ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.1224

Review of optimization techniques for scheduling school schedules

Daniel Alonzo Montes Carvajalino [1]; Rita Cecilia De la Hoz del Villar [1]; Jorge del Rio Cortina[1]; Alba Zulay Cárdenas Escobar[1]; Oriana Susana Martinez Palomino[1]
[1]Universidad Tecnológica de Bolivar, Colombia, *montesd@utb.edu.co, rdelahoz@utb.edu.co, jdelrio@utb.edu.co, acardenas@utb.edu.co, omartinez@utb.edu.co*

Abstract– ***The scheduling of timetables in school environments is one of the topics of greatest interest within the educational field, which is why a review of the techniques used for the scheduling of school timetables is presented, to identify them and compare some aspects that relate to them such as the quality of the solution, the execution time, the practical applicability and its limitations. For this purpose, current practices in creating school schedules are examined, as well as the tools and strategies used to improve efficiency and effectiveness in managing resources in educational institutions at various levels. The review initially addresses common challenges associated with school scheduling, including allocating limited resources, meeting the needs and preferences of students and teachers, and optimizing the distribution of teaching and learning time. The findings highlight that these techniques are valuable tools for educational management, which requires considering the specific constraints and limitations of each academic institution, in order to use the optimization technique that best suits the design and development of their school schedules.***

Keywords -- School timetable, Timetable assignment problem, Timetable optimization, Linear Programming, Optimization Algorithms.

Revisión de las técnicas de optimización para la programación de horarios escolares

Daniel Alonzo Montes Carvajalino, MBA[1]; Rita Cecilia De la Hoz del Villar, PhD [1]; Jorge del Rio Cortina, PhD[1]; Alba Zulay Cárdenas Escobar, MSc[1]; Oriana Susana Martinez Palomino MSc[1]
[1]Universidad Tecnológica de Bolivar, Colombia, *montesd@utb.edu.co, rdelahoz@utb.edu.co, jdelrio@utb.edu.co, acardenas@utb.edu.co, omartinez@utb.edu.co*

Resumen *– La programación de horarios en ambientes escolares es uno de los temas de mayor interés dentro del ámbito educativo, es por esto que se presenta una revisión de las técnicas utilizadas para la programación de horarios escolares, con el objetivo de identificarlas y comparar algunos aspectos que le relacionan tales como la calidad de la solución, el tiempo de ejecución, la aplicabilidad práctica y sus limitaciones. Para esto se examinan las prácticas actuales en la creación de horarios escolares, así como las herramientas y estrategias utilizadas para mejorar la eficiencia y la efectividad en la gestión de los recursos en instituciones educativas de diversos niveles. La revisión aborda inicialmente los desafíos comunes asociados con la programación de horarios escolares, incluyendo la asignación de recursos limitados, la satisfacción de las necesidades y preferencias de estudiantes y docentes, y la optimización de la distribución del tiempo de enseñanza y aprendizaje. Los hallazgos destacan que estas técnicas son herramientas valiosas para la gestión educativa, que requieren tener en cuenta las restricciones y limitaciones específicas de cada institución educativa, con el propósito de usar la técnica de optimización que mejor se adapte a la hora de diseñar y elaborar sus horarios escolares.*

Palabras Claves -- Horario Escolar, Problema de asignación de horarios, Optimización de horarios, Programación Lineal, Algoritmos de Optimización.

I. Introducción

La programación de horarios escolares es una tarea fundamental en la gestión de las instituciones académicas, ya que implica la asignación de recursos limitados, tales como: aulas, profesores, horarios, etc.; a un conjunto de actividades con restricciones y objetivos específicos [1]. La asignación de estos recursos son una tarea compleja y laboriosa que requiere de una planificación cuidadosa y una toma de decisiones basada en criterios y objetivos claros. Los errores en la programación de horarios escolares pueden tener consecuencias negativas en la calidad de la enseñanza y en la satisfacción de los estudiantes y profesores.

Debido a su complejidad y a las numerosas restricciones que se deben considerar, la programación de horarios escolares se caracteriza por la presencia de múltiples variables interdependientes, tales como la disponibilidad de profesores, el número estudiantes, el número de aulas disponibles, las preferencias de los profesores y estudiantes, las limitaciones de tiempo y espacio, entre otros [2]. Por tanto, la resolución de este tipo de problemas requiere de herramientas y técnicas avanzadas que permitan modelar y optimizar las diferentes variables y restricciones involucradas.

A pesar de la importancia de la programación de horarios escolares, la literatura especializada señala que un número importante de las instituciones académicas todavía utilizan métodos manuales para resolver este tipo de problemas [3]. Estos métodos pueden ser eficaces en situaciones sencillas o con un bajo número de restricciones, pero resultan ineficientes e insuficientes para la mayoría de los casos prácticos, dado que la evolución de los sistemas educativos es continua, y a menudo surgen nuevos retos que requieren de nuevos modelos y metodologías de solución.

Para abordar en este articulo la tarea de la optimización de recursos en la programación de horarios escolares, es fundamental revisar detenidamente las diversas técnicas empleadas en este ámbito, a través de una revisión crítica de la literatura especializada y del estudio de casos prácticos, buscando responder a la pregunta problema: ¿Cuáles son las técnicas utilizadas para optimizar los recursos en la programación de horarios escolares?, con la finalidad de identificarlas, compararlas y mostrar sus ventajas y desventajas.

II. Fundamentación Teórica

Los problemas de programación de horarios han sido ampliamente estudiados [1], [4] y [5] debido a su importancia práctica y teórica. En el ámbito educativo existen tres escenarios principales donde este se aplica:

- Programación de Horarios en Escuelas: Hace referencia a la construcción del cronograma de todas las clases de una escuela, evitando que los profesores se crucen con dos clases en el mismo momento.
- Programación de Horario de Cursos Universitarios: Hace referencia a la programación de todas las clases de un grupo de cursos universitarios, tratando de evitar

el solapamiento de las clases en cursos que tienen los mismos estudiantes.

