Alcaraz, Maroto y Ruiz, (2003) recomiendan una población inicial de 100 cromosomas. El tamaño de la población es un parámetro que deberá ser ingresado por el usuario. Se propone una población inicial de 100 cromosomas.

Figura 9. Diagrama de flujo de algoritmo de población inicial



Fuente: Elaboración Propia

Paso 2. Cromosoma

La codificación de los individuos (cromosomas) de la población se representa por medio de un vector $V = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1})$, que indica que cada cliente está representada por un número que se coloca en una cadena de números. La longitud de un cromosoma es el número de clientes. Todos los clientes se enumeran secuencialmente en el orden de su asignación, cuando el número es 0 se considera

que no se está atendiendo ningún cliente. Un ejemplo de la estructura del cromosoma se muestra en la figura 10.

Figura 10. Codificación del cromosoma

Orden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Persona 1	1	4	2	5	0	3	7	6	9	8
...										
Persona n	22	29	21	28	23	27	20	25	24	26

Fuente: Elaboración Propia.

Paso 3. Fitness

Un aspecto importante en los algoritmos genéticos es la determinación de la función fitness o fortaleza de los individuos en la población, en este caso la función fitness evalúa el costo total de las asignaciones de las personas. Esta función se presenta en la figura 9.

Figura 11. Función fitness

$$\text{Minimizar } z: \sum_{\forall i \in I} \sum_{j \in J} ctr_{i,j} * x_{i,j} + \sum_{\forall i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{\forall k \in K} \sum_{p \in P} ctp_p * n_{i,j,k,p}$$

Fuente: Elaboración Propia.

Paso 4. Selección

Es necesario realizar una selección con los individuos más capacitados para que estos sean los que se reproduzcan con mayor probabilidad. En este caso se emplea la selección por torneo. Esta selección se efectúa mediante un torneo entre un pequeño subconjunto de individuos elegidos al azar desde la población, ordenando a cada uno de los concursantes de acuerdo con su fitness y eligiendo el ganador del torneo. En la figura 12 se muestra el pseudocódigo utilizado para realizar la selección.

Figura 12. Pseudocódigo método de selección

```
DEFINIR tamaño del subconjunto
  CALCULAR el fitness acumulado
    MIENTRAS el tamaño de subconjunto > 0
      ELEGIR concursante
    FIN /*Mientras*/
  ORDENAR los concursantes de acuerdo a su fitness y elegir el ganador del
torneo
  DEVOLVER el cromosoma ganador del torneo
FIN /*Calcular*/
FIN /*Definir*/
```

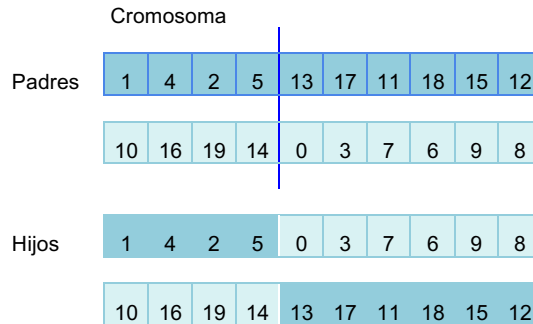
Fuente: Elaboración Propia.

Paso 5. Cruce

El operador de cruce es la función mediante la cual se crean los nuevos individuos a partir de una pareja de cromosomas. En este caso se utilizó el cruce de punto único con el siguiente procedimiento:

- Se genera un número entero aleatorio u entre 1 y n , donde n es el tamaño del cromosoma, el cual representará el punto de cruce entre los cromosomas.
- Uno de los hijos hereda los genes del padre de izquierda a derecha y completa su secuencia genética heredando los genes de la madre, de izquierda a derecha, que aún no formen parte del nuevo individuo.
- El segundo hijo hereda los genes de la madre de izquierda a derecha y completa su secuencia genética heredando los genes del padre, de izquierda a derecha, que aún no formen parte de esta (Niermann, 2005). En la figura 13 se presenta un ejemplo de este operador.

Figura 13. Ilustración de cruce de punto único



Fuente: Elaboración Propia.

Paso 6. Probabilidad de cruce

La probabilidad de cruce es un parámetro para decidir la frecuencia con la que se realizará el cruce, si por ejemplo la probabilidad es 1, significa que todos los descendientes se generan por medio de cruce; si la probabilidad es 0, toda la generación es hecha por copias exactas de la generación anterior aun cuando esto no implica que la nueva generación sea la misma. El cruce se realiza con el fin de obtener nuevas generaciones que aporten mejores resultados Niermann (2005).

Con relación a la probabilidad de cruce, Niermann (2005) propone la utilización de los porcentajes cercanos a 1, para este caso se realizó una instancia de prueba cambiando el porcentaje de cruce desde 0 hasta 1 como se muestra en la figura 14. El resultado más favorable se obtiene usando un porcentaje de 0.80, en el que la función objetivo toma el valor mínimo: \$ 2.343.483

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

Figura 14. Probabilidad de cruce



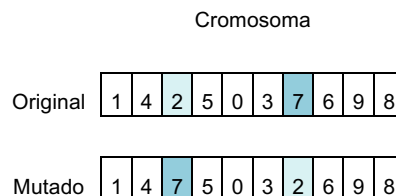
Fuente: Elaboración Propia.

Paso 7. Mutación

La mutación tiene como objetivo evitar que el algoritmo quede atrapado en un mínimo local. Por lo tanto, la mutación se encarga de recuperar material genético perdido y altera aleatoriamente la información genética. Para lograrlo, se utilizó el método de mutación de intercambio que consiste en intercambiar un par de individuos, asegurando que se continúe cumpliendo con las restricciones del problema. Para lograr lo anteriormente propuesto, los pasos a seguir son:

- Generar un número aleatorio entre 1 y $n-1$.
- Si se cumple con las restricciones del problema se deberán intercambiar ambas tareas. En caso contrario se requiere volver al procedimiento anterior. La figura 15 muestra un ejemplo de la mutación propuesta.

Figura 15. Ilustración de mutación de intercambio



Fuente: Elaboración Propia.

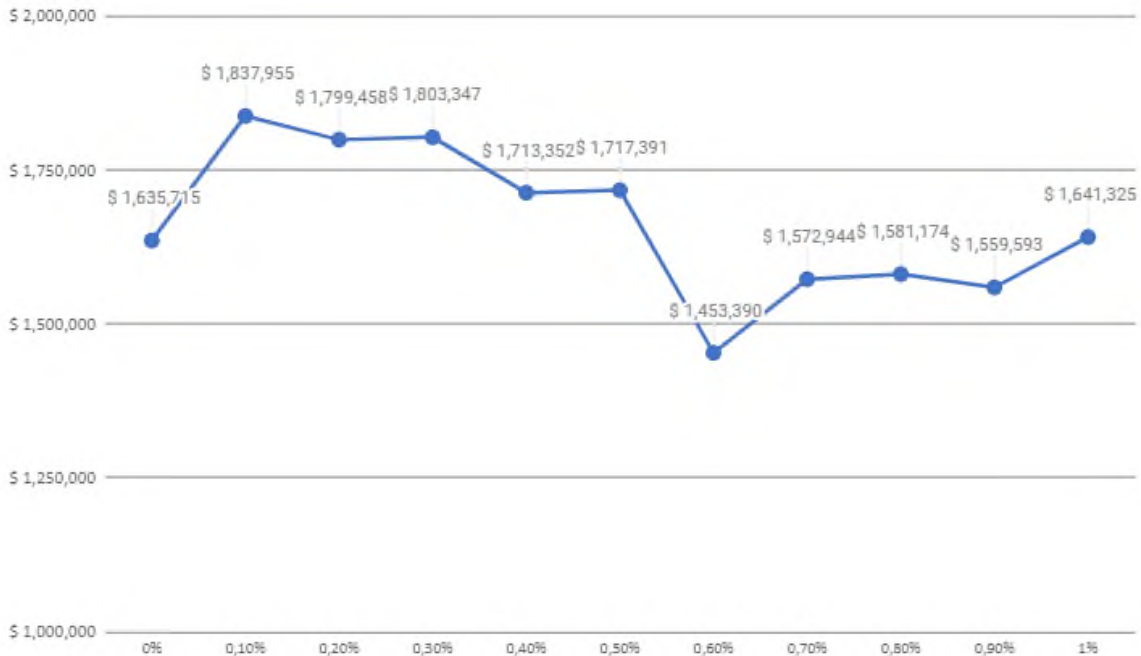
Paso 8. Probabilidad de mutación

La probabilidad de mutación decide con qué frecuencia se mutarán partes del cromosoma. Si no hay mutación, se generará inmediatamente la descendencia después del cruce. Si la probabilidad es del 1 % se cambiará todo el cromosoma.

