

# **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO**

**División de Estudios de Posgrado e Investigación**

**Maestría en Ciencias de la Computación**



**TESIS**

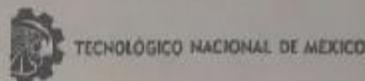
**INCORPORACIÓN DE ESTRATEGIAS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES EN  
EL DESARROLLO DE INTERFACES DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE  
PROGRAMACIÓN DE HORARIOS**

**Que para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias de la Computación**

**Presenta  
I.S.C. FRANCISCO FEDERICO MEZA BARRÓN  
G12071202**

**Director de Tesis  
DR. NELSON RANGEL VALDEZ**

**Co-Director de Tesis  
DRA. MARÍA LUCILA MORALES RODRÍGUEZ**



Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cd. Madero, Tams., a **29 de Mayo de 2019**

OFICIO No.: US.079/19  
ÁREA: DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS.

**ING. FRANCISCO FEDERICO MEZA BARRÓN**  
No. DE CONTROL G12071202  
**PRESENTE**

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Maestro en Ciencias de la Computación, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

**"INCORPORACIÓN DE ESTRATEGIAS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES EN EL DESARROLLO DE INTERFACES DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE HORARIOS"**

El Jurado está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	DRA.	LAURA CRUZ REYES
SECRETARIO:	DR.	GUADALUPE CASTILLA VALDEZ
VOCAL:	DRA.	NELSON RANGEL VALDEZ
SUPLENTE:	DRA.	MARÍA LUCILA MORALES RODRÍGUEZ
DIRECTORA DE TESIS :	DRA.	NELSON RANGEL VALDEZ
CO-DIRECTOR DE TESIS:	DRA.	MARÍA LUCILA MORALES RODRÍGUEZ

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

**ATENTAMENTE**

Excellencia en Educación Tecnológica  
"Por mi patria y por mi bien"

**DR. JOSÉ AARÓN MELO BANDA**  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

c.c.p.- Archivo  
Minuta

JAMB JAMP .jar



Av. 1º de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz Col. Los Mangos, C.P. 89440, Cd. Madero, Tam.

Tel. 01 (833) 357 48 20, e-mail: dir01\_cdmadero@tecnm.mx

www.tecnm.mx | www.cdmadero.tecnm.mx

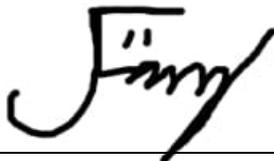
## **Declaración de Originalidad**

Declaro y prometo que este documento de tesis es producto de mi trabajo original y que no infringe los derechos de terceros, tales como derecho de publicación, derechos de autor, patentes y similares.

Además, declaro que en las citas textuales que he incluido (las cuales aparecen entre comillas) y en los resúmenes que he realizado de publicaciones ajenas, indico explícitamente los datos de los autores y las publicaciones.

Además, en caso de infracción a los derechos de terceros derivados de este documento de tesis, acepto la responsabilidad de la infracción y relevo de ésta a mi director y co-director de tesis, así como al Instituto Tecnológico de Cd. Madero y sus autoridades.

Junio de 2019, Cd. Madero, Tamaulipas.



---

I.S.C. Francisco Federico Meza Barrón

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco a mi familia: mis padres Federico Meza Díaz y Ludivina Barrón Tovar, que siempre han sido dos grandes pilares de amor y sabiduría en mi vida y a los cuales les debo en gran parte mis humildes logros, a mi hermano Pedro Antonio Meza Barrón, a mi pareja Itzel Alexia Guerrero Rodríguez por entenderme y apoyarme sobre todo en los lapsos de gran carga de trabajo en los que pasábamos días sin vernos.

También quiero expresar mi eterna gratitud a mi asesor, el Dr. Nelson Rangel Valdez, cuyos conocimientos y actitud me brindaron un gran apoyo siempre que lo necesité, por guiarme en el mejoramiento profesional, pero, sobre todo, gracias por ser una persona de tan gran corazón a quien considero más que mi asesor, un amigo.

Agradezco profundamente a mis maestros y guías en esta etapa: a la Dra. Claudia Guadalupe Gómez Santillán quien con su gran conocimiento siempre tuvo una respuesta para cada una de mis dudas a las que respondía de manera agradable, la Dra. Laura Cruz Reyes por sus sabios aportes a mi formación profesional y por ese carácter tan bello que tiene, a la Dra. María Lucila Morales Rodríguez por su apoyo en la parte del razonamiento, redacción, y a la Dra. Guadalupe Castilla Valdez por enseñarme sobre las heurísticas y metaheurísticas, las cuales fueron un gran apoyo para la resolución de mi proyecto de tesis.

Finalmente, me gustaría dar las gracias a las siguientes instituciones del Gobierno: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cd. Madero (TecNM/ITCM), por el apoyo financiero y la guía académica recibidas.

# Tabla de contenido

---

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 <i>Objetivo General</i> .....	3
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	3
1.3 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	3
1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	4
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
2.1 PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO.....	5
2.1.1 <i>Frente de óptimo de Pareto</i> .....	5
2.2 SCHEDULING.....	6
2.2.1 <i>Problema de programación de horarios universitarios</i> .....	6
2.3 TOMA DE DECISIONES .....	7
2.3.1 <i>Modelo relacional de preferencia ELECTRE</i> .....	7
2.3.2 <i>Modelo de optimización basado en el sistema relacional de sobre clasificación difusa</i> .....	8
2.3.3 <i>Región de interés</i> .....	9
2.4 TRANSFORMACIÓN DE RESTRICCIONES A OBJETIVOS .....	9
2.5 META-HEURÍSTICAS.....	11
2.5.1 <i>Meta-heurísticas trayectoriales</i> .....	11
2.5.2 <i>Meta-heurísticas poblacionales</i> .....	11
2.5.2.1 Algoritmos evolutivos.....	12
2.5.2.1.1 Algoritmos genéticos.....	12
2.6 META-HEURÍSTICAS CONSTRUCTIVAS.....	13
<b>CAPÍTULO 3. TRABAJOS RELACIONADOS.....</b>	<b>14</b>
3.1 ENFOQUES DEL MANEJO DE PREFERENCIAS.....	14
3.2 PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE HORARIOS UNIVERSITARIOS.....	14
3.3 MANEJO DE RESTRICCIONES COMO OBJETIVOS .....	16
3.4 CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN DE LA LITERATURA REVISADA .....	17
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>18</b>
4.1 METODOLOGÍA DE DESARROLLO .....	18
4.2 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....	19
<b>CAPÍTULO 5. PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....</b>	<b>20</b>
5.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	21
5.1.1 <i>Ejemplo ilustrativo</i> .....	22
5.2 DESCRIPCIÓN DE LA INSTANCIA .....	25
5.3 TRANSFORMACIÓN DE RESTRICCIONES A OBJETIVOS .....	26
5.4 INCORPORACIÓN DE LAS PREFERENCIAS DEL TOMADOR DE DECISIONES. ....	27
5.4.1 <i>Modelo relacional de preferencias ELECTRE</i> .....	27
5.4.1.1 Ejemplo Didáctico del Método ELECTRE-III.....	30
5.4.2 <i>Sistema relacional de sobre clasificación difusa</i> .....	32
5.4.2.1 Ejemplo Didáctico del Sistema Relacional de Preferencias Difusas .....	33
5.4.3 <i>Función de objetivo resultante</i> .....	37

5.5	ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN (NOSGA-II) .....	37
5.5.1.1	Función de inicialización de la población .....	40
5.5.1.2	Selección mediante torneo binario .....	40
5.5.1.3	Operador genético de cruce de un punto .....	41
5.5.1.4	Operador genético de mutación mediante cambio de valor.....	42
5.6	RETROALIMENTACIÓN A TRAVÉS DEL PDA .....	43
5.6.1	<i>Descripción de la instancia del PDA</i> .....	44
<b>CAPÍTULO 6. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.....</b>		<b>48</b>
6.1	EXPERIMENTO 1: FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA DE SOLUCIÓN A PPHU .....	48
6.1.1	<i>Iteración 1</i> .....	50
6.1.2	<i>Iteración 2</i> .....	51
6.1.3	<i>Iteración 3</i> .....	52
6.1.4	<i>Iteración 4</i> .....	53
6.1.5	<i>Iteración 5</i> .....	54
6.2	EXPERIMENTO 2: VALIDACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA EN LA INTERACCIÓN.....	55
6.2.1	<i>Instancias derivadas del caso de estudio</i> .....	55
6.2.2	<i>Módulo de Interacción con el TD</i> .....	56
6.2.3	<i>Resultados obtenidos del experimento 2</i> .....	59
6.2.4	<i>Análisis de resultados del experimento 2</i> .....	61
6.3	EXPERIMENTO 3: DESEMPEÑO EN INSTANCIAS DE PROBLEMAS RELACIONADOS .....	61
6.3.1	<i>Formulación del problema asociado a instancia comp01.ctt</i> .....	62
6.3.2	<i>Estrategia de transformación a PPHU</i> .....	62
6.3.3	<i>Resultados del experimento 3 y análisis</i> .....	63
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....</b>		<b>65</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>66</b>
<b>ANEXO 1. INSTANCIA REAL .....</b>		<b>71</b>
7.1.1	<i>Bloque 1</i> .....	71
7.1.2	<i>Bloque 2</i> .....	71
7.1.3	<i>Bloque 3</i> .....	72
7.1.4	<i>Bloque 4</i> .....	72
7.1.5	<i>Bloque 5</i> .....	73
7.1.6	<i>Bloque 6</i> .....	74
7.1.7	<i>Bloque 7</i> .....	75
7.1.8	<i>Bloque 8</i> .....	76
7.1.9	<i>Bloque 9</i> .....	77
7.1.10	<i>Bloque 10</i> .....	77
7.1.11	<i>Bloque 11</i> .....	78
<b>ANEXO 2. EJEMPLO DE ELECTRE III .....</b>		<b>80</b>
<b>ANEXO 3. INSTANCIA COMP01.CTT .....</b>		<b>91</b>
<b>ANEXO 4. TRANSFORMACIÓN DE COMP01.CTT .....</b>		<b>94</b>

# Índice de figuras

---

FIGURA 1 CONCEPTOS DE OPTIMALIDAD DE PARETO. ....	6
FIGURA 2 CONCEPTOS DE LA REGIÓN DE INTERÉS.....	9
FIGURA 3 ARQUITECTURA PROPUESTA. ....	20
FIGURA 4 ALGORITMO DEL NOSGA-II (FERNANDEZ, LOPEZ, LOPEZ, & COELLO COELLO, 2011).....	38
FIGURA 5 MODELO DE INTERACCIÓN QUE INCORPORA PREFERENCIAS DE MANERA DINÁMICA. ....	43
FIGURA 6 SISTEMA WEB DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN CON INTERACCIÓN. ....	57
FIGURA 7 SOLICITUD EN PROCESO DE CREACIÓN DE HORARIOS POR MÓDULO CREAR HORARIO. ....	58
FIGURA 8 MÓDULO DE INTERACCIÓN CON EL TD DEL SISTEMA WEB. ....	58

# Índice de tablas

---

TABLA 1 UMBRALES EMPLEADOS EN LA DEFINICIÓN DE LOS MÉTODOS ELECTRE.....	8
TABLA 2 COMPARATIVA ENTRE TRABAJOS DE LA LITERATURA Y ESTE TRABAJO PARTE 1.....	15
TABLA 3 COMPARATIVA ENTRE TRABAJOS DE LA LITERATURA Y ESTE TRABAJO PARTE 2.....	16
TABLA 4 CONJUNTOS UTILIZADOS.....	21
TABLA 5 INSTANCIA FICTICIA DEL PPHU PARTE 1.....	22
TABLA 6 INSTANCIA FICTICIA DEL PPHU PARTE 2.....	22
TABLA 7 SOLUCIÓN FICTICIA.....	23
TABLA 8 SOLUCIÓN FICTICIA AGRUPADA POR AULAS.....	23
TABLA 9 SOLUCIÓN FICTICIA AGRUPADA POR PROFESORES.....	24
TABLA 10 RESULTADOS FICTICIOS CON FORMATO.....	25
TABLA 11 INFORMACIÓN RELEVANTE DE LA INSTANCIA.....	26
TABLA 12 UMBRALES.....	28
TABLA 13 ELEMENTOS PARA CONSTRUIR LA RELACIÓN DE SUPERACIÓN.....	28
TABLA 14 SOLUCIÓN DE UN PROBLEMA FICTICIO.....	30
TABLA 15 UMBRALES.....	30
TABLA 16 CONCORDANCIA INDIVIDUAL DE $C(ALT1, ALT2)$ .....	30
TABLA 17 CONCORDANCIA GLOBAL.....	31
TABLA 18 DISCORDANCIA INDIVIDUAL $D(ALT1, ALT2)$ .....	31
TABLA 19 GRADOS DE CREDIBILIDAD (CONCENTRADO).....	31
TABLA 20 SOLUCIÓN DE UN PROBLEMA FICTICIO.....	33
TABLA 21 GRADOS DE CREDIBILIDAD $\sigma x, y$ .....	33
TABLA 22 DOMINANCIA DE LA ALT1 CON LAS DEMÁS.....	34
TABLA 23 DOMINANCIA DE LA ALT2 CON LAS DEMÁS.....	34
TABLA 24 DOMINANCIA DE LA ALT3 CON LAS DEMÁS.....	34
TABLA 25 RELACIONES DE PREFERENCIAS (CONCENTRADO).....	36
TABLA 26 RELACIONES DE PREFERENCIA POR ALTERNATIVA.....	36
TABLA 27 CLASIFICACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS EN LOS TRES OBJETIVOS.....	37
TABLA 28 ORDENAMIENTO LEXICOGRAFICO.....	37
TABLA 29 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DEL NOSGA-II.....	40
TABLA 30 POBLACIÓN GENERADA ALEATORIAMENTE.....	40
TABLA 31 SELECCIÓN DE PADRES MEDIANTE TORNEO BINARIO COELLO (2016).....	41
TABLA 32 EJEMPLO DE LA CRUZA DE UN PUNTO.....	42
TABLA 33 EJEMPLO DE LA MUTACIÓN MEDIANTE CAMBIO DE VALOR.....	42
TABLA 34 PRIMER CONJUNTO DE DATOS DE LA INSTANCIA.....	44
TABLA 35 SEGUNDO CONJUNTO DE DATOS DE LA INSTANCIA.....	45
TABLA 36 TERCER CONJUNTO DE DATOS DE LA INSTANCIA.....	45
TABLA 37 CUARTO CONJUNTO DE DATOS DE LA INSTANCIA.....	47
TABLA 38 VALORES INICIALES.....	50
TABLA 39 RESULTADO NOSGA-II PRIMERA ITERACIÓN.....	50
TABLA 40 RESULTADO PDA PRIMERA ITERACIÓN.....	51
TABLA 41 RESULTADO NOSGA-II SEGUNDA ITERACIÓN.....	51
TABLA 42 RESULTADO PDA SEGUNDA ITERACIÓN.....	52
TABLA 43 RESULTADO NOSGA-II TERCERA ITERACIÓN.....	52
TABLA 44 RESULTADO PDA TERCERA ITERACIÓN.....	52
TABLA 45 RESULTADO NOSGA-II CUARTA ITERACIÓN.....	53
TABLA 46 RESULTADO PDA CUARTA ITERACIÓN.....	53

TABLA 47 RESULTADO NOSGA-II QUINTA ITERACIÓN.....	54
TABLA 48 RESULTADO PDA QUINTA ITERACIÓN.....	54
TABLA 49 DETALLES DE LAS INSTANCIAS PARA EVALUAR LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	56
TABLA 50 NOMENCLATURA DE LAS INSTANCIAS.....	56
TABLA 51 RESULTADOS OBTENIDOS DE SOLUCIÓN DE LA INSTANCIA I01.....	60
TABLA 52 RESULTADOS OBTENIDOS DE SOLUCIÓN DE LA INSTANCIA I04.....	60
TABLA 53 RESUMEN RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS INSTANCIAS.....	61
TABLA 54 RESULTADOS DE RESOLVER COMP01.CTT YA TRANSFORMADA A PPHU.....	63
TABLA 55 BLOQUE 1.....	71
TABLA 56 BLOQUE 2.....	72
TABLA 57 BLOQUE 3.....	72
TABLA 58 BLOQUE 4.....	73
TABLA 59 BLOQUE 5.....	73
TABLA 60 BLOQUE 6 PARTE 1.....	74
TABLA 61 BLOQUE 6 PARTE 2.....	75
TABLA 62 BLOQUE 6 PARTE 3.....	75
TABLA 63 BLOQUE 7.....	76
TABLA 64 BLOQUE 8.....	77
TABLA 65 BLOQUE 9.....	77
TABLA 66 BLOQUE 10.....	78
TABLA 67 BLOQUE 11.....	79
TABLA 68 SOLUCIÓN DE UN PROBLEMA FICTICIO.....	80
TABLA 69 UMBRALES.....	80
TABLA 70 CONCORDANCIA INDIVIDUAL DE C(ALT1, ALT2).....	80
TABLA 71 CONCORDANCIA INDIVIDUAL DE C(ALT1, ALT3).....	81
TABLA 72 CONCORDANCIA INDIVIDUAL DE C(ALT1, ALT4).....	81
TABLA 73 CONCORDANCIA INDIVIDUAL DE C(ALT2, ALT1).....	81
TABLA 74 CONCORDANCIA INDIVIDUAL DE C(ALT2, ALT3).....	82
TABLA 75 CONCORDANCIA INDIVIDUAL DE C(ALT2, ALT4).....	82
TABLA 76 CONCORDANCIA INDIVIDUAL DE C(ALT3, ALT1).....	82
TABLA 77 CONCORDANCIA INDIVIDUAL DE C(ALT3, ALT2).....	83
TABLA 78 CONCORDANCIA INDIVIDUAL DE C(ALT3, ALT4).....	83
TABLA 79 CONCORDANCIA INDIVIDUAL DE C(ALT4, ALT1).....	84
TABLA 80 CONCORDANCIA INDIVIDUAL DE C(ALT4, ALT2).....	84
TABLA 81 CONCORDANCIA INDIVIDUAL DE C(ALT4, ALT3).....	84
TABLA 82 CONCORDANCIA INDIVIDUAL (CONCENTRADO).....	84
TABLA 83 CONCORDANCIAS GLOBALES (CONCENTRADO).....	85
TABLA 84 DISCORDANCIA INDIVIDUAL D(ALT1, ALT2).....	85
TABLA 85 DISCORDANCIA INDIVIDUAL D(ALT1, ALT3).....	86
TABLA 86 DISCORDANCIA INDIVIDUAL D(ALT1, ALT4).....	86
TABLA 87 DISCORDANCIA INDIVIDUAL D(ALT2, ALT1).....	86
TABLA 88 DISCORDANCIA INDIVIDUAL D(ALT2, ALT3).....	87
TABLA 89 DISCORDANCIA INDIVIDUAL D(ALT2, ALT4).....	87
TABLA 90 DISCORDANCIA INDIVIDUAL D(ALT3, ALT1).....	87
TABLA 91 DISCORDANCIA INDIVIDUAL D(ALT3, ALT2).....	88
TABLA 92 DISCORDANCIA INDIVIDUAL D(ALT3, ALT4).....	88
TABLA 93 DISCORDANCIA INDIVIDUAL D(ALT4, ALT1).....	88
TABLA 94 DISCORDANCIA INDIVIDUAL D(ALT4, ALT2).....	89
TABLA 95 DISCORDANCIA INDIVIDUAL D(ALT4, ALT3).....	89
TABLA 96 DISCORDANCIA INDIVIDUAL (CONCENTRADO).....	89
TABLA 97 GRADOS DE CREDIBILIDAD (CONCENTRADO).....	90

# Capítulo 1. Introducción

El problema de programación de horarios universitarios (PPHU) aparece al principio de cada ciclo escolar en muchas universidades. Según (Cruz, Federico, & Ramirez, 2002) el problema consiste en construir un horario de una secuencia de eventos entre maestros y alumnos en un lapso de tiempo fijo, con un conjunto de restricciones de varios tipos.

Actualmente en el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero (ITCM) el PPHU es resuelto manualmente por los directores del programa, requiriendo varias semanas para obtener una solución inicial basada en datos existentes sin que esta pueda ser una buena solución (Que no minimiza el número de conflictos, por ejemplo, varias materias asignadas a la misma hora, provocando que los alumnos no puedan tomar ambas materias). Por otro lado, según (Schaerf, 1999) el PPHU es NP-Completo, por estas razones se plantea resolver el problema a través de algoritmos aproximados llamados también métodos heurísticos, los cuales están diseñados para encontrar una solución cercana al óptimo o mejores soluciones en un periodo de tiempo corto.

Se ha observado que ocasionalmente, durante el proceso de construcción de un horario, directivos, jefes de departamento, y en general, personal dedicado a la toma de decisiones dentro de este problema, requieren introducir nuevas preferencias no consideradas en la definición inicial de la instancia, por ejemplo, el uso de un aula en específico solo estará disponible en las mañanas para ser asignadas a clases, porque el tomador de decisiones (TD) decidió que en la tarde esa aula será asignada para hacer juntas de maestros.

Actualmente, el grupo de investigación en el ITCM cuenta con *frameworks* que permiten implementar soluciones a problemas de optimización. Particularmente, dentro de los trabajos relacionados se han abordado problemas similares, como el problema de carteras de proyectos. Así mismo, se cuenta con estrategias que permiten incorporar preferencias de un tomador de decisiones en el proceso de búsqueda, tales como el modelo relacional de preferencias y sistema relacional de preferencias difusas.

Por otro lado, el estado del arte que concierne a la solución de PPHU está formado principalmente por estrategias que buscan una solución dentro del frente óptimo de Pareto, sin considerar las preferencias de un TD para guiar mejor la búsqueda. Incluso, el software existente sólo permite incluir nuevas preferencias al incluirlas directamente dentro de la información de entrada, y este software, cuando está dirigido a usuarios finales (es decir, tomadores de decisiones), generalmente no favorecen la experiencia del usuario, haciendo difícil en muchas ocasiones interpretar la información que ofrece de salida la estrategia de solución, o también el introducir los datos. En general, soluciones existentes a problemas de generación de horarios habitualmente no ofrecen una buena experiencia de usuario para su uso, y la incorporación de nuevas preferencias es complicada. Por esta razón se utilizó una interfaz web ya existente dedicada al PPHU que permite la introducción de datos de una manera fácil y eficiente. Se modificó un poco la interfaz web para que permitiera clasificar

las soluciones proporcionadas por el algoritmo de solución, las cuales proporcionarán las nuevas preferencias del TD.

Este trabajo propone dar solución al PPHU a través de un diseño de una metodología que incorpore preferencias a algoritmos evolutivos de manera dinámica para la solución del problema, precisamente el algoritmo genético NOSGA-II. La metodología se compone de los siguientes elementos: a) **Restricciones a Objetivos**, dando como resultado la transformación de un problema de optimización multi-objetivo con restricciones (POMCR) a un problema de optimización multi-objetivo sin restricciones (POMSR); b) **Umbrales de Discriminación**, valores numéricos que permiten incorporar las preferencias del TD; c) **Estrategia de Solución**, la cual se divide en tres actividades, la primera actividad es el NOSGA-II, la segunda y tercera actividad (modelos relacionales de preferencia basados en métodos *outranking*, p. ej. ELECTRE III (Coello, 2000a) y el sistema relacional de preferencias difusas presentado en (Fernandez, Lopez, Mazcorro, Olmedo, & Coello, 2013)) en conjunto transforman el POMSR en un POTSR, reduciendo la dimensionalidad del mismo y aun persiguiendo soluciones en regiones de interés; d) **Interfaz Web**, para proporcionar las soluciones al TD, permitirle introducir información necesaria para el proceso de solución y e) **Retroalimentación**, encargada de procesar la información introducida por el TD para generar los nuevos valores de los umbrales de discriminación.

Este trabajo está dividido en 8 capítulos. En el capítulo dos se dan a conocer los conceptos necesarios para el buen entendimiento del trabajo. En el capítulo tres se presenta el estado del arte relacionado con los componentes mostrados en la metodología, tablas comparativas y conclusiones obtenidas de la observación de las diferentes características de los trabajos encontrados. En el capítulo cuatro se presenta la metodología de desarrollo y el caso de estudio. En el capítulo cinco se presenta la implementación de la propuesta de solución, y se describe el formato de las instancias, etc. En el capítulo seis se presenta la validación de la experimentación realizada. Los capítulos siete y ocho contienen las conclusiones y referencias de este trabajo de tesis.

## 1.1 Justificación.

El PPHU aparece al principio de cada ciclo escolar en muchas universidades, este proceso suele ser resuelto manualmente por los directores del programa, requiriendo varias semanas para obtener una solución inicial basada en los datos existentes. Ya que según (Schaerf, 1999) el PPHU es NP-Completo, se justifica la utilización de algoritmos aproximados llamados también métodos heurísticos, los cuales arrojan una solución rápida, casi óptima y también son utilizadas cuando hay necesidad de resolver el mismo problema con frecuencia.

Ahora bien, como las necesidades de las universidades no son iguales entre ellas, no se puede proporcionar la misma solución a todas, aunque estas pertenezcan al mismo sector productivo, ya que se rigen bajo diferentes criterios. Por esta razón se propone que al método de solución para el PPHU se le incorporen preferencias para que las alternativas que se proporcionen se adapten a las necesidades específicas de una universidad en particular.

Una vez que se obtenga las diferentes soluciones del PPHU se debe definir como presentar los resultados, y que mejor mediante una interfaz intuitiva que brinde un marco de referencia que permita contrastar sus preferencias contra compromisos establecidos y que proporcione al TD la información de manera visual para facilitar la toma de decisiones, o en su caso retroalimentar al sistema para que en un proceso dinámico ajuste las preferencias adecuadamente.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo que integre preferencias en estrategias de búsqueda de solución para el problema de programación de horarios

### 1.2.2 Objetivos Específicos.

- Desarrollar un modelo que permita incorporar preferencias de un TD al PPHU.
- Desarrollar un modelo que permita transformar restricciones a objetivos para el PPHU.
- Desarrollar un algoritmo de solución para resolver el PPHU basado en preferencias.
- Utilizar y adaptar una interfaz gráfica existente para guiar el proceso de toma de decisiones en la solución del PPHU.
- Desarrollar un modelo que permita incorporar preferencias de un TD de manera dinámica al PPHU, la cual sea capaz de facilitar la incorporación de nuevas preferencias a partir de la interacción del TD con el sistema.

## 1.3 Problema de Investigación

Dado un TD, un Modelo para el Manejo Preferencias  $M$ , una Metaheurística evolutiva  $H$  que guía su búsqueda a través de  $S$  en la solución del PPHU, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Es posible desarrollar un Sistema que resuelva el PPHU mediante  $H$  satisfaciendo las preferencias del TD?
2. ¿Es posible que  $M$  pueda incorporar dinámicamente nuevas preferencias del TD para hacer un reajuste en la búsqueda de la solución hecha por  $H$ ?