- Calendario de Exámenes Universitarios: Hace referencia a la programación de los exámenes de un grupo de cursos universitarios, tratando de evitar el cruce de exámenes en cursos que tienen los mismos estudiantes [4].

La programación de horario en escuelas es el tema central en este artículo, esta temática representa un reto constante por la continua evolución del sistema educativo, y las múltiples restricciones que esta tiene tales como: la disponibilidad de docentes, tiempo mínimo entre asignaturas, preferencias de los estudiantes, disponibilidad de aulas, restricciones legales o normativas. Sin embargo, existen un conjunto de técnicas que abordan la optimización de recursos en la programación de horarios, las cuales son el principal objeto de estudio en el presente artículo.

Una de estas técnicas usada para la optimización de recursos en la programación de horario escolares, es la programación lineal, la cual es un método matemático usado para maximizar o minimizar una función lineal, es decir, es un método que busca encontrar la mejor solución a un problema en el que todas las funciones involucradas son lineales y las restricciones son expresadas como desigualdades o igualdades lineales [1]. La Programación Lineal ha demostrado ser efectiva para minimizar los desplazamientos de profesores entre aulas, optimizando el uso de recursos y reduciendo los tiempos muertos [3], como también ha mostrado modelos desarrollados que maximizan el número de bloques de dos horas consecutivas para una misma asignatura, favoreciendo el aprendizaje y la productividad [6] y [7]. Su implementación en la creación de aplicaciones, como MathProg, ha logrado generar horarios de forma automática, reduciendo el tiempo y esfuerzo del proceso [8]. Sin embargo, el uso de este método al considerar incorporar las preferencias de estudiantes, profesores y otras partes interesadas en el proceso de programación de horarios lo hace todo un reto, por lo que la programación de horarios escolares es un problema NP-completo, lo cual hace referencia a que encontrar un horario óptimo que satisfaga todas las restricciones es computacionalmente muy difícil por la misma complejidad del problema, esto significa que su resolución exacta es computacionalmente costosa para casos de gran tamaño [7], [9] y [10].

Las metaheurísticas son otro tipo de técnicas usadas para obtener soluciones de calidad, estas técnicas son un tipo especial de algoritmo de optimización diseñadas para encontrar soluciones a problemas complejos como los de programación de horarios [11]. Estas técnicas incluyen el recocido simulado, la búsqueda de vecindarios variables, los algoritmos genéticos, las optimizaciones de enjambre de gatos y la búsqueda tabú. Por ejemplo, El recocido simulado y la búsqueda de vecindarios variables han demostrado ser eficaces y escalables en instituciones educativas de diversos tamaños, incluyendo aquellas con una gran cantidad de estudiantes, profesores y asignaturas. Estas técnicas han sido aplicadas exitosamente en contextos universitarios, escuelas secundarias y otros entornos educativos con una alta complejidad en la programación de horarios. Sus capacidades permiten la resolución de problemas de programación en un plazo razonable, que normalmente oscila entre unas pocas horas y varios días, según el tamaño y la complejidad del problema [12] y [13]. Para el caso de los algoritmos genéticos, estos han conseguido soluciones de alta calidad en tiempos de 30 a 60 minutos para problemas de gran tamaño [12], mientras que, los algoritmos basados en enjambres de gatos, aunque no tienen tiempos de ejecución registrados, muestran ser eficientes, por su capacidad de explorar múltiples soluciones potenciales en paralelo y adaptarse dinámicamente a medida que se ejecutan [8]. Por último, la búsqueda tabú ha mostrado ser más lenta que algunos otros enfoques debido a la necesidad de explorar y evaluar múltiples vecindarios de soluciones, su capacidad para evitar quedarse atrapado en óptimos locales puede conducir a soluciones de mejor calidad en general [14].

Por otra parte, los algoritmos híbridos son otra alternativa en la optimización de recursos en la programación de horario escolares. Estos algoritmos se centran en combinar dos o más técnicas de optimización aprovechando sus fortalezas y adaptándolas a los requerimientos exigidos. Ellos han demostrado ser capaces de obtener soluciones de alta calidad en problemas de programación de horarios complejos, superando en muchos casos los resultados obtenidos con métodos tradicionales [15] y [16]. Por su misma naturaleza de flexibilidad y adaptabilidad, han mostrado reducciones significativas del tiempo de ejecución en la programación de horarios [15]. Todo este desarrollo en las técnicas de programación de horarios escolares ha generado un avance en la creación de herramientas informáticas especializadas, lo cual ha sido fundamental para agilizar la gestión de las instituciones educativas y, permitir a los administradores de las mismas, tomar decisiones que beneficien en mayor medida a las mismas.

Entre las herramientas utilizadas se encuentran LINGO un software de optimización matemática que permite modelar y resolver problemas de programación de horarios mediante técnicas como la programación lineal [17]. Así mismo, se encuentran algoritmos de Soft Computing los cuales son algoritmos que se han desarrollado empleando algunas metaheurísticas, como la búsqueda local iterada y la búsqueda de vecindario variable, para la optimización de horarios escolares. Estos algoritmos incorporan nuevas estructuras de solución que le permiten una búsqueda más eficaz [13]. Al igual que se utilizan lenguajes de programación, como MathProg y solucionadores de programación lineal como Gurobi y CPLEX, para codificar y resolver problemas de programación de horarios [18].

III. METODOLOGÍA

Este artículo presentará una revisión teórica de las diferentes técnicas empleadas en la programación de horarios en las escuelas, con el objetivo de identificarlas y comparar algunos aspectos que le relacionan tales como la calidad de la solución, el tiempo de ejecución, la aplicabilidad práctica y sus limitaciones. Además de esto, proporcionará una visión completa de la literatura científica existente en este campo de estudio.

