Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Industrial y Sistemas
ICS1113-Optimización

Informe 3

Operación Deyse

Grupo 30

Andrés Errázuriz Demaría- 22638199 - sección 4
Samuel Frías Bezmalinovic - 22641629 - sección 4
Tomás Gellona Giroz - 22639731 - sección 3
Martín Muñoz Varas - 22637575 - sección 3
Emilio Sánchez Barja - 22639780 - sección 4
Clemente Valenzuela Larraín - 22643281 - sección 4

Fecha entrega: 3 de Junio de 2024

Índice

1. Descripción del Problema

1.1. Descripción completa y contexto

El problema elegido corresponde a minimizar el tiempo de evacuación durante la Operación Deyse (De evacuación y seguridad escolar). Esta operación, ahora llamada Plan Integral de Seguridad Escolar, fue organizada por la ONEMI en 1977 con el objetivo de garantizar la seguridad de los escolares chilenos ante fenómenos naturales.

Se realizan varias etapas que permiten la correcta elaboración del plan; primero, se conforma el Comité de Seguridad Escolar del establecimiento, luego se desarrolla un diagnóstico de amenazas, vulnerabilidades y capacidades del recinto; y finalmente, se elaboran programas de prevención, y planes de respuesta para cada riesgo identificado.

Entre los principales desafíos para la elaboración del plan, está considerar la infraestructura de cada establecimiento para poder definir las distintas zonas seguras a las que los estudiantes deben evacuar, y también definir cómo se desplazarán los estudiantes para llevarlos a la zona de manera eficiente. El tomador de decisiones en este caso, sería el Comité de Seguridad Escolar del establecimiento, encargado de crear el protocolo de evacuación en los recintos escolares. Para su planificación, se deben considerar factores como la cantidad de cursos, cantidad de alumnos por curso, cantidad y tamaño de zonas seguras, y rutas entre cada sala y las zonas seguras.

1.2. Impacto

La operación Deyse es fundamental para la seguridad y protección de las vidas de los estudiantes dentro de establecimientos educacionales. Minimizar el tiempo en el que los colegios realizan esta operación es muy valioso, porque si se realiza un simulacro en condiciones similares a la emergencia, se genera un sentido de preparación en las personas que les permite tener el comportamiento adecuado en la emergencia real. Esto aumenta la conciencia sobre la importancia de tener planes de evacuación y procedimientos de seguridad establecidos, lo que eventualmente puede salvar vidas, que es lo verdaderamente valioso de nuestro modelo.

Un beneficio colateral, es el tiempo que se ahorra en los simulacros el cual puede ser destinado a tiempo de aprendizaje en las salas de clase. Así los colegios disponen de más horas destinadas a educar a sus estudiantes. Un simulacro más rápido significa un uso más eficiente de los recursos del colegio, como lo es el personal. Todo esto conlleva a un ahorro de costos para las instituciones educativas.

Intentando cuantificar el valor, en el terremoto de Valdivia de 1960, ocurrido a las 15:11 de la tarde (en horario escolar), hubo más de 2.000 personas muertas, millones de damnificados y daños severos en los caminos y edificaciones (BBC, 2020). A grueso modo, teniendo en cuenta que la población chilena de aquel entonces eran 8 millones de personas (Datosmacro, s.f.) y suponiendo que un décimo de la población iba al colegio, estamos ante cerca de 200 muertos que pueden haber sido escolares. Ahí se ve la importancia de tener un plan eficiente en el cual cada minuto cuenta para prevenir muertes y heridos.

Por otra parte, digamos que se realizan en promedio 3 simulacros al año y que cada uno se demora un total de 35 minutos en promedio. En Chile, cerca de 3,3 millones de personas asisten al colegio como estudiantes (Mineduc, 2024) por lo tanto si logramos reducir solo 5 minutos del simulacro, serían 15 minutos más de clase para cada uno de los estudiantes de Chile, lo que equivaldría a 825 000 horas más de aprendizaje en total para el país. Esto aumenta el conocimiento y la educación general, al mismo tiempo que disminuye las lesiones y muertes por accidentes en simulacros y emergencias reales.

1.3. Objetivo

Se propone un modelo de optimización que le permite al **comité de seguridad escolar** minimizar el tiempo que le toma realizar la operación Deyse en su establecimiento educacional, siguiendo todos los requerimientos de seguridad asociados a esta y tomando en cuenta las condiciones y contexto de los alumnos y funcionarios. Dentro de estas condiciones encontramos la edad, la posible presencia de una persona con discapacidad o movilidad reducida que resultan en una variaciones de la velocidad máxima de movimiento del curso como conjunto.

Además, se toma en consideración la infraestructura del establecimiento, fijándose si dos pasillos se encuentran conectados, si un pasillo llega a una zona de seguridad, la distancia de estos, si son o no aptos para personas con discapacidad y la capacidad máxima de personas que pueden haber en este. Los pasillos serían considerados como líneas, van de un lugar a otro, y las bifurcaciones e intersecciones darían paso a dos o más pasillos distintos.

La realización de esta operación tiene cuatro variables de decisión asociadas. En primer lugar tenemos s_c que representa el tiempo en que cada curso c sale de su sala. En segundo lugar se encuentra p_{ict}, una variable binaria que toma el valor 1 si el pasillo i es usado por el curso c en el tiempo t, y 0 en otro caso. En tercer lugar se tiene la variable u_{ict}, variable binaria que toma el valor 1 si cuando el pasillo i comienza a ser transitado por el curso c en el segundo t y 0 en otro caso. Por último, se define λ que indica el tiempo en que todos los cursos se encuentran en alguna zona segura, es decir, la operación Deyse ha terminado.