## **1.4 Alcances y limitaciones.**

Los alcances y limitaciones de este trabajo de tesis se mencionan a continuación:

- Para el manejo de las preferencias se utilizarán los métodos de sobre clasificación ELECTRE III o ELECTRE TRI.
- El PPHU es un problema multi-objetivo el cual será convertido en un problema de tres objetivos a través del modelo de optimización basado en el sistema relacional de sobre clasificación difusa.
- La interfaz gráfica solamente será utilizada y adaptada para mostrar los resultados en forma de consultas y para el ingreso de nuevas preferencias.
- El enfoque meta-heurístico estará basado en una estrategia evolutiva particularmente un algoritmo genético (NOSGA-II).
- La estrategia de solución será desarrollada de manera secuencial.

# Capítulo 2. Marco Teórico.

En este capítulo se presentan los aspectos teóricos relacionados con los problemas de optimización, algunas meta-heurísticas, el proceso de toma de decisiones y cómo influye el modelo de preferencias del TD en los problemas de optimización multi-objetivo en el caso particular de los problemas de PPHU.

## 2.1 Problema de optimización multi-objetivo

Debido a que diversos problemas reales usualmente requieren de la búsqueda de soluciones que satisfagan de forma simultánea múltiples criterios de desempeño u objetivos que pueden ser contradictorios puede ser factible combinar los objetivos de un problema de manera adecuada, es posible considerar un único objetivo a optimizar (Lücken, Hermosilla, & Benjamín, 2004).

Se genera un problema de optimización multi-objetivo (POM) cuando no se conoce la manera óptima de combinar los diferentes objetivos o sea inadecuado. Según (Lücken et al., 2004) un POM puede ser definido formalmente como en la Ecuación 1.

$$\min \quad y = F(x) = (f_1(x), \dots, f_k(x)) \quad (1.1)$$

sujeto a:

$$g(x) = (g_1(x), \dots, g_m(x)) \leq \mathbf{0} \quad (1.2)$$

donde:

$$\begin{aligned} x &= (x_1, \dots, x_n) \in X \subseteq \mathbb{R}^n, \\ y &= (y_1, \dots, y_k) \in Y \subseteq \mathbb{R}^k \end{aligned}$$

En donde  $x$  es una variable de decisión vectorial  $n$ -dimensional,  $y$  es un vector objetivo  $k$ -dimensional,  $X \subseteq \mathbb{R}^n$  denota el espacio de decisión, e  $Y \subseteq \mathbb{R}^k$  denota el espacio objetivo. El conjunto de restricciones dadas por la Ecuación 1.2 define la región de factibilidad, y cualquier punto  $x \in X_f$  es una solución factible.

### 2.1.1 Frente de óptimo de Pareto

Según (Zitzler & Thiele, 1998) en un POM al tener más de un solo objetivo a menudo no existe una única solución óptima como se ha estado abordando en los problemas de optimización mono-objetivos ya que estas cuentan con múltiples objetivos, dando como resultado un conjunto de soluciones alternativas en donde dichas soluciones son óptimas en el sentido de que ninguna otra solución en el espacio de búsqueda es superior a ellas cuando son considerados todos los objetivos. En la **Figura 1** recuperada de (García, García, & Villada, 2015) se muestran los conceptos de optimalidad de Pareto para el caso de un

problema con dos objetivos, en donde las soluciones indicadas con una estrella son soluciones dominadas, las soluciones representadas con un círculo son soluciones no dominadas, el frente de Pareto viene siendo una línea imaginaria que cruza por las soluciones no dominadas y por último, el conjunto de Pareto óptimo es el conjunto de soluciones no dominadas.

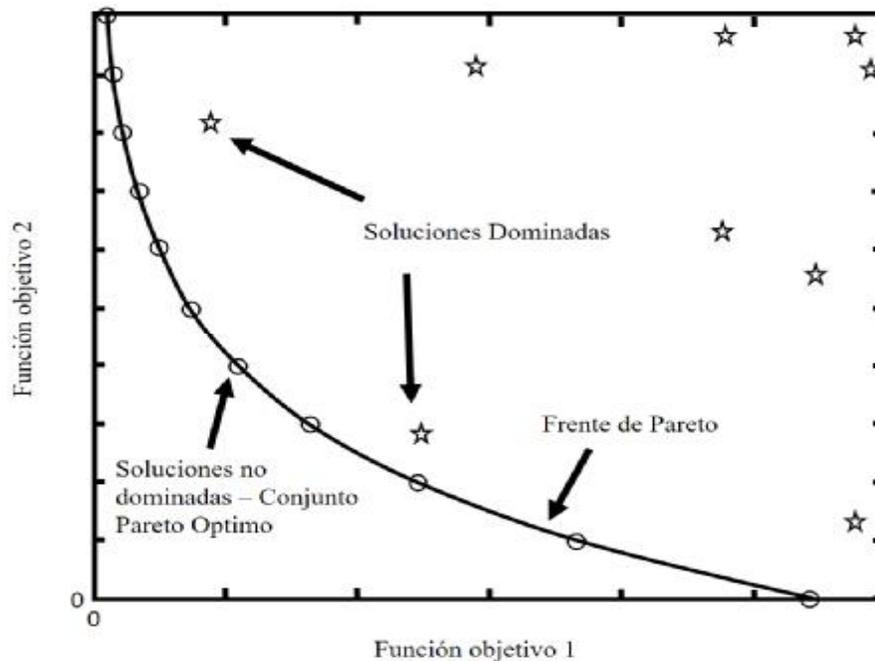


Figura 1 Conceptos de Optimalidad de Pareto.

## 2.2 Scheduling

EL *scheduling* es uno de los problemas más comunes, además de los más complicados en la vida cotidiana. Este problema intenta asignar un número indefinido de actividades a lapsos de tiempos. El objetivo principal es obtener el menor número de conflictos mientras se asignan actividades (Soria-Alcaraz, 2010).

A su vez (Wren, 1996), la define como la disposición de los objetos en un patrón en el tiempo o el espacio en de tal manera que algunos objetivos se logran, o casi se logran, y que las restricciones sobre la forma en que se pueden arreglar los objetos son satisfecho o casi satisfecho.

A continuación, se muestra la definición del PPHU, el cual es un problema derivado del *scheduling*.

### 2.2.1 Problema de programación de horarios universitarios

El PPHU según (Cooper & Kingston, 1995) trata de asignar horarios, maestros, estudiantes y salones a una colección de reuniones para que ninguno de los participantes tenga que asistir

a dos reuniones simultáneamente. Véase el Capítulo 4 “Descripción del problema” para mayor información.

## 2.3 Toma de decisiones

“La toma de decisiones es el proceso mediante el cual se realiza una elección entre las opciones o formas para resolver diferentes situaciones de la vida en diferentes contextos” (García, 2017). Según (García, 2017) el proceso básico de la toma de decisiones es:

- **Definir el problema.** En este paso se procura responde a la pregunta: ¿Qué es lo que se desea conseguir en la situación?
- **Buscar alternativas.** Pensar en el mayor número de alternativas posibles nos dará más posibilidades de escoger la mejor.
- **Valorar las consecuencias de cada alternativa.** Considerar los aspectos positivos y negativos de cada alternativa puede tener, a corto y largo plazo.
- **Elegir la mejor alternativa posible.** Una vez que se ha pensado en las alternativas disponibles y en las consecuencias de cada una de ellas, habrá que escoger la más positiva o adecuada.
- **Aplicar la alternativa escogida y comprobar si los resultados son satisfactorios.** Una vez elegida, deberemos responsabilizarnos de la decisión tomada y ponerla en práctica.

### 2.3.1 Modelo relacional de preferencia ELECTRE

El modelo de *elimination et choix traduisant la réalité* (ELECTRE) “pertenece a la familia de métodos basados en relaciones de superación y consiste en determinar una solución, que sin ser óptima puede considerarse satisfactoria o bien se determina una jerarquización, alternativas bajo análisis. Este método fue desarrollado por la escuela francófona (Francia, Bélgica, Suiza)” (Villegas, 2009).

Según (Figueira, Greco, Roy, & Słowiński, 2010) las preferencias en los métodos ELECTRE se modelan usando relaciones binarias de superación,  $S$ , cuyo significado es “al menos tan bueno como”. Considerando acciones  $a$  y  $b$ , pueden ocurrir cuatro situaciones:

- $aSb$  y no  $bSa$ , es decir,  $aPb$  ( $a$  es estrictamente preferido a  $b$ ).
- $bSa$  y no  $aSb$ , es decir,  $bPa$  ( $b$  es estrictamente preferido a  $a$ ).
- $aSb$  y  $bSa$ , es decir,  $aIb$  ( $a$  es indiferente a  $b$ ).
- No  $aSb$  y no  $bSa$ , es decir,  $aRb$  ( $a$  es incomparable a  $b$ ).

Según (Figueira et al., 2010) los métodos basados en superación se basa en dos grandes conceptos que de alguna manera manejan razones a favor o en contra de una situación de superación, estos conceptos son los siguientes:

- Concordancia. Para una superación de  $aSb$  para ser validada, la mayoría de los criterios deberían estar a favor de esta afirmación.
- Discordancia. Cuando se cumple la condición de concordancia, ninguno de los criterios de la minoría debe oponerse demasiado a la afirmación  $aSb$ .

Los métodos ELECTRE según (Figueira et al., 2010) comprenden dos procedimientos principales, los cuales son:

- Procedimiento de agregación: Construye una o posiblemente varias relaciones de superación, este procedimiento tiene como objetivo comparar de manera integral cada par de acciones.
- Procedimiento de explotación: Deriva recomendaciones a partir de los resultados obtenidos en la primera fase.

Los métodos ELECTRE también hacen uso de los conceptos presentados en la **Tabla 1**.

Umbral	Descripción
$w_i$	Representa el peso del criterio $i$ .
$p_i$	Representa el umbral de preferencia. Es el valor numérico por el cual el TD prefiere una alternativa sobre otra.
$q_i$	Representa el umbral de indiferencia. Es el valor numérico por el cual el TD es indiferente ante dos alternativas.
$v_i$	Representa el umbral de veto. Es el valor numérico el cual hace un bloqueo en la relación de superación entre dos alternativas en el criterio $i$ , es decir, opone fuertemente a la afirmación de $aSb$ .

Tabla 1 Umbrales empleados en la definición de los Métodos ELECTRE.

### 2.3.2 Modelo de optimización basado en el sistema relacional de sobre clasificación difusa

Los análisis multi-objetivo constituyen una buena opción para superar las limitaciones de los análisis costo-beneficio porque esto puede manejar intangibles, preferencias ambiguas y condiciones veto. Diferentes métodos multi-objetivo han sido propuestos para agregar la evaluación del proyecto y la selección de carteras.

Estos métodos son apropiados para evaluar y clasificar proyectos, desde que la información multi-objetivo es agregada en el nivel del proyecto (Fernández et. al., 2012).

Es decir, este modelo toma en cuenta la aplicación de análisis multi-objetivo para seleccionar la mejor solución posible a un problema dentro de un conjunto de alternativas.

El cual establece alguna de las siguientes relaciones de preferencias:

- Preferencia estricta.
- Indiferencia.
- Preferencia débil.

- Incomparabilidad.
- K-preferencia.

Después se agrupan en 3 fronteras que son:

- NS(O) - Frontera no superada estrictamente.
- NW(O) - Frontera no superada débilmente.
- NF(O) - Frontera no superada en flujo neto.

### 2.3.3 Región de interés

La combinación del PPHU, el modelo de optimización basado en el sistema relacional de sobre clasificación difusa y el modelo relacional de preferencias traen consigo un nuevo concepto al incorporar las preferencias del TD, este concepto el cual es llamado Región de Interés (RI) puede ser definido como un subconjunto del frente de Pareto con la característica de que estas soluciones están apegadas a las preferencias del TD (Cruz-Reyes et al., 2017), véase la **Figura 2** en la cual se muestran los conceptos de la RI para el caso de un problema con dos objetivos, en donde las soluciones no dominadas tomando en cuenta las preferencias del TD son representadas con un rectángulo y la RI representada por la región definida a través de la llave “}”,

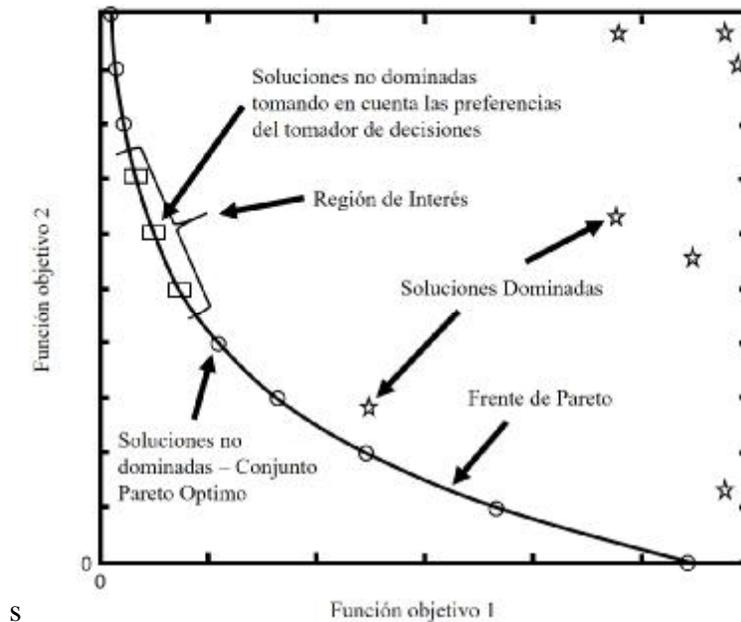


Figura 2 Conceptos de la Región de Interés.

## 2.4 Transformación de restricciones a objetivos

Se utilizó una variante del modelo de (Coello, 2000b), dicha variante nos permite transformar un POMCR a un POMSR en el cual tendremos  $m + n$  objetivos, donde  $m$  es el número de restricciones y  $n$  el número de objetivos. El nuevo vector  $\bar{v} = (g_1, \dots, g_n, f_1, \dots, f_m)$ , donde

$(g_1, \dots, g_n)$  son los objetivos originales del problema y  $(f_1, \dots, f_m)$  son las restricciones originales del problema.

Sin pérdida de generalidad, para la transformación se toma como caso base que el problema de optimización solo tiene restricciones de tipo “menor que” o “menor o igual que”. En caso que el caso no tenga exclusivamente restricciones de los tipos mencionados previamente se procederá de la siguiente manera para su estandarización. Primero, cada restricción que sea de tipo “igual a” se transformará en dos restricciones, una de tipo “mayor o igual que” y otra de tipo “menor o igual que”. Posteriormente, cada restricción que sea de tipo “mayor que” o “mayor o igual que” se multiplicará por  $-1$  para transformarse en su equivalente de tipo “menor que” o “menor o igual que”. Finalmente, una vez que el caso se encuentra en su forma estándar o base, se transforma a un caso sin restricción. Para ejemplificar la transformación se toma como ejemplo el modelo matemático mostrado en la Ecuación 2.

$$\min z = 8x + 5y \quad \dots (2.1)$$

s. a:

$$x + 2y \leq 30 \quad \dots (2.2)$$

$$x < 15 \quad \dots (2.3)$$

$$y < 12 \quad \dots (2.4)$$

$$x, y > 0 \quad \dots (2.5)$$

Dado que las restricciones en Ecuaciones 2.3 a 2.4 son de tipo “menor que” o “menor o igual que”, cada una de ellas se transforma a una función objetivo de minimización; la función objetivo se forma restando al lado izquierdo de la restricción su correspondiente parte derecha. De esta manera, la restricción en ecuación 2.2 resultaría en la función  $\min z_2 = x + 2y - 30$ , la restricción en ecuación 2.3 sería  $\min z_3 = x - 15$ , y la restricción en ecuación 2.4 generaría a  $\min z_4 = y - 12$ . Con estos cambios, el modelo matemático sin restricciones que resultaría de la transformación quedaría como en Ecuación 3.

$$\min(z_1, z_2, z_3, z_4) \quad (3)$$

s. a:

$$x, y > 0$$

Donde  $z_1 = 8x + 5y$ ,  $z_2 = x + 2y - 30$ ,  $z_3 = x - 15$ ,  $z_4 = y - 12$ . Cabe mencionar que con esta definición de funciones objetivo es posible definir elementos de referencia y umbrales que permitan ajustar en mejor medida valores particulares de preferencia para un decisor.

## 2.5 Meta-heurísticas

Según (Duarte, Pantrigo, & Gallego, 2007) meta-heurística deriva de la composición de dos palabras de origen griego, que son “meta” y “heurística” en donde meta (en inglés) se traduce como “más allá de” o “en un nivel superior”, mientras que heurística podría traducirse como “encontrar”, “descubrir” o hallar”.

Por otro lado, la (RAE, 2014) define heurística como:

- Técnica de la indagación y del descubrimiento.
- Búsqueda o investigación de documentos o fuentes históricas.

### 2.5.1 Meta-heurísticas trayectoriales

Según (Duarte et al., 2007) se utiliza el término trayectoria porque el proceso de búsqueda que desarrollan estos métodos se caracterizan por una trayectoria en el espacio de soluciones. Es decir, que, partiendo de una solución inicial, son capaces de generar un camino o trayectoria en el espacio de búsqueda a través de operaciones de movimiento.

En (Duarte et al., 2007) se mencionan algunos ejemplos de meta-heurísticas trayectoriales, los cuales son:

- Búsqueda tabú.
- Recocido simulado.
- Búsqueda de vecindad variable.
- Búsqueda local guiada.
- Aceptación de umbral.
- FANS.
- Búsqueda local iterativa.

### 2.5.2 Meta-heurísticas poblacionales

Según (Duarte et al., 2007) las meta-heurísticas basadas en poblaciones o meta-heurísticas poblacionales son aquéllas que emplean un conjunto de soluciones (población) en cada iteración del algoritmo, en lugar de utilizar una única solución como las meta-heurísticas trayectoriales.

En (Duarte et al., 2007) se mencionan algunos ejemplos de meta-heurísticas poblacionales, los cuales son:

- Algoritmos evolutivos
  - Algoritmos genéticos
  - Algoritmos meméticos.
- Búsqueda dispersa.
- Reencadenamiento de trayectorias.

- Algoritmos de estimación de la distribución.
- ALGORITMOS CULTURALES.
- Inteligencia de enjambre y optimización por enjambre de partículas

De los cuales en este trabajo se enfoca en los Algoritmos genéticos descritos a continuación.

### ***2.5.2.1 Algoritmos evolutivos***

Según (Coello, 2017) el termino de computación evolutiva o algoritmos evolutivos, realmente engloban una seria de técnicas inspiradas biológicamente (en los principios de la teoría Neo-Darwiniana de la evolución natural). En términos generales, para simular el proceso evolutivo en una computadora se requiere:

- Codificar las estructuras que se replicaran.
- Operaciones que afecten a los “individuos”.
- Una función de aptitud.
- Un mecanismo de selección.

Existe 3 paradigmas principales en la computación evolutiva los cuales son:

- Programación Evolutiva.
- Estrategias Evolutivas.
- Algoritmos Genitivos.

En este trabajo se enfocó en el paradigma de algoritmos genéticos, el cual se describirá a continuación.

#### **2.5.2.1.1 Algoritmos genéticos**

“Los algoritmos genéticos (denominados originalmente “planes reproductivos genéticos”) fueron desarrollados por John H. Holland a principios de los 1960s, motivado por resolver problemas de aprendizaje de máquina” (Coello, 2017).

El algoritmo genético como bien lo dice su nombre se basa en la genética de la mayoría de los seres vivos, en donde dos individuos se juntan para formar descendencia, la cual con el tiempo tiende a mutar. Según (Coello, 2017) el algoritmo básico de un algoritmo genético es el siguiente:

- Generar (aleatoriamente) una población inicial.
- Calcular aptitud de cada individuo.
- Seleccionar (probabilísticamente) en base a la aptitud.
- Aplicar operadores genéticos (cruza y mutación) para generar la siguiente población.
- Ciclar hasta que cierta condición se satisfaga.

Según (Coello, 2017) para poder aplicar el algoritmo genético se requiere de los cinco componentes básicos siguientes:

- Una representación de las soluciones potenciales del problema
- Una forma de crear una población inicial de posibles soluciones (normalmente un proceso aleatorio).
- Una función de evaluación que juegue el papel del ambiente, clasificando las soluciones en términos de su “aptitud”.
- Operadores genéticos que alteren la composición de los hijos que se producirán para las siguientes generaciones.
- Valores para los diferentes parámetros que utiliza el algoritmo genético (tamaño de la población, probabilidad de cruza, probabilidad de mutación, número máximo de generaciones, etc.)

## **2.6 Meta-heurísticas constructivas**

Según (Duarte et al., 2007) las meta-heurísticas constructivas son aquellas que utilizan métodos constructivos. Este tipo de métodos construyen iterativamente paso a paso una solución del problema, usualmente de forma determinista y suelen estar basados en la mejor elección en cada iteración

En (Duarte et al., 2007) se mencionan algunos ejemplos de meta-heurísticas constructivas, los cuales son:

- Métodos multi-arranque.
- GRASP.
- Concentración heurística.
- Optimización por colonias de hormigas.
- POPMUSIC.
- Equipos asíncronos.

# Capítulo 3. Trabajos Relacionados.

En este capítulo se presentan los trabajos relacionados con la investigación, los cuales servirán como apoyo y/o para contrastar las diferencias de esta investigación con los demás trabajos mediante tablas comparativas, destacando la aportación que se presenta en este trabajo.

## 3.1 Enfoques del manejo de preferencias

En (Coello, 2000a) se revisan los enfoques de manejo de preferencias más importantes utilizados con los algoritmos evolutivos (por sus siglas en inglés, EA), las cuales fueron:

- **El logro de metas:** La propuesta era extender el MOGA para acomodar la información de metas como un criterio adicional a la no dominancia para asignar rangos a la población.
- **Funciones de utilidad:** La idea era clasificar un conjunto de soluciones del problema de optimización multi-objetivo (por sus siglas en inglés, MOP) en lugar de clasificar explícitamente los atributos del problema. La información de preferencia también se incorpora en los criterios de supervivencia utilizados por la EA.
- **Relaciones de preferencia:** La idea era utilizar relaciones de preferencias binarias que puedan expresarse cualitativamente y luego traducirlas a términos cuantitativos (es decir, pesos) para restringir la búsqueda de una EA.
- **Superación:** La propuesta era utilizar PROMETHEE (método de organización de clasificación de preferencias para el enriquecimiento de evaluaciones), combinado con un EA. Los métodos de PROMETHEE pertenecen a la familia de los enfoques de superación (como los métodos ELECTRE).
- **Lógica difusa:** La propuesta era utilizar un controlador difuso que regulara automáticamente la presión de selección de una EA mediante el uso de un conjunto de objetivos predefinidos que definen el comportamiento deseable de la población, aunque el enfoque se utilizó solo para mantener la diversidad de la población, podría ampliarse fácilmente para incorporar las preferencias del TD.

También hace mención que independientemente del enfoque utilizado para manejar las preferencias en una EA, hay varias cuestiones que deben tomarse en cuenta tales como: preservar la dominancia, la transitividad, la escalabilidad y el hecho de que pueden existir varios tomadores de decisiones.

## 3.2 Problema de programación de horarios universitarios

En las **Tablas 2 y 3** se muestra una comparativa entre los trabajos de la literatura y este trabajo, en donde se toma en cuenta la estrategia utilizada (estrategias de solución y/o tipos de problemas utilizados), el manejo del PPHU, incorporación de las preferencias de manera

estática (IPME) y por último la incorporación de las preferencias de manera dinámica (IPMD). Posteriormente se presenta el análisis y conclusiones de las mismas.

	Estrategia Utilizada	PPHU	IPME	IPMD
(Welsh & Powell, 1967)	Coloreo de Grafos	✓		
(Selim, 1988)		✓		
(Razak, Ibrahim, & Hussin, 2010)		✓		
(Dandashi & Al-Mouhamed, 2010)		✓		
(Asham, Soliman, & Ramadan, 2011)	Coloreo de Grafos y Algoritmos Genéticos	✓		
(Dimopoulou & Miliotis, 2001)	Programación Entera	✓		
(Aubin & Ferland, 1989)		✓		
(Daskalaki, Birbas, & Housos, 2004)		✓	✓	
(Daskalaki & Birbas, 2005)		✓	✓	
(Akif & Cihan, 2008)		✓		
(Deris, Omatu, Ohta, & Saad, 1999)	Programación de Satisfacción de Restricciones	✓		
(Deris, Omatu, & Ohta, 2000)		✓		
(Zhang & Lau, 2005)		✓		
(Khonggamnerd & Innet, 2009)	Algoritmos Genéticos	✓		
(Alsmadi, Abo-Hammour, Abu-Al-Nadi, & Algsoon, 2011)		✓		
(Socha, Knowles, & Sampels, 2002)	Colonia de Hormigas	✓		
(Nothegger, Mayer, Chwatal, & Raidl, 2012)	Colonia de Hormigas (Paralelo)	✓		
(Ayob & Jaradat, 2009)	Colonia de Hormigas-Recocido Simulado y Colonia de Hormigas-Búsqueda Tabú	✓		
(Alvarez-Valdes, Crespo, & Tamarit, 2002)	Búsqueda Tabú (un software llamado HORARIS)	✓		
(Aladag, Hocaoglu, & Basaran, 2009)	Búsqueda Tabú	✓		
(Tuga, Berretta, & Mendes, 2007)	Híbrido Recocido Simulado-Vecindario Kempe Chain	✓		
(Aycañ & Ayav, 2009)	Recocido Simulado	✓		
(Joudaki, Imani, & Mazhari, 2010)	Híbrido Memético-Recocido Simulado	✓		
(Yang & Jat, 2011)	Híbrido Genético-Búsqueda Local (Memético)	✓		
(Abdullah, Burke, & Mccollum, 2005)	Búsqueda Variable de Vecindarios	✓		
(Abdullah, Burke, & McCollum, 2007a)	Híbrido Genético-Búsqueda Local (Memético)	✓		
(Abdullah, Burke, & McCollum, 2007b)	Algoritmo de Mejoramiento Iterativo Aleatorizado con Estructuras de Vecindarios Compuestos	✓		

Tabla 2 Comparativa entre trabajos de la literatura y este trabajo parte 1.

	EU	M-PPHU	IPME	IPMD
(Abdullah & Hamdan, 2008)	Híbridos Heurística Constructiva- Algoritmo de Mejoramiento Iterativo Aleatorizado con Estructuras de Vecindarios Compuestos y un Criterio de Aceptación Basado en el Recocido Simulado-Ascenso de Colina	✓		
(Turabieh & Abdullah, 2009)	Memético Basado en la Búsqueda Tabú	✓		
(Kohshori & Abadeh, 2012)	FGARI, FGASA y FGATS	✓		
(Rachmawati & Srinivasan, 2005)	Híbridos Algoritmos Evolutivos-Lógica Difusa	X	✓	
(Asmuni, Burke, & Garibaldi, 2005)	Heurísticas de Ordenamiento (Mayor grado, Grado de Saturación y Matricula más Grande)	✓		
(Golabpour, Shirazi, Farahi, Mohammad, & Beigi, 2008)	Soluciones Difusas Basadas en Algoritmos Meméticos	✓		
(Chaudhuri & De, 2010)	Híbrido Genético-Búsqueda Local (Memético) y lógica difusa	✓		
(Rangel-Valdez, Jasso-Luna, Rodriguez-Chavez, & Bujano-Guzman, 2014)	Híbrido Recocido Simulado- Algoritmo Genético	✓		
<b>Este trabajo</b>	<b>NOSGA-II</b>	✓	✓	✓

Tabla 3 Comparativa entre trabajos de la literatura y este trabajo parte 2.