Para la elaboración del artículo se recurrirá a fuentes de información secundarias correspondientes a investigaciones asociadas a la temática en mención. Para esto, se realizará una búsqueda exhaustiva en artículos publicados en revistas científicas indexadas en bases de datos con una amplia cobertura en la literatura científica como Scopus y Science Direct. Luego, se definirán los términos que se usarán en los motores de búsqueda, lo que implica seleccionar palabras claves relevantes y estrechamente vinculadas al tema de interés. Las palabras elegidas son: horario escolar, problema de asignación de horarios, optimización de horarios, programación lineal, algoritmos de optimización.

Para realizar esta búsqueda se tendrá en cuenta la combinación de estas palabras a través de operadores booleanos como AND y OR, buscando obtener así resultados precisos y relevantes. Todo esto llevará a plantear las ecuaciones de búsqueda que se usarán en las bases de datos ya mencionadas. Estas ecuaciones se presentan en la Tabla I.

TABLA I.
ECUACIONES DE BÚSQUEDA PARA BASE DE DATOS

Ecuaciones de Búsqueda
"school schedule" OR "school timetable" OR "school scheduling"
"scheduling problem" AND "school" AND "assignment"
"schedule optimization" OR "timetable optimization" OR "scheduling optimization"
"linear programming" AND "school schedule" OR "timetable"
("optimization algorithm" OR "optimization technique" OR "metaheuristic" OR "heuristic") AND ("school schedule" OR "timetable")

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Con la finalidad de refinar los resultados de la búsqueda en estas bases de datos, se aplicarán algunos filtros de búsqueda avanzados. Estos filtros de búsqueda se presentan en la Tabla II.

TABLA II.
FILTROS DE BÚSQUEDA PARA BASES DE DATOS.

Filtros de Búsqueda	
Fecha de Publicación	Últimos 10 años
Tipo de Documento	Artículo de revista, Revisión Bibliográfica, Tesis
Idioma	Español, inglés, portugués
Fuente	Revistas especializadas en educación o ciencias de la computación

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Para facilitar la organización y análisis de los resultados de la búsqueda, se exportarán dichos resultados a un formato bibliográfico en Excel en el que se revisarán los resúmenes de los artículos para identificar aquellos que se ajusten a los criterios de búsqueda. Luego, se seleccionarán los artículos más relevantes para el tema de investigación, con los que se hará una revisión profunda y critica de sus metodologías, resultados y conclusiones. De estos artículos se extraerá información clave como: Autores, título del artículo, fecha de publicación, metodología usada, principales hallazgos y conclusiones. Con esta estructura metodológica resultante se procederá analizar 40 artículos científicos, 1 tesis de pregrado, 3 tesis de maestría y 1 tesis doctoral.

Por último, es importante anotar que, para la elaboración de este documento, se utilizará la metodología de investigación de tipo descriptiva, ya que se destacarán los principales aportes hechos por los diversos autores consultados, mostrándose los logros y desarrollos que han alcanzado estas técnicas de optimización en la programación de horarios escolares, como el impacto que estas generan sobre el aprovechamiento de los recursos.

IV. RESULTADOS

En la educación, la construcción de un horario escolar es una tarea complicada ya que se debe tener en cuenta muchos factores, por ejemplo: la disponibilidad de los docentes, los tiempos de clases, las materias, las preferencias de los estudiantes, etcétera [19]. Para lograr soluciones que logren cumplir con los múltiples objetivos y que a su vez minimicen restricciones como los cruces, las interferencias o los solapamientos, la investigación científica ha desarrollado un conjunto de técnicas para una planificación óptima de los mismos.

Este artículo presenta una revisión exhaustiva de los hallazgos mostrados en una variedad de estudios sobre la optimización de los horarios escolares. Por tal razón, se presentan las técnicas usadas, como los resultados en cuanto a sus desarrollos y avances, con la finalidad de proveer una visión general del estado actual de la investigación en este campo.

A. Categorización de las técnicas de optimización para la programación de horarios escolares

De acuerdo a lo revisado en la literatura, las técnicas de optimización empleadas para abordar la problemática de la programación de horarios escolares, se pueden categorizar de la siguiente manera: Optimización Matemática, Heurística,

Matheurística, Metaheurística, Hiperheurísticos y Algoritmos Híbridos. Donde cada una de estas categorías, específicamente sus técnicas de optimización, logran adaptarse a las diferentes condiciones que presentan los horarios escolares en sus contextos particulares. En la Figura 1, se muestra dicha categorización esquematizada, donde se presentan puntualmente las técnicas buscan optimizar los recursos en la programación de horarios escolares. A continuación, se mencionan cada de ellas y se muestran los resultados y logros que han conseguido.

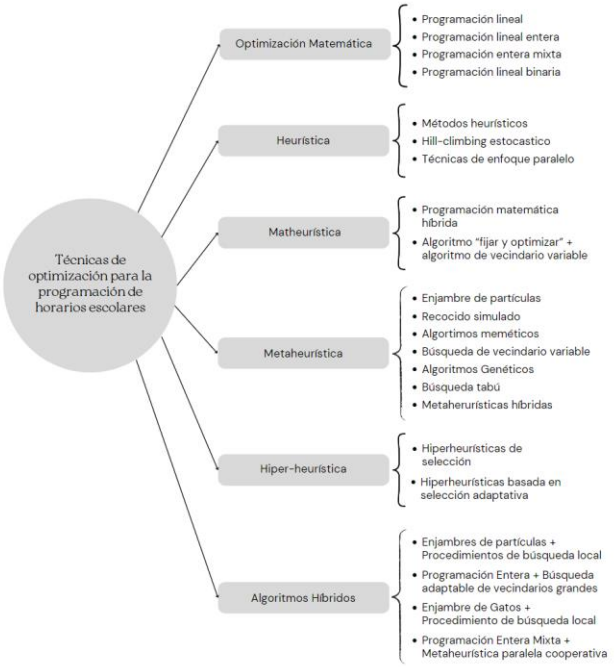


Fig. 1 Categorización de las técnicas de optimización de la programación de horarios escolares.