Adicionalmente, (Arranz de la Peña y Parra Truyol, 2007), proponen utilizar un valor entre 0 y 0,1%, para este caso se realizó una instancia de prueba, tomando inicialmente la probabilidad de mutación de Arranz y Parra, de manera gradual se modificó este porcentaje. El porcentaje más favorable es de 0,6% por sus resultados en el valor de la función fitness. Este resultado se representa en la figura 16.

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

Figura 16. Probabilidad de mutación



Fuente: Elaboración Propia.

Paso 9. Criterio de parada

La finalización del algoritmo genético generalmente viene determinada por los siguientes criterios:

- Haber alcanzado un número máximo de generaciones.
- Haber alcanzado el tiempo máximo de resolución.
- Se ha encontrado una solución que satisface condiciones mínimas deseadas.
- Se ha llegado a una solución de tal manera que las siguientes generaciones no producen una mejora sustancial en comparación con el esfuerzo necesitado para alcanzar dicha mejora.
- Combinación de dos o más de las estrategias mencionadas anteriormente (Alcaraz, Maroto y Ruiz, 2003).

Teniendo en cuenta las posibilidades anteriores, se decide para el diseño del algoritmo como criterio de parada el alcance de un número determinado de generaciones, ya que no se cuenta con un límite de tiempo y se busca mejorar los resultados actuales.

3.3.2 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO

El algoritmo genético se programó en el lenguaje JAVA. Para su desarrollo se utilizó el software Eclipse, con el objetivo de poder ingresar de manera más práctica los datos de entrada. La ejecución se realizó en un computador MacBook Pro, procesador Intel Core i5 de 2.4 GHz y 4GB de memoria RAM.

3.3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ALGORITMO GENÉTICO

Para comprobar el funcionamiento del algoritmo genético se procedió a realizar dos pruebas; la primera consiste en ejecutar las 8 instancias del modelo matemático en el algoritmo propuesto y proceder a comparar los resultados obtenidos, la segunda prueba se basa en la metodología backtesting, en la cual se ejecuta una instancia correspondiente a la programación de dos meses en la empresa TGS GLOBAL.

3.3.3.1 RESULTADOS DE INSTANCIAS APLICADAS AL MODELO MATEMATICO VS RESULTADOS DE INSTANCIAS APLICADAS EN LA METAHEURISTICA

Al implementar en el algoritmo genético los datos de las 8 instancias aplicadas en el modelo matemático se obtuvieron los resultados con un tiempo de procesamiento inferior a los 30 segundos. En el anexo 5, se identifica los resultados de cada una de las instancias y en la tabla 7 se compara los resultados del modelo matemático con los resultados de la metaheurística algoritmos genéticos obteniendo que el modelo es mejor en un rango del 6% al 7%.

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

Tabla 7. Verificación de instancias relacionada en el modelo matemático ejecutadas por la metaheurística.

Instancias	Número de clientes	Número de perfiles	Modelo	Metaheurística	Porcentaje diferencia
1	4	5	\$2.907.000	\$3.110.000	6,98%
2	5	5	\$2.800.000	\$2.995.000	6,96%
3	7	5	\$2.431.000	\$2.600.000	6,95%
4	7	6	\$2.430.000	\$2.597.000	6,87%
5	5	6	\$2.820.000	\$3.017.000	6,99%
6	9	5	\$1.891.000	\$2.023.000	6,98%
7	9	6	\$2.452.000	\$2.623.000	6,97%
8	9	5	\$2.564.000	\$2.743.000	6,98%

Fuente. Elaboración propia

3.3.3.2 BACKTESTING

Para implementar la metodología backtesting inicialmente, se procede a ejecutar la instancia correspondiente a la programación de dos meses en la empresa TGS GLOBAL. Esta empresa se dedica a la prestación de servicios de auditoría, consultoría e interventoría. Los datos utilizados por la empresa se relacionan en el anexo 3. En la tabla 8 se resumen las características de esta instancia.

Tabla 8. Resumen instancia de prueba

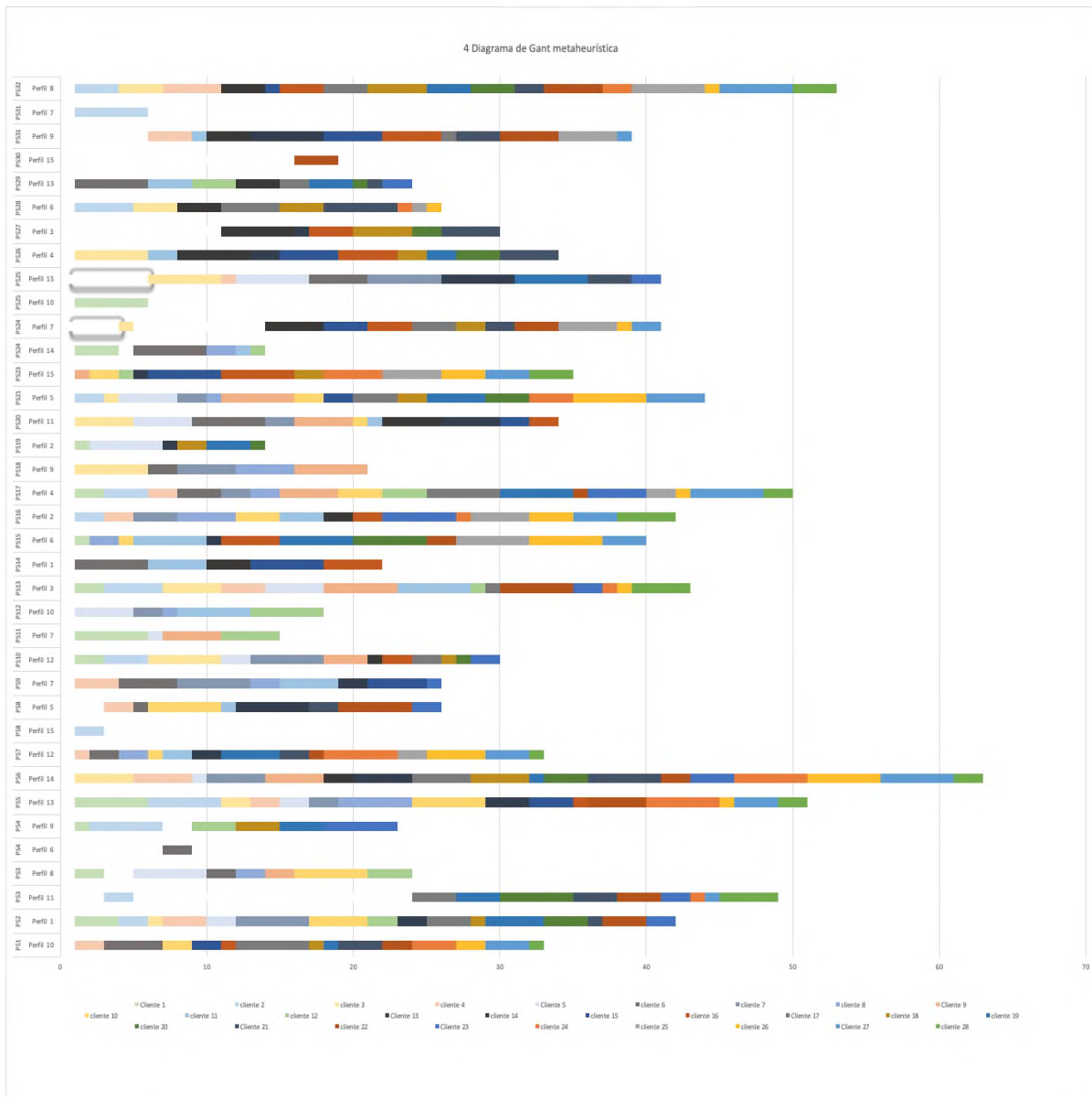
Característica	Cantidad
Personas	32
Perfiles	15
Días disponibles	60
Clientes	28
Sucursales	3