El proceso de decisiones está ligado a diferentes restricciones con el objetivo de delimitar y restringir el problema de acuerdo a su contexto, complejidad y naturaleza. Debido a la limitaciones físicas, consideramos las siguientes restricciones: la cantidad de personas en un pasillo no puede superar la capacidad de este, un curso que pasa por un pasillo debe tener por lo menos 1 pasillo de origen y 1 de destino, a menos de que este sea el primero o último, y deben pasar por su pasillo de origen, los cursos deben estar en un único lugar, es decir no en más de un pasillo al mismo tiempo, los cursos que presenten personas con discapacidad sólo podrán pasar por pasillos habilitados para estas, las zonas de seguridad no pueden recibir a más cursos que su capacidad y el tiempo que toma a un curso recorrer un pasillo debe ser mayor o igual al largo del pasillo dividido por la velocidad de este. Por otro lado, tenemos restricciones de carácter administrativo, como es que todos los cursos deben llegar a una zona de seguridad y que los responsables de zona de seguridad lleguen a su zona indicada, ya que existen ciertos profesores que deben de llegar a cierta zona puesto que son encargados de esta.

2. Modelación del Problema

2.1. Conjuntos

- C : cursos del colegio $\{1, ..., c\}$
- I : pasillos del colegio $\{1, ..., i\}$
- Y : zonas de seguridad del clegio $\{1, ..., y\}$
- T : tiempo en segundos $\{1, ..., t\}$

2.2. Variables

- s_c: Tiempo que el curso c espera antes de salir de su sala
- $p_{ict} : \begin{cases} 1 & \text{si el pasillo } i \text{ es usado por el curso } c \text{ en el tiempo } t \\ 0 & e.o.c \end{cases}$

- $u_{ict}: \begin{cases} 1 & \text{si el curso } c \text{ comienza a usar (pasar) por el pasillo } i \text{ en el tiempo } t \\ 0 & e.o.c \end{cases}$
- λ : Tiempo en el que todos los cursos se encuentran en zona segura. La operación Deyse se terminó.

2.3. Parámetros

- $z_{iy}: \begin{cases} 1 & \text{si el pasillo } i \text{ llega a una zona segura } y \\ 0 & e.o.c \end{cases}$

  Por definición de pasillo, este parámetro sólo puede ser igual a 1 en a lo más una zona de seguridad para un pasillo dado.
- $c_{ij}: \begin{cases} 1 & \text{si los pasillos } i \text{ y } j \text{ están conectados (no direccionado)} \\ 0 & e.o.c \end{cases}$
- d_i : distancia (largo) pasillo i.
- v_{ci} : velocidad máxima del curso c en el pasillo i.
- $\theta_{ic}: \begin{cases} 1 & \text{si el pasillo } i \text{ es de origen del curso } c \\ 0 & e.o.c \end{cases}$
- k_i : capacidad de personas en el pasillo i.
- n_c : cantidad de personas en el curso c.
- q_y : capacidad máxima de zona segura y.
- $m_c: \begin{cases} 1 & \text{si el curso } c \text{ tiene personas discapacitadas (minusválidos)} \\ 0 & e.o.c \end{cases}$
- $a_i: \begin{cases} 1 & \text{si pasillo } i \text{ apto para discapacitados} \\ 0 & e.o.c \end{cases}$
- $r_{cy}: \begin{cases} 1 & \text{si dentro del curso } c \text{ se encuentra el responsable de la zona de seguridad } y \\ 0 & e.o.c \end{cases}$

2.4. Función Objetivo

$$min \quad \lambda$$

2.5. Restricciones

1. El momento en que el último curso llega a una zona segura.

$$\lambda \geq s_c + \sum_i \sum_t p_{ict} \quad \forall c$$

2. Las personas en un pasillo no exceden el máximo.

$$\sum_c p_{ict} \cdot n_c \leq k_i \quad \forall i \forall t$$

3. El tiempo en un pasillo es mayor o igual a la distancia del pasillo dividida por la velocidad máxima del curso.

$$\sum_{\sigma=t}^{t+\frac{d_i}{v_{ci}}} p_{ic\sigma} \geq \frac{d_i}{v_{ci}} \cdot u_{ict} \quad \forall c \forall i \forall t$$

4. Un curso que pasa por un pasillo debe tener uno de origen, a menos que este sea el primero.

$$u_{ict} \leq \theta_{ic} + \sum_{j \neq i} c_{ij} \cdot p_{jc(t-1)} \quad \forall c \forall i \forall (t \geq 1)$$

5. Todos los cursos llegan a una zona de seguridad.

$$1 = \sum_t \sum_i \sum_y u_{ict} \cdot z_{iy} \quad \forall c$$

6. Todos los cursos pasan por su pasillo de origen.

$$\theta_{ci} \leq \sum_t u_{ict} \quad \forall c \forall i$$

7. Las zonas de seguridad no rebalsan.

$$\sum_t \sum_c \sum_i u_{ict} \cdot z_{iy} \cdot n_c \leq q_y \quad \forall y$$

8. Si un curso ya salió de su sala, debe estar en algún pasillo que no lleva a una zona segura o debe haber comenzado a recorrer un pasillo que lleva a una zona segura (esta en camino o ya llego)

$$\sum_{\sigma=1}^{t} \sum