La optimización matemática se enfoca en encontrar soluciones óptimas a problemas que pueden ser expresados matemáticamente, y que, además, se apoya en programas computacionales o solvers especializados. Dentro de esta categoría se encuentran: la programación lineal, la programación lineal entera, la programación entera mixta y la programación lineal binaria.

Los resultados o alcances logrados por estas técnicas han sido muy satisfactorios, por ejemplo, a través de la programación lineal, se ha logrado reducir los traslados entre sedes de los profesores que se encuentran compartidos entre las mismas, como también ha generado horarios especiales para los docentes que imparten clases en jornada extendida [20] y [21]. Así mismo, logró mejores resultados, en algunos casos, con la división de los problemas por etapas, en donde cada etapa se aborda de manera especial, enfocándose en optimizar cada recurso de la institución para ir obteniendo soluciones factibles. Además, el desarrollo de aplicaciones web basadas en esta técnica mostró mejorías en el proceso de gestión de horarios y la reducción de los tiempos en el desarrollo de los mismos, sin embargo, se identificó que, al aumentar el tamaño del problema, el tiempo requerido por el software de optimización para encontrar la solución también se incrementaba [22].

1) Optimización Matemática: Las técnicas de programación lineal entera muestran ser muy competitivas en la resolución de problemas de programación de horarios, especialmente en las instancias más pequeñas [23]. Mientras que las técnicas de programación entera mixta han logrado reducir, en cierta medida, la cantidad de docentes en instituciones educativas mitigando el problema de sobrecontratación y sobrecostos que estas tienen, como también han mostrado maximizar la cantidad de bloques, de dos horas consecutivas, de la misma materia [6]. Dentro de esta técnica, el uso del enfoque de generación columnas, mostró una mayor eficiencia en la asignación de actividades dentro de un horario escolar, logrando en promedio resultados, 5 veces más rápido que lo presentado en la literatura, y 24 veces más rápido para las instancias de mayor tamaño, sin dejar a un lado en este enfoque que se minimizan los espacios vacíos o tiempos muertos entre las clases y las actividades [19].

Con esta técnica también se generaron horarios óptimos que satisfacen al 100% de los objetivos blandos propuestos por las instituciones educativas, lo cual representa una mejora promedio del 9,45% en comparación con las otras técnicas de optimización matemática [24]. Así mismo, se resalta que la programación lineal binaria también evidenció una mejora significativa de un 58% en la optimización de los recursos de programación de horarios en relación a la programación que se realiza manualmente en las instituciones [16].

2) Heurística: En la programación de horarios, las heurísticas se utilizan para abordar la complejidad del problema y generar soluciones factibles en un tiempo razonable. Dentro de las heurísticas encontradas en la literatura tenemos las técnicas heurísticas, hill-climbing estocástico y algunas técnicas de enfoque paralelo.

Las técnicas heurísticas han resuelto eficientemente el 95,5% y el 97,2% de los periodos vacíos para perturbaciones pequeñas y grandes, respectivamente, los cuales hacen referencia, a los intervalos de tiempo dentro de un horario que no están asignados a ninguna actividad o clase, además, este método ha logrado soluciones optimas en el 50% de los casos involucrados [25]. Sin embargo, al incluirle perturbaciones grandes al problema, no fueron suficientes 12 horas de cálculo para llegar a una solución óptima [25]. Mientras que, la heurística hill-climbing estocástica, ha logrado realizar esta labor con resultados de 30 minutos y 46 segundos, con un desvío estándar de 3 minutos y 48 segundos para la programación de horarios, esto lo mostró teniendo en cuenta las restricciones planteadas por la problemática.

Por último, los enfoques paralelos dentro de esta categoría es una herramienta que ha combinado los métodos de Memory Based Central y Memory Based Diversification - Intensification, obteniendo soluciones de mayor calidad en menos tiempo computacional que los enfoques secuenciales, lo cual se contrastó al superar la mayoría de las técnicas de esta categoría encontrados en el estado del arte [13].

3) Matheurística: Este tipo de algoritmo de optimización combina elementos de dos enfoques, optimización matemática y heurística, en la literatura se muestra la combinación de un algoritmo de "fijar y optimizar" con una heurística de descenso de vecindario variable, logrando soluciones optimas en el 42,2% de los problemas de programación de horarios intervenidos, con este valor se consiguió resultados iguales o mejores a los propuestos por la literatura en esta misma categoría.

4) Metaheurística: Las metaheurísticas son un tipo de técnica de optimización que utiliza estrategias de búsqueda generalizadas para encontrar soluciones de buena calidad a problemas complejos, en otras palabras, estas las metaheurísticas se centran en encontrar soluciones "suficientemente buenas" en tiempos razonables [5].

Dentro de esta categoría se encuentra en la literatura los algoritmos de enjambre de partículas, de recocido simulado, los algoritmos meméticos, genéticos, los de búsqueda de vecindario variable, búsqueda tabú, y algunos enfoques metaheurísticos híbridos.

Los algoritmos de enjambre de partículas han mostrado su capacidad de construir horarios de alta calidad en pocos minutos, la eficiencia y factibilidad de los mismos lo hacen un algoritmo competente ante la problemática de estudio [26]. De igual manera, los algoritmos de recocido simulado muestran soluciones factibles para el 42,1% de las instancias en las que se han usado, estos resultados han mostrado ser mejores que algunos solvers especializados con los que se han comparado, sin embargo, estos tienen un incremento en el costo computacional para resolver problemas de mayor complejidad. También en la literatura se evidencian los algoritmos de recocido simulado mejorado, los cuales han arrojado soluciones óptimas al satisfacer todos los requisitos de las restricciones duras y blandas de las instituciones, los tiempos de simulación promedio de acuerdo con la literatura son de 37,91 y 42,16 segundos.