Fuente: Elaboración Propia.

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

Los datos presentados en el anexo 3, fueron ejecutados utilizando el algoritmo genético, obteniendo los resultados que se evidencian en la figura 17, en un tiempo inferior a 30 segundos. Para comprobar los resultados del algoritmo genético se establecen indicadores como: el costo de asignación, el porcentaje de utilización de la capacidad de personas, según su tipo de vinculación y el número de traslados necesarios para la ejecución de los servicios.

Figura 17. Diagrama de Gantt metaheurística



Fuente: Elaboración Propia.

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

A continuación, se presenta el detalle de los indicadores identificados y sus resultados:

- **Costo de las asignaciones**

Este indicador mide el costo de las asignaciones es decir el total de recursos financieros empleados para la prestación de los servicios.

Tabla 9. Costo de asignación

	Instancia 1 resultados Empresa	Instancia 1 resultados Metaheurística
Costos Asignación	\$31,648,000.00	\$18,039,360.00
Costos Traslados	\$29,040,000.00	\$16,552,800.00

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 18. Resultado algoritmo / histórico – costos de asignación



Fuente: Elaboración Propia.

- **Utilización de la capacidad instalada**

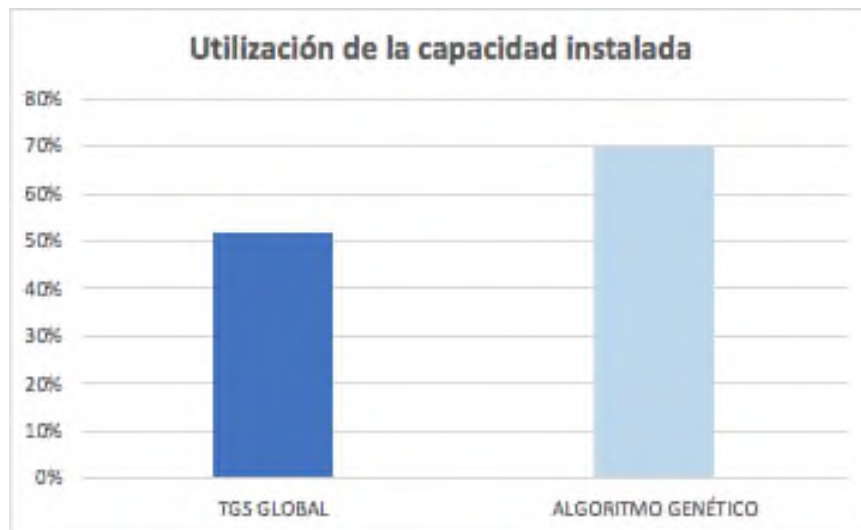
Este indicador mide el porcentaje de la capacidad instalada que fue utilizada durante el periodo de tiempo definido. Este indicador está dividido en dos partes: la disponibilidad de días para las personas con contrato directo y para contrato indirecto, esto debido a que cada tipo de contrato representa una disponibilidad y un costo de asignación diferente.

Tabla 10. Uso de capacidad

Contrato	TGS GLOBAL		ALGORITMO GENÉTICO	
	Directos	Indirecto	Directos	Indirecto
Días disponibles	1305	615	1305	615
Días Asignados	678	300	909	196
% Utilización	52%	49%	70%	32%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 19. Resultado algoritmo / histórico – ocupación



Fuente: Elaboración Propia.

- **Desplazamientos necesarios**

Este indicador cuenta el número de asignaciones que requieren traslados de personas entre diferentes puntos geográficos.

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

Tabla 11. Número de traslados necesarios

TGS GLOBAL		METAHEURÍSTICA	
Traslados	Servicios	Traslados	Servicios
Sin Traslado	88	Sin Traslado	98
Con Traslado	20	Con Traslado	10
% Traslados necesarios	23%	% Traslados necesarios	10%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 20. Resultado algoritmo / histórico – traslados



Fuente: Elaboración Propia.

Los indicadores arrojan como resultado una disminución de 43% en el costo de asignación, como se muestra en la tabla 10. En cuanto a la capacidad de personas con vinculación directa, esta presenta un aumento positivo en el porcentaje de utilización como lo indica la tabla 11. El algoritmo requiere para esta programación 10 traslados menos con respecto a la programación realizada en la empresa.

3.4 RESUMEN

En el presente capítulo se dio a conocer una propuesta de solución al problema WSRP en programación de personas en servicios de auditoría, consultoría e interventoría. Así mismo, la solución fue representada por medio de un modelo

Capítulo 3. Desarrollo del problema de programación de personas en sistemas de auditoría consultoría e interventoría

matemático y una metaheurística. El modelo matemático se formuló teniendo en cuenta las características propias de la programación en este tipo de del problema. Posteriormente, se presentaron varias instancias que son resultado de la ejecución del modelo encontrando que, aunque cumple con las restricciones planteadas, el modelo matemático no es funcional para instancias de tamaños superiores a 10 clientes. Seguidamente, se presentó el diseño de la metaheurística en algoritmos genéticos, la cual es validada a través de la comparación de los resultados de una instancia real obtenida de una organización dedicada a realizar este tipo de programaciones. Finalmente, se presentaron los indicadores para evaluar la eficiencia del algoritmo con respecto a las programaciones previamente realizadas.

CAPÍTULO 4

ESTUDIO DE CASO: ICONTEC Y TGS GLOBAL

4.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo tiene como objetivo aplicar el método de solución metaheurístico propuesto en el Capítulo 3, por medio de la metodología estudio de caso. El estudio de caso se desarrolla para las organizaciones ICONTEC y TGS GLOBAL, dedicadas a la prestación de servicios de auditoría, consultoría e interventoría. Las tareas por realizar para el estudio de caso son: descripción general de cada organización, descripción de los indicadores a evaluar, aplicación del método metaheurístico y análisis de los resultados.

4.2 ESTUDIO DE CASO (ICONTEC – TGS GLOBAL)

El algoritmo genético propuesto en el capítulo 3 será evaluado por medio de la aplicación de dos estudios de casos realizados en dos organizaciones dedicadas a la programación de servicios de auditoría, consultoría e interventoría. La ejecución del algoritmo se llevó a cabo teniendo en cuenta los parámetros definidos en el capítulo anterior: población inicial de 100 cromosomas, probabilidad de cruce 0.8 y probabilidad de mutación 0.6. A continuación, se presentan cada uno de los casos:

4.2.1 CASO I - ICONTEC

El primer caso por abordar corresponde a la empresa Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC. ICONTEC es una organización dedicada a la prestación de servicios de auditoría. Actualmente cuenta con una capacidad operativa de 225 personas que prestan los servicios de auditoría, de las cuales solo el 24% cuentan

con vinculación directa. De igual manera, tanto el personal directo como indirecto se encuentra distribuido en 5 sucursales en el país. La programación de los servicios se realiza de manera manual para cada cliente y en promedio se realizan 3200 programaciones por semestre.