En la **Tabla 3** se muestra que en (Rachmawati & Srinivasan, 2005) se marca con una “X”, lo cual indica que no se trata del PPHU si no del Problema de Asignación de Proyectos para Estudiantes, por otro lado en (Kohshori & Abadeh, 2012) las siglas FGARI, FGASA y FGATS significan *Fuzzy Genetic Algorithm guided by Randomized Iterative local search algorithm*, *Fuzzy Genetic Algorithm guided by Simulated Annealing algorithm* y *Fuzzy Genetic Algorithm guided by Tabu Search algorithm*, respectivamente.

### 3.3 Manejo de restricciones como objetivos

El objetivo de esta actividad es tener un modelo de optimización multi-objetivo sin restricciones y para ello se utiliza una pequeña variante del modelo de (Coello, 2000b), el cual nos dice que para redefinir un problema de optimización mono-objetivo de  $f$  como un problema de optimización multi-objetivo en el cual tendremos  $m + 1$  objetivos, donde  $m$  es el número de restricciones. Entonces se aplica cualquier técnica de optimización multi-objetivo a un nuevo vector  $\vec{v} = (f, f_1, \dots, f_m)$ , donde  $(f_1, \dots, f_m)$  son las restricciones originales del problema.

### **3.4 Conclusiones de la revisión de la literatura revisada**

Al analizar las Tablas anteriores podemos notar que para el PPHU se han utilizado distintas heurísticas para resolver dicho problema, tales como colonia de hormigas, algoritmos genéticos y meméticos, etc. Podemos notar trabajos como los de (Daskalaki et al., 2004) y (Daskalaki & Birbas, 2005) que manejan ciertas preferencias del tomador de decisiones a través de las funciones de penalidad, en este trabajo se maneja las preferencias del TD en el enfoque de superación antes mencionado. Por otro lado, También se observa que en el trabajo de (Rachmawati & Srinivasan, 2005) manejan las preferencias a través de la lógica difusa, pero cabe destacar que ellos resuelven otro problema llamado asignación de proyectos para estudiantes.

Lo que compete a la transformación de restricciones como objetivos que se muestra en (Coello, 2000b) también pueden ser utilizadas para los POMCR con una pequeña modificación explicada anteriormente.

En conclusión, las aportaciones de este trabajo son los siguientes: a) El manejo de las preferencias del TD en el PPHU; b) El manejo de las preferencias del TD de manera dinámica y c) la transformación de restricciones a objetivos en PPHU.

# Capítulo 4. Metodología.

La metodología de trabajo utilizada se dividirá en dos; Metodología de desarrollo y metodología de investigación. La metodología de desarrollo es la encargada de estructurar, planear y controlar el proceso de desarrollo del proyecto y la metodología de investigación es la encargada de

## 4.1 Metodología de desarrollo

La metodología de desarrollo para resolver el problema propuesto consta de dos fases principales, las cuales son: a) Desarrollo del Modelo para incorporar Preferencias de forma dinámica en la solución de PPHU; b) Desarrollo de algoritmo de solución para PPHU basado en preferencias; Las actividades asociadas con estas fases son las siguientes:

1. Desarrollar un modelo que permita incorporar preferencias de un TD al PPHU.
2. Desarrollar un modelo que permita transformar restricciones a objetivos para el PPHU.
3. Desarrollar un algoritmo de solución para resolver el PPHU basado en preferencias.
4. Utilizar y adaptar una interfaz gráfica existente para guiar el proceso de toma de decisiones en la solución del PPHU.
5. Desarrollar un modelo que permita incorporar preferencias de un TD de manera dinámica al PPHU, la cual sea capaz de facilitar la incorporación de nuevas preferencias a partir de la interacción del TD con el sistema.

La descripción de cada una de las actividades anteriores es la siguiente:

En la **revisión del estado del arte** se llevó con el objeto de identificar modelos de preferencias o arquitecturas para el manejo de preferencias que puedan ajustarse dinámicamente a nuevas preferencias. También se revisarán estrategias de solución para el PPHU a las que se puedan incorporar preferencias. Así mismo, se investigarán herramientas que permitan mejorar la experiencia de usuario en el manejo de la información a través de interfaces gráficas, basadas en herramientas multimedia.

En la **transformación de restricciones a objetivos** se revisó en la literatura maneras de transformar restricciones a objetivos de las cuales se optó por el modelo de Coello (2000b), el cual permite transformar las restricciones a objetivos de una manera sencilla.

En el **análisis de Modelo de Preferencias Dinámico** se estudiaron modelos y arquitecturas existentes para el manejo de preferencias, que permitan dinamismo en la integración de nuevas preferencias.

## 4.2 Metodología de Investigación

La metodología involucra la definición y solución de los siguientes elementos necesarios para la solución del problema:

**Definición del Problema:** Es necesaria una instancia del PPHU, la cual consta principalmente de seis elementos; Aulas, grupos, materias, profesores, horas y días. También se redefinirá el problema de un POMCR a un POMSR y por último, al incorporar las preferencias del TD es necesario saber los valores de los umbrales de discriminación, para ello existen dos formas de obtenerlos; a) El TD tenga de antemano dichos valores y b) Si se tiene un historial de las soluciones ya aplicadas en dicha institución, entonces se podrá hacer uso del PDA, el cual hace uso de dicho historial y devuelve como resultado un conjunto de parámetros ajustados (umbrales de discriminación).

**Incorporación de Preferencias:** Se utilizó una estrategia de superación llamada método ELECTRE en combinación con un modelo de optimización basado en el sistema relacional de sobre clasificación difusa. Estas dos estrategias utilizan los umbrales de discriminación proporcionados por el TD en la **Definición del Problema**.

**Estrategia de Solución:** Para resolver problemas con la incorporación de preferencias del TD se necesitan algoritmos diseñados especialmente para ello, aquí es donde entra el NOSGA-II, el cual es un algoritmo genético poblacional diseñado para incorporar preferencias del TD.

**Interfaz Gráfica:** Para solucionar la parte de interacción con el TD es necesario de una interfaz gráfica, la cual permita de manera sencilla obtener los datos necesarios para obtener la retroalimentación del TD. Los datos necesarios para dicha retroalimentación son los siguientes: a) Una sección visual de los horarios construidos por la **Estrategia de Solución** para presentarle los resultados de una manera amena y sencilla; b) Campos para que el TD califique (nuevas preferencias) las soluciones (que tan buena es cada solución para él).

Retroalimentación: Este elemento hace uso de las nuevas preferencias proporcionadas por el TD a través de la **Interfaz Gráfica**, los cuales son tratados de alguna manera por el PDA, dando como resultado nuevos valores de los umbrales de discriminación apegados a las nuevas preferencias del TD.

# Capítulo 5. Propuesta de Solución.

Para el desarrollo de este trabajo se propone un modelo que se encuentra dividido en cinco etapas principales como se muestra en la **Figura 3**.

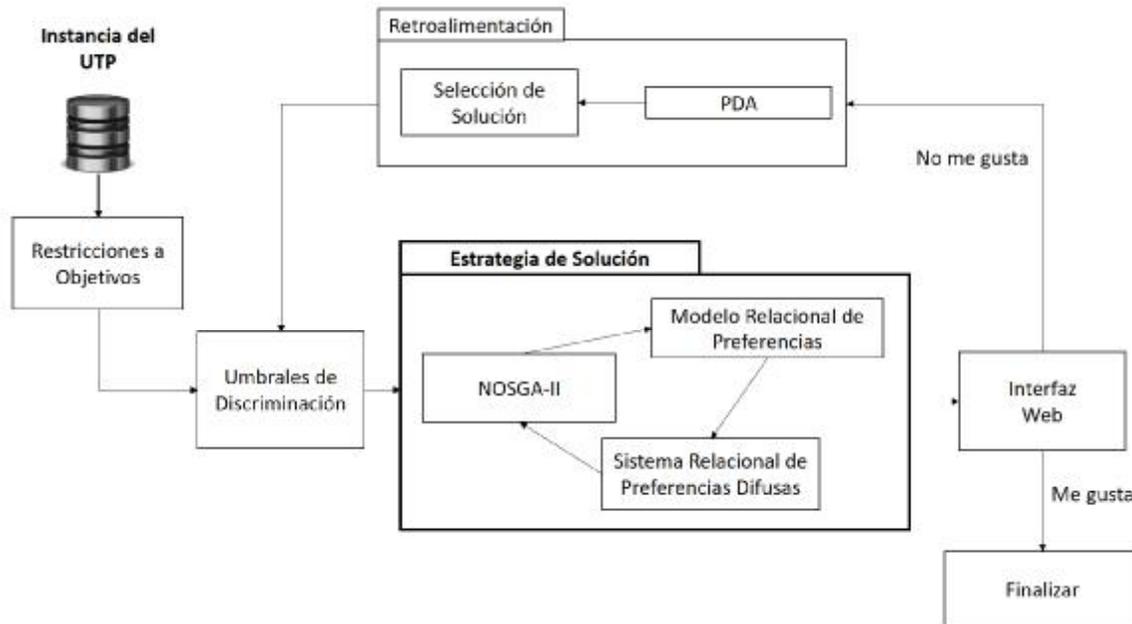


Figura 3 Arquitectura propuesta.

Esta tesis tiene como objetivo principal desarrollar un algoritmo evolutivo que incorpore preferencias del tomador de decisiones para la solución del PPHU. Para lo cual se requieren realizar las siguientes actividades.

- Transformación de restricciones a objetivos.
- Incorporación de las preferencias del tomador de decisiones.
- Estrategia de solución (NOSGA-II)
- Retroalimentación.

Para ello se necesita llevar a cabo las actividades siguientes:

## 5.1 Definición del problema

El problema de programación de horarios consiste en los conjuntos  $C, T, P, R$ . El conjunto  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  que corresponde a los cursos. El conjunto  $P = \{p_{1,1}, p_{1,2}, \dots, p_{1,p}, p_{2,1}, p_{2,2}, \dots, p_{2,p}, \dots, p_{d,1}, p_{d,2}, \dots, p_{d,p}\}$  es el  $d * p$  intervalos de tiempo o ranuras de tiempo, distribuidos en una semana formada por  $d$  días. El conjunto  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  representa a los profesores y el conjunto  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_w\}$  está formado por las aulas disponibles.

Teniendo en cuenta los datos anteriores, el problema de programación de horarios puede definirse como el problema de encontrar una matriz de ordenación  $M$  de tamaño  $w * d * p$ , donde cada celda  $m_{i,j,k}$ , para  $1 \leq i \leq w$ ,  $1 \leq j \leq d$  y  $1 \leq k \leq p$  contiene una tupla  $(cl_{u,l}, t_v) \in T * C$ . En a **Tabla 4** se muestra otros conjuntos utilizados y una breve descripción de los mismos.

Símbolo	Descripción
$CR = \{cr_1, cr_2, \dots, cr_s\}$	Un conjunto donde cada elemento $cr_i$ , $1 \leq i \leq s$ , es un plan de estudios, es decir, un grupo de cursos con estudiantes en común.
$TC = \{tc_1, tc_2, \dots, tc_m\}$	Un conjunto donde cada elemento $tc_i$ , $1 \leq i \leq m$ , contiene el grupo de cursos que un profesor podría enseñar.
$TA = \{ta_1, ta_2, \dots, ta_m\}$	Un conjunto donde cada elemento $ta_i$ , $1 \leq i \leq m$ , contiene los intervalos de tiempo en los que un profesor está disponible para enseñar una clase.
$CL = \{cl_1, cl_2, \dots, cl_n\}$	Un conjunto donde cada elemento $cl_i$ , $1 \leq i \leq n$ , contiene las materias que deben impartidas por cada curso durante la semana.

Tabla 4 Conjuntos utilizados.

El modelo utilizado es el siguiente:

$$\min z = \text{Idle}(\text{CR}) + \text{Idle}(\text{T}) + \text{R}(\text{M})$$

s. a:

$$\cup_{\forall i,j,k} C(m_{i,j,k}) =$$

$$CCR(m_{i_1,j,k}) \cap CR(m_{i_2,j,k}) = \emptyset, \text{ para cualquier } i_1 \neq i_2 \text{ teniendo fijo } j, k;$$

$$T(m_{i_1,j,k}) \cap T(m_{i_2,j,k}) = \emptyset, \text{ para cualquier } i_1 \neq i_2 \text{ teniendo fijo } j, k;$$

$$T(m_{i_1,j_1,k_1}) \cap T(m_{i_2,j_2,k_2}) = \emptyset, \text{ para cualquier } i_1, j_1, k_1, i_2, j_2, k_2, \text{ donde } CR(m_{i_1,j_1,k_1}) = CR(m_{i_2,j_2,k_2}); C(m_{i_2,j_2,k_2}) \neq C(m_{i_2,j_2,k_2});$$

$$C(m_{i,j,k}) \in tc_{T(m_{i,j,k})} \text{ para cualquier } i, j, k;$$

$$P_{j,k} \in ta_{T(m_{i,j,k})};$$

En donde la función objetivo trata de minimizar el tiempo inactivo de los estudiantes, el tiempo inactivo de los profesores y el tiempo inactivo de las aulas. La primera restricción: Todos los cursos deben ser asignados; La segunda restricción: No debe haber un grupo de estudiantes asignados a dos materias a la misma hora el mismo día; La tercera restricción: Un profesor no puede ser asignado a dos clases a la misma hora el mismo día; La cuarta restricción: Un profesor no puede dar dos materias al mismo grupo; La quinta restricción: Un curso debe ser enseñado por un profesor que la puede enseñar; la sexta restricción: Un curso debe ser enseñado por un profesor en el horario que él pueda enseñar.

### 5.1.1 Ejemplo ilustrativo

Supongamos que tenemos una instancia ficticia mostradas en las **Tablas 5 y 6**.

A	H	G	Materias								
1	7	1	$M_{11}$	$M_{21}$	$M_{31}$	$M_{41}$	$M_{51}$	$M_{61}$	$M_{71}$		
2	8	2	$M_{12}$	$M_{22}$	$M_{32}$	$M_{42}$	$M_{52}$	$M_{62}$	$M_{72}$		
3	9										
	10		$p_1$			$p_2$			$p_3$		
	11		$M_{11}$	$M_{22}$	$M_{72}$	$M_{21}$	$M_{12}$	$M_{41}$	$M_{31}$	$M_{52}$	$M_{12}$
	12										
	13		$p_4$			$p_5$			$p_6$		
			$M_{41}$	$M_{11}$	$M_{32}$	$M_{51}$	$M_{31}$	$M_{42}$	$M_{61}$	$M_{62}$	$M_{22}$
			$p_7$								
			$M_{71}$	$M_{12}$	$M_{31}$						

Tabla 5 Instancia ficticia del PPHU parte 1.

En donde  $A$  son las aulas,  $H$  son las horas laborales,  $G$  son los grupos existentes,  $M_{i,j}$  y  $P_n$  son los profesores.

	P						
	7	8	9	10	11	12	13
1		x	x	x	x	x	x
2	x	x	x	x	x	x	
3		x	x	x	x	x	x
4		x	x	x	x	x	
5	x	x	x	x	x	x	
6		x	x	x	x	x	x
7	x	x	x	x			

	A						
	7	8	9	10	11	12	13
1	x	x	x	x	x	x	x
2		x	x	x	x	x	x
3	x	x	x	x	x	x	

Tabla 6 Instancia ficticia del PPHU parte 2.

En donde  $P$  es la matriz de disponibilidad de los profesores en las diferentes horas y  $A$  es la matriz de disponibilidad de las aulas en las diferentes horas.

Ahora supongamos que de manera aleatoria fueron asignados los valores a la solución, véase la **Tabla 7**.

M	A	H	P
$M_{11}$	2	7	1
$M_{21}$	1	11	5
$M_{31}$	3	13	5
$M_{41}$	3	8	2
$M_{51}$	1	10	7
$M_{61}$	3	11	3
$M_{71}$	2	8	4
$M_{12}$	1	7	5
$M_{22}$	1	10	1
$M_{32}$	2	12	2
$M_{42}$	3	9	3
$M_{52}$	3	9	7
$M_{62}$	1	12	6
$M_{72}$	2	13	1

Tabla 7 Solución ficticia.

Se procede a calcular la función objetivo  $\min z = idle(CR) + idle(T) + idle(M)$

Ahora debemos de encontrar el IDLE(CR):

Posteriormente se decide dividir la **Tabla 7** en tres partes para facilidad del ejemplo, en donde se agrupan por las aulas, véase **Tabla 8**.

M	A	H	P
$M_{21}$	1	11	5
$M_{51}$	1	10	7
$M_{12}$	1	7	5
$M_{22}$	1	10	1
$M_{62}$	1	12	6

M	A	H	P
$M_{11}$	2	7	1
$M_{71}$	2	8	4
$M_{32}$	2	12	2
$M_{72}$	2	13	1

M	A	H	P
$M_{31}$	3	13	5
$M_{41}$	3	8	2
$M_{61}$	3	11	3
$M_{42}$	3	9	3
$M_{52}$	3	9	7

Tabla 8 Solución ficticia agrupada por aulas.

Para verificar cuantas horas sin que las aulas sean ocupadas hay que ordenarlos por hora de la manera siguiente:

Aula 1:  $H = \{7, \_, \_, 10, 11, 12\}$  Notamos que no tienen clases a las 8-9 y 9-10, lo cual hace que el aula tenga dos horas sin ser aprovechadas.

Aula 2:  $H = \{7, 8, \_, \_, \_, 12, 13\}$  Notamos que no tienen clases a las 9-10, 10-11, 11-12, lo cual hace que las aulas tengan tres horas sin ser aprovechadas.

Aula 3:  $H = \{8, 9, \_, 11, \_, 13\}$  Notamos que no tienen clases a las 10-11 y 12-13, lo cual hace que las aulas tengan dos horas sin ser aprovechadas.

Por lo tanto

$$IDLE(CR) = 2 + 3 + 3 = 7.$$

Posteriormente el  $IDLE(T)$ :

También se vuelve a dividir la **Tabla 7** en siete partes para facilidad del ejemplo, en donde se agrupan por los profesores, véase **Tabla 9**.

M	A	H	P
$M_{11}$	2	7	1
$M_{22}$	1	10	1
$M_{72}$	2	13	1

M	A	H	P
$M_{41}$	3	8	2
$M_{32}$	2	12	2

M	A	H	P
$M_{61}$	3	11	3
$M_{42}$	3	9	3

M	A	H	P
$M_{71}$	2	8	4

M	A	H	P
$M_{21}$	1	11	5
$M_{31}$	3	13	5
$M_{12}$	1	7	5

M	A	H	P
$M_{62}$	1	12	6

M	A	H	P
$M_{51}$	1	10	7
$M_{52}$	3	9	7

Tabla 9 Solución ficticia agrupada por profesores.

Para verificar cuantas horas libres tienen los profesores hay que ordenarlos por hora de la siguiente manera:

Profesor 1:  $H = \{7, \_, \_, 10, \_, \_, 13\}$  Notamos que el profesor 1 no tiene asignado dar clases a las 8-9, 9-10, 11-12 y 12-13, lo cual hace que el profesor tenga cuatro horas sin ser aprovechadas.

Profesor 2:  $H = \{8, \_, \_, 12\}$  Notamos que el profesor 2 no tienen asignado dar clases a las 9-10, 10-11 y 11-12, lo cual hace que el profesor tenga tres horas sin ser aprovechadas.

Profesor 3:  $H = \{9, \_, 11\}$  Notamos que el profesor 3 no tienen asignado dar clases a las 10-11, lo cual hace que el profesor tenga una hora sin ser aprovechadas.

Profesor 4:  $H = \{8\}$  Notamos que el profesor 4 no tienen horas sin desaprovechar.

Profesor 5:  $H = \{7, \_, \_, 11, \_, 13\}$  Notamos que el profesor 5 no tienen asignado dar clases a las 8-9, 9-10, 10-11 y 12-13, lo cual hace que el profesor tenga cuatro horas sin ser aprovechadas.

Profesor 6:  $H = \{12\}$  Notamos que el profesor 6 no tienen horas sin desaprovechar.

Profesor 7:  $H = \{9, 10\}$  Notamos que el profesor 7 no tienen horas sin desaprovechar.

Por lo tanto

$$Idle(T) = 4 + 3 + 1 + 0 + 4 + 0 + 0 = 12$$

Por último, el IDLE(M):

Se procede de la misma manera como los ejemplos anteriores dando como resultado:

$$Idle(T) = 2 + 3 + 2 = 7$$

Una vez obtenidos estos valores, simplemente los tenemos que sustituir en la función objetivo.

$$\min z = idle(CR) + idle(T) + idle(M)$$

$$\min z = 7 + 12 + 7$$

$$\min z = 26$$

La **Tabla 10** muestra los resultados obtenidos de una forma más entendible para el TD.

	7-8	8-9	...	13-14
<i>Aula<sub>1</sub></i>	(5, 2, <i>M<sub>12</sub></i> )		...	
<i>Aula<sub>2</sub></i>	(1, 1, <i>M<sub>11</sub></i> )	(4, 1, <i>M<sub>71</sub></i> )	...	(1, 2, <i>M<sub>72</sub></i> )
<i>Aula<sub>3</sub></i>		(2, 1, <i>M<sub>41</sub></i> )	...	(5, 1, <i>M<sub>31</sub></i> )

Tabla 10 Resultados ficticios con formato.

## 5.2 Descripción de la instancia

La instancia consta principalmente de seis elementos; Aulas, grupos, materias, profesores, horas y días, los cuales se describen a continuación con la ayuda de la **Tabla 11**:

- **Aulas:** Número de aulas (6), estas aulas constan de id y tipo de aula (aula o laboratorio), tienen un horario aceptable para el uso de las mismas que dependen del número de días (5) y el número de horas/día (13).
- **Grupos:** Número de Grupos (9), estos grupos constan de id y código del grupo, tienen un horario aceptable para cada grupo que dependen del número de días (5) y el número de horas/día (13).
- **Materias:** Numero de Materias (25), estas materias constan de un id-materia-grupo, grupo, id-materia, materia, horas totales, horas teóricas, horas de práctica, profesor1 y profesor2, las cuales dependen del número de materias a impartir (41) y de la suma de las horas totales de las 41 materias a impartir. También tienen asociadas la disponibilidad de las aulas en las que las materias se pueden impartir que dependen del número de aulas (6).

- **Profesores:** Número de Profesores (11), estos profesores constan de id, id-real, nombre del profesor y el número máximo de horas por semana, tienen un horario de disponibilidad del profesor que dependen del número de días (5) y el número de horas/día (13). También tiene asociado las aulas en que cada profesor puede dar clase, el cual depende del número de aulas (6) y por ultimo tiene asociado las materias que el profesor puede impartir (puede impartir menos de 4 materias).
- **Horas:** Número de Horas (5).
- **Días:** Número de Horas/Día (13).

Información	Valor
Número de Aulas	6
Número de Grupos	9
Numero de Materias	25
Número de Profesores	11
Número de días	5
Número de Horas/Día	13
Número de Materias a Impartir	41
Número máximo de sesiones continuar por profesor	6
Número máximo de sesiones continuas por materia	3
Número máximo de asignaturas por profesor	6
Número máximo de asignaturas por profesor por grupo	3

Tabla 11 Información relevante de la instancia.

Para más información de la instancia ir al [Anexo 1](#).

### 5.3 Transformación de restricciones a objetivos

Se modificó el modelo de Coello (2000b), el cual ahora transforma un problema de optimización multi-objetivo con restricciones a un problema de optimización multi-objetivo sin restricciones en el cual tendremos  $m + n$  objetivos, donde  $m$  es el número de restricciones y  $n$  el número de objetivos. El nuevo vector  $\vec{v} = (g_1, \dots, g_n, f_1, \dots, f_m)$ , donde  $(g_1, \dots, g_n)$  son los objetivos originales del problema y  $(f_1, \dots, f_m)$  son las restricciones originales del problema.

A continuación, se presenta un ejemplo de cómo transformar una restricción a un objetivo:

$$\text{Min } z_1 = 20x_1 + 30x_2$$

$$\text{Max } z_2 = 3x_1 + 2x_2$$

s. a:

$$4x_1 + 3x_2 \leq 240$$

Transformada:

$$\text{Min } z_1 = 20x_1 + 30x_2$$

$$\text{Max } z_2 = 3x_1 + 2x_2$$

$$\text{Min } z_3 = 4x_1 + 3x_2$$

Dichas restricciones son transformadas mediante las siguientes reglas:

- Cuando la restricción es “  $\leq$  ” o “  $<$  ” se transforma en un objetivo de minimización.
- Cuando la restricción es “  $\geq$  ” o “  $>$  ” se transforma en un objetivo de maximización.
- Cuando la restricción es “ = ” esta restricción se transforma en dos restricciones; “  $\leq$  ” y “  $\geq$  ”.

## 5.4 Incorporación de las preferencias del tomador de decisiones.

Esta actividad se basa principalmente en dos elementos; Método de ELECTRE-III y el Modelo de Fernández (Modelo de optimización basado en el sistema relacional de sobre clasificación difusa). A continuación, se definirán y se presentarán ejemplos prácticos de ellos.

### 5.4.1 Modelo relacional de preferencias ELECTRE

En este trabajo se utilizó ELECTRE-III construye relaciones de superación  $S$  entre pares de alternativas, por ejemplo  $aSb$  y se lee como “a es al menos tan buena que b”. En la **Tabla 12** se muestra los umbrales utilizados con su respectiva definición.

Umbrales	Definición
$w_i$	Representa el umbral peso, el cual es un valor numérico que indica la importancia de un objetivo con respecto a otro en el objetivo $i$ .
$q_i$	Representa el umbral de indiferencia, el cual es un valor numérico que indica la indiferencia del TD con respecto a dos alternativas en el objetivo $i$ .
$p_i$	Representa el umbral de preferencia, el cual es un valor numérico que indica la preferencia del TD de una alternativa sobre de otra en el objetivo $i$ .
$v_i$	Representa el umbral de veto, el cual es un valor numérico que sirve como un bloqueo de la relación de superación entre dos alternativas en el objetivo $i$ .

Tabla 12 Umbrales.

Por otra parte, para construir la relación de superación se necesitan de los elementos mostrados en la **Tabla 13**.