Por otra parte, los algoritmos meméticos resuelven el problema de programación de horarios en un tiempo razonable, y logran cumplir con las expectativas y restricciones establecidas por el cuerpo docente. Al igual que los algoritmos genéticos, quienes son igualmente de satisfactorios en los tiempos de ejecución y son factibles y eficientes en sus resultados generados.

Los algoritmos de búsqueda de vecindario variable presentan un tiempo de ejecución más robusto y soluciones menos dispersas en comparación a otros tipos de algoritmos, tienen un 74% de efectividad al presentar soluciones a problemas de programación de horarios. Además, han logrado superar problemas propuestos por instancias internacionales y enfoques híbridos de recocido simulado y búsqueda local iterativa [11]. Mientras que, los algoritmos de búsqueda tabú han mostrado una tasa de satisfacción promedio superior al 90% con respecto a las restricciones blandas propuestas por las instituciones educativas [14]. Estos algoritmos también han sido combinados con algunos algoritmos exactos para lograr una mayor precisión, robustez y rendimiento en términos de tiempo, logrando superar algoritmos genéticos en un 45,12% y a los de búsqueda tabú en un 13,19%, por lo que destaca su capacidad para producir soluciones de alta calidad [27].

Por último, existen algunos enfoques metaheurísticos híbridos que logran adaptarse con mucha facilidad a cualquier situación problema. Los enfoques híbridos, especialmente la hibridación de búsqueda local y enfoques basados en población, han logrado un alto rendimiento en la resolución de estos problemas, muestran resultados óptimos y factibles en tiempos razonables [10]. Entre los enfoques híbridos más exitosos se encuentran la hibridación colaborativa del Recocido Simulado y la Búsqueda Tabú, así como la hibridación integrativa de Algoritmos Genéticos con búsqueda local y Búsqueda Tabú [10].

5) Hiperheurísticas: Muestran la gestión de un conjunto de heurísticas más simples obteniendo soluciones óptimas y muy cercanas a las óptimas. Se evidencia que son aplicables a una amplia gama de problemas de optimización por su capacidad de adaptabilidad. Los resultados muestran que obtienen desempeños superiores al de otros enfoques, especialmente en las instancias más grandes. Cumplen con los límites de tiempo establecidos al ser ejecutadas. La hiperheurística que combina permutación aleatoria con aceptación de movimiento por dique adaptativo, obtuvo los mejores resultados, al clasificarse en segundo lugar entre los

enfoques propuestos por competencias internacionales de horarios escolares [9].

6) Algoritmos Híbridos: Estos algoritmos mostraron resultados que superan ampliamente a otros en termino de calidad de soluciones, mostrando efectividades del 100%. Estos algoritmos han logrado evitar caer rápidamente en óptimos locales mostrando una mejora significativa durante el proceso evolutivo. Pueden tardar entre pocos minutos y 1 hora con 20 minutos, dependiendo de la dimensión del problema [1] y [26]. Exhiben un mejor rendimiento en menos tiempo de cálculo en comparación con la mayoría de los enfoques existentes, como Algoritmos Genéticos, Algoritmos Evolutivos, Recocido Simulado, Optimización por Enjambre de Partículas y Enjambre Artificial de Peces [28]. Además, han logrado incorporarlos en sistemas de gestión de aprendizajes de algunos países, como es el caso en Dinamarca, donde está disponible este algoritmo para más de 200 escuelas, siendo una opción atractiva para la programación de horarios [29].

También se han desarrollado modelos de selección de algoritmos obteniendo muy buenos desempeños en el cierre de brechas entre el mejor y peor algoritmo, lo cual muestra su utilidad y funcionalidad [30]. Otro gran logro es la estrategia de reparación de búsqueda de proximidad la cual puede reparar y optimizar casi todas las soluciones parciales inviables [5].

B. Análisis comparativo de las técnicas de optimización

Con el propósito de ofrecer un análisis más detallado de las técnicas de optimización presentadas, se realizó una comparación basada en cinco criterios claves: calidad de la solución, tiempo de ejecución, escalabilidad, adaptabilidad y limitantes o desventajas de las técnicas de optimización (ver Tabla III). Esta comparación permite entender no solo qué tan buenas son las técnicas en términos de resultado, sino también qué tan viables son en contextos reales.

Para el caso de la técnica de optimización matemática, esta se destaca por su alta precisión en la solución, pero no genera buenos resultados en términos de adaptabilidad y escalabilidad cuando se enfrenta a instituciones con muchos cursos o restricciones. Por ejemplo, esta técnica para instancias de tamaño moderado, el tiempo de ejecución puede variar entre 30 y 120 minutos, dependiendo de la complejidad del modelo y los recursos computacionales disponibles [21]. Además, es una técnica que puede alcanzar una satisfacción del 100% en las restricciones duras [16], las cuales hacen referencia a restricciones que se plantean en el modelo matemático de estricto cumplimiento. Esta se puede aplicar en instituciones con múltiples sedes y estructuras curriculares complejas.

TABLA III.
FILTROS DE BÚSQUEDA PARA BASES DE DATOS.