4.2.1.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO

La aplicación del método en ICONTEC se realizó a partir del mes de enero hasta el mes de junio del presente año. En este periodo se realizaron 3.075 asignaciones en las 5 sucursales, generando un costo de programación total de \$ 675.067.000 millones de pesos con un promedio de uso de personal directo de 64%. Los datos anteriores se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Costo de asignación histórico ICONTEC

Mes	Número de servicios programados	Costo de asignación en pesos	% Uso directo	% Uso Indirecto	%Traslados
Enero	220	\$93,887,000	29%	77%	4%
Febrero	210	\$99,880,000	39%	69%	10%
Marzo	564	\$106,060,000	63%	79%	12%
Abril	645	\$130,392,000	77%	88%	14%
Mayo	595	\$103,900,000	81%	71%	15%
Junio	841	\$140,948,000	93%	92%	18%
	3075	\$675,067,000	64%	79%	12%

Fuente: Elaboración Propia.

Para evaluar el comportamiento del algoritmo se tuvieron en cuenta los siguientes indicadores: costo de asignación, porcentaje de uso de personas con contratación directa y porcentaje de traslados entre sucursales. Por consiguiente, se generaron para cada mes 100 iteraciones.

Para las iteraciones realizadas, inicialmente se evaluó el costo de asignación. Los resultados de enero a junio se muestran a continuación en la figura 21.

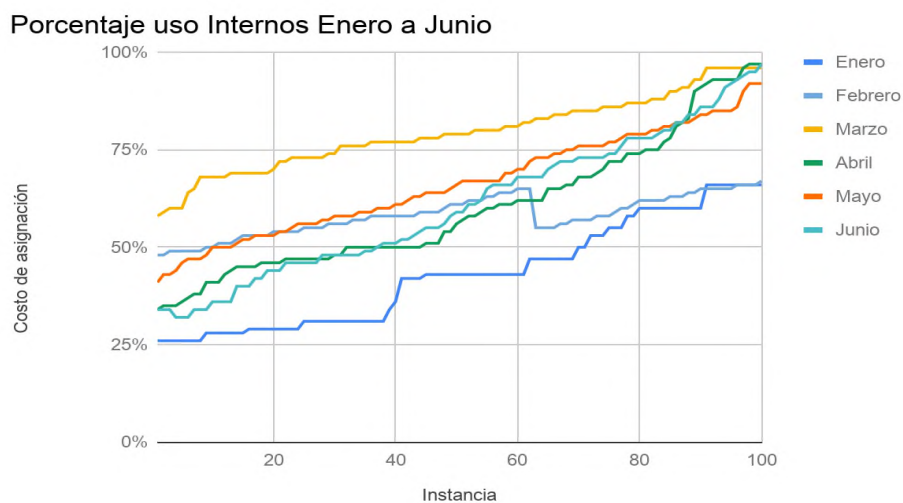
Figura 21. Costo por iteración de asignación de ICONTEC generado por el algoritmo genético



Fuente: Elaboración Propia.

El siguiente indicador está relacionado con el porcentaje de uso de personas con contrato directo, teniendo en cuenta que su disponibilidad de tiempo es completa. Además, este tipo de contrato recibe una remuneración por hora de servicio independiente de su porcentaje de ocupación mensual. El comportamiento del algoritmo respecto al porcentaje de ocupación en contrato directo de cada mes se muestra en la figura 22.

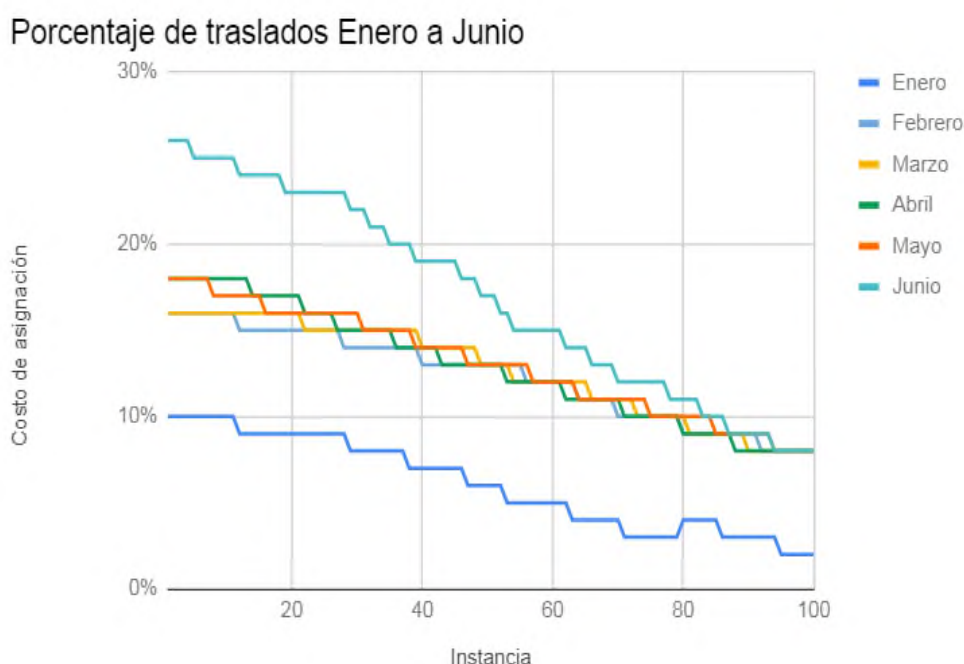
Figura 22. Porcentaje de uso de recurso con contrato directo con ICONTEC



Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, se evalúa el porcentaje de traslados necesarios entre sucursales, teniendo en cuenta que, a menor cantidad de traslados, menor costo por viáticos (transporte, manutención y alojamiento del trabajador). Sin embargo, la ubicación geográfica de algunos clientes y la ausencia de personal en algunas regiones ocasionan la necesidad ineludible de realizar algún traslado. Los resultados de las instancias para este indicador se muestran en la figura 21.

Figura 23. Porcentaje de uso de traslados con ICONTEC



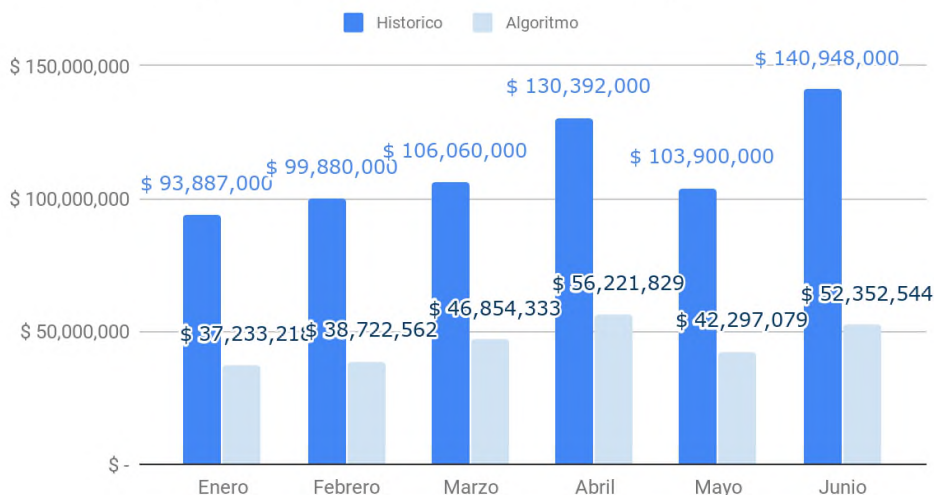
Fuente: Elaboración Propia.