Elementos	Definición
$g_j(a)$	Representa el valor del objetivo $a$ en el índice $j$ .
$g_j(b_h)$	Representa el valor del objetivo $b_h$ en el índice $j$ .
$c_i(a, b_h)$	Representa la concordancia individual en el índice $i$ de la alternativa $a$ con la alternativa $b_h$ .
$C(a, b_h)$	Representa la concordancia global de la alternativa $a$ con la alternativa $b_h$ .
$d_i(a, b_h)$	Representa la discordancia individual en el índice $i$ de la alternativa $a$ con la alternativa $b_h$ .
$\sigma(a, b_h)$	Representa el grado de credibilidad de la alternativa $a$ con la alternativa $b_h$ .

Tabla 13 Elementos para construir la relación de superación.

Pasos para construir la relación de superación:

- **Paso 1:** Calcular la concordancia individual.
- **Paso 2:** Calcular la concordancia global.
- **Paso 3:** Calcular la discordancia individual.
- **Paso 4:** Calcular el grado de credibilidad.

Por último se muestran las fórmulas presentadas en (Mousseau, Slowinski, & Zielniewicz, 1999) para el cálculo de la concordancia individual, concordancia global, discordancia individual y el grado de credibilidad, respectivamente.

Fórmulas para la concordancia individual:

$$\begin{aligned}
 & \text{if } g_j(a) \geq g_j(b_h) + p_j(b_h), \text{ then } c_j(b_h, a) = 0 \\
 & \text{if } g_j(b_h) + q_j(b_h) \leq g_j(a) < g_j(b_h) + p_j(b_h), \text{ then} \\
 & \quad c_j(b_h, a) = \frac{[g_j(b_h) - g_j(a) + p_j(b_h)]}{[p_j(b_h) - q_j(b_h)]} \\
 & \text{if } g_j(a) < g_j(b_h) + q_j(b_h), \text{ then } c_j(b_h, a) = 1
 \end{aligned}$$

Fórmula para la concordancia global

$$c(a, b_h) = \frac{\sum_{j \in F} k_j c_j(a, b_h)}{\sum_{j \in F} k_j}$$

Fórmula para la discordancia individual

$$\begin{aligned}
 & \text{if } g_j(a) > g_j(b_h) - p_j(b_h), \text{ then } d_j(a, b_h) = 0 \\
 & \text{if } g_j(b_h) - v_j(b_h) < g_j(a) \leq g_j(b_h) - p_j(b_h), \text{ then} \\
 & \quad d_j(a, b_h) = \frac{[g_j(b_h) - g_j(a) - p_j(b_h)]}{[v_j(b_h) - p_j(b_h)]} \\
 & \text{if } g_j(b_h) - v_j(b_h) \geq g_j(a), \text{ then } d_j(a, b_h) = 1
 \end{aligned}$$

Fórmula para obtener el grado de credibilidad:

$$\sigma(a, b_h) = c(a, b_h) \prod_{j \in \bar{F}} \frac{1 - d_j(a, b_h)}{1 - c(a, b_h)} \text{ where } \bar{F} = \{j \in F \mid d_j(a, b_h) > c(a, b_h)\}$$

A continuación, se mostrará un ejemplo del cálculo del grado de credibilidad a través del Método de ELECTRE-III.

### 5.4.1.1 Ejemplo Didáctico del Método ELECTRE-III

Para este ejemplo se cuenta con una solución de un problema ficticio de **cuatro alternativas** y **tres objetivos** cada una como se muestra en la **Tabla 14**. Por otra parte, en la **Tabla 15** se muestra los umbrales. Se mostrará únicamente la relación de superación de *alt1* *alt2*. Para ver el ejemplo completo, véase en el [Anexo 2](#).

	$g_1$	$g_2$	$g_3$
$a_1$	75	67	85
$a_2$	70	75	80
$a_3$	74	73	81
$a_4$	78	76	84

Tabla 14 Solución de un problema ficticio.

	$g_1$	$g_2$	$g_3$
k	0.33	0.33	0.33
q	2	3	4
p	10	11	12
v	30	31	32

Tabla 15 Umbrales.

**Paso 1:** Calcular la concordancia individual.

En la **Tabla 16** se muestran las concordancias individuales de la alternativa 1 con la alternativa 2.

$c_i(a, b_h) = c(a_1, a_2)$			
$g_1$	$75 \leq 70 - 10$	Falso	1
	$70 - 10 < 75 \leq 70 - 2$	Falso	
	$70 - 2 < 75$	Verdadero	
$g_2$	$67 \leq 75 - 11$	Falso	0.375
	$75 - 11 < 67 \leq 75 - 3$	Verdadero	
$g_3$	$85 \leq 80 - 12$	Falso	1
	$80 - 12 < 85 \leq 80 - 4$	Falso	
	$80 - 4 < 85$	Verdadero	

Tabla 16 Concordancia individual de  $c(\text{alt1}, \text{alt2})$ .

**Paso 2:** Calcular la concordancia global.

En la **Tabla 17** se muestra la concordancia global.

$C(a, b_h)$		
$C(alt1, alt2)$	$((0.33 * 1) + (0.33 * 0.375) + (0.33 * 1)) / (0.33 + 0.33 + 0.33)$	0.79

Tabla 17 Concordancia global.

**Paso 3:** Calcular la discordancia individual.

En la **Tabla 18** se muestran las discordancias individuales de la alternativa 1 con la alternativa 2.

$d_i(a, b_h) = d(a_1, a_2)$			
$g_1$	$75 > 70 - 10$	Verdadero	0
	$70 - 30 < 75 \leq 70 - 10$	Falso	
	$70 - 30 \geq 75$	Falso	
$g_2$	$67 > 75 - 11$	Verdadero	0
	$75 - 31 < 67 \leq 75 - 11$	Falso	
	$75 - 31 \geq 67$	Falso	
$g_3$	$85 > 80 - 12$	Verdadero	0
	$80 - 32 < 85 \leq 80 - 12$	Falso	
	$80 - 32 \geq 85$	Falso	

Tabla 18 Discordancia individual  $d(alt1, alt2)$ .

**Paso 4:** Calcular el grado de credibilidad.

En este último paso se presenta en la **Tabla 19** el grado de credibilidad de la alternativa 1 con la alternativa 2. La parte roja se omite ya que para que se tome en cuenta se debe de cumplir la siguiente condición  $d_j(a, b_h) > c(a, b_h)$ .

$\sigma(a, b_h)$		
$\sigma(a_1, a_2)$	$0.79 * \left( \left( \frac{1 - 0}{1 - 0.79} \right) * \left( \frac{1 - 0}{1 - 0.79} \right) * \left( \frac{1 - 0}{1 - 0.79} \right) \right)$	0.79

Tabla 19 Grados de credibilidad (Concentrado).

## 5.4.2 Sistema relacional de sobre clasificación difusa

El modelo de optimización basado en el sistema relacional de sobre clasificación difusa convierte el problema de optimización multi-objetivo en un problema de optimización tri-objetivo que son el frente no superado estrictamente (NS), el frente no superado débilmente (NW), y el frente no superado por flujo neto (NF).

Según Fernández et al. (2013) el modelo es capaz de establecer las siguientes relaciones de preferencia:

- **Preferencia Extrita.** Notación:  $xPy$ . Debe de cumplirse por lo menos una de las siguientes condiciones:
  - §  $y$  es dominada por  $x$ .
  - §  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(y, x) < 0.5$
  - §  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge (0.5 \leq \sigma(y, x) < \lambda) \wedge (\sigma(x, y) - \sigma(y, x)) \geq \beta$
- **Indiferencia.** Notación:  $xIy$ . Deben cumplirse las siguientes condiciones:
  - §  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(y, x) \geq \lambda$
  - §  $|\sigma(x, y) - \sigma(y, x)| < \varepsilon$
- **Preferencia Débil.** Notación:  $xQy$ . Deben cumplirse las siguientes condiciones:
  - §  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(x, y) > \sigma(y, x)$
  - § Que no sea  $xPy$ .
  - § Que no sea  $xIy$ .
- **K-Preferencia.** Notación:  $xKy$ . Deben cumplirse las siguientes condiciones:
  - §  $0.5 < \sigma(x, y) < \lambda$
  - §  $\sigma(y, x) < 0.5$
  - §  $(\sigma(x, y) - \sigma(y, x)) \geq \varepsilon$
- **Incomparabilidad.** Notación:  $xRy$ . Deben cumplirse las siguientes condiciones:
  - §  $\sigma(x, y) < 0.5$
  - §  $\sigma(y, x) < 0.5$
- **No Preferencia.** Notación:  $x \sim y$ . Deben cumplirse las siguientes condiciones:
  - § Que no sea  $xPy$  y que no sea  $yPx$
  - § Que no sea  $xQy$  y que no sea  $yQx$
  - § Que no sea  $xKy$  y que no sea  $yKx$
  - § Que no sea  $xIy$
  - § Que no sea  $xRy$

Pasos para realizar el modelo de Fernández:

- **Paso 1:** Establecer relaciones de preferencias.
- **Paso 2:** Contar cuantas relaciones de preferencias se dieron en cada alternativa.
- **Paso 3:** Clasificar en los tres objetivos (NS son P, NW son I y K y para NF el resto).

### 5.4.2.1 Ejemplo Didáctico del Sistema Relacional de Preferencias Difusas

Para este ejemplo se cuenta con una solución de un problema ficticio de **tres alternativas** y **cuatro objetivos** cada una como se muestra en la **Tabla 20**. En la **Tabla 21** se muestra los **grados de credibilidad** de  $x$  con  $y$ . Se trabajaran con  $\varepsilon = 0.4$ ,  $\beta = 0.6$  y  $\lambda = 0.8$ .

	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$
$a_1$	75	75	85	90
$a_2$	70	75	80	88
$a_3$	74	73	81	85

Tabla 20 Solución de un problema ficticio.

$\sigma(x, y)$		
0	0	0
0.88	0	0.94
0.8	0.55	0

Tabla 21 Grados de Credibilidad  $\sigma(x, y)$

**Paso 1:** Establecer relaciones de preferencias.

Como la primera relación de preferencia que validamos es la preferencia estricta y esta tiene el concepto de la dominancia (se dice que  $x$  domina a  $y$  si  $x$  es mejor o igual en todos los objetivos que  $y$  y  $x$  por lo menos es mejor en un objetivo que  $y$ ), en las **Tablas 22, 23 y 24** se muestran todas las posibles combinaciones de la dominancia.

$a_1$ domina a $a_2$ ?					
		$y$			
		$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$
$x$	$a_1$	75	75	85	90
	$a_2$	70	75	80	88

$a_1$ domina a $a_3$ ?					
		$y$			
		$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$
$x$	$a_1$	75	75	85	90
	$a_3$	74	73	81	85

	$\geq$	si	si	si	si
	$>$	si	no	si	si
<b><math>x</math> domina a <math>y</math></b>					

	$\geq$	si	si	si	si
	$>$	si	si	si	si
<b><math>x</math> domina a <math>y</math></b>					

Tabla 22 Dominancia de la alt1 con las demás.

<b><math>a_2</math> domina a <math>a_1</math>?</b>					
		<b>y</b>			
		<b>g1</b>	<b>g2</b>	<b>g3</b>	<b>g4</b>
<b>x</b>	$a_2$	70	75	80	88
	$a_1$	75	75	85	90
	$\geq$	no	si	no	no
	$>$	no	no	no	no
<b><math>x</math> no domina a <math>y</math></b>					

<b><math>a_2</math> domina a <math>a_3</math>?</b>					
		<b>y</b>			
		<b>g1</b>	<b>g2</b>	<b>g3</b>	<b>g4</b>
<b>x</b>	$a_2$	70	75	80	88
	$a_3$	74	73	81	85
	$\geq$	no	si	no	si
	$>$	no	si	no	si
<b><math>x</math> no domina a <math>y</math></b>					

Tabla 23 Dominancia de la alt2 con las demás.

<b><math>a_3</math> domina a <math>a_1</math>?</b>					
		<b>y</b>			
		<b>g1</b>	<b>g2</b>	<b>g3</b>	<b>g4</b>
<b>x</b>	$a_3$	74	73	81	85
	$a_1$	75	75	85	90
	$\geq$	no	no	no	no
	$>$	no	no	no	no
<b><math>x</math> no domina a <math>y</math></b>					

<b><math>a_3</math> domina a <math>a_2</math>?</b>					
		<b>y</b>			
		<b>g1</b>	<b>g2</b>	<b>g3</b>	<b>g4</b>
<b>x</b>	$a_3$	74	73	81	85
	$a_2$	70	75	80	88
	$\geq$	si	no	si	no
	$>$	si	no	si	no
<b><math>x</math> no domina a <math>y</math></b>					

Tabla 24 Dominancia de la alt3 con las demás.

### Relación de preferencia de la alt1 con alt2:

- **Preferencia Estricta:**  
§  $y$  es dominada por  $x$ . **SI**, por lo tanto, alt1Palt2.

### Relación de preferencia de la alt1 con alt3:

- **Preferencia Estricta:**  
§  $y$  es dominada por  $x$ . **SI**, por lo tanto, alt1Palt3.

### Relación de preferencia de la alt2 con alt1:

- **Preferencia Estricta:**  
§  $y$  es dominada por  $x$ . **NO**.  
§  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(y, x) < 0.5$ , entonces  $0.88 \geq 0.8$  y  $0.82 < 0.5$ . **NO**.  
§  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge (0.5 \leq \sigma(y, x) < \lambda) \wedge (\sigma(x, y) - \sigma(y, x)) \geq \beta$ , entonces  $0.88 \geq 0.8$  y  $(0.5 \leq 0.82 < 0.8)$  y  $(0.88 - 0.82) \geq 0.6$ . **NO**.
- **Indiferencia:**  
§  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(y, x) \geq \lambda$ , entonces  $0.88 \geq 0.8$  y  $0.82 \geq 0.8$ . **SI**.  
§  $|\sigma(x, y) - \sigma(y, x)| < \varepsilon$ , entonces  $|0.88 - 0.82| < 0.4$  **SI**, por lo tanto, alt2Ialt1.

### Relación de preferencia de la alt2 con alt3:

- **Preferencia Estricta:**  
§  $y$  es dominada por  $x$ . **NO**.  
§  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(y, x) < 0.5$ , entonces  $0.94 \geq 0.8$  y  $0.8 < 0.5$ . **NO**.  
§  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge (0.5 \leq \sigma(y, x) < \lambda) \wedge (\sigma(x, y) - \sigma(y, x)) \geq \beta$ , entonces  $0.94 \geq 0.8$  y  $(0.5 \leq 0.8 < 0.8)$  y  $(0.94 - 0.8) \geq 0.6$ . **NO**.
- **Indiferencia:**  
§  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(y, x) \geq \lambda$ , entonces  $0.94 \geq 0.8$  y  $0.8 \geq 0.8$ . **SI**.  
§  $|\sigma(x, y) - \sigma(y, x)| < \varepsilon$ , entonces  $|0.94 - 0.8| < 0.4$  **SI**, por lo tanto, alt2Ialt1.

### Relación de preferencia de la alt3 con alt1:

- **Preferencia Estricta:**  
§  $y$  es dominada por  $x$ . **NO**.  
§  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(y, x) < 0.5$ , entonces  $0.8 \geq 0.8$  y  $0 < 0.5$ . **SI**, por lo tanto, alt3Palt1.

**Relación de preferencia de la alt3 con alt2:**

- **Preferencia Estricta:**
  - §  $y$  es dominada por  $x$ . **NO.**
  - §  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(y, x) < 0.5$ , entonces  $0.51 \geq 0.8$  y  $0.1 < 0.5$ . **NO.**
  - §  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge (0.5 \leq \sigma(y, x) < \lambda) \wedge (\sigma(x, y) - \sigma(y, x)) \geq \beta$ , entonces  $0.51 \geq 0.8$  y  $(0.5 \leq 0.1 < 0.8)$  y  $(0.51 - 0.1) \geq 0.6$ . **NO.**
- **Indiferencia:**
  - §  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(y, x) \geq \lambda$ , entonces  $0.51 \geq 0.8$  y  $0.1 \geq 0.8$ . **NO.**
- **Preferencia Débil:**
  - §  $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(x, y) > \sigma(y, x)$ , entonces  $0.51 \geq 0.8$  y  $0.51 > 0.1$ . **NO.**
- **K-Preferencia:**
  - §  $0.5 < \sigma(x, y) < \lambda$ , entonces  $0.5 < 0.51 < 0.8$ . **SI.**
  - §  $\sigma(y, x) < 0.5$ , entonces  $0.1 < 0.5$ . **SI.**
  - §  $(\sigma(x, y) - \sigma(y, x)) \geq \varepsilon$ , entonces  $(0.51 - 0.1 \geq 0.4)$ . **SI**, por lo tanto, alt3Kalt2.

En la **Tabla 25** se muestra el concentrado de las relaciones de preferencia

	$a_1$	$a_2$	$a_3$
$a_1$		P	P
$a_2$	I		I
$a_3$	P	K	

Tabla 25 Relaciones de preferencias (concentrado).

**Paso 2:** Contar cuantas relaciones de preferencias se dieron en cada alternativa.

En la **Tabla 26** se muestran las relaciones de preferencia que se dieron por cada alternativa.

$a_1$						$a_2$						$a_3$					
P	I	Q	K	E	~	P	I	Q	K	E	~	P	I	Q	K	E	~
1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0

Tabla 26 Relaciones de preferencia por alternativa.

**Paso 3:** Clasificar en los tres objetivos (NS son P, NW son I y K y para NF el resto).

En la **Tabla 27** se muestran las clasificaciones de las alternativas en los tres objetivos.

$a_1$			$a_2$			$a_3$		
NS	NW	NF	NS	NW	NF	NS	NW	NF
1	1	0	1	1	0	1	1	0

Tabla 27 Clasificación de las alternativas en los tres objetivos.

### 5.4.3 Función de objetivo resultante

La función objetivo es representada por los tres frentes obtenidos en el modelo de optimización basado en el sistema relacional de sobre clasificación difusa ( $N_s, N_w, F_n$ , llamados: no superado estrictamente, no superado débilmente y flujo neto, respectivamente) los cuales se ordenarán mediante un ordenamiento lexicográfico de izquierda a derecha, donde  $N_s$  es mejor que  $N_w$ ,  $N_w$  es mejor que  $F_n$  y “0” es mejor que “1”. En la **Tabla 28** se muestra un ejemplo del ordenamiento lexicográfico en un problema ficticio con seis individuos en la población.

#Individuo	$N_s$	$N_w$	$F_n$
4	0	0	0
6	0	0	0
1	0	0	1
3	0	1	0
2	0	1	1
5	1	1	1

Tabla 28 Ordenamiento Lexicográfico.

## 5.5 Estrategia de solución (NOSGA-II)

En la **Figura 4** se muestra el algoritmo de NOSGA-II.

```

PROCEDURE NOSGA-II (L, Number_of_Generations)
Initialize Population P
Generate random population with size L
Evaluate objective values
Evaluate  $\sigma$  on  $P \times P$ 
For each  $x \in P$ , calculate card  $(S_0)_x$ 
Generate fronts of equal values of card  $(S_0)$ 
Assign to these fronts a rank (level) based on card  $(S_0)$ 
FOR each rank  $C_i$  DO
    for each  $x \in C_i$  calculate card  $(W_{C_i})_x$ , card  $(F_{C_i})_x$ ,  $\eta$ 
End FOR
Generate Child Population Q with size L
    Perform Binary Tournament Selection
    Perform Recombination and mutation
FOR I = 1 to Number_of_Generations DO
    Assign  $P' = P \cup Q$ 
    Evaluate  $\sigma$  on  $P' \times P'$ 
    FOR each parent and child in P' DO
        Calculate card  $(S_0)$ 
        Assign rank (level) based on card  $(S_0)$ 
        Calculate  $\eta$ 
        Loop (inside) by adding solutions to the
        next generation until L individuals have been found
    End FOR
    Replace P by the L individuals found
    Generate Child Population Q with size L
        Perform Binary Tournament Selection
        Perform Recombination and mutation
    End FOR
End FOR
End PROCEDURE

```

Figura 4 Algoritmo del NOSGA-II (Fernandez, Lopez, Lopez, & Coello Coello, 2011).

Por el motivo de resaltar los elementos principales del algoritmo del NOSGA-II se compactará el siguiente segmento del algoritmo y será renombrado por **Function of Rank**:

```

Evaluate  $\sigma$  on  $P \times P$ 
For each  $x \in P$ , calculate card  $(S_0)_x$ 
Generate fronts of equal values of card  $(S_0)$ 
Assign to these fronts a rank (level) based on card  $(S_0)$ 
FOR each rank  $C_i$  DO
    For each  $x \in C_i$  calculate card  $(W_{C_i})_x$ , card  $(F_{C_i})_x$ ,  $\eta$ 
End FOR

```

Entonces, el algoritmo resultante se mostrará a continuación en donde los pasos subrayados representan los elementos básicos del algoritmo, los cuales posteriormente se describirán y se darán ejemplos.

*PROCEDURE NOSGA-II (L, Number\_of\_Generations)*

*Generate random Population P with size L*

*Evaluate objective values*

*Function of Rank*

*Generate Child Population Q with size L*

*Perform Binary Tournament Selection*

*Perform Recombination and mutation*

*FOR I = 1 to Number\_of\_Generations DO*

*Assign  $P' = P \cup Q$*

*Function of Rank*

*Replace P by the L individuals found*

*Generate Child Population Q with size L*

*Perform Binary Tournament Selection*

*Perform Recombination and mutation*

*End FOR*

*End PROCEDURE*

En la **Tabla 29** se muestra configuración de los parámetros utilizada en este trabajo.

Número de corridas para cada instancia.	De 1 a 2 dependiendo de los resultados obtenidos.
Número de generaciones	100
Tamaño de población	100
Porcentaje de cruza	80
Porcentaje de muta	20
lambda	Primera corrida 0.70; Segunda corrida depende del resultado del PDA.
beta	Primera corrida 0.11; Segunda corrida depende del resultado del PDA.
Épsilon	Primera corrida 0.09; Segunda corrida depende del resultado del PDA.
Peso (w)	Para los tres objetivos del problema original se le asigna el 90% de uno, el resultado se dividió entre tres ( $\frac{0.9}{3} = 0.3$ ). Para el resto se le asigna el 10% de uno, el resultado se dividió entre el número de objetivos nuevos (18) de la transformación de restricciones a objetivos ( $\frac{0.1}{18} = 0.0055$ ).

Indiferencia (q)	El valor de preferencia entre dos para todos los objetivos (21).
Preferencia (p)	El valor de veto entre dos para todos los objetivos (21).
Veto (v)	Para los tres objetivos del problema original se le asigna el número de grupos, el número de profesores y el número de aulas entre dos (los valores de este parámetro depende de la instancia).

Tabla 29 Configuración de parámetros del NOSGA-II.

### 5.5.1.1 Función de inicialización de la población

El algoritmo para la construcción de la función de inicialización de la población es el siguiente:

1. Repetir hasta que se obtengan los  $l$  individuos de la población.
  - 1.1. Para cada elemento de las columnas asignar un número aleatorio en el rango aceptable para cada columna.

En la **Tabla 30** se muestra un ejemplo de cómo sería una población generada aleatoriamente, los valores válidos para la columna aula van de **[0, 5]**, columna profesor van de **[0, 10]**, columna materia van de **[0, 24]**, columna hora van de **[0, 12]**, columna día van de **[0, 4]**.

#	Aula	Profesor	Materia	Hora	Día
1	4	2	24	0	3
2	0	8	15	11	4
3	2	10	7	12	2
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
n	5	4	22	6	1

Tabla 30 Población generada aleatoriamente.

### 5.5.1.2 Selección mediante torneo binario

Según Coello (2016) el algoritmo para la construcción de la selección mediante torneo binario es el siguiente:

1. Calcular la aptitud.
2. Barajar los individuos de la población.
3. Escoger un número  $p$  de individuos (típicamente 2).
4. Compararlos con base en su aptitud.
5. El ganador del “torneo” es el individuo más apto.
6. Debe barajarse la población un total de  $p$  veces para seleccionar  $N$  padres (donde  $N$  es el tamaño de la población).

En la **Tabla 31** se muestra un ejemplo de la selección de padres mediante torneo binario, donde en la primera barajada el resultado de los padres fueron 6, 3 y 4. En la segunda barajada el resultado de los padres fueron 1, 6 y 3.

Orden	Aptitud	Barajar (1)	Ganadores(1)	Barajar (2)	Ganadores(2)
1	254	2	6	4	1
2	47	6		1	
3	457	1	3	6	6
4	194	3		5	
5	85	5	4	2	3
6	310	4		3	

Tabla 31 Selección de padres mediante torneo binario Coello (2016).

### 5.5.1.3 Operador genético de cruce de un punto

Según Coello (2016) el algoritmo para la construcción de la cruce de un punto es el siguiente:

1. El padre 1 y el padre 2 serán divididos por la mitad formando dos partes (**parte izquierda = A; parte derecha = B**).
2. El primer hijo será formado por la parte **A** del padre 1 y la parte **B** del padre 2.
3. El segundo hijo será formado por la parte **B** del padre 1 y la parte **A** del padre 2.

En la **Tabla 32** se muestra un ejemplo de la cruce de un punto, en donde el padre 1 y el padre 2 son divididos por la mitad (filas) y en la parte de abajo se presentan los hijos. Los números con letras normales en el padre 1 y padre 2 representan que esas partes deben de unirse para generar el hijo 1, lo mismo para con la parte que esta con letras en negritas del padre 1 y padre 2, los cuales al unirse generan el hijo 2.

Padre 1					Padre 2				
4	2	24	0	3	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>4</b>
0	8	15	11	4	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>12</b>	<b>2</b>	2	6	10	10	2
<b>5</b>	<b>4</b>	<b>22</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	3	7	11	9	1

Hijo 1					Hijo 2				
4	2	24	0	3	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>12</b>	<b>2</b>
0	8	15	11	4	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>22</b>	<b>6</b>	<b>1</b>
2	6	10	10	2	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>4</b>
3	7	11	9	1	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>3</b>

Tabla 32 Ejemplo de la cruce de un punto.

#### 5.5.1.4 Operador genético de mutación mediante cambio de valor

El algoritmo para la construcción de la mutación mediante cambio de valor es el siguiente:

1. Se escoge una celda aleatoriamente y se le cambia el valor por otro valor valido.

En la **Tabla 33** se muestra un ejemplo de la mutación mediante cambio de valor en donde la celda con el número en negrito es la celda seleccionada aleatoriamente, la cual contiene el valor **10**, después se cambia este valor por otro valor valido (**[0, 24]**), en este caso el valor de **7**.

Antes de la mutación					Después de la mutación				
Hijo 1					Hijo 1				
4	2	24	0	3	4	2	24	0	3
0	8	15	11	4	0	8	15	11	4
2	6	<b>10</b>	10	2	2	6	<b>7</b>	10	2
3	7	11	9	1	3	7	11	9	1

Tabla 33 Ejemplo de la mutación mediante cambio de valor.

## 5.6 Retroalimentación a través del PDA

En la **Figura 5** se muestra el modelo de interacción que incorpora preferencias de manera dinámica.