Categoría	Calidad de la Solución	Tiempo de Ejecución	Escalabilidad	Adaptabilidad	Limitantes o Desventajas
Optimización Matemática	Alta	Lento	Media	Baja	Requiere formulación precisa del problema, no es flexible.
Heurística	Variable	Rápido	Alta	Media	Soluciones no garantizadas, depende de la calidad de la heurística.
Matheurística	Alta	Variable	Alta	Alta	Combina ventajas de la optimización matemática y heurística, pero puede ser complejo de implementar.
Metaheurística	Alta	Variable	Alta	Alta	Eficaz en problemas complejos, pero puede requerir ajustes y esfuerzo de ajuste de parámetros.
Hiperheurísticos	Variable	Variable	Alta	Alta	Puede ser complejo de diseñar y ajustar.
Algoritmos Híbridos	Alta	Variable	Alta	Alta	Mayor complejidad en la implementación y ajuste de parámetros.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Mientras que los algoritmos metaheurísticos como el recocido simulado o los algoritmos genéticos, aunque no garantizan soluciones óptimas, ofrecen buenos resultados de calidad, tiempo de ejecución y adaptabilidad. En cuanto a los tiempos de ejecución, estos varían entre 5 y 60 minutos, dependiendo del algoritmo y la instancia del problema [12], alcanzan niveles superiores al 95% de satisfacción de restricciones duras, con una alta calidad en las soluciones generadas, además de ser eficaces, en la minimización de tiempos muertos [17]. Este tipo de técnica se puede aplicar en instituciones con énfasis en educación técnica o artística, donde las restricciones y preferencias son complejas y variadas.

Por otro lado, los algoritmos híbridos y las mateheuristicas, al combinar métodos exactos para aprovechar las fortalezas de los enfoques seleccionados, se consolidan como técnicas robustas, ya que muestran alta calidad de solución y adaptabilidad, esto las lleva a requerir de un mayor esfuerzo en su diseño e implementación [19]. Demoran entre 10 y 90 minutos en ejecución, dependiendo de la complejidad del problema y la implementación específica [26], tiene un porcentaje de satisfacción de restricciones superior al 98%, donde reducen casi el total de los solapamientos logrando soluciones altamente factibles y minimizan los tiempos muertos en los horarios [30]. Estas técnicas se pueden aplicar

en instituciones con múltiples sedes y con estructuras curriculares complejas.

Las heurísticas puras son útiles en entornos con pocos recursos computacionales, por lo que presentan mayores variaciones en la calidad final de la solución, las soluciones se generan en tiempos que oscilan entre segundos y pocos minutos, dependiendo del tamaño del problema [31], alcanzan niveles de satisfacción del 90%, logrando reducir solapamientos, aunque en algunos casos pueden estos pueden persistir, [13] además, tienen capacidad limitada para minimizar tiempos muertos [25]. Esta técnica se puede aplicar en escuelas rurales con recursos computacionales limitados, donde se requieren soluciones rápidas y aceptables.

Las hiperheurísticas operan a un nivel superior, seleccionando o generando heurísticas adecuadas para resolver problemas específicos, estas varían ampliamente en su tiempo de ejecución, desde minutos hasta horas, dependiendo de la complejidad del problema y la estrategia de selección utilizada [25]. Alcanzan niveles del 95% al 99%, con una alta adaptabilidad a diferentes problemas [27] y tiene la capacidad de reducir significativamente los solapamientos [10]. Este tipo de técnica se puede aplicar en entornos con alta rotación docente.

Lo anterior mostró que las técnicas de optimización para la programación de horarios son herramientas valiosas que se pueden usar para mejorar la gestión académica de las instituciones educativas, sin embargo, es importante tener en cuenta, que al desarrollar horarios académicos, se identifiquen las restricciones y limitaciones propias de cada contexto de las institución educativa, para seleccionar de manera estratégica la técnica de optimización que mejor se ajuste a los requerimientos, necesidades y objetivos de la institución.

C. Panorama de las técnicas de optimización para la programación de horarios escolares.

Una valiosa recopilación de las técnicas de optimización más recientes usadas para abordar los desafíos de la programación de horarios escolares se proporciona en la Tabla IV. La tabla abarca el período de los últimos 10 años, de 2014 a 2024, e incluye una amplia gama de enfoques, desde la programación matemática hasta los algoritmos híbridos. En ella se relacionan las técnicas usadas para la programación de horarios escolares, el autor que los citó y el año en que se publicó, mostrándose de esta manera un panorama general de las categorías que marcan una tendencia dentro del presente campo de investigación.

V. Discusión y Conclusiones.

Este artículo de revisión bibliográfica se enfoca en analizar las diversas técnicas de optimización para la programación de horarios escolares, revisando y comparando sus efectividades en términos de calidad de solución, tiempo de ejecución, aplicabilidad práctica y limitaciones. Los resultados presentados en este articulo son consistentes con los hallazgos de estudios previos que han evaluado la efectividad de las técnicas de optimización para la programación de horarios escolares.

En primer lugar, los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica mostraron que las técnicas de optimización matemática han sido utilizadas en este campo para la asignación óptima de recursos como aulas, profesores y tiempos de clase. Esto concuerda con lo expresado en [16], [22], y [29], cuyas investigaciones afirman que estas técnicas de optimización matemática, basadas en modelos matemáticos, han demostrado ser efectivas para resolver problemas de programación de horarios con restricciones específicas.

Al comparar los resultados con investigaciones similares, también se observa que la aplicación de técnicas heurísticas ha sido frecuente en la programación de horarios escolares [5] y [31]. Si bien las heurísticas pueden ofrecer soluciones rápidas, su calidad puede variar dependiendo de la complejidad del problema y de la configuración de las restricciones.

En cuanto a las matheurísticas y metaheurísticas, se ha encontrado que estas técnicas son especialmente útiles para abordar problemas de optimización combinatoria, como la programación de horarios escolares, donde múltiples variables y restricciones deben ser consideradas simultáneamente [5] y [30]. La capacidad de adaptación y búsqueda global de soluciones que ofrecen las metaheurísticas las convierte en herramientas apropiadas para resolver problemas complejos de programación de horarios.