Teniendo en cuenta lo anterior, se seleccionaron los mejores resultados de las 100 instancias de cada mes para cada indicador. Posteriormente, se realizó una comparación tomando como base los datos históricos. La información se presenta en la figura 24

Como se puede observar, en la figura 24, se identifica que el algoritmo alcanza para su función objetivo valores inferiores a los valores reales en todos los meses. En promedio el porcentaje de disminución de los costos de asignación de cada mes es de 40.6%. El costo total logrado por el algoritmo es de \$273.681.565

Figura 24. Costo de asignación histórico vs algoritmo genético caso ICONTEC

Resultados algoritmo/histórico - Costo de asignación

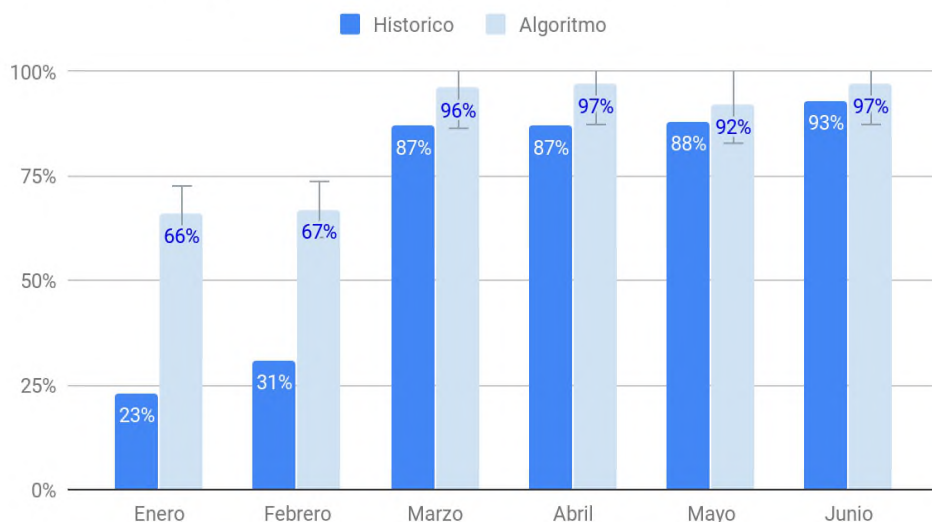


Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto al porcentaje de ocupación de las personas con contrato directo, se evidencia un aumento con relación a los datos históricos. En promedio del 85,8% de uso durante los 6 meses evaluados. Los datos se muestran en la figura 25.

Figura 25. Ocupación interna histórico vs algoritmo genético caso ICONTEC

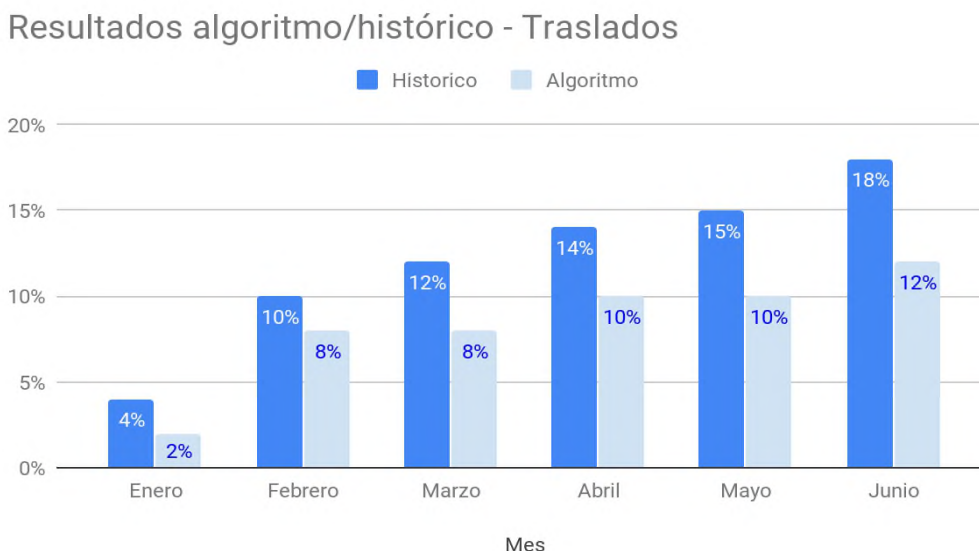
Resultados algoritmo/histórico - Ocupación Directos



Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados del algoritmo indican un menor porcentaje de traslados en la mayoría de los meses. En promedio un 8.33% de los servicios requieren traslados. Los datos se muestran en la figura 26

Figura 26. Traslados entre sucursales a histórico vs algoritmo genético caso ICONTEC



Fuente: Elaboración Propia.

4.2.2 CASO II TGS GLOBAL

El segundo caso corresponde a la empresa TGS GLOBAL, esta es una empresa dedicada a la prestación de servicios de consultoría, auditoría e intervectoría. TGS GLOBAL cuenta con 110 personas de los cuales el 69% tienen contrato a término fijo, es decir, directo y el restante tiene contrato por prestación de servicios o indirecto. Actualmente la empresa cuenta con 4 sucursales y la programación de los servicios se realiza de manera manual con una semana de diferencia.

4.2.2.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO

El método de solución se aplica para los meses de enero a junio del presente año. Se programaron en total 3328 servicios en las 4 sucursales generando un costo de \$456,800,320.

Tabla 13. Costo de asignación histórico TGS

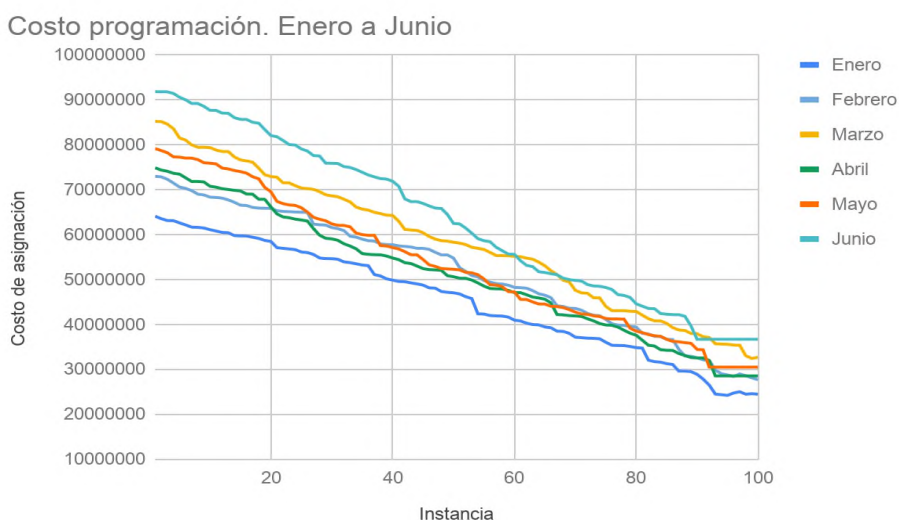
Mes	Número de servicios programados	Costo de asignación en pesos	% Uso Directo	% Uso Indirecto	%Traslados
Enero	363	\$62,568,200	72%	43%	11%
Febrero	410	\$70,345,090	75%	53%	10%
Marzo	495	\$85,543,600	64%	39%	16%
Abril	432	\$72,543,000	63%	51%	15%
Mayo	467	\$76,400,430	74%	54%	18%
Junio	520	\$89,400,000	78%	58%	21%
	2687	\$456,800,320	71%	50%	15%

Fuente: Elaboración Propia.