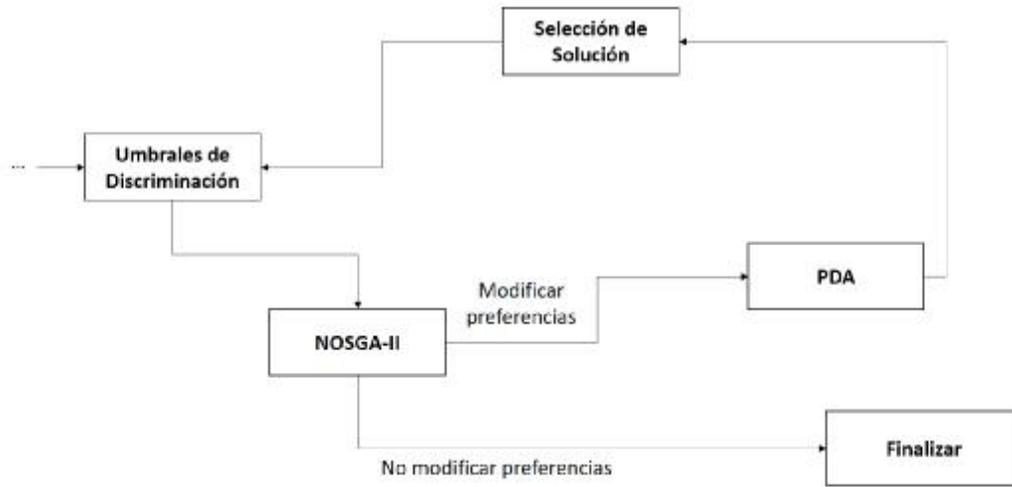


Figura 5 Modelo de Interacción que incorpora preferencias de manera dinámica.

En donde, el módulo de **Umbrales de Discriminación** contiene los umbrales necesarios para operar con los métodos ELECTRE y el sistema relacional de preferencias difusas tales como: peso, indiferencia, preferencias y veto, los cuales son proporcionados de manera directa por el tomador de decisiones. Estos umbrales de discriminación son pasados al módulo de **NOSGA-II** que es el encargado de encontrar soluciones al problema de programación de horarios universitarios dando como salida un conjunto de soluciones, las cuales serán mostradas al tomador de decisión. Después de que el tomador de decisiones analice las soluciones podrá optar por dos opciones: a) Modificar sus preferencias; b) Seleccionar la solución que más se ajustó a sus preferencias y finalizar el proceso. Si el tomador de decisiones opta por modificar sus preferencias lo podrá llevar a cabo a través del módulo **PDA** el cual es un algoritmo evolutivo que recibe un conjunto de soluciones (en este caso el conjunto de soluciones que proporciona el NOSGA-II) las cuales serán tratadas bajo un procedimiento que da como resultado un conjunto de parámetros ajustados. Por último, se encuentra el módulo **Selección de Solución**, el cual nos permite seleccionar una solución de manera aleatoria del conjunto de soluciones proporcionadas por el PDA, la cual fungirá como nuevo parámetro, los cuales serán proporcionados al NOSGA-II a través de los umbrales de discriminación y así sucesivamente hasta que el tomador de decisiones opte por una solución que se ajuste más a sus preferencias.

### 5.6.1 Descripción de la instancia del PDA

A continuación, se describirá la instancia, la cual consta de cuatro conjuntos de datos:

El primer conjunto de datos consta de tres valores: a) El primer valor indica el número de umbrales de discriminación (peso, preferencia, indiferencia, preveto y veto) por el número de objetivos + los parámetros de simetría y asimetría (lambda, beta y épsilon), en este caso sería  $5 * 10 + 3 = 53$ ; b) El segundo valor indica el número total de soluciones que deben clasificarse, en este caso **42** soluciones; c) El tercer valor indica el número de objetivos, en este caso **10**, véase la **Tabla 34**.

53	42	10
----	----	----

Tabla 34 Primer conjunto de datos de la instancia.

El segundo conjunto de datos representa los valores iniciales de los parámetros que reflejan las preferencias del tomador de decisiones, donde las filas representan los umbrales de discriminación y las columnas los objetivos, véase la **Tabla 35**. Por ejemplo, el número máximo de aulas = 100 y se quiere minimizar, entonces podemos tomar la media = 50 como inicial de ese objetivo, y así sucesivamente con los demás. Los objetivos originales del problema son los que se asocian al tomador de decisiones, los cuales se estiman en función del significado del mismo y una vez que se tiene la primera corrida del PDA estos valores se aproximan a la media de los extremos en el conjunto de preferencia. Por otro lado, los objetivos que vienen de las restricciones tendrán valores de *veto* = **1**, *preveto* = **0.75**, *preferencia* = **0.5**, *indiferencia* = **0.25** y el *peso* = **10%/Numero de restricciones, por cada objetivo – restricción**.

0.158241	0.122784	0.121926	0.106415	0.099540	0.087940	0.080033	0.079772	0.072849	0.070500
0.133327	0.129723	0.169720	0.189476	0.179208	0.164896	0.189170	0.126378	0.115945	0.156673
0.691130	0.580365	0.665190	0.908130	0.799969	0.524251	0.559609	0.869967	0.733936	0.552815
1.652625	1.203958	1.788390	1.683834	2.117255	1.665013	1.773767	1.877061	1.489507	1.473885
2.836201	1.701124	2.690138	2.500793	3.506922	2.702862	3.172883	2.691025	2.383210	2.338266

Tabla 35 Segundo conjunto de datos de la instancia.

La **Tabla 36** muestra el tercer conjunto de datos, el cual consta de tres valores: a) La primera columna representa el valor de lambda; b) La segunda columna representa el valor de beta; c) La tercera columna representa el valor de épsilon.

0.510000	0.150000	0.070000
----------	----------	----------

Tabla 36 Tercer conjunto de datos de la instancia.

Por último, en la **Tabla 37** se muestra el listado de cada solución, donde las filas es igual al número total de soluciones (42) y las columnas el número de objetivos (10) + una columna extra que representa el grupo en el que dicha solución es clasificada por el tomador de decisiones (“0” indica que es una buena solución, “1” indica que la solución es regular y “2” indica que la solución es mala).

4.434400	1.271678	1.756379	2.588704	2.378752	4.015082	6.620101	4.944908	2.703062	2.783438	0
2.294692	8.734265	2.918479	1.093151	8.507867	8.627884	3.409769	8.130308	5.569647	3.011335	1
6.427076	8.889423	9.848408	7.587395	3.387592	9.078329	9.613897	4.326931	3.021512	9.452583	2
3.672676	9.061369	4.521835	6.161372	4.076538	7.543837	9.834284	9.024426	3.121978	9.355945	0
7.810041	8.828235	7.012981	1.506622	7.015998	7.050928	9.625778	9.539169	7.022583	2.059093	1
2.523109	4.867681	3.188742	3.237006	3.091233	2.566970	4.734968	7.526427	1.631495	3.182208	0
4.574950	1.732767	4.726626	7.850252	2.086553	9.100225	2.415934	6.128983	3.736311	2.539098	0
2.959360	5.772475	1.615838	8.048657	5.479304	4.707034	2.379837	5.969148	3.167939	6.237038	0
6.175990	1.410373	7.326195	9.767504	1.523815	2.406201	9.605283	5.124295	6.086011	3.713153	0

9.308887	9.251973	7.032639	4.553562	7.557447	2.748534	9.758494	8.020854	5.226146	8.116323	0
8.079179	7.478848	7.436795	9.789888	4.816829	1.006723	5.879979	7.286125	4.222066	7.120622	0
9.700247	5.172286	6.139986	1.059328	4.235779	2.207366	2.261527	8.621805	7.530643	3.450259	0
5.779226	5.692292	9.128592	7.664155	8.560305	7.452831	3.904407	9.789084	8.900228	1.553656	0
9.592127	7.603104	6.026318	1.188622	5.229058	1.947529	5.783714	1.105841	4.950288	4.052747	0
4.354894	1.072980	6.440508	3.568510	9.439182	5.212161	8.878239	3.876268	7.050122	1.921168	0
7.392165	3.140960	7.976260	8.805676	9.890056	9.345823	1.994855	6.161475	3.617879	6.246176	0
7.128227	7.066161	7.959971	8.776735	3.588874	2.066536	4.800753	6.951939	7.572222	6.780968	0
6.234264	1.709857	5.724776	5.475190	1.529869	8.467675	6.940679	4.815581	1.040822	5.380355	1
4.121089	6.555663	1.176933	9.423950	1.668515	5.869620	6.653390	9.461227	5.782166	7.410849	1
3.974897	9.389568	2.070601	9.944097	9.517562	1.319815	8.604369	5.576478	8.630575	8.489569	1
8.949693	7.899391	9.094416	4.858196	9.586487	9.917425	8.073138	9.838690	5.838010	1.706655	1
6.656100	2.006873	7.766472	9.216887	5.257233	7.194126	6.417462	7.422320	9.225740	5.608267	1
7.248546	8.521455	4.551647	7.889019	9.397806	8.277235	5.948419	4.198857	3.661642	7.884059	1
4.932963	4.114704	9.106089	6.688538	8.985102	8.122143	7.449150	4.515875	7.441023	1.508672	1
9.320328	2.691307	2.304506	9.840975	2.250129	8.201175	8.082539	4.345038	5.599709	5.528525	1
6.315584	9.034554	4.800709	6.448888	2.820945	9.907610	6.510319	3.510494	6.504843	2.669166	1
4.854227	5.214363	8.359561	7.919904	8.595128	6.656097	9.270298	2.620558	3.183403	2.218552	1
9.331937	4.617751	5.371258	7.252556	6.628332	7.253752	2.598209	7.561205	9.722218	7.562298	1
6.539570	4.681766	7.428353	6.687758	8.088832	9.953522	9.576125	1.100975	8.000134	2.213137	1
9.108062	1.022947	5.364878	3.047709	7.221036	9.468608	6.081157	8.829624	5.546099	7.646229	2
6.340428	6.042457	2.698157	3.893175	7.070752	2.505082	9.021185	8.351497	9.433088	6.260169	2
4.897896	3.914854	4.566908	9.996324	3.056737	8.866528	8.373592	4.347989	6.424667	7.149187	2
6.503318	3.411900	7.600994	1.709057	3.511182	5.819750	9.350028	5.333074	4.279294	8.379339	2
3.198061	6.370391	6.245476	1.408569	3.150768	5.359636	5.571631	4.164857	8.707840	8.365817	2
8.867689	7.809916	4.777471	4.675569	9.231509	9.258838	6.458465	8.689148	7.664793	7.453589	2
9.499428	9.607356	2.623876	7.608028	8.276836	6.812427	9.594322	4.061057	4.801233	1.930240	2
9.144334	7.958220	1.155817	5.248322	3.240436	8.532415	4.364193	7.249223	8.289391	3.867934	2
2.997666	3.700625	5.977179	7.707544	4.660070	4.518297	9.555244	4.597487	9.405528	4.417527	2
9.612387	8.805766	9.986359	9.566945	8.220440	7.461844	3.071682	7.808966	3.908154	5.492486	2

2.421765	9.214456	6.263131	9.708567	1.666604	7.950803	5.798846	8.351615	5.283150	1.515087	2
1.777334	7.501857	8.471998	6.060755	5.237709	6.004412	8.897089	8.629236	4.696468	3.731408	2
7.100571	4.974296	5.960971	9.673218	7.041817	4.349766	9.030762	4.503991	7.918255	5.817635	2

*Tabla 37 Cuarto conjunto de datos de la instancia.*

## Capítulo 6. Validación Experimental.

Este capítulo tiene como finalidad dar a conocer los resultados obtenidos a través de los experimentos realizados. El diseño experimental que se implementó consta de tres experimentos donde se validaban la funcionalidad del sistema completo, su objetividad al mejorar el ajuste de preferencias a través de la interacción con el TD, y su viabilidad para resolver instancias reales provenientes de la literatura, respectivamente. Cada uno de estos experimentos se detallan a lo largo de este capítulo.

### 6.1 Experimento 1: Funcionalidad del Sistema de Solución a PPHU

La Propuesta de Solución presentada en el Capítulo 5 fue validada en relación a su funcionalidad en este experimento. Para llevar a cabo esta tarea la instancia descrita en el Capítulo 5.6 fue resuelta por la implementación hecha del Sistema de Solución para PPHU. Dado que la metodología de solución implementada aborda la interacción con el decisor, para probar que de manera efectiva un TD puede introducir retroalimentación y el sistema considerarla para actualizar los valores de los umbrales que guían al modelo de preferencias, éste experimento implementó un proceso de 5 iteraciones de uso del sistema.

Para evaluar la funcionalidad, durante cada iteración del proceso de solución, el sistema construía un conjunto de soluciones (haciendo uso del modelo de preferencias válido en dicha iteración). Al finalizar, reportaba las 10 mejores soluciones al TD (tomadas en orden de importancia lexicográfica obtenida de acuerdo a los objetivos derivados del modelo tri-objetivo empleado), los empates eran eliminados de manera arbitraria. Posteriormente, se simuló la interacción del TD a través de un TD artificial, quien se encargaba de clasificar las soluciones presentadas en *MUY BUENAS*, *BUENAS*, o *REGULARES*. Finalmente, el conjunto de soluciones ya clasificado se integraba al conjunto de referencia que tomaba de entrada el PDA para actualizar los valores de los parámetros del modelo de preferencia, considerando nuevos detalles de las preferencias dadas por el TD en cada iteración. Cabe mencionar que el TD artificial fue implementado haciendo uso de un generador de números aleatorios que asignaba los valores 0, 1 o 2 a cada solución para indicar que era MUY BUENA, BUENA o REGULAR, respectivamente.

Para el desarrollo del experimento se requieren las siguientes condiciones iniciales: 1) la instancia, la cual fue tomada de un caso real y cuyos detalles se proveen en la Sección 5.6; y 2) Los valores iniciales de los umbrales para cada objetivo del problema, los usados en este experimento son provistos en la **Tabla 38**.

En la **Tabla 38** se muestran los valores iniciales requeridos por el modelo de preferencia. El primer conjunto de datos consta de tres valores: a) El primer valor indica el número de umbrales requeridos, que incluye los umbrales de discriminación de cada objetivo y los

parámetros de simetría y asimetría; b) El segundo valor indica el tamaño del conjunto de referencia, es decir el número total de soluciones clasificadas, que cuando no existe conjunto de referencia inicial éste es de 0; c) El tercer valor indica el número de objetivos. El segundo conjunto de datos representa los valores iniciales de los parámetros que reflejan las preferencias del tomador de decisiones en el modelo empleado (es decir, el Método ELECTRE III). Por último, el tercer conjunto de datos, el cual consta de tres valores: a) La primera columna representa el valor de  $I$ ; b) La segunda columna representa el valor de  $b$ ; c) La tercera columna representa el valor de  $e$ .

Los subcapítulos 6.1.1 a 6.1.5 muestran el progreso de las soluciones obtenidas en cada una de las iteraciones. Cada subcapítulo provee dos tablas, la primera tabla se emplea para mostrar el conjunto de las 10 mejores soluciones obtenidas, y la clasificación otorgada por el TD artificial; esta tabla tiene 22 columnas, las tres primeras presentan los valores obtenidos para los objetivos originales del problema que eran minimizar los tiempos inactivos de estudiantes, profesores, y aulas, las siguientes 18 columnas presentan los valores obtenidos por las restricciones del problema transformadas en objetivos, la última columna contiene la clasificación dada por el TD en valor numérico. La segunda tabla provee los nuevos valores de los umbrales obtenidos a partir del PDA al usar el nuevo conjunto de referencia que se mejora a través de la integración paulatina de las nuevas soluciones generadas y clasificadas. Se observa en el proceso iterativo un cambio en los valores de los umbrales, y se ilustra la mejora en el desempeño al ir incrementado el número de soluciones *BUENAS* y *MUY BUENAS*, como se observa entre las iteraciones 5 y 1. Con esto queda demostrada la funcionalidad del sistema, el siguiente experimento tiene como objetivo demostrar su validez en una serie de casos reales, al resolver la instancia del Capítulo 5.6.

108	10	21																			
0.3 000	0.3 000	0.3 000	0.0 056																		
1.0 000	1.0 000	1.0 000	0.2 500																		
2.0 000	2.0 000	2.0 000	0.5 000																		
0.7 000																					
4.0 000	5.0 000	3.0 000	1.0 000																		
.66	.15	.7																			

Tabla 38 Valores Iniciales.

### 6.1.1 Iteración 1

En la **Tabla 39** se muestra los resultados de la primera iteración del NOSGA-II y en la **Tabla 40** se muestra los resultados obtenidos de la primera iteración del PDA.

224	218	138	174	96	31	19	60	191	0	0	0	142	28	186	0	0	177	0	52	0	1
200	197	127	178	98	37	21	61	191	0	0	0	142	31	186	0	0	178	0	58	0	2
185	201	137	172	96	31	32	56	191	0	0	0	142	30	192	0	0	176	0	61	0	1
230	214	156	177	64	37	25	56	188	0	0	0	142	29	182	0	0	179	0	64	0	2
202	200	135	175	72	29	18	64	186	0	0	0	142	15	172	0	0	169	0	52	0	1
216	238	149	179	78	33	24	57	188	0	0	0	142	29	178	0	0	177	0	62	0	1
163	91	123	169	124	81	66	56	188	0	0	0	142	50	212	0	0	177	0	104	0	2
177	89	132	170	128	85	68	53	190	0	0	0	142	51	224	0	0	180	0	103	0	2
153	74	127	182	94	85	68	60	191	0	0	0	142	38	172	0	0	175	0	103	0	0
161	66	137	169	132	84	72	55	190	0	0	0	142	51	220	0	0	177	0	115	0	

Tabla 39 Resultado NOSGA-II primera iteración.

0.35	0.34	0.22	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.96	1.24	0.81	0.28	0.22	0.24	0.21	0.20	0.26	0.31	0.30	0.24	0.30	0.30	0.24	0.31	0.21	0.26	0.25	0.24	0.22
1.40	1.40	1.40	0.40	0.60	0.62	0.39	0.56	0.63	0.51	0.58	0.41	0.50	0.53	0.62	0.50	0.41	0.38	0.39	0.43	0.40
0.91	0.91	0.91	0.88	0.71	0.70	0.64	0.73	0.69	0.82	0.80	0.64	0.74	0.74	0.86	0.80	0.80	0.75	0.74	0.88	0.73
2.80	3.50	2.10	1.24	0.83	0.78	0.95	0.97	0.72	1.09	1.10	0.96	0.87	0.96	1.16	1.09	1.23	1.00	1.09	1.20	1.03
0.86	0.11	0.07																		

Tabla 40 Resultado PDA primera iteración.

## 6.1.2 Iteración 2

En la **Tabla 41** se muestra los resultados de la segunda iteración del NOSGA-II y en la **Tabla 42** se muestra los resultados obtenidos de la segunda iteración del PDA.

204	204	151	186	84	35	24	66	195	0	0	0	142	13	190	0	0	183	0	54	0	2
217	241	160	181	72	27	24	64	177	0	0	0	142	18	176	0	0	166	0	54	0	1
184	229	137	186	74	30	26	58	186	0	0	0	142	28	188	0	0	178	0	64	0	2
187	194	135	190	62	33	26	62	191	0	0	0	142	26	182	0	0	183	0	61	0	1
250	216	153	184	72	31	30	62	185	0	0	0	142	24	164	0	0	168	0	63	0	0
214	212	153	182	76	32	25	60	183	0	0	0	142	20	172	0	0	167	0	55	0	1
203	227	151	184	88	24	23	67	186	0	0	0	142	19	170	0	0	171	0	49	0	1
240	221	150	182	76	39	25	65	192	0	0	0	142	24	176	0	0	177	0	61	0	1
201	205	127	179	80	29	30	62	190	0	0	0	142	26	184	0	0	180	0	60	0	1
238	225	149	183	72	31	25	63	187	0	0	0	142	30	166	0	0	172	0	63	0	2

Tabla 41 Resultado NOSGA-II segunda iteración.

0.38	0.29	0.23	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

0.87	1.23	0.78	0.24	0.29	0.23	0.18	0.31	0.26	0.18	0.18	0.29	0.26	0.32	0.22	0.24	0.30	0.30	0.29	0.18	0.21
1.40	1.40	1.40	0.59	0.47	0.57	0.47	0.54	0.37	0.36	0.38	0.47	0.38	0.44	0.39	0.59	0.35	0.48	0.55	0.44	0.57
0.91	0.91	0.91	0.67	0.78	0.66	0.73	0.75	0.83	0.57	0.64	0.86	0.65	0.78	0.72	0.75	0.84	0.82	0.77	0.79	0.72
2.80	3.50	2.10	0.75	1.03	0.82	1.02	1.11	1.20	0.71	0.95	1.09	1.02	1.15	1.14	0.82	1.23	1.29	1.01	1.07	0.84
0.70	0.18	0.09																		

Tabla 42 Resultado PDA segunda iteración.

### 6.1.3 Iteración 3

En la **Tabla 43** se muestra los resultados de la tercera iteración del NOSGA-II y en la **Tabla 44** se muestra los resultados obtenidos de la tercera iteración del PDA.

211	196	132	188	68	29	31	63	180	0	0	0	142	27	164	0	0	167	0	57	0	2
160	67	134	191	96	91	77	59	183	0	0	0	142	45	192	0	0	172	0	117	0	1
234	194	147	190	58	32	30	60	182	0	0	0	142	25	162	0	0	171	0	60	0	1
213	232	161	192	64	31	20	65	183	0	0	0	142	24	174	0	0	170	0	54	0	1
218	245	125	182	72	32	23	66	178	0	0	0	142	23	168	0	0	165	0	51	0	0
234	205	152	185	58	32	29	56	179	0	0	0	142	29	168	0	0	165	0	66	0	2
160	43	118	184	88	82	64	60	181	0	0	0	142	49	180	0	0	167	0	104	0	0
214	192	125	189	68	28	30	61	177	0	0	0	142	27	170	0	0	165	0	56	0	0
190	195	141	188	90	33	27	63	182	0	0	0	142	25	190	0	0	172	0	58	0	0
217	201	137	187	56	28	31	60	187	0	1	0	142	31	172	0	0	172	0	71	0	1

Tabla 43 Resultado NOSGA-II tercera iteración.

0.33	0.32	0.25	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
1.29	1.29	0.93	0.27	0.26	0.25	0.19	0.23	0.22	0.26	0.22	0.23	0.22	0.25	0.30	0.23	0.27	0.24	0.21	0.22	0.32	
1.40	1.40	1.40	0.59	0.46	0.48	0.57	0.38	0.65	0.40	0.54	0.41	0.45	0.50	0.54	0.58	0.62	0.47	0.41	0.39	0.57	
0.91	0.91	0.91	0.86	0.64	0.84	0.77	0.74	0.78	0.70	0.85	0.58	0.76	0.75	0.76	0.86	0.76	0.72	0.68	0.75	0.75	
2.80	3.50	2.10	1.22	0.85	1.16	1.02	1.12	0.98	1.00	1.23	0.71	0.98	0.97	0.99	1.06	0.91	1.03	1.05	1.14	1.01	
0.78	0.14	0.08																			

Tabla 44 Resultado PDA tercera iteración.

### 6.1.4 Iteración 4

En la **Tabla 45** se muestra los resultados de la cuarta iteración del NOSGA-II y en la **Tabla 46** se muestra los resultados obtenidos de la cuarta iteración del PDA.

224	264	167	184	66	35	20	58	185	0	0	0	142	26	168	0	0	178	0	60	0	1
220	255	159	187	60	35	25	63	185	0	0	0	142	20	166	0	0	181	0	59	0	2
193	230	140	184	76	32	21	64	186	0	0	0	142	21	164	0	0	173	0	52	0	0
184	206	125	196	92	36	23	57	184	0	0	0	142	28	206	0	0	173	0	56	0	1
209	207	140	192	78	34	21	60	195	0	0	0	142	26	192	0	0	181	0	62	0	1
195	226	133	190	66	33	25	62	186	0	0	0	142	24	176	0	0	178	0	53	0	0
209	218	134	192	92	24	18	64	189	0	0	0	142	21	194	0	0	173	0	43	0	1
208	203	130	186	82	32	22	64	197	0	0	0	142	22	192	0	0	181	0	53	0	2
225	256	166	184	58	35	21	60	187	0	0	0	142	23	162	0	0	180	0	61	0	0
221	206	133	193	76	35	25	65	187	0	0	0	142	18	174	0	0	178	0	50	0	1

Tabla 45 Resultado NOSGA-II cuarta iteración.

0.36	0.27	0.27	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.91	1.08	1.03	0.30	0.31	0.22	0.28	0.30	0.23	0.27	0.18	0.22	0.26	0.29	0.31	0.29	0.32	0.22	0.23	0.21	0.22
1.40	1.40	1.40	0.40	0.41	0.54	0.43	0.50	0.52	0.51	0.52	0.47	0.61	0.44	0.39	0.55	0.44	0.49	0.45	0.55	0.46
0.91	0.91	0.91	0.66	0.62	0.67	0.75	0.72	0.76	0.72	0.59	0.90	0.88	0.60	0.66	0.74	0.70	0.71	0.63	0.87	0.84
2.80	3.50	2.10	0.86	0.86	0.87	1.05	0.89	0.89	1.02	0.73	1.30	1.20	0.76	0.86	0.87	1.00	0.90	0.89	1.03	1.24
0.70	0.11	0.09																		

Tabla 46 Resultado PDA cuarta iteración.

### 6.1.5 Iteración 5

En la **Tabla 47** se muestra los resultados de la quinta iteración del NOSGA-II y en la **Tabla 48** se muestra los resultados obtenidos de la quinta iteración del PDA.

191	213	134	176	82	35	26	61	190	0	0	0	142	25	170	0	0	179	0	56	0	1
185	201	122	175	76	38	26	59	189	0	0	0	142	31	174	0	0	175	0	59	0	1
186	206	135	176	78	37	26	59	186	0	0	0	142	28	178	0	0	172	0	55	0	2
184	232	140	184	86	37	15	59	189	0	0	0	142	27	168	0	0	179	0	57	0	0
202	234	168	184	92	37	21	60	192	0	0	0	142	29	196	0	0	172	0	60	0	0
195	213	141	178	98	24	25	61	191	0	0	0	142	24	186	0	0	172	0	59	0	2
206	185	133	177	84	33	25	65	187	0	0	0	142	21	174	0	0	180	0	57	0	0
203	224	139	177	88	33	21	63	185	0	0	0	142	23	184	0	0	179	0	57	0	1
184	227	135	177	82	35	26	60	188	0	0	0	142	30	168	0	0	178	0	54	0	2
195	236	145	184	90	43	17	58	191	0	0	0	142	27	176	0	0	180	0	63	0	0

Tabla 47 Resultado NOSGA-II quinta iteración.