Además, se ha observado un creciente interés en el desarrollo de hiperheurísticas y algoritmos híbridos en la programación de horarios escolares. Estas combinan diferentes técnicas de optimización, aprovechando las fortalezas de cada una para mejorar la calidad de las soluciones obtenidas [32].

En relación con los aspectos calidad de la solución, tiempo de ejecución, escalabilidad y adaptabilidad, se evidencia que son fundamentales para la implementación de la solución más óptima, que sí bien no aparecen de manera explícita en la literatura como lo expresan [1] y [4], se pueden deducir porque son atributos propios de la naturaleza de las técnicas de optimización que se requieren para lograr la idoneidad y eficacia de las soluciones en función de las necesidades específicas de cada contexto escolar.

En síntesis, este articulo presenta el conjunto de técnicas de optimización para la programación de horarios escolares y destaca la importancia de seleccionar y aplicar la técnica de optimización más adecuada, considerando las características específicas de cada problema y las necesidades particulares de cada institución educativa. Así mismo, presenta un panorama general del uso e implementación de las técnicas en diversos contextos y situaciones mostrando su evolución y desarrollo. El debate dialéctico entre los resultados obtenidos en esta investigación y los hallazgos de otros estudios refuerza la importancia de seguir explorando nuevas técnicas y enfoques, y/o desarrollando las ya existentes para mejorar la gestión de los recursos en el ámbito educativo.

VI. Oportunidades Para Futuras Investigaciones.

A partir del análisis realizado, se identifican diversos temas o líneas de investigación que podrían enriquecer el campo de estudio: Efectos de la optimización de horarios en el rendimiento académico y en la eficiencia institucional, Incorporación de la inteligencia artificial en la generación de horarios ajustados a contextos reales y Evaluación del impacto de los horarios escolares en la satisfacción docente recursos.

TABLA IV.
FILTROS DE BÚSQUEDA PARA BASES DE DATOS.

Año	Técnica o método	Autor
2014	Programación matemática híbrida Búsqueda de Vecindario Variable Modelo de programación lineal Algoritmos Genéticos	Dorneles et al. (2014) Fonseca y Santos (2014) Esquivel (2014) Neira (2014)
2015	Hiperheurísticas de selección Programación entera mixta + Generación de columnas Método de Programación entera Enjambre de Partículas + Enjambre de Peces Artificial	Ahmed et al. (2015) Al-Yakoob y Sherali (2015) Kristiansen et al. (2015) Katsaragakis et al. (2015)
2016	Generación de columnas Método heurístico Enjambre de Gatos + algoritmo de búsqueda local Búsqueda de Vecindario Variable + Programación Entera Programación matemática Programación entera mixta	Dorneles et al. (2016) Veenstra y Vis (2016) Skoullis et al (2016) Fonseca et al (2016) Canseco et al (2016) Marín y Maya (2016)
2017	Memory Based Central + Memory Based Diversification-Intensification Búsqueda Local Iterada + Búsqueda de Vecindad Variable Programación entera	Saviniec et al. (2017) Saviniec y Aparecido (2017) Fonseca et al. (2017)
2018	Programación lineal entera Programación lineal Búsqueda local paralela	Esquivel y Orjuela (2018) González (2018) y Peiró (2018) Savienic et al. (2018)
2019	Programación Entera Mixta +Metaheurística Paralela Cooperativa Hill-Climbing Estocástico Programación entera mixta Búsqueda de vecindad variable	Saviniec et al. (2019) Duran y Faillace (2019) López y Fino (2019) Teixeira et al. (2019)
2020	Programación lineal binaria Recocido Simulado + Algoritmos Genéticos Programación entera mixta	Pérez y Montenegro (2020) Odeniyi et al. (2020) Saviniec et al. (2020)
2021	Programación Entera Mixta + Programación por Restricciones Modelo Híbrido Programación Lineal	Siang et al. (2021) De la Rosa et al. (2021) Baquerizo (2021)
2022	Programación entera mixta	Crobu et al. (2022)
2023	Programación entera mixta Búsqueda tabú en dos fases Programación lineal entera mixta Meta-heurísticas híbridas	Saviniec et al. (2023) Sun y Wu (2023) Mallari et al. (2023) Abdipoor et al. (2023)
2024	Algoritmo de búsqueda tabú	Xiang et al. (2024)

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios por su guía y fortaleza durante todo este proceso. A mi esposa Adriana e hija Luciana, por su apoyo incondicional, comprensión y

paciencia. A la Dra. Rita De La Hoz, por su valiosa asesoría, orientación y tiempo dedicado. A la Universidad Tecnológica de Bolívar (UTB), por brindarme las herramientas, el entorno necesario y las oportunidades para llevar a cabo esta investigación.

REFERENCIAS

[1] Siang, J., Leng, S., Graham Kendall, G., Sabar, N. (2021). A survey of the state-of-the-art of optimization methodologies in school timetabling problems. *Expert Systems With Applications, 165*(1), 113943. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113943

[2] Sinisterra, L. (2024). Sistema de asignación de horarios utilizando herramientas de computación evolutiva para la distribución de las aulas de clases en la Universidad del Valle sede Zarzal (Tesis de Pregrado). Universidad del Valle, Zarzal.

[3] Esquivel, L., Orejuela. (2018). Programación de horario escolar con multi-localización y preferencias docentes. *Logos Ciencia & Tecnología, 11*(1), 2422 – 4200. http://dx.doi.org/10.22335/rlct.v11i1.621

[4] Ceschia, S. Gaspero, L. Sczaerf, A. (2023). Educational timetabling: Problems, benchmarks, and state-of-the-art results. *European Journal of Operational Research, 308*(1), 1-18. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.07.011

[5] Savienic, L., Santos, M., Costa, A., Dos Santos, L. (2020). Pattern-based models and a cooperative parallel metaheuristic for high school timetabling problems. *European Journal of Operational Research. 280*(3) 1064–1081. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.08.001

[6] Marín, Juan., Maya, P. (2016). Modelo lineal para la programación de clases en una institución educativa. *Ingeniería y Ciencia, 12*(23), 47 -71. http://www.eafit.edu.co/ingciencia

[7] Rodriguez, J., (2012). Aplicación de Algoritmos Meméticos en la Programación de Horarios de Clases (Tesis Maestría). UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO. Mayagüez.