Para el caso de estudio desarrollado en TGS GLOBAL, se tuvieron en cuenta los mismos indicadores mencionados en el caso de estudio ICONTEC. De la misma manera se generaron para cada mes 100 iteraciones.

Con relación a los costos de asignación, los resultados de enero a junio se muestran en la figura 27.

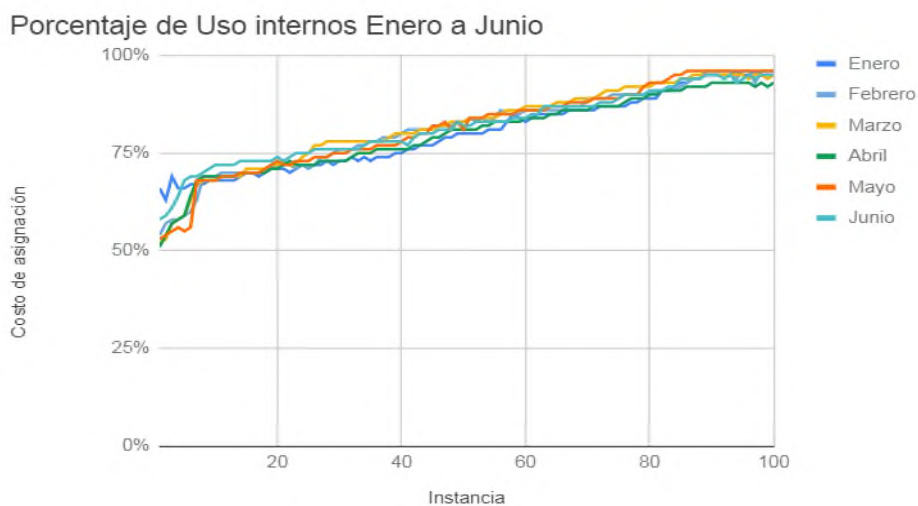
Figura 27. Costo por iteración de asignación de TGS GLOBAL generado por el algoritmo genético



Fuente: Elaboración Propia.

Al igual que en el caso 1, el segundo indicador es el porcentaje de uso de personas con contrato directo, en este caso como se evidencia en la figura 28 la asignación de personal está entre el 50% al 97%.

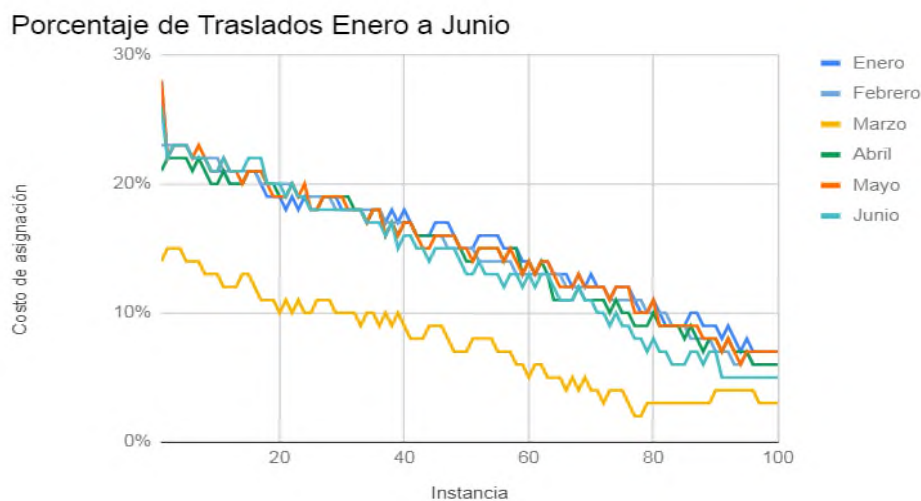
Figura 28. Porcentaje de uso de recurso con contrato directo con TGS



Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, se presentan los datos obtenidos con relación a los traslados necesarios para la ejecución de los servicios. Para TGS GLOBAL los traslados son frecuentes, debido a que algunos servicios como interventoría requieren visitas a proyectos ubicados fuera de la zona rural.

Figura 29. Porcentaje de traslados para TGS



Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se presentan los mejores resultados de las instancias obtenidas en cada mes para cada indicador y se procede a comparar con los datos históricos presentados por TGS. La información se muestra en las gráficas 28 a 30.

Inicialmente, la función objetivo muestra que el algoritmo genera un costo de asignación inferior a los valores históricos en cada uno de los meses, presentando una mejora en el costo de asignación en un 39%.

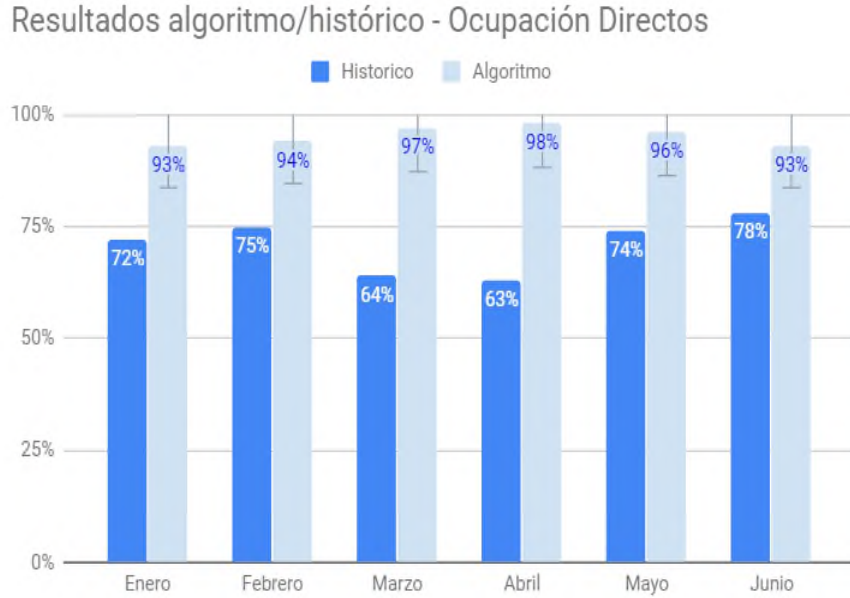
Figura 30. Costo de asignación histórico vs algoritmo genético caso TGS



Fuente: Elaboración Propia.

En cuanto a los porcentajes de utilización de personas con contrato directo que se muestra en la figura 31, se evidencia que en cada uno de los meses el algoritmo genético utiliza un porcentaje mayor de personas con contrato directo con respecto al dato que presentó en el histórico de la empresa.

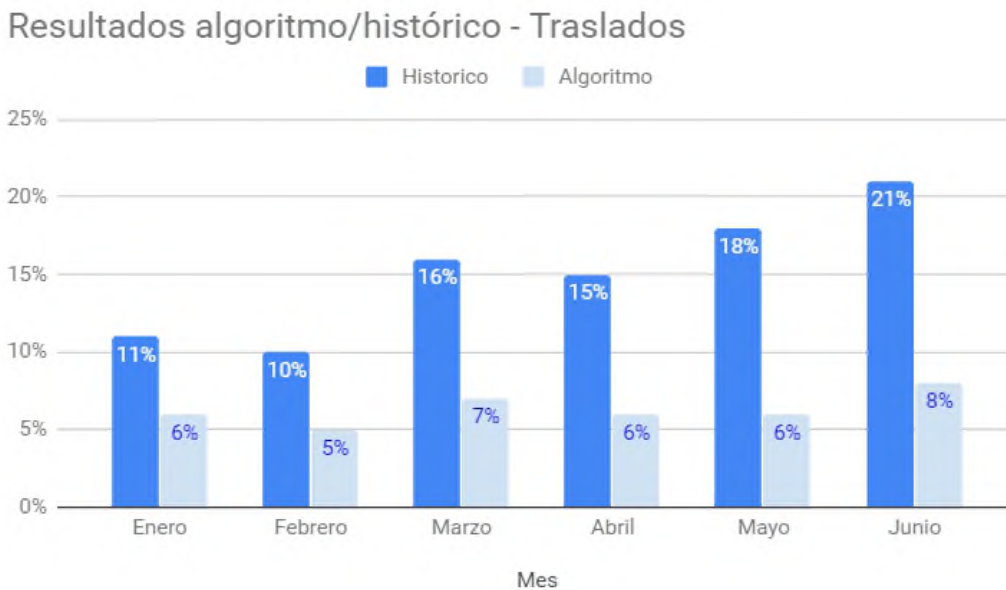
Figura 31. Ocupación interna histórico vs algoritmo genético caso TGS



Fuente: Elaboración Propia.