0.34	0.29	0.28	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.81	1.12	0.92	0.18	0.24	0.27	0.30	0.21	0.26	0.19	0.25	0.25	0.32	0.30	0.24	0.23	0.28	0.31	0.27	0.18	0.20
1.40	1.40	1.40	0.56	0.46	0.58	0.61	0.50	0.61	0.55	0.53	0.64	0.64	0.42	0.45	0.58	0.59	0.41	0.36	0.52	0.52
0.91	0.91	0.91	0.84	0.74	0.70	0.69	0.80	0.79	0.74	0.62	0.87	0.72	0.72	0.64	0.71	0.69	0.78	0.65	0.73	0.67
2.80	3.50	2.10	1.07	0.98	0.88	0.85	1.16	0.99	0.98	0.71	1.15	0.87	1.14	0.88	0.73	0.89	1.05	1.03	1.00	0.82
0.58	0.18	0.06																		

Tabla 48 Resultado PDA quinta iteración.

## 6.2 Experimento 2: Validación del Desempeño del Sistema en la Interacción

Una vez demostrada la funcionalidad del sistema, se procedió a desarrollar el segundo experimento con el objetivo de probar la validez de su desempeño en cuanto a la mejora paulatina de las soluciones construidas a través de la interacción con el decisor. Para llevar a cabo este propósito, el diseño experimental planteó la evaluación de diversas instancias del PPHU en función de la mejora en la calidad de la solución obtenida. Los elementos involucrados fueron: 1) 10 instancias derivadas del caso de estudio analizado (instancia del capítulo 5.6); 2) un TD real que interactuó con el sistema web; 3) una métrica de desempeño que indique mejoría en la calidad de la solución en función de las preferencias del TD.

El subcapítulo 6.2.1 describe las instancias particulares empleadas. El subcapítulo 6.2.2 presenta el módulo del Sistema Web usado para la interacción con el TD, y la información recibida de éste para retroalimentar el modelo de preferencias. El subcapítulo 6.2.3 muestra los resultados obtenidos al emplear la propuesta de solución en las instancias definidas. El subcapítulo 6.2.4 presenta el análisis de los resultados.

### 6.2.1 Instancias derivadas del caso de estudio

El caso de estudio corresponde a la instancia definida en la sección 5.6 (y presentada con detalle en el Anexo A). Para evaluar el desempeño de la propuesta en cuanto a la mejora en la calidad de solución a través de la interacción el caso de estudio fue dividido en 10 instancias, 1 de ellas correspondiente a la instancia completa con todos los grupos, y 9 definidas a partir de la división de la instancia original en instancias más pequeñas obtenidas en función de grupos particulares correspondientes al periodo lectivos. Detalles básicos de las instancias se muestran en la **Tabla 49**. Cabe mencionar que los objetivos originales se mantienen para cada instancia.

Información	I01	I02	I03	I04	I05	I06	I07	I08	I09	I10
Núm. de Aulas	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Núm. de Grupos	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Núm. de Materias	25	2	1	2	2	6	7	7	7	7
Núm. de Profesores	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Núm. de días	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Núm. de Horas/Día	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Núm. de Materias a Impartir	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
Máx. Sesiones continuas por profesor	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Máx. Sesiones continuas por materia	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Máx. asignaturas por profesor	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Máx. Asignaturas por profesor por grupo	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

*Tabla 49 Detalles de las instancias para evaluar la Propuesta de Solución.*

La nomenclatura *I01*, ..., *I10* se utiliza para simplificar los nombres reales de las instancias que se muestran en la **Tabla 50**.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Instancia</b>
I01	Instancia Completa del Capítulo 5.6
I02	ITI-G6-IRREG
I03	ITI-G7-IRREG
I04	ITI-G8-01
I05	ITI-G8-02
I06	ITI-G8-03
I07	ITI-G9-01
I08	ITI-G9-02
I09	ITI-G10-01
I10	ITI-G10-02

*Tabla 50 Nomenclatura de las instancias.*

## 6.2.2 Módulo de Interacción con el TD

Para poder validar el desempeño de la integración dinámica de preferencias se incorporó un módulo de interacción. La **Figura 6** muestra la apariencia genérica del sistema, y todos los módulos de captura que posee, tanto para introducir información como para generar y mostrar el horario.



Figura 6 Sistema Web de la propuesta de Solución con Interacción.

De manera particular, para el presente trabajo de tesis fueron de relevancia los módulos de *Crear Horario* y *Reportes*. Estos módulos fueron modificados para integrarse con el generador de horarios basado en NOSGAI desarrollado en la propuesta de solución, y permitir la interacción con el TD.

El Módulo *Crear Horario* verifica si existe una solución de la instancia (que se encuentra en una base de datos), y de no ser así pregunta al TD si desea crearla. En ese momento el módulo manda llamar al generador y espera a la construcción de las soluciones, véase **Figura 7** que muestra la solicitud en proceso.





La información de clasificación provista por el usuario es empleada para actualizar las soluciones (agregando dicha clasificación a los objetivos de las mismas). Este conjunto actualizado de soluciones se agrega al conjunto de referencia actual, que sirve de entrada al PDA para actualizar los valores de los umbrales empleados por el modelo de preferencia usado en la propuesta de solución. Este proceso se repite en cada interacción que se tenga con el TD, dado que su información preferencial se asume formará un histórico que en el futuro será tan completo como para que los umbrales que se estimen precisen mejor sus intereses. El siguiente subcapítulo presenta los resultados de este proceso de interacción sobre las instancias definidas previamente.

### 6.2.3 Resultados obtenidos del experimento 2

Para observar el desempeño obtenido a través de la implementación de la propuesta de solución, se resolvieron las 10 instancias presentadas en el subcapítulo 6.2.1. Cada instancia fue objeto de una interacción con el TD, quién decidió la clasificación de MUY BUENA, BUENA, o REGULAR en función de un objetivo en particular, el correspondiente a la restricción que garantiza que cada clase de materia sea asignada. El TD decidió asignar una clasificación de REGULAR si no todas las clases fueron asignadas, BUENA si todas fueron asignadas, pero existían empalmes, y MUY BUENA si todas fueron asignadas y sin empalmes.

La **Tabla 51** muestra los resultados obtenidos en cada iteración para la instancia *I01*. La información mostrada en cada tabla corresponde a las 10 mejores soluciones obtenidas (en orden lexicográfico de los objetivos del modelo tri-objetivo), y por cada solución se presenta 22 elementos de información, los tres primeros presentan los valores obtenidos para los objetivos originales del problema que eran minimizar los tiempos inactivos de estudiantes, profesores, y aulas, las siguientes 18 son los valores obtenidos por las restricciones del problema transformadas en objetivos, y el último contiene la clasificación dada por el TD en valor numérico. Se puede observar en esta instancia que no existe mejora en la clasificación dada por el TD entre la primera y segunda iteración, las 10 mejores soluciones todas fueron regulares. Este se puede explicar por la magnitud de la instancia, lo cual sugiere una mayor interacción para poder mejorar el resultado.

203	225	156	185	86	34	21	61	191	0	0	0	142	22	196	0	0	172	0	46	0	2
197	241	152	180	88	31	20	60	182	0	0	0	142	27	186	0	0	171	0	67	0	2
220	225	138	186	66	30	23	59	186	0	0	0	142	32	182	0	0	171	0	64	0	2
218	174	148	188	62	40	24	57	195	0	0	0	142	31	182	0	0	184	0	76	0	2
206	198	129	184	80	28	26	61	193	0	0	0	142	26	192	0	0	179	0	54	0	2
213	217	137	185	100	30	22	62	185	0	0	0	142	22	174	0	0	167	0	58	0	2
207	189	128	173	94	32	26	65	190	0	0	0	142	22	190	0	0	185	0	58	0	2
150	218	123	179	72	37	27	62	189	0	0	1	142	26	176	0	0	175	0	69	0	2
218	215	136	189	70	24	21	62	189	0	0	0	142	23	182	0	0	179	0	55	0	2
214	259	163	179	66	32	27	67	184	0	0	0	142	20	204	0	0	175	0	52	0	2

a) Resultados Iteración 1

204	214	137	184	72	28	25	58	185	0	0	0	142	29	186	0	0	167	0	52	0	2
207	215	143	183	82	34	23	62	182	0	0	0	142	22	190	0	0	165	0	59	0	2
189	217	135	189	66	33	24	62	184	0	0	0	142	22	180	0	0	173	0	73	0	2

169	205	142	192	74	33	24	64	192	0	0	1	142	18	184	0	0	177	0	57	0	2
191	216	121	178	78	33	25	62	187	0	0	0	142	22	176	0	0	183	0	65	0	2
227	206	164	189	70	34	26	53	196	0	0	0	142	35	170	0	0	193	0	69	0	2
225	194	143	170	74	43	25	60	186	0	0	0	142	29	180	0	0	179	0	51	0	2
221	216	141	171	80	33	15	66	189	0	0	0	142	26	190	0	0	171	0	59	0	2
230	228	152	188	64	27	20	57	188	0	0	0	142	32	178	0	0	176	0	50	0	2
195	222	134	186	70	34	20	58	194	0	0	0	142	32	176	0	0	179	0	66	0	2

b) Resultados Iteración 2

Tabla 51 Resultados obtenidos de solución de la instancia I01.

La **Tabla 52** muestra los resultados obtenidos en cada iteración para la instancia *I04*. La información mostrada es la misma a la **Tabla 51**. A diferencia del resultado obtenido con la instancia anterior, con una sola interacción con el TD el siguiente resultado obtenido produjo que todas las soluciones fueran clasificadas como BUENAS en la segunda iteración (cuando en la primera había solamente 4). Se puede observar que en estas soluciones todas las clases fueron asignadas, aunque posiblemente existían empalmes por lo que no alcanzaron la máxima clasificación.

13	0	7	12	0	0	0	3	6	0	0	0	0	0	8	0	0	6	0	220	0	1
6	2	6	12	6	3	0	1	11	0	0	0	0	0	12	0	0	11	0	220	0	2
0	0	0	12	8	9	1	1	11	0	0	0	4	7	18	0	0	11	0	228	0	2
8	0	1	12	0	2	0	3	11	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	220	0	1
1	0	2	12	2	5	3	4	9	0	0	0	0	0	10	0	0	9	0	223	0	2
2	0	0	12	4	5	3	3	9	0	0	0	0	1	4	0	0	9	0	223	0	2
16	2	3	12	0	0	0	4	8	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	220	0	1
4	4	4	12	0	3	2	4	9	0	0	0	0	1	0	0	0	9	0	222	0	1
1	0	1	12	6	10	1	1	12	0	0	0	3	6	20	0	0	12	0	227	0	2
6	0	0	12	2	1	0	3	8	0	0	0	0	0	6	0	0	8	0	220	0	2

c) Resultados Iteración 1

0	0	0	12	0	0	0	2	10	0	0	0	0	0	6	0	0	10	0	220	0	1
0	0	1	12	0	0	0	5	9	0	0	0	0	0	2	0	0	9	0	220	0	1
0	0	0	12	0	0	0	4	9	0	0	0	0	0	6	0	0	9	0	220	0	1
0	0	1	12	0	0	0	3	10	0	0	0	0	0	2	0	0	10	0	220	0	1
0	0	1	12	0	0	0	2	9	0	0	0	0	0	6	0	0	9	0	220	0	1
0	0	1	12	0	0	0	2	9	0	0	0	0	0	6	0	0	9	0	220	0	1
0	0	0	12	0	0	0	2	10	0	0	0	0	0	8	0	0	10	0	220	0	1
0	0	1	12	0	0	0	3	9	0	0	0	0	0	4	0	0	9	0	220	0	1
0	0	1	12	0	0	0	3	9	0	0	0	0	0	4	0	0	9	0	220	0	1
0	0	1	12	0	0	0	3	9	0	0	0	0	0	4	0	0	9	0	220	0	1

d) Resultados Iteración 2

Tabla 52 Resultados obtenidos de solución de la instancia I04.

Finalmente, la **Tabla 53** muestra el resumen de los resultados para todas las instancias. Particularmente muestra el cambio en la clasificación de las soluciones entre cada iteración, donde  $|R|$  es el número de soluciones regulares,  $|B|$  el número de soluciones buenas, y  $|MB|$  el número de soluciones muy buenas.

	<b>Iteración 1</b>	<b>Iteración 2</b>
--	--------------------	--------------------

Instancia	R	B	MB	R	B	MB
I01	10	0	0	10	0	0
I02	6	4	0	2	8	0
I03	4	6	0	4	6	0
I04	6	4	0	0	10	0
I05	7	3	0	0	10	0
I06	10	0	0	10	0	0
I07	10	0	0	10	0	0
I08	10	0	0	10	0	0
I09	10	0	0	10	0	0
I10	10	0	0	10	0	0

Tabla 53 Resumen resultados obtenidos en las instancias.

## 6.2.4 Análisis de resultados del experimento 2

A partir de los resultados obtenidos en el subcapítulo 6.2.3 se puede observar el beneficio de la interacción con el TD al mejorar la clasificación entre iteraciones (véase resultados obtenidos en instancias I02 a I05). Estos resultados demuestran la validez de la propuesta de solución para resolver el PPHU, así como el éxito en la incorporación de preferencias.

Por otro lado, se pueden notar cambios nulos en las instancias I01 e I06 a I10, los cuales se observan fueron producto de la magnitud de las mismas y el número de iteraciones, mientras todas ellas tenían un mayor número de materias a asignar en comparación de los otros, mantuvieron el mismo número de iteraciones (solo 2). Este resultado abre una línea de investigación que concierne la caracterización del desempeño de la interacción del sistema en función de la magnitud de las instancias.

Finalmente, se observa que cuando la información empleada por el TD para hacer la clasificación es demasiado uniforme, es posible que no encuentre elementos suficientes para diferenciar entre soluciones (por ejemplo, cuando todas las soluciones tienen el mismo valor objetivo considerado). Debido a esto es necesario contar siempre con un conjunto de atributos lo suficientemente descriptivo y diferenciador que permita a un TD establecer adecuadamente sus preferencias.

## 6.3 Experimento 3: Desempeño en Instancias de Problemas Relacionados

La validación del uso de la propuesta de solución en instancias relacionadas fue llevado a cabo a través del tercer experimento. El diseño experimental planteó la solución de la instancia *comp01.ctt* tomada del estado del arte de un problema relacionado. Dicha instancia se encuentra descrita en el Anexo 3, y corresponde a un caso de la Segunda Competencia Internacional de Programación de Horarios (ITC-2007, por sus siglas en inglés *International Timetabling Competition*) del conjunto denominado *Track 3* (Di Gaspero et al., 2007), un bien conocido *benchmark* para problemas de programación de horarios. Para llevar a cabo la experimentación, la instancia fue transformada al caso de estudio del presente trabajo de tesis, y haciendo uso de los umbrales obtenidos en la instancia *I04* se procedió a obtener la

solución. El resto del subcapítulo presenta detalles del experimento organizados de la siguiente manera. El subcapítulo 6.3.1 presenta la formulación del problema asociado a la instancia *comp01.ctt* y su relación con el problema particular abordada en éste trabajo de tesis. El subcapítulo 6.3.2 describe la estrategia de transformación propuesta para poder resolver la instancia usando la propuesta de solución. El subcapítulo 6.3.3 presenta los resultados obtenidos a partir de la solución y un breve análisis de los mismos.

### **6.3.1 Formulación del problema asociado a instancia *comp01.ctt***

El CBTP (acrónimo derivado del término en inglés *Curriculum-based Timetabling problem*) de la instancia *comp01.ctt* aplica a la Universidad de Udine, Italia (véase Di Gaspero et al., 2007).

Este problema consiste en programar semanalmente las clases de varias materias en la universidad en aulas y horarios que eviten las siguientes restricciones fuertes: 1) programar más de una clase en la misma aula a la misma hora; 2) programa un maestro en dos clases a la misma hora; y, 3) programar más de una clase de un grupo a la misma hora. Adicionalmente, se debe validar que la programación de clases respete las siguientes restricciones suaves: a) disponibilidad de maestros en horarios específicos; b) disponibilidad de materias a ser asignadas en horarios específicos; c) capacidad de las aulas; y d) el número mínimo de días de trabajo. Finalmente, el objetivo del CBTP es asignar las clases tal manera que el espacio libre entre clases sea lo mínimo posible.

Las entidades participantes en los casos del CBTP son periodos de tiempo por día, materias, profesores, aulas y grupos, donde cada materia se divide en un conjunto de clases que se debe impartir de ella a la semana.

### **6.3.2 Estrategia de transformación a PPHU**

La relación entre CBTP y PPHU es casi directa. Todas las restricciones fuertes del CBTP son tomadas en cuenta por el PPHU. En cuanto a las restricciones suaves el PPHU solo maneja directamente la correspondiente al inciso *a* descrito en el subcapítulo previo, pero puede manejar la capacidad de las aulas (inciso *c*) al indicar de acuerdo al grupo y las materias específicas correspondientes, en que aulas pueden o no estar. Así mismo, el número mínimo de días de trabajo (inciso *d*) es análogo en PPHU al máximo número de horas consecutivas, ya que este se obtendría de dividir el número de clases entre el mínimo número de días de trabajo.

La función objetivo del CBTP no se maneja en PPHU, así como tampoco la restricción suave del inciso *b* correspondiente a horarios de disponibilidad de impartición de clases. Una aproximación a la función objetivo del CBTP es el primer objetivo del PPHU que busca minimizar las horas libres entre clases, el cual indirectamente podría impactar en este objetivo. Con lo expuesto en éste párrafo se deja evidencia que la validación de la propuesta de solución sobre su aplicación en problemas similares queda limitada solamente al manejo

de aquellas restricciones y objetivos que puedan ser transformados. Esta situación era esperada dada la particularidad del problema real abordado. El Anexo 4 muestra el ejemplo de transformación de la instancia *comp01.ctt* a una instancia del problema PPHU.

### 6.3.3 Resultados del experimento 3 y análisis

Este subcapítulo presenta los resultados obtenidos de resolver la instancia transformada del caso *comp01.ctt* del problema CBTP, a través de la propuesta de solución. La configuración de los algoritmos fue la misma empleada en los experimentos previos, y los valores de los umbrales empleados fueron de dos tipos: i) inicialización por default, cuando no existe conjunto de referencia previo; y ii) los obtenidos a través de la segunda iteración de la solución de la instancia *I04*. La **Tabla 54** muestra los resultados.

67	65	17	217	104	50	25	46	215	0	0	0	0	0	104	0	0	215	0	377	0	2
72	60	33	208	64	51	34	39	217	0	0	0	0	0	64	0	0	217	0	386	0	2
68	61	25	211	104	41	28	43	221	0	0	0	0	0	104	0	0	221	0	380	0	2
54	1	44	207	118	122	100	91	215	0	0	0	0	0	118	0	0	215	0	463	0	2
67	47	23	201	92	48	39	48	218	0	0	0	0	0	92	0	0	218	0	391	0	2
71	83	23	204	76	43	31	58	218	0	0	0	0	0	76	0	0	218	0	382	0	2
3	0	3	12	432	216	3	2	7	0	0	0	195	188	432	0	0	7	0	568	0	2
35	38	43	106	238	123	12	14	111	0	0	0	87	80	238	0	0	111	0	468	0	2
91	44	26	205	92	54	25	52	217	0	0	0	0	0	92	0	0	217	0	377	0	2
62	37	39	107	222	118	11	24	118	0	0	0	86	79	222	0	0	118	0	463	0	2

a) Resultados usando umbrales por default.

83	61	26	214	86	45	30	46	222	0	0	0	0	0	86	0	0	222	0	383	0	2
71	42	25	203	94	57	35	50	212	0	0	0	0	0	94	0	0	212	0	389	0	2
76	71	26	217	110	40	25	46	216	0	0	0	0	0	110	0	0	216	0	376	0	2
67	74	27	217	84	52	21	51	213	0	0	0	0	0	84	0	0	213	0	373	0	2
101	87	30	213	80	53	27	48	212	0	0	0	0	0	80	0	0	212	0	377	0	2
75	46	17	211	90	50	38	53	218	0	0	0	0	0	90	0	0	218	0	393	0	2
65	64	24	215	78	52	31	44	215	0	0	0	0	0	78	0	0	215	0	385	0	2
85	88	26	206	84	50	25	49	220	0	0	0	0	0	84	0	0	220	0	378	0	2
80	58	30	209	76	43	26	52	223	0	0	0	0	0	76	0	0	223	0	377	0	2
79	91	27	211	88	52	19	49	221	0	0	0	0	0	88	0	0	221	0	370	0	2

b) Resultados usando umbrales tomados de la instancia *I04*.

*Tabla 54 Resultados de resolver comp01.ctt ya transformada a PPHU.*

Los resultados de este experimento muestran la viabilidad de resolver instancias de CBTP en el dominio de PPHU, haciendo una analogía en el manejo de las restricciones. La información de la **Tabla 54** muestra, como era esperado, que para el TD todas las soluciones generadas en la primera iteración son REGULARES, esto se justifica por la magnitud de las instancias ya que involucra un gran número de grupos (algo similar ocurrió con la instancia completa analizada en el experimento anterior). Sin embargo, se observa que el valor de la quinta columna, que presenta el número de clases no asignadas, disminuye de usar el valor umbrales de preferencia sin estimar (valores iniciales cuando no existe conjunto de referencia), véase

**Tabla 54.b**, al usar umbrales obtenidos para el TD a partir de una de las instancias con mejor resultado en el experimento anterior (la *I04*). Dicha disminución demuestra la relevancia de incluir umbrales que de manera adecuada reflejen las preferencias del decisor, y que por lo tanto a través de un proceso de interacción más largo se podría mejorar las soluciones obtenidas.

## Capítulo 7. Conclusiones.

Este trabajo demuestra para el PPHU las soluciones de las problemáticas siguientes: A) funcionalidad del sistema completo; B) Objetividad al mejorar el ajuste de preferencias a través de la interacción con el TD; y C) Viabilidad para resolver instancias reales provenientes de la literatura. En donde la problemática *A* es resuelta en el Capítulo 6.1 logrando que NOSGA-II, la página web y el PDA logren comunicarse de manera correcta, es decir, la salida (resultado) de uno, se vuelve la entrada (instancia) de otro, además de poder incorporar las preferencias del TD. Por otro lado, la problemática *B* es resuelta en el Capítulo 6.2 logrando que a través de la interacción del TD con el sistema mejore las soluciones pasando de tener soluciones “muy buena”, “buena”, o “regular” a tener más soluciones buenas para las instancias pequeñas. Por último, la problemática *C* es resuelta en el Capítulo 6.3 logrando demostrar su viabilidad para resolver instancias reales mediante la observación del quinto objetivo (Que todas las materias sean asignadas), en donde se observa que disminuyen los valores del mismo, es decir, hay más materias asignadas con respecto a los resultados de la primera iteración del NOSGA-II.

# Referencias

- Abdullah, S., Burke, E. K., & McCollum, B. (2007a). A hybrid evolutionary approach to the university course timetabling problem. In *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation* (pp. 1764–1768). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CEC.2007.4424686>
- Abdullah, S., Burke, E. K., & McCollum, B. (2007b). Using a Randomised Iterative Improvement Algorithm with Composite Neighbourhood Structures for the University Course Timetabling Problem. In *Metaheuristics* (pp. 153–169). Boston, MA: Springer US. Retrieved from [http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-71921-4\\_8](http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-71921-4_8)
- Abdullah, S., Burke, E., & Mccollum, B. (2005). An investigation of variable neighbourhood search for university course timetabling, (May 2014). Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/document/5477159/>
- Abdullah, S., & Hamdan, A. R. (2008). A Hybrid Approach for University Course Timetabling. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 8(8), 127. Retrieved from [http://paper.ijcsns.org/07\\_book/200808/20080819.pdf](http://paper.ijcsns.org/07_book/200808/20080819.pdf)
- Akif, M., & Cihan, A. (2008). A 0-1 integer programming approach to a university timetabling problem. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 37(1), 41–55.
- Aladag, C. H., Hocaoglu, G., & Basaran, M. A. (2009). The effect of neighborhood structures on tabu search algorithm in solving course timetabling problem. *Expert Systems with Applications*, 36(10), 12349–12356. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.04.051>
- Alsmadi, O., Abo-Hammour, Z., Abu-Al-Nadi, D., & Algsoon, A. (2011). A novel genetic algorithm technique for solving university course timetabling problems. In *International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications, WOSSPA* (pp. 195–198). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WOSSPA.2011.5931449>
- Alvarez-Valdes, R., Crespo, E., & Tamarit, J. M. (2002). Design and implementation of a course scheduling system using Tabu Search. *European Journal of Operational Research*, 137(3), 512–523. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00091-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00091-1)
- Asham, M., Soliman, M., & Ramadan, R. (2011). Trans Genetic Coloring Approach for Timetabling Problem. *IJCA Special Issue On*, 17–25. <https://doi.org/10.5120/2824-205>
- Asmuni, H., Burke, E., & Garibaldi, J. (2005). Fuzzy Multiple Heuristic Ordering for Course. In *Proceedings of the 2005 UK Workshop on Computational Intelligence*.
- Aubin, J., & Ferland, J. (1989). A large scale timetabling problem. *Computers and Operations Research*, 16(1), 67–77. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(89\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0305-0548(89)90053-1)
- Aycan, E., & Ayav, T. (2009). Solving the Course Scheduling Problem Using Simulated Annealing. In *2009 IEEE International Advance Computing Conference* (pp. 462–466). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IADCC.2009.4809055>
- Ayob, M., & Jaradat, G. (2009). Hybrid Ant Colony systems for course timetabling problems.

In *2009 2nd Conference on Data Mining and Optimization* (pp. 120–126). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DMO.2009.5341898>

Chaudhuri, A., & De, K. (2010). Fuzzy genetic heuristic for university course timetable problem. *International Journal of Advances in Soft Computing and Its Applications*, 2(1), 100–123.

Coello, C. (2000a). Handling preferences in evolutionary multiobjective optimization: A survey. In *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, CEC 2000* (Vol. 1, pp. 30–37). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CEC.2000.870272>

Coello, C. (2000b). Treating Constraints As Objectives for Single-Objective Evolutionary Optimization. *Engineering Optimization*, 32(3), 275–308. <https://doi.org/10.1080/03052150008941301>

Coello, C. (2017). Introducción a la Computación Evolutiva, (2508), 306.

Cooper, T., & Kingston, J. (1995). The complexity of timetable construction problems (pp. 281–295). [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/3-540-61794-9\\_66](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/3-540-61794-9_66)

Cruz, L., Federico, A., & Ramirez, L. (2002). Programación de Horarios con Coloreo de Grafos. *Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Departamento de Sistemas y Computación*.