[8] Sørensen, M., & Stidsen, T. R. (2012). High School Timetabling: Modeling and solving a large number of cases in Denmark. In Proceedings of the Ninth International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT 2012), 359-364.

[9] Leena, A., Ender, O., Ahmed, K. (2015). Solving high school timetabling problems worldwide using selection hyper-heuristics. *Expert Systems with Applications.* 42 (13), 5463–5471. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.02.059

[10] Abdipoor, S., Yaakob, R., Leng, S., Abdullah, S. (2023). Meta-heuristic approaches for the University Course Timetabling Problem. *Intelligent Systems with Applications*. 19, 200253. https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200253

[11] Fonseca, G., Santos, H. (2014). Variable Neighborhood Search based algorithms for high school timetabling. *Computers & Operations Research, 52* (B), 203 -208. https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.11.012

[12] Odeniyi1, O., Omidiora, E., Olabiyisi3, S., Oyeleye, A. (2020). A Mathematical Programming Model and Enhanced Simulated Annealing Algorithm for the School Timetabling Problem. *Asian Journal of Research in Computer Science, 5*(3), 21-38. https://10.9734/AJRCOS/2020/v5i330136

[13] Saviniec, L. Aparecido, A. (2017). Effective local search algorithms for high school timetabling problems. *Applied Soft Computing, 60*, 363-373. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.06.047

[14] Sun, Z., Wu, Q. (2023). Two-phase tabu search algorithm for solving Chinese high school timetabling problems under the new college entrance examination reform. *Data Science and Management. 6* (1) 55–63. https://doi.org/10.1016/j.dsm.2023.02.001

[15] Fonseca, G., Santos, H., Carrano, E., Stidsen, T. (2017). Integer Programming Techniques for Educational Timetabling, *European Journal of Operational Research, 262*(1), 28-39. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.020

[16] Perez, D., Montenegro, D. (2020). Development of a tool to schedule school timetabling through linear programming. *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology.* http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.104

[17] Gonzalez, B., Suarez, A. (2018). Desarrollo de un modelo de asignación de horarios en el entorno educativo mediante la programación lineal (tesis de Pregrado). Universidad Autonoma, Santiago de Cali.

[18] Tassopoulos, I. Beligiannis, G. (2020). Solving effectively the school timetabling problem using particle swarm optimization. *Expert Systems with Applications, 39*(5), 6029-6040. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.12.013

[19] Dorneles, A. Araujo, O. Buriol, L. (2017). A column generation approach to high school timetabling modeled as a multicommodity flow problema. *European Journal of Operational Research, 256*(3), 685 – 695. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.002

[20] Esquivel, L. (2014). Modelo matemático para la programación de un horario escolar con multi-localización de docentes (Tesis de maestría). Universidad del Valle. Santiago de Cali.

[21] Lopez, L., Fino, A. (2019). Formulación de una propuesta para la programación de horarios en el Colegio Sagrado Corazón (Tesis Pregrado). Universidad de la Salle. Bogotá.

[22] Baquerizo, J. (2021). "Aplicación web para la automatización y gestión de horarios de clases mediante algoritmos basados en el modelo de programación lineal en la escuela 'Lic. Angélica Villón Lindao'" (Tesis de Pregrado). Universidad Estatal Península de Santa Elena, la Libertad.

[23] Kristiansen, S., Sorensen, M., Stidsen, T. (2015). Integer programming for the generalized high school timetabling problem. *Journal of Scheduling, 18*(4), 377-392. https://doi.org/10.1007/s10951-014-0405-x

[24] Mallari, C., San Juan, J., Li, R. (2023). The university coursework timetabling problem: An optimization approach to synchronizing course calendars. *Computers & Industrial Engineering. 184*, 109561. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109561

[25] Veenstra, M., Vis, I., (2016). School timetabling problem under disturbances. *Computers & Industrial Engineering, 95*, 175 -186. https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.02.011

[26] Tassopoulos, I. Beligiannis, G. (2012). A hybrid particle swarm optimization based algorithm for high school timetabling problems. *Applied Soft Computing, 12*(11), 3472-3489. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.05.029

[27] Xiang, K., Hu, X., Yu, M., Wang, X. (2024). Exact and heuristic methods for a university course scheduling problem. *Expert Systems With Applications. 248*, 123383. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123383

[28] Skoullis, V., Tassopoulos, I., Beligiannis, G., (2016). Solving the high school timetabling problem using a hybrid cat swarm optimization-based algorithm. *Applied Soft Computing, 52*, 277-289. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.10.038

[29] Sorensen, M., Stidsen, T. (2013). Comparing Solution Approaches for a Complete Model of High School Timetabling. *DTU Management Engineering.* DTU Management Engineering Report No. 5.2013.

[30] De la Rosa, F., Nuñez, Jose., Ortiz, J., Terashima, H., (2021). Algorithm selection for solving educational timetabling problems. *Expert Systems With Applications, 174*, 114694. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114694

[31] Duran, G., Faillace, N. (2019). Implementación de una heurística para la programación automática de horarios de una escuela secundaria. *Ingeniería de Sistemas, 33.*

[32] Ahmed, L. Özcan, E. Kheiri, A. (2015). Solving high school timetabling problems worldwide using selection hyper-heuristics. *Expert Systems with Applications, 42*(13), 5463 – 5471. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.02.059