Por último, se muestra en la figura 30 que los resultados del algoritmo realizan menos traslados de personal entre sucursales. El 6.33% de los servicios requieren realizar al menos un traslado.

Figura 32. Traslados entre sucursales a histórico vs algoritmo genético caso TGS



Fuente: Elaboración Propia.

4.3 RESUMEN

En este capítulo se presentaron dos casos de estudios desarrollados en las empresas ICONTEC y TGS GLOBAL. Estas empresas cuentan con una actividad económica basada en la asignación de personas para la revisión, control y asesoría en normatividad. Los estudios de casos se presentaron con la finalidad de comprobar el comportamiento del diseño del algoritmo genético propuesto en el capítulo 3, a través de la comparación de los resultados al ser aplicados en el algoritmo y los valores históricos reales.

Para la medición de los resultados se definieron tres indicadores relacionados con el costo de las asignaciones, el porcentaje de utilización y los traslados necesarios para la ejecución de los servicios. Los indicadores permitieron concluir que el algoritmo diseñado contribuye a una mejora significativa con respecto a los valores reales.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En primer lugar, el presente trabajo se desarrolló teniendo en cuenta los aportes realizados en los estudios del problema WSRP. El planteamiento se realiza en un ambiente de programación de servicios de auditoría, interventoría y consultoría, para lo cual se identificaron sus características y restricciones.

En segundo lugar, se presenta un modelo matemático que describe las características identificadas. Posteriormente, se implementó como método de solución la metaheurística de algoritmos genéticos. Finalmente, se presentan dos estudios de caso aplicados en dos empresas, las cuales comparten voluntariamente los datos del primer semestre del 2018. Adicionalmente, se establecen algunos de los indicadores más relevantes en la programación de este tipo de tareas, con el fin de determinar el comportamiento del algoritmo propuesto.

Al identificar los resultados se evidencia que se puede seleccionar como solución al problema propuesto las alternativas con los mejores resultados a nivel de costos de asignación, capacidad operativa y costos de traslados, cumpliendo con los requerimientos de horas y perfiles de cada cliente, logrando de esta manera satisfacer toda la demanda.

Por otro lado, el costo de asignación entregado por el algoritmo genético presentó en algunos casos un valor por debajo del real de las empresas, por ende, se sugiere solucionar este mismo problema mediante otros metaheurísticos propuestos por varios autores como GRASP o Tabu search, lo anterior, con el objetivo de comparar las soluciones e identificar si se puede presentar mejores resultados respecto al método propuesto.

Para finalizar, las características descritas en este trabajo contemplan las otorgadas por las empresas ICONTEC y TGS GLOBAL. Por lo cual, se puede realizar un estudio

con una muestra superior de empresas que presten servicios de auditoría, consultoría e interventoría, con el objetivo de contemplar otras características del problema.

GLOSARIO

A

Auditoría: actividad realizada por una organización auditora independiente de la organización y del usuario, con el fin de certificar el sistema de gestión o proceso de una organización.

Auditor: persona con la competencia para realizar una auditoría.

C

Calificación: proceso a través del cual un profesional demuestra que cumple con los requisitos de competencia establecidos para uno o varios servicios en particular.

Competencia: aptitud para aplicar conocimientos y habilidades para lograr los resultados previstos.

Consultoría: visita en la que se lleva a cabo tareas de revisión en las organizaciones, con el fin de aportar recomendaciones que le permita gestionar mejoras en sus procesos.

D

Día auditor: la duración de un día de auditoría es de 8 horas y no incluye el tiempo de viaje, de desplazamiento o de almuerzo.

Diversificación de tareas: indica que existen diferentes tipos de tareas con distintos modos de ejecución.

E

Estudio de caso: investigación empírica que estudia un fenómeno contemporáneo dentro de su contexto de la vida real, especialmente cuando los límites entre el fenómeno y su contexto no son claramente evidentes. Una investigación de estudio de caso trata exitosamente con una situación técnicamente distintiva en la cual hay muchas más variables de interés que datos observacionales; y como resultado, se basa en múltiples fuentes de evidencia, con datos que deben converger en un estilo

de triangulación; y también como resultado, se beneficia del desarrollo previo de proposiciones teóricas que guían la recolección y el análisis de datos.

I

Interventoría: Actividad de control y vigilancia de un contrato estatal que tiene como objetivo verificar el cumplimiento integral de su objeto y de las obligaciones en él pactadas a partir de la firma y perfeccionamiento de este hasta su liquidación definitiva, coadyuvando a las partes contratantes para lograr una terminación exitosa del contrato.

M

Metodología proviene del griego *methodos* (camino a seguir) y *logos* (estudio o tratado de). Por lo tanto, la metodología se refiere al estudio o tratado de los métodos.

Minimizar el costo de asignación: encontrar una asignación que represente una mejora en los costos operacionales.

Maximizar la calidad de las asignaciones: lograr equilibrio en la carga laboral de los recursos.

Maximizar la utilidad de las asignaciones: aumentar la utilidad total de las asignaciones.

Minimizar el tiempo de ejecución de las asignaciones: disminuir la duración total de un conjunto de asignaciones.

Múltiples habilidades por recursos: nivel de especialización de los recursos.

N

Necesidad de traslados: esta característica se presenta cuando los recursos se encuentran en localizaciones diferentes a las localizaciones en las que son requeridos.

O

Organización: persona o grupo de personas que tiene sus propias funciones con responsabilidades, autoridades y relaciones para alcanzar sus objetivos.

P

Periodos de asignación: momentos del periodo en los que se deben realizar las tareas.

Periodos específicos de asignación: momentos específicos para cada actividad.

Periodos inhábiles: momentos en que existen periodos de inactividad por vacaciones o bloqueo de recursos.

R

Restricciones dadas por el usuario: en caso de que el usuario imponga condiciones específicas para la visita.

T

Tipos de contratación: hace referencia al tipo de vinculación del recurso con la organización prestadora de servicios. Puede ser directo o indirecto, cuando es indirecto, es realizar a prestación de servicios.

V

Visita: conjunto de tareas realizada en campo.

Visitas de interventoría: gestión de la interventoría en campo para el acompañamiento, seguimiento y control técnico y financiero a los proyectos en la sede administrativa y a las unidades productivas, involucrando a contratistas del proyecto, con financiadores y beneficiarios durante su plazo de ejecución y finalización para efectos de la emisión de conceptos desde el inicio hasta el cierre y liquidación de los proyectos, que aportará información a los entregables correspondientes a los informes contractualmente establecidos por el programa.

inconvenience. *European Journal of Operational Research*, (2), 428. <https://doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.ejor.2015.07.028>.

Brusco, M. J. (2008). An exact algorithm for a workforce allocation problem with application to an analysis of cross-training policies. *IIE Transactions*, 40, 495-508.

Cai, X. y Li, K. N.(2009). Genetic algorithm for scheduling staff of mixed skills under multi-criteria. *European Journal of Operational Research*, 125(2), 359–369. [https://doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/S0377-2217\(99\)00391-4](https://doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/S0377-2217(99)00391-4)

Castillo-Salazar, J. A., Landa-Silva, D., & Qu, R. (2015). A greedy heuristic for workforce scheduling and routing with time-dependent activities constraints.