Dandashi, A., & Al-Mouhamed, M. (2010). Graph coloring for class scheduling. *2010 ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA 2010*, 2–5. <https://doi.org/10.1109/AICCSA.2010.5586963>

Daskalaki, S., & Birbas, T. (2005). Efficient solutions for a university timetabling problem through integer programming. *European Journal of Operational Research*, 160(1), 106–120. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.06.023>

Daskalaki, S., Birbas, T., & Housos, E. (2004). An integer programming formulation for a case study in university timetabling. *European Journal of Operational Research*, 153(1), 117–135. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00103-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00103-6)

Deris, S., Omatu, S., & Ohta, H. (2000). Timetable planning using the constraint-based reasoning. *Computers and Operations Research*, 27(9), 819–840. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(99\)00051-9](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(99)00051-9)

Deris, S., Omatu, S., Ohta, H., & Saad, P. (1999). Incorporating constraint propagation in genetic algorithm for university timetable planning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 12(3), 241–253. [https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(99\)00007-X](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(99)00007-X)

Dimopoulou, M., & Miliotis, P. (2001). Implementation of a university course and examination timetabling system. *European Journal of Operational Research*, 130(1), 202–213. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00052-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00052-7)

Duarte, A. M., Pantrigo, J. J. F., & Gallego, M. C. (2007). *Metaheurísticas*.

Fernandez, E., Lopez, E., Lopez, F., & Coello Coello, C. A. (2011). Increasing selective pressure towards the best compromise in evolutionary multiobjective optimization: The

- extended NOSGA method. *Information Sciences*, 181(1), 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2010.09.007>
- Fernandez, E., Lopez, E., Mazcorro, G., Olmedo, R., & Coello, C. (2013). Application of the non-outranked sorting genetic algorithm to public project portfolio selection. *Information Sciences*, 228, 131–149. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2012.11.018>
- Figueira, J. R., Greco, S., Roy, B., & Słowiński, R. (2010). ELECTRE Methods: Main Features and Recent Developments. *Handbook of Multicriteria Analysis*, 103, 51–89. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-92828-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92828-7_3)
- García, C., García, E., & Villada, F. (2015). Implementación del Algoritmo Evolutivo Multi-Objetivo de Frente de Pareto (SPEA) para la Planeación de Sistemas Eléctricos de Distribución incluyendo Huecos de Voltaje. *Información Tecnológica*, 26(5), 155–168. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000500019>
- García, J. (2017). *Bomberos - Diputación Provincial de Sevilla*. Ediciones Rodio.
- Golabpour, A., Shirazi, H., Farahi, A., Mohammad, A., & Beigi, H. (2008). A Fuzzy Solution Based on Memetic Algorithms for Timetabling. In *2008 International Conference on MultiMedia and Information Technology* (pp. 108–110). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MMIT.2008.193>
- Joudaki, M., Imani, M., & Mazhari, N. (2010). Using improved Memetic algorithm and local search to solve University Course Timetabling Problem (UCTTP). *Doroud, Iran: Islamic*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1501384112>
- Khonggamnerd, P., & Innet, S. (2009). On Improvement of Effectiveness in Automatic University Timetabling Arrangement with Applied Genetic Algorithm. In *2009 Fourth International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology* (pp. 1266–1270). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCIT.2009.202>
- Kohshori, M., & Abadeh, M. (2012). Hybrid Genetic Algorithms for University Course Timetabling. *Journal of Computer Science*, 9(2), 446–455.
- Lücken, C. Von, Hermosilla, A., & Benjamín, B. (2004). Algoritmos evolutivos para optimización multiobjetivo: Un estudio comparativo en un ambiente paralelo asíncrono. *X Congreso Argentino de Ciencias de La Computación*. Retrieved from [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/22476/Documento\\_completo.pdf?sequence=1](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/22476/Documento_completo.pdf?sequence=1)
- Mousseau, V., Slowinski, R., & Zielniewicz, P. (1999). Methodological Guide and User ' S Manual. *Construction*.
- Nothegger, C., Mayer, A., Chwatal, A., & Raidl, G. R. (2012). Solving the post enrolment course timetabling problem by ant colony optimization. *Annals of Operations Research*, 194(1), 325–339. <https://doi.org/10.1007/s10479-012-1078-5>
- Rachmawati, L., & Srinivasan, D. (2005). A hybrid fuzzy evolutionary algorithm for a multi-objective resource allocation problem. In *Fifth International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS'05)* (Vol. 2005, p. 6 pp.). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICHIS.2005.10>

- RAE. (2014). Diccionario de la Lengua Española (23.<sup>a</sup> ed.). Consultado en <http://www.rae.es/>.
- Rangel-Valdez, N., Jasso-Luna, J., Rodriguez-Chavez, M., & Bujano-Guzman, G. (2014). Practical relaxation of a special case of the Curriculum-Based Course Timetabling problem. *Progress in Artificial Intelligence*, 2(4), 237–248. <https://doi.org/10.1007/s13748-014-0055-4>
- Razak, H. A., Ibrahim, Z., & Hussin, N. M. (2010). Bipartite graph edge coloring approach to course timetabling. *Proceedings - 2010 International Conference on Information Retrieval and Knowledge Management: Exploring the Invisible World, CAMP'10*, 229–234. <https://doi.org/10.1109/INFRKM.2010.5466912>
- Schaerf, A. (1999). A Survey of Automated Timetabling, (Gotlieb 1963), 87–127.
- Selim, S. (1988). Split Vertices in Vertex Colouring and Their Application in Developing a Solution To the Faculty Timetable Problem. *Computer Journal*. <https://doi.org/10.1093/comjnl/31.1.76>
- Socha, K., Knowles, J., & Sampels, M. (2002). A MAX-MIN Ant System for the University Course Timetabling Problem (pp. 1–13). [https://doi.org/10.1007/3-540-45724-0\\_1](https://doi.org/10.1007/3-540-45724-0_1)
- Soria-Alcaraz, J. A. (2010). Diseño de horarios con respecto al alumno mediante técnicas de computo evolutivo. *Doctoral Dissertation, Master's Thesis, Instituto Tecnológico de León*.
- Tuga, M., Berretta, R., & Mendes, A. (2007). A Hybrid Simulated Annealing with Kempe Chain Neighborhood for the University Timetabling Problem. In *6th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science (ICIS 2007)* (pp. 400–405). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIS.2007.25>
- Turabieh, H., & Abdullah, S. (2009). Incorporating tabu search into memetic approach for enrolment-based course timetabling problems. In *2009 2nd Conference on Data Mining and Optimization* (pp. 115–119). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DMO.2009.5341901>
- Villegas, N. (2009). Análisis de valor en la toma de decisiones aplicado a carreteras. *Departamento de Ingeniería de La Construcción - Universidad Politécnica de Cataluña*, 259.
- Welsh, D., & Powell, M. (1967). An upper bound for the chromatic number of a graph and its application to timetabling problems. *The Computer Journal*, 10(1), 85–86. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Wren, A. (1996). Scheduling, timetabling and rostering - A special relationship? *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1153, 46–75. [https://doi.org/10.1007/3-540-61794-9\\_51](https://doi.org/10.1007/3-540-61794-9_51)
- Yang, S., & Jat, S. N. (2011). Genetic Algorithms With Guided and Local Search Strategies for University Course Timetabling. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 41(1), 93–106. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2010.2049200>

- Zhang, L., & Lau, S. (2005). Constructing university timetable using constraint satisfaction programming approach. *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*, 2(November), 55–60. <https://doi.org/10.1109/CIMCA.2005.1631445>
- Zitzler, E., & Thiele, L. (1998). Multiobjective Evolutionary Algorithms : A Comparative Case Study and. *Nature*, 3(September), 257–271.

# Anexo 1. Instancia Real

La instancia se puede interpretar como si estuviera dividida en 11 bloques lo cual se separan por un espacio en blanco, dichos bloques serán descritos a continuación.

## 7.1.1 Bloque 1

El bloque 1 consta de una columna, dicha columna se puede observar en la parte derecha de la **Tabla 55**, y en la parte izquierda se presenta el significado de cada valor.

Información	Valor
Número de Aulas	6
Número de Grupos	9
Numero de Materias	25
Número de Profesores	11
Número de días	5
Número de Horas/Día	13
Número de Materias a Impartir	41
Número máximo de sesiones continuar por profesor	6
Número máximo de sesiones continuas por materia	3
Número máximo de asignaturas por profesor	6
Número máximo de asignaturas por profesor por grupo	3

*Tabla 55 Bloque 1.*

## 7.1.2 Bloque 2

El bloque 2 representa las **aulas**, la información consta de **tres columnas** como podemos ver en la **Tabla 56**. La **primera columna** representa el **id del Aula**, la **segunda columna** representa el **nombre del aula** y la **tercera columna** representa el **tipo del aula** (aula o laboratorio).

0	Aula_2	AULA
1	Aula_3	AULA
2	CAII-2-ITI	LABORATORIO
3	LAB_DE_REDES	LABORATORIO
4	LAB_OPT_Y_REDES	AULA
5	LABMICROCOMPUTADORAS	LABORATORIO

Tabla 56 Bloque 2.

### 7.1.3 Bloque 3

El bloque 3 representa el **horario aceptable del uso de las aulas**, la información consta de **síes columnas** como podemos ver en la **Tabla 57**. La **primera columna** representa el **id del aula** y de la **segunda a la sexta columna** representan el **número de días (5)**, en los cuales tienen **trece números** que representan el **número de Horas/Día**, estos trece números pueden ser **0** o **1**, si es **0** significa que **a la hora tal en el día tal no está disponible el aula tal** y si es **1** significa que **a la hora tal en el día tal está disponible el aula tal**.

0	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
1	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
2	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
3	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
4	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
5	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111

Tabla 57 Bloque 3.

### 7.1.4 Bloque 4

El bloque 4 representa los **grupos**, la información consta de **dos columnas** como podemos ver en la **Tabla 58**. La **primera columna** representa el **id del grupo** y la **segunda columna** representa el **nombre del grupo**.

0	ITI-G10-01
1	ITI-G10-02
2	ITI-G9-01
3	ITI-G9-02
4	ITI-G8-01
5	ITI-G8-02
6	ITI-G8-03
7	ITI-G6-IRREG
8	ITI-G7-IRREG

Tabla 58 Bloque 4.

### 7.1.5 Bloque 5

El bloque 5 representa el **horario de disponibilidad aceptable para los grupos**, la información consta de **síes columnas** como podemos ver en la **Tabla 59**. La **primera columna** representa el **id del grupo** y **de la segunda a la sexta columna** representan el **número de días (5)**, en los cuales tienen **trece números** que representan el **número de Horas/Día**, estos **trece números** pueden ser **0** o **1**, si es **0** significa que **a la hora tal en el día tal no está disponible el grupo tal** y si es **1** significa que **a la hora tal en el día tal está disponible el grupo tal**.

0	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
1	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
2	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
3	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
4	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
5	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111

Tabla 59 Bloque 5.

## 7.1.6 Bloque 6

El bloque 6 representa las **materias que se tienen que impartir**, la información consta de **nueve columnas** como podemos ver en las **Tablas 60, 61 y 62**. La **primera columna** representa una **combinación de id entre materia-grupo**, la **segunda columna** representa el **id del grupo**, la **tercera columna** representa el **id de la materia**, la **cuarta columna** representa el **nombre de la materia**, la **quinta columna** representa el **número de horas que se debe impartir cada materia**, la **sexta columna** representa el **número de horas teóricas de cada materia**, la **séptima columna** representa el **número de horas prácticas de cada materia**, la **optaba columna** representa el **primero de los dos profesores que puede impartir tal materia** y por último la **novena columna** representa el **segundo profesor que puede impartir tal materia**.

6835	0	1378	MATEMATICAS_BASICAS	6	6	0	2541	184
6836	0	1281	ALGORITMOS	6	2	4	1812	1008
6837	0	1441	HERRAMIENTAS_OFIMATICAS	6	0	6	1043	1008
6838	0	1278	VALORES_DEL_SER	4	4	0	1008	1043
6839	0	1286	ARQUITECTURA_DE_COMPUTADORAS	4	0	4	2261	1008
6840	0	1282	INTRODUCCION_A_LA_ITI	4	0	4	2261	1043
6841	0	1442	INGLES_I	6	6	0	1530	2912
6842	1	1378	MATEMATICAS_BASICAS	6	6	0	2541	184
6843	1	1281	ALGORITMOS	6	2	4	1812	1008
6844	1	1441	HERRAMIENTAS_OFIMATICAS	6	0	6	1043	1008
6845	1	1442	INGLES_I	6	6	0	1530	2912

Tabla 60 Bloque 6 parte 1.

6846	1	1286	ARQUITECTURA_DE_COMPUTADORAS	4	0	4	2261	1008
6847	1	1278	VALORES_DEL_SER	4	4	0	1008	1043
6848	1	1282	INTRODUCCION_A_LA_ITI	4	0	4	2261	1043
6849	2	1445	INGLES_IV	6	4	2	3319	2912
6850	2	1227	ALGEBRA_LINEAL	4	4	0	184	1043
6851	2	1295	HABILIDADES_DEL_PENSAMIENTO	3	3	0	3319	0
6852	2	1216	PROBABILIDAD_Y_ESTADISTICA	4	4	0	184	1043
6853	2	1396	INTRODUCCION_A_LAS_BASES_DE_DATOS	6	6	0	1812	0
6854	2	1402	PROCESO_ADMINISTRATIVO	4	2	2	1043	0

6855	2	1395	INTROD._A_LA_PROG._ORIENTADA_A_OBJETOS	6	2	4	2199	1812
6856	3	1445	INGLES_IV	6	4	2	3319	2912
6857	3	1295	HABILIDADES_DEL_PENSAMIENTO	3	3	0	3319	0
6858	3	1227	ALGEBRA_LINEAL	4	4	0	184	1043
6859	3	1216	PROBABILIDAD_Y_ESTADISTICA	4	4	0	184	1043
6860	3	1395	INTROD._A_LA_PROG._ORIENTADA_A_OBJETOS	6	4	2	2199	1812
6861	3	1402	PROCESO_ADMINISTRATIVO	4	4	0	1043	0
6862	3	1396	INTRODUCCION_A_LAS_BASES_DE_DATOS	6	4	2	1812	0
6863	4	1453	ARO._DE_APLICACIONES_EMPRESARIALES	6	0	6	3281	0
6864	4	1409	PROGRAMACION_WEB	6	2	4	1008	0

Tabla 61 Bloque 6 parte 2.

6865	5	1409	PROGRAMACION_WEB	6	2	4	1008	0
6866	5	1453	ARO._DE_APLICACIONES_EMPRESARIALES	6	0	6	3281	0
6867	6	1403	SEGURIDAD_INFORMATICA	6	4	2	2541	1530
6868	6	1463	SEMINARIO_INVESTIGACION	4	2	2	1008	0
6869	6	1408	PROGRAMACION_ORIENTADA_A_OBJETOS	6	0	6	2199	1043
6870	6	1448	INGLES_VII	6	6	0	2912	1530
6871	6	1404	NEGOCIOS_ELECTRONICOS	4	4	0	1530	0
6872	7	1450	INGLES_IX	6	6	0	2912	0
6873	7	1449	INGLES_VIII	6	6	0	2912	1530
6874	8	1392	PROGRAMACION_MVC	4	0	4	3281	1008
7119	6	1397	IMPLEMENTACION_DE_BASES_DE_DATOS	4	0	4	1812	1530

Tabla 62 Bloque 6 parte 3.

### 7.1.7 Bloque 7

El bloque 7 representa las **aulas en que las materias se pueden impartir**, la información consta de **dos columnas**, dicha información se dividió en **tres partes**, en donde la **primera parte** se muestra a la **izquierda**, la **segunda parte** en **medio** (continuación de la primera parte) y por último la **tercera parte** se muestra a la **derecha** (continuación de la segunda parte) como podemos ver en la **Tabla 63**. La **primera columna** representa una **combinación de id entre materia-grupo** y la **segunda columna** representa **las aulas en donde las materias se pueden impartir**, estos **seis números** pueden ser **0** o **1**, si es **0** significa que el

aula tal no está disponible para que se pueda impartir la materia tal y si es 1 significa que el aula tal está disponible para que se pueda impartir la materia tal.

6835	111111		6848	111111		6862	111111	
6836	111111		6849	111111		6863	111111	
6837	111111		6850	111111		6864	111111	
6838	111111		6851	111111		6865	111111	
6839	111111		6852	111111		6866	111111	
6840	111111		6853	111111		6867	111111	
6841	111111		6854	111111		6868	111111	
6842	111111		6855	111111		6869	111111	
6843	111111		6856	111111		6870	111111	
6844	111111		6857	111111		6871	111111	
6845	111111		6858	111111		6872	111111	
6846	111111		6859	111111		6873	111111	
6847	111111		6860	111111		6874	111111	
			6861	111111		7119	111111	

Tabla 63 Bloque 7.

### 7.1.8 Bloque 8

El bloque 8 representa a los **profesores**, la información consta de **cuatro columnas**, dicha información se dividió en **dos partes**, en donde la **primera parte** se muestra a la **izquierda** y la **segunda parte** a la **derecha** (continuación de la primera parte) como podemos ver en la **Tabla 64**. La **primera columna** representa el **id del profesor**, la **segunda columna** representa el **id real del profesor** y la **tercera columna** representa el **nombre del profesor** y la **cuarta columna** representa el **máximo número de horas por semana que el profesor puede impartir clases**.

0	1043	Ángela	24		5	2912	Heriberto	18
1	3319	Laura	18		6	184	Erika	18
2	2541	Claudia	18		7	1530	Fernando	18
3	3281	Ángel	18		8	1812	Patricia	28

4	1008	Santiago	24		9	2261	Antonio	24	
					10	2199	José	24	

Tabla 64 Bloque 8.

### 7.1.9 Bloque 9

El bloque 9 representa el **horario de disponibilidad del profesor**, la información consta de **síes columnas** como podemos ver en la **Tabla 65**. La **primera columna** representa el **id del profesor** y **de la segunda a la sexta columna** representan el **número de días** (5), en los cuales tienen **trece números** que representan el **número de Horas/Día**, estos **trece números** pueden ser **0** o **1**, si es **0** significa que **a la hora tal en el día tal no está disponible el profesor tal** y si es **1** significa que **a la hora tal en el día tal está disponible el profesor tal**.

1043	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
3319	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
2541	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
3281	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
1008	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
2912	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
184	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
1530	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
1812	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
2261	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111
2199	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111	1111111111111

Tabla 65 Bloque 9.

### 7.1.10 Bloque 10

El bloque 10 representa las **aulas en que cada profesor puede dar clase**, la información consta de **dos columnas** como podemos ver en la **Tabla 66**. La **primera columna** representa el **id del profesor** y la **segunda columna** representa **las aulas en donde los profesores pueden impartir clases**, estos **seis números** pueden ser **0** o **1**, si es **0** significa que **el aula tal no está disponible para el profesor tal** y si es **1** significa que **el aula tal está disponible para el profesor tal**.

1043	111111
3319	111111
2541	111111
3281	111111
1008	111111
2912	111111
184	111111
1530	111111
1812	111111
2261	111111
2199	111111

*Tabla 66 Bloque 10.*

### 7.1.11 Bloque 11

Por último, el bloque 11 representa las **materias que el profesor puede impartir**, la información consta de **cuatro columnas** como podemos ver en la **Tabla 67**. **Todas las columnas indican un profesor que puede impartir tal materia.**

2541	1378	1281	4021
1812	1281	1396	1397
1043	1441	1216	1282
1008	1409	2659	0
2261	1286	1403	1282
1530	1404	1442	1403
3319	2740	0	0
184	1227	1378	2498

2199	1395	1408	1463
3281	1453	1392	1281
2912	1450	1449	2890

*Tabla 67 Bloque 11.*

## Anexo 2. Ejemplo de ELECTRE III

Para este ejemplo se cuenta con una solución de un problema ficticio de cuatro alternativas y tres objetivos cada una como se muestra en la **Tabla 68**. Por otra parte, en la **Tabla 69** se muestra los umbrales.

	$g_1$	$g_2$	$g_3$
alt 1	75	67	85
alt 2	70	75	80
alt 3	74	73	81
alt 4	78	76	84

*Tabla 68 Solución de un problema ficticio.*

	$g_1$	$g_2$	$g_3$
k	0.33	0.33	0.33
q	2	3	4
p	10	11	12
v	30	31	32

*Tabla 69 Umbrales.*

**Paso 1:** Calcular la concordancia individual:

En las **Tablas 70, 71 y 72** se muestran las concordancias individuales de la alternativa 1 con todas las demás.

$c_i(a, b_h) = c(alt1, alt2)$			
$g_1$	$75 \leq 70 - 10$	Falso	1
	$70 - 10 < 75 \leq 70 - 2$	Falso	
	$70 - 2 < 75$	Verdadero	
$g_2$	$67 \leq 75 - 11$	Falso	0.375
	$75 - 11 < 67 \leq 75 - 3$	Verdadero	
	$75 - 3 < 67$	Falso	
$g_3$	$85 \leq 80 - 12$	Falso	1
	$80 - 12 < 85 \leq 80 - 4$	Falso	
	$80 - 4 < 85$	Verdadero	

*Tabla 70 Concordancia individual de  $c(alt1, alt2)$ .*

$c_i(a, b_h) = c(alt1, alt3)$			
$g_1$	$75 \leq 74 - 10$	Falso	1
	$74 - 10 < 75 \leq 74 - 2$	Falso	
	$74 - 2 < 75$	Verdadero	
$g_2$	$67 \leq 73 - 11$	Falso	0.625
	$73 - 11 < 67 \leq 73 - 3$	Verdadero	
	$73 - 3 < 67$	Falso	
$g_3$	$85 \leq 81 - 12$	Falso	1
	$81 - 12 < 85 \leq 81 - 4$	Falso	
	$81 - 4 < 85$	Verdadero	

Tabla 71 Concordancia individual de  $c(alt1, alt3)$ .

$c_i(a, b_h) = c(alt1, alt4)$			
$g_1$	$75 \leq 78 - 10$	Falso	0.875
	$78 - 10 < 75 \leq 78 - 2$	Verdadero	
	$78 - 2 < 75$	Falso	
$g_2$	$67 \leq 76 - 11$	Falso	0.250
	$76 - 11 < 67 \leq 76 - 3$	Verdadero	
	$76 - 3 < 67$	Falso	
$g_3$	$85 \leq 84 - 12$	Falso	1
	$84 - 12 < 85 \leq 84 - 4$	Falso	
	$84 - 4 < 85$	Verdadero	

Tabla 72 Concordancia individual de  $c(alt1, alt4)$ .

En las **Tablas 73, 74 y 75** se muestran las concordancias individuales de la alternativa 2 con todas las demás.

$c_i(a, b_h) = c(alt2, alt1)$			
$g_1$	$70 \leq 75 - 10$	Falso	0.625
	$75 - 10 < 70 \leq 75 - 2$	Verdadero	
	$75 - 2 < 70$	Falso	
$g_2$	$75 \leq 67 - 11$	Falso	1
	$67 - 11 < 75 \leq 67 - 3$	Falso	
	$67 - 3 < 75$	Verdadero	
$g_3$	$80 \leq 85 - 12$	Falso	0.875
	$85 - 12 < 80 \leq 85 - 4$	Verdadero	
	$85 - 4 < 80$	Falso	

Tabla 73 Concordancia individual de  $c(alt2, alt1)$ .

$c_i(a, b_h) = c(alt2, alt3)$			
$g_1$	$70 \leq 74 - 10$	Falso	0.750
	$74 - 10 < 70 \leq 74 - 2$	Verdadero	
	$74 - 2 < 70$	Falso	
$g_2$	$75 \leq 73 - 11$	Falso	1
	$73 - 11 < 75 \leq 73 - 3$	Falso	
	$73 - 3 < 75$	Verdadero	
$g_3$	$80 \leq 81 - 12$	Falso	1
	$81 - 12 < 80 \leq 81 - 4$	Falso	
	$81 - 4 < 80$	Verdadero	

Tabla 74 Concordancia individual de  $c(alt2, alt3)$ .

$c_i(a, b_h) = c(alt2, alt4)$			
$g_1$	$70 \leq 78 - 10$	Falso	0.250
	$78 - 10 < 70 \leq 78 - 2$	Verdadero	
	$78 - 2 < 70$	Falso	
$g_2$	$75 \leq 76 - 11$	Falso	1
	$76 - 11 < 75 \leq 76 - 3$	Falso	
	$76 - 3 < 75$	Verdadero	
$g_3$	$80 \leq 84 - 12$	Falso	1
	$84 - 12 < 80 \leq 84 - 4$	Falso	
	$84 - 4 < 80$	Verdadero	

Tabla 75 Concordancia individual de  $c(alt2, alt4)$ .

En las **Tablas 76, 77 y 78** se muestran las concordancias individuales de la alternativa 3 con todas las demás.

$c_i(a, b_h) = c(alt3, alt1)$			
$g_1$	$74 \leq 75 - 10$	Falso	1
	$75 - 10 < 74 \leq 75 - 2$	Falso	
	$75 - 2 < 74$	Verdadero	
$g_2$	$73 \leq 67 - 11$	Falso	1
	$67 - 11 < 73 \leq 67 - 3$	Falso	
	$67 - 3 < 73$	Verdadero	
$g_3$	$81 \leq 85 - 12$	Falso	1
	$85 - 12 < 81 \leq 85 - 4$	Falso	
	$85 - 4 < 81$	Verdadero	

Tabla 76 Concordancia individual de  $c(alt3, alt1)$ .

$c_i(a, b_h) = c(alt3, alt2)$			
$g_1$	$74 \leq 70 - 10$	Falso	1
	$70 - 10 < 74 \leq 70 - 2$	Falso	
	$70 - 2 < 74$	Verdadero	
$g_2$	$73 \leq 75 - 11$	Falso	1
	$75 - 11 < 73 \leq 75 - 3$	Falso	
	$75 - 3 < 73$	Verdadero	
$g_3$	$81 \leq 80 - 12$	Falso	1
	$80 - 12 < 81 \leq 80 - 4$	Falso	
	$80 - 4 < 81$	Verdadero	

Tabla 77 Concordancia individual de  $c(alt3, alt2)$ .

$c_i(a, b_h) = c(alt3, alt4)$			
$g_1$	$74 \leq 78 - 10$	Falso	1
	$78 - 10 < 74 \leq 78 - 2$	Falso	
	$78 - 2 < 74$	Verdadero	
$g_2$	$73 \leq 76 - 11$	Falso	1
	$76 - 11 < 73 \leq 76 - 3$	Falso	
	$76 - 3 < 73$	Verdadero	
$g_3$	$81 \leq 84 - 12$	Falso	1
	$84 - 12 < 81 \leq 84 - 4$	Falso	
	$84 - 4 < 81$	Verdadero	

Tabla 78 Concordancia individual de  $c(alt3, alt4)$ .

En las **Tablas 79, 80 y 81** se muestran las concordancias individuales de la alternativa 4 con todas las demás.

$c_i(a, b_h) = c(alt4, alt1)$			
$g_1$	$78 \leq 75 - 10$	Falso	1
	$75 - 10 < 78 \leq 75 - 2$	Falso	
	$75 - 2 < 78$	Verdadero	
$g_2$	$76 \leq 67 - 11$	Falso	1
	$67 - 11 < 76 \leq 67 - 3$	Falso	
	$67 - 3 < 76$	Verdadero	
	$84 \leq 85 - 12$	Falso	1
	$85 - 12 < 84 \leq 85 - 4$	Falso	

$g_3$	$85 - 4 < 84$	Verdadero
-------	---------------	-----------

Tabla 79 Concordancia individual de  $c(alt4, alt1)$ .