Chen, Z. G., Du, K. J., Zhan, Z. H., & Zhang, J. (2015). Deadline constrained cloud computing resources scheduling for cost optimization based on dynamic objective genetic algorithm. In *Evolutionary Computation (CEC), 2015 IEEE Congress on*(pp. 708-714). IEEE.

Cordeau, J. F., Laporte, G., Pasin, F., & Ropke, S. (2010). Scheduling technicians and tasks in a telecommunications company. *Journal of Scheduling*, 13(4), 393-409.

Corominas, A., Pastor, R., y Rodríguez, E. (2006). Rotational allocation of tasks to multifunctional workers in a service industry. *International Journal of Production Economics*, 103(1), 3-9. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Rotational%20allocation%20of%20tasks%20to%20multifunctional%20workers%20in%20a%20service%20industry&author=A.%20Corominas&author=R.%20Pastor&author=E.%20Rodr%C3%ADguez&journal=Int%20J%20Prod%20Econ&volume=103&issue=1&pages=3-9&publication_year=2006.

Cuevas, R., Ferrer, J.-C., Muñoz, J.-C., y Klapp, M. (2016). A mixed integer programming approach to multi-skilled workforce scheduling. *Journal of Scheduling*, 19(1), 91. Retrieved from <http://ezproxy.javeriana.edu.co:2048/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edby&AN=112966594&lang=es&site=eds-live>.

Daniel, L. y Molinero, H. (1998). Algoritmos de Propagación I: Métodos Exactos. *UCLM*. <http://hdl.handle.net/10578/6098>.

Garaix, T., Gondran, M., Lacomme, P., Mura, E., y Tchernev, N. (2018). Workforce Scheduling Linear Programming Formulation. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 264-269.

Hartmann, S. y Briskorn, D. (2010). A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 207(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.11.005>.

Hui Nie. (2013) Combining MILP with Memetic Algorithm for Scheduling and Staffing Construction Project with a Multi-skilled Workforce. *International Conference on Computational and Information Sciences, Computational and Information Sciences (ICCIS)*. <https://doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1109/ICCIS.2013.305>.

Gamze y Xinhui (2017). Mathematical models and solution approach for cross-training staff scheduling at call centers. *Computers and Operations Research*, 87, 258–269. <https://doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.cor.2016.07.001>.

Kovacs, A. A., Parragh, S. N., Doerner, K. F., y Hartl, R. F. (2012). Adaptive large neighborhood search for service technician routing and scheduling problems. *Journal of scheduling*, 15(5), 579-600.

Lassaigne, R., y De Rougemont, M. (2012). Logic and complexity. Springer Science y Business Media.

Li, W., Wu, Y., Petering, M. E., Goh, M., & de Souza, R. (2009). Discrete time model and algorithms for container yard crane scheduling. *European Journal of Operational Research*, 198(1), 165-172.

Lim, A., Rodrigues, B., y Song, L. (2004). Manpower allocation with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 55(11), 1178–1186. <https://doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1057/palgrave.jors.2601782>

Lourenco, HR, Paixao, JP, y Portugal, R. (2001). Metaheurística multiobjetivo para el problema de la programación del controlador de bus. *La ciencia del transporte*, 35 (3), 331-343.

Maghsoudlou, H., Afshar-Nadjafi, B. y Niaki, S. T. A. (2016). A multi-objective invasive weeds optimization algorithm for solving multi-skill multi-mode resource constrained project scheduling problem. *Computers and Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.02.018>.

Murakami, K., Gen, M., Tasan, SO, y Oyabu, T. (2010). Una solución al problema de asignación de recursos humanos en un caso de gestión hotelera. En *Informática e Ingeniería Industrial (CIE)*, 2010 40ª Conferencia Internacional sobre (pp. 1-6). IEEE.

Naveh, Y., Richter, Y., Altshuler, Y., Gresh, D. L., y Connors, D. P. (2007). Workforce optimization: Identification and assignment of professional workers using constraint programming. *IBM Journal of Research and Development*, 51(3/4), 263. <https://search.proquest.com/openview/67a60d7697be847fdcdbb7a4e7a33f77/1?pq-origsite=gscholarycbl=41123>.

Norman, B. A., Tharmmapornphilas, W., Needy, K. L., Bidanda, B., y Warner, R. C. (2002). Worker assignment in cellular manufacturing considering technical and human skills. *International Journal of Production Research*, 40(6), 1479-1492.

Pinedo, M. L. (2005). *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services. [Recurso electrónico]*. New York, NY Springer Science+Business Media, Inc. 2005. <http://ezproxy.javeriana.edu.co:2048/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cab01040&AN=pujbc.785071&lang=es&site=eds-live>.

Pinedo, M. L. (2008). *Scheduling, Theory, Algorithms, and Systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78935-4>.

Pinheiro, R. L., Landa-Silva, D., y Atkin, J. (2016). A variable neighbourhood search for the workforce scheduling and routing problem. In *Advances in Nature and Biologically Inspired Computing* (pp. 247-259). Springer, Cham.

Rasmussen, M. S., Justesen, T., Dohn, A., & Larsen, J. (2012). The home care crew scheduling problem: Preference-based visit clustering and temporal dependencies. *European Journal of Operational Research*, 219(3), 598-610.

Rong, A. (2010). Monthly tour scheduling models with mixed skills considering weekend off requirements. *Computers y Industrial Engineering*, 59(2), 334-343. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835210001208>.

Swangnop, S., y Chaovalitwongse, P. (2014). A two-step tabu search heuristic for multi-period multi-site assignment problem with joint requirement of multiple resource types. *Engineering Journal*, 18(3), 83-98. [b=edbyAN=120198437&lang=es&site=eds-live](https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cab01040&AN=120198437&lang=es&site=eds-live).

Schwarze, Voss, (2015). Skill vehicle routing problem with time windows and an application to pushback operations at airports J. Dethloff, H.-D. Haasis, H. Kopfer, H.

Kotzab, J. Schönberger (Eds.), *Logistics management, Lecture Notes in Logistics*, Springer International Publishing, Bremen (2015), pp. 289-300.

Valls, V., Pérez, Á., Y Quintanilla, S. (2009). Programación de la mano de obra calificada en centros de servicio. *Revista Europea de Investigación Operacional*, 193 (3), 791-804.

Van den Bergh, J., Beliën, J., De Bruecker, P., Demeulemeester, E. y De Boeck, L. (2013). Personnel scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 226(3):367–385.

Veldhoven, S., Post, G., van der Veen, E., & Curtois, T. (2016). An assessment of a days off decomposition approach to personnel shift scheduling. *Annals of operations research*, 239(1), 207-223.

Viveros Gutiérrez, Rivera. (2017). *Formulaciones matemáticas y heurísticos simples para solucionar problemas de programación con recursos limitados* (Master's thesis, Universidad EAFIT).

Wang Y. R. y Kong, S. L. (2012). Applying genetic algorithms for construction quality auditor assignment in public construction projects. In *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.11.005>.

Xie, Potts y Bektas. (2017). Iterated local search for workforce scheduling and routing problems. *Journal of Heuristics*, 471–500. <https://doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1007/s10732-017-9347-8>.

Zamorano, Emilio, y Raik Stolletz. (2017). “Branch-and-Price Approaches for the Multiperiod Technician Routing and Scheduling Problem.” *European Journal of Operational Research*, no. 1: 55. doi: 10.1016/j.ejor.2016.06.058.

Zhang, X. y Xu, J. (2012). Cost Optimization of Heterogeneous Auditors Allocation in Certification Body.