$c_i(a, b_h) = c(alt4, alt2)$			
$g_1$	$78 \leq 70 - 10$	Falso	1
	$70 - 10 < 78 \leq 70 - 2$	Falso	
	$70 - 2 < 78$	Verdadero	
$g_2$	$76 \leq 75 - 11$	Falso	1
	$75 - 11 < 76 \leq 75 - 3$	Falso	
	$75 - 3 < 76$	Verdadero	
$g_3$	$84 \leq 80 - 12$	Falso	1
	$80 - 12 < 84 \leq 80 - 4$	Falso	
	$80 - 4 < 84$	Verdadero	

Tabla 80 Concordancia individual de  $c(alt4, alt2)$ .

$c_i(a, b_h) = c(alt4, alt3)$			
$g_1$	$78 \leq 74 - 10$	Falso	1
	$74 - 10 < 78 \leq 74 - 2$	Falso	
	$74 - 2 < 78$	Verdadero	
$g_2$	$76 \leq 73 - 11$	Falso	1
	$73 - 11 < 76 \leq 73 - 3$	Falso	
	$73 - 3 < 76$	Verdadero	
$g_3$	$84 \leq 81 - 12$	Falso	1
	$81 - 12 < 84 \leq 81 - 4$	Falso	
	$81 - 4 < 84$	Verdadero	

Tabla 81 Concordancia individual de  $c(alt4, alt3)$ .

Por último, el concentrado de los valores de la concordancia individual se muestra en la **Tabla 82**.

Concordancia Individual												
	alt 1			alt 2			alt 3			alt 4		
	g1	g2	g3	g1	g2	g3	g1	g2	g3	g1	g2	g3
alt 1				1	0.375	1	1	0.625	1	0.875	0.250	1
alt 2	0.625	1	0.875				0.750	1	1	0.250	1	1
alt 3	1	1	1	1	1	1				0.750	1	1
alt 4	1	1	1	1	1	1	1	1	1			

Tabla 82 Concordancia individual (Concentrado).

**Paso 2:** Calcular la concordancia global.

En la **Tabla 83** se muestra el concentrado de concordancias globales.

$C(a, b_h)$		
$C(alt1, alt2)$	$((0.33 * 1) + (0.33 * 0.375) + (0.33 * 1)) / (0.33 + 0.33 + 0.33)$	0.79
$C(alt1, alt3)$	$((0.33 * 1) + (0.33 * 0.625) + (0.33 * 1)) / (0.33 + 0.33 + 0.33)$	0.88
$C(alt1, alt4)$	$((0.33 * 0.875) + (0.33 * 0.250) + (0.33 * 1)) / (0.33 + 0.33 + 0.33)$	0.71
$C(alt2, alt1)$	$((0.33 * 0.625) + (0.33 * 1) + (0.33 * 0.875)) / (0.33 + 0.33 + 0.33)$	0.83
$C(alt2, alt3)$	$((0.33 * 0.750) + (0.33 * 1) + (0.33 * 1)) / (0.33 + 0.33 + 0.33)$	0.92
$C(alt2, alt4)$	$((0.33 * 0.250) + (0.33 * 1) + (0.33 * 1)) / (0.33 + 0.33 + 0.33)$	0.75
$C(alt3, alt1)$	$((0.33 * 1) + (0.33 * 1) + (0.33 * 1)) / (0.33 + 0.33 + 0.33)$	1
$C(alt3, alt2)$	$((0.33 * 1) + (0.33 * 1) + (0.33 * 1)) / (0.33 + 0.33 + 0.33)$	1
$C(alt3, alt4)$	$((0.33 * 0.750) + (0.33 * 1) + (0.33 * 1)) / (0.33 + 0.33 + 0.33)$	0.92
$C(alt4, alt1)$	$((0.33 * 1) + (0.33 * 1) + (0.33 * 1)) / (0.33 + 0.33 + 0.33)$	1
$C(alt4, alt2)$	$((0.33 * 1) + (0.33 * 1) + (0.33 * 1)) / (0.33 + 0.33 + 0.33)$	1
$C(alt4, alt3)$	$((0.33 * 1) + (0.33 * 1) + (0.33 * 1)) / (0.33 + 0.33 + 0.33)$	1

Tabla 83 Concordancias globales (concentrado).

**Paso 3:** Calcular la discordancia individual.

En las **Tablas 84, 85 y 86** se muestran las discordancias individuales de la alternativa 1 con todas las demás.

$d_i(a, b_h) = d(alt1, alt2)$			
$g_1$	$75 > 70 - 10$	Verdadero	0
	$70 - 30 < 75 \leq 70 - 10$	Falso	
	$70 - 30 \geq 75$	Falso	
$g_2$	$67 > 75 - 11$	Verdadero	0
	$75 - 31 < 67 \leq 75 - 11$	Falso	
	$75 - 31 \geq 67$	Falso	
$g_3$	$85 > 80 - 12$	Verdadero	0
	$80 - 32 < 85 \leq 80 - 12$	Falso	
	$80 - 32 \geq 85$	Falso	

Tabla 84 Discordancia individual  $d(alt1, alt2)$ .

$d_i(a, b_h) = d(alt1, alt3)$			
$g_1$	$75 > 74 - 10$	Verdadero	0
	$74 - 30 < 75 \leq 74 - 10$	Falso	
	$74 - 30 \geq 75$	Falso	
$g_2$	$67 > 73 - 11$	Verdadero	0
	$73 - 31 < 67 \leq 73 - 11$	Falso	
	$73 - 31 \geq 67$	Falso	
$g_3$	$85 > 81 - 12$	Verdadero	0
	$81 - 32 < 85 \leq 81 - 12$	Falso	
	$81 - 32 \geq 85$	Falso	

Tabla 85 Discordancia individual  $d(alt1, alt3)$ .

$d_i(a, b_h) = d(alt1, alt4)$			
$g_1$	$75 > 78 - 10$	Verdadero	0
	$78 - 30 < 75 \leq 78 - 10$	Falso	
	$78 - 30 \geq 75$	Falso	
$g_2$	$67 > 76 - 11$	Verdadero	0
	$76 - 31 < 67 \leq 76 - 11$	Falso	
	$76 - 31 \geq 67$	Falso	
$g_3$	$85 > 84 - 12$	Verdadero	0
	$84 - 32 < 85 \leq 84 - 12$	Falso	
	$84 - 32 \geq 85$	Falso	

Tabla 86 Discordancia individual  $d(alt1, alt4)$ .

En las **Tablas 87, 88 y 89** se muestran las discordancias individuales de la alternativa 2 con todas las demás.

$d_i(a, b_h) = d(alt2, alt1)$			
$g_1$	$70 > 75 - 10$	Verdadero	0
	$75 - 30 < 70 \leq 75 - 10$	Falso	
	$75 - 30 \geq 70$	Falso	
$g_2$	$75 > 67 - 11$	Verdadero	0
	$67 - 31 < 75 \leq 67 - 11$	Falso	
	$67 - 31 \geq 75$	Falso	
$g_3$	$80 > 85 - 12$	Verdadero	0
	$85 - 32 < 80 \leq 85 - 12$	Falso	
	$85 - 32 \geq 80$	Falso	

Tabla 87 Discordancia individual  $d(alt2, alt1)$ .

$d_i(a, b_h) = d(alt2, alt3)$			
$g_1$	$70 > 74 - 10$	Verdadero	0
	$74 - 30 < 70 \leq 74 - 10$	Falso	
	$74 - 30 \geq 70$	Falso	
	$75 > 73 - 11$	Verdadero	

$g_2$	$73 - 31 < 75 \leq 73 - 11$	Falso	0
	$73 - 31 \geq 75$	Falso	
$g_3$	$80 > 81 - 12$	Verdadero	0
	$81 - 32 < 80 \leq 81 - 12$	Falso	
	$81 - 32 \geq 80$	Falso	

Tabla 88 Discordancia individual  $d(alt2, alt3)$ .

$d_i(a, b_h) = d(alt2, alt4)$			
$g_1$	$70 > 78 - 10$	Verdadero	0
	$78 - 30 < 70 \leq 78 - 10$	Falso	
	$78 - 30 \geq 70$	Falso	
$g_2$	$75 > 76 - 11$	Verdadero	0
	$76 - 31 < 75 \leq 76 - 11$	Falso	
	$76 - 31 \geq 75$	Falso	
$g_3$	$80 > 84 - 12$	Verdadero	0
	$84 - 32 < 80 \leq 84 - 12$	Falso	
	$84 - 32 \geq 80$	Falso	

Tabla 89 Discordancia individual  $d(alt2, alt4)$ .

En las **Tablas 90, 91 y 92** se muestran las discordancias individuales de la alternativa 3 con todas las demás.

$d_i(a, b_h) = d(alt3, alt1)$			
$g_1$	$74 > 75 - 10$	Verdadero	0
	$75 - 30 < 74 \leq 75 - 10$	Falso	
	$75 - 30 \geq 74$	Falso	
$g_2$	$73 > 67 - 11$	Verdadero	0
	$67 - 31 < 73 \leq 67 - 11$	Falso	
	$67 - 31 \geq 73$	Falso	
$g_3$	$81 > 85 - 12$	Verdadero	0
	$85 - 32 < 81 \leq 85 - 12$	Falso	
	$85 - 32 \geq 81$	Falso	

Tabla 90 Discordancia individual  $d(alt3, alt1)$ .

$d_i(a, b_h) = d(alt3, alt2)$			
$g_1$	$74 > 70 - 10$	Verdadero	0
	$70 - 30 < 74 \leq 70 - 10$	Falso	

	$70 - 30 \geq 74$	Falso	
$g_2$	$73 > 75 - 11$	Verdadero	0
	$75 - 31 < 73 \leq 75 - 11$	Falso	
	$75 - 31 \geq 73$	Falso	
$g_3$	$81 > 80 - 12$	Verdadero	0
	$80 - 32 < 81 \leq 80 - 12$	Falso	
	$80 - 32 \geq 81$	Falso	

Tabla 91 Discordancia individual  $d(alt3, alt2)$ .

$d_i(a, b_h) = d(alt3, alt4)$			
$g_1$	$74 > 78 - 10$	Verdadero	0
	$78 - 30 < 74 \leq 78 - 10$	Falso	
	$78 - 30 \geq 74$	Falso	
$g_2$	$73 > 76 - 11$	Verdadero	0
	$76 - 31 < 73 \leq 76 - 11$	Falso	
	$76 - 31 \geq 73$	Falso	
$g_3$	$81 > 84 - 12$	Verdadero	0
	$84 - 32 < 81 \leq 84 - 12$	Falso	
	$84 - 32 \geq 81$	Falso	

Tabla 92 Discordancia individual  $d(alt3, alt4)$ .

En las **Tablas 93, 94 y 95** se muestran las discordancias individuales de la alternativa 1 con todas las demás.

$d_i(a, b_h) = d(alt4, alt1)$			
$g_1$	$78 > 75 - 10$	Verdadero	0
	$75 - 30 < 78 \leq 75 - 10$	Falso	
	$75 - 30 \geq 78$	Falso	
$g_2$	$76 > 67 - 11$	Verdadero	0
	$67 - 31 < 76 \leq 67 - 11$	Falso	
	$67 - 31 \geq 76$	Falso	
$g_3$	$84 > 85 - 12$	Verdadero	0
	$85 - 32 < 84 \leq 85 - 12$	Falso	
	$85 - 32 \geq 84$	Falso	

Tabla 93 Discordancia individual  $d(alt4, alt1)$ .

$d_i(a, b_h) = d(alt4, alt2)$			
-------------------------------	--	--	--

$g_1$	$78 > 70 - 10$	Verdadero	0
	$70 - 30 < 78 \leq 70 - 10$	Falso	
	$70 - 30 \geq 78$	Falso	
$g_2$	$76 > 75 - 11$	Verdadero	0
	$75 - 31 < 76 \leq 75 - 11$	Falso	
	$75 - 31 \geq 76$	Falso	
$g_3$	$84 > 80 - 12$	Verdadero	0
	$80 - 32 < 84 \leq 80 - 12$	Falso	
	$80 - 32 \geq 84$	Falso	

Tabla 94 Discordancia individual  $d(\text{alt4}, \text{alt2})$ .

$d_i(a, b_h) = d(\text{alt4}, \text{alt3})$			
$g_1$	$78 > 74 - 10$	Verdadero	0
	$74 - 30 < 78 \leq 74 - 10$	Falso	
	$74 - 30 \geq 78$	Falso	
$g_2$	$76 > 73 - 11$	Verdadero	0
	$73 - 31 < 76 \leq 73 - 11$	Falso	
	$73 - 31 \geq 76$	Falso	
$g_3$	$84 > 81 - 12$	Verdadero	0
	$81 - 32 < 84 \leq 81 - 12$	Falso	
	$81 - 32 \geq 84$	Falso	

Tabla 95 Discordancia individual  $d(\text{alt4}, \text{alt3})$ .

Por último, el concentrado de los valores de la discordancia individual se muestra en la **Tabla 96**.

Discordancia Individual												
	alt 1			alt 2			alt 3			alt 4		
	g1	g2	g3									
alt 1				0	0	0	0	0	0	0	0	0
alt 2	0	0	0				0	0	0	0	0	0
alt 3	0	0	0	0	0	0				0	0	0
alt 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0			

Tabla 96 Discordancia individual (Concentrado).

**Paso 4:** Calcular el grado de credibilidad.

En este último paso se presenta en la **Tabla 97** el concentrado de los grados de credibilidad, en donde la parte en **negrita** se omite ya que para que se tomen en cuenta se debe de cumplir la siguiente condición  $d_j(\mathbf{a}, \mathbf{b}_h) > c(\mathbf{a}, \mathbf{b}_h)$ .

$\sigma(\mathbf{a}, \mathbf{b}_h)$		
$\sigma(alt1, alt2)$	<b>0.79</b> * $\left( \left( \frac{1-0}{1-0.79} \right) * \left( \frac{1-0}{1-0.79} \right) * \left( \frac{1-0}{1-0.79} \right) \right)$	0.79
$\sigma(alt1, alt3)$	<b>0.88</b> * $\left( \left( \frac{1-0}{1-0.88} \right) * \left( \frac{1-0}{1-0.88} \right) * \left( \frac{1-0}{1-0.88} \right) \right)$	0.88
$\sigma(alt1, alt4)$	<b>0.71</b> * $\left( \left( \frac{1-0}{1-0.71} \right) * \left( \frac{1-0}{1-0.71} \right) * \left( \frac{1-0}{1-0.71} \right) \right)$	0.71
$\sigma(alt2, alt1)$	<b>0.83</b> * $\left( \left( \frac{1-0}{1-0.83} \right) * \left( \frac{1-0}{1-0.83} \right) * \left( \frac{1-0}{1-0.83} \right) \right)$	0.83
$\sigma(alt2, alt3)$	<b>0.92</b> * $\left( \left( \frac{1-0}{1-0.92} \right) * \left( \frac{1-0}{1-0.92} \right) * \left( \frac{1-0}{1-0.92} \right) \right)$	0.92
$\sigma(alt2, alt4)$	<b>0.75</b> * $\left( \left( \frac{1-0}{1-0.75} \right) * \left( \frac{1-0}{1-0.75} \right) * \left( \frac{1-0}{1-0.75} \right) \right)$	0.75
$\sigma(alt3, alt1)$	<b>1</b> * $\left( \left( \frac{1-0}{1-1} \right) * \left( \frac{1-0}{1-1} \right) * \left( \frac{1-0}{1-1} \right) \right)$	1
$\sigma(alt3, alt2)$	<b>1</b> * $\left( \left( \frac{1-0}{1-1} \right) * \left( \frac{1-0}{1-1} \right) * \left( \frac{1-0}{1-1} \right) \right)$	1
$\sigma(alt3, alt4)$	<b>0.92</b> * $\left( \left( \frac{1-0}{1-0.92} \right) * \left( \frac{1-0}{1-0.92} \right) * \left( \frac{1-0}{1-0.92} \right) \right)$	0.92
$\sigma(alt4, alt1)$	<b>1</b> * $\left( \left( \frac{1-0}{1-1} \right) * \left( \frac{1-0}{1-1} \right) * \left( \frac{1-0}{1-1} \right) \right)$	1
$\sigma(alt4, alt2)$	<b>1</b> * $\left( \left( \frac{1-0}{1-1} \right) * \left( \frac{1-0}{1-1} \right) * \left( \frac{1-0}{1-1} \right) \right)$	1
$\sigma(alt4, alt3)$	<b>1</b> * $\left( \left( \frac{1-0}{1-1} \right) * \left( \frac{1-0}{1-1} \right) * \left( \frac{1-0}{1-1} \right) \right)$	1

Tabla 97 Grados de credibilidad (Concentrado).

## Anexo 3. Instancia *comp01.ctt*

Name: Fis0506-1  
Courses: 30  
Rooms: 6  
Days: 5  
Periods\_per\_day: 6  
Curricula: 14  
Constraints: 53

### COURSES:

c0001 t000 6 4 130  
c0002 t001 6 4 75  
c0004 t002 7 3 117  
c0005 t003 3 3 75  
c0014 t004 1 1 65  
c0015 t005 8 3 65  
c0016 t006 7 3 65  
c0017 t007 2 2 65  
c0024 t008 4 3 55  
c0025 t009 8 3 55  
c0078 t010 5 4 55  
c0030 t011 5 4 20  
c0031 t012 5 4 11  
c0032 t013 1 1 31  
c0033 t014 6 4 31  
c0057 t015 5 4 2  
c0058 t016 5 4 2  
c0059 t017 6 4 7  
c0061 t018 6 4 6  
c0062 t019 5 4 10  
c0063 t020 6 4 8  
c0064 t020 6 4 6  
c0065 t021 6 4 5  
c0066 t008 6 4 14  
c0067 t022 5 4 7  
c0068 t023 6 4 9  
c0069 t007 6 4 7  
c0070 t002 6 4 4  
c0071 t001 6 4 10  
c0072 t003 6 4 9

ROOMS:

B 200  
C 100  
E 9  
F 30  
G 20  
S 30

CURRICULA:

q000 4 c0001 c0002 c0004 c0005  
q001 4 c0014 c0015 c0016 c0017  
q002 4 c0024 c0025 c0001 c0078  
q003 3 c0030 c0032 c0033  
q004 3 c0031 c0032 c0033  
q005 3 c0070 c0066 c0072  
q006 2 c0057 c0059  
q007 2 c0061 c0062  
q008 3 c0065 c0059 c0072  
q009 4 c0063 c0064 c0066 c0071  
q010 3 c0058 c0063 c0068  
q011 3 c0069 c0067 c0068  
q012 1 c0004  
q013 3 c0062 c0066 c0071

UNAVAILABILITY\_CONSTRAINTS:

c0001 4 0  
c0001 4 1  
c0001 4 2  
c0001 4 3  
c0001 4 4  
c0001 4 5  
c0004 0 0  
c0004 0 1  
c0004 0 2  
c0004 0 3  
c0004 0 4  
c0004 0 5  
c0024 3 0  
c0024 3 1  
c0024 3 2  
c0024 3 3  
c0024 3 4  
c0024 3 5  
c0025 2 2  
c0025 2 3  
c0025 2 4  
c0025 2 5

c0025 3 0  
c0025 3 1  
c0025 3 2  
c0025 3 3  
c0025 3 4  
c0025 3 5  
c0033 3 2  
c0033 3 3  
c0033 3 4  
c0033 3 5  
c0033 4 0  
c0033 4 1  
c0033 4 2  
c0033 4 3  
c0033 4 4  
c0033 4 5  
c0071 0 0  
c0071 0 1  
c0071 0 2  
c0071 1 0  
c0071 1 1  
c0071 1 2  
c0071 2 0  
c0071 2 1  
c0071 2 2  
c0071 3 0  
c0071 3 1  
c0071 3 2  
c0071 4 0  
c0071 4 1  
c0071 4 2

END.

## Anexo 4. Transformación de *comp01.ctt*

6  
14  
30  
24  
5  
6  
30  
6  
6  
30  
30

0	R1	AULA
1	R2	AULA
2	R3	AULA
3	R4	AULA
4	R5	AULA
5	R6	AULA

0	111111	111111	111111	111111	111111
1	111111	111111	111111	111111	111111
2	111111	111111	111111	111111	111111
3	111111	111111	111111	111111	111111
4	111111	111111	111111	111111	111111
5	111111	111111	111111	111111	111111

0	q000
1	q001
2	q002
3	q003
4	q004
5	q005
6	q006
7	q007
8	q008
9	q009
10	q010
11	q011
12	q012
13	q013

0	111111	111111	111111	111111	111111
---	--------	--------	--------	--------	--------

1	111111	111111	111111	111111	111111
2	111111	111111	111111	111111	111111
3	111111	111111	111111	111111	111111
4	111111	111111	111111	111111	111111
5	111111	111111	111111	111111	111111
6	111111	111111	111111	111111	111111
7	111111	111111	111111	111111	111111
8	111111	111111	111111	111111	111111
9	111111	111111	111111	111111	111111
10	111111	111111	111111	111111	111111
11	111111	111111	111111	111111	111111
12	111111	111111	111111	111111	111111
13	111111	111111	111111	111111	111111

6000	0	1001	c0001	6	6	0	4000	4000
6001	0	1002	c0002	6	6	0	4001	4001
6002	0	1004	c0004	7	7	0	4002	4002
6003	0	1005	c0005	3	3	0	4003	4003
6004	1	1014	c0014	1	1	0	4004	4004
6005	1	1015	c0015	8	8	0	4005	4005
6006	1	1016	c0016	7	7	0	4006	4006
6007	1	1017	c0017	2	2	0	4007	4007
6008	2	1024	c0024	4	4	0	4008	4008
6009	2	1025	c0025	8	8	0	4009	4009
6010	2	1001	c0001	6	6	0	4000	4000
6011	2	1078	c0078	5	5	0	4010	4010
6012	3	1030	c0030	5	5	0	4011	4011
6013	3	1032	c0032	1	1	0	4013	4013
6014	3	1033	c0033	6	6	0	4014	4014
6015	4	1031	c0031	5	5	0	4012	4012
6016	4	1032	c0032	1	1	0	4013	4013
6017	4	1033	c0033	6	6	0	4014	4014
6018	5	1070	c0070	6	6	0	4002	4002
6019	5	1066	c0066	6	6	0	4008	4008
6020	5	1072	c0072	6	6	0	4003	4003
6021	6	1057	c0057	5	5	0	4015	4015
6022	6	1059	c0059	6	6	0	4017	4017
6023	7	1061	c0061	6	6	0	4018	4018
6024	7	1062	c0062	5	5	0	4019	4019
6025	8	1065	c0065	6	6	0	4021	4021
6026	8	1059	c0059	6	6	0	4017	4017
6027	8	1072	c0072	6	6	0	4003	4003
6028	9	1063	c0063	6	6	0	4020	4020
6029	9	1064	c0064	6	6	0	4020	4020
6030	9	1066	c0066	6	6	0	4008	4008
6031	9	1071	c0071	6	6	0	4001	4001
6032	10	1058	c0058	5	5	0	4016	4016

6033	10	1063	c0063	6	6	0	4020	4020
6034	10	1068	c0068	6	6	0	4023	4023
6035	11	1069	c0069	6	6	0	4007	4007
6036	11	1067	c0067	5	5	0	4022	4022
6037	11	1068	c0068	6	6	0	4023	4023
6038	12	1004	c0004	7	7	0	4002	4002
6039	13	1062	c0062	5	5	0	4019	4019
6039	13	1066	c0066	6	6	0	4008	4008
6039	13	1071	c0071	6	6	0	4001	4001

6000 111111  
6001 111111  
6002 111111  
6003 111111  
6004 111111  
6005 111111  
6006 111111  
6007 111111  
6008 111111  
6009 111111  
6010 111111  
6011 111111  
6012 111111  
6013 111111  
6014 111111  
6015 111111  
6016 111111  
6017 111111  
6018 111111  
6019 111111  
6020 111111  
6021 111111  
6022 111111  
6023 111111  
6024 111111  
6025 111111  
6026 111111  
6027 111111  
6028 111111  
6029 111111  
6030 111111  
6031 111111  
6032 111111  
6033 111111  
6034 111111  
6035 111111  
6036 111111

6037 111111  
6038 111111  
6039 111111  
6039 111111  
6039 111111

0 4000 t000 24  
1 4001 t001 24  
2 4002 t002 24  
3 4003 t003 24  
4 4004 t004 24  
5 4005 t005 24  
6 4006 t006 24  
7 4007 t007 24  
8 4008 t008 24  
9 4009 t009 24  
10 4010 t010 24  
11 4011 t011 24  
12 4012 t012 24  
13 4013 t013 24  
14 4014 t014 24  
15 4015 t015 24  
16 4016 t016 24  
17 4017 t017 24  
18 4018 t018 24  
19 4019 t019 24  
20 4020 t020 24  
21 4021 t021 24  
22 4022 t022 24  
23 4023 t023 24

4000	111111	111111	111111	111111	111111
4001	111111	111111	111111	111111	111111
4002	111111	111111	111111	111111	111111
4003	111111	111111	111111	111111	111111
4004	111111	111111	111111	111111	111111
4005	111111	111111	111111	111111	111111
4006	111111	111111	111111	111111	111111
4007	111111	111111	111111	111111	111111
4008	111111	111111	111111	111111	111111
4009	111111	111111	111111	111111	111111
4010	111111	111111	111111	111111	111111
4011	111111	111111	111111	111111	111111
4012	111111	111111	111111	111111	111111
4013	111111	111111	111111	111111	111111
4014	111111	111111	111111	111111	111111
4015	111111	111111	111111	111111	111111

4016	111111	111111	111111	111111	111111
4017	111111	111111	111111	111111	111111
4018	111111	111111	111111	111111	111111
4019	111111	111111	111111	111111	111111
4020	111111	111111	111111	111111	111111
4021	111111	111111	111111	111111	111111
4022	111111	111111	111111	111111	111111
4023	111111	111111	111111	111111	111111

4000	111111
4001	111111
4002	111111
4003	111111
4004	111111
4005	111111
4006	111111
4007	111111
4008	111111
4009	111111
4010	111111
4011	111111
4012	111111
4013	111111
4014	111111
4015	111111
4016	111111
4017	111111
4018	111111
4019	111111
4020	111111
4021	111111
4022	111111
4023	111111

4000	1001	0	0
4001	1002	1071	0
4002	1004	1070	0
4003	1005	1072	0
4004	1014	0	0
4005	1015	0	0
4006	1016	0	0
4007	1017	1069	0
4008	1024	1066	0
4009	1025	0	0
4010	1078	0	0
4011	1030	0	0
4012	1031	0	0

4013	1032	0	0
4014	1033	0	0
4015	1057	0	0
4016	1058	0	0
4017	1059	0	0
4018	1061	0	0
4019	1062	0	0
4020	1063	1064	0
4021	1065	0	0
4022	1067	0	0
4023	1068	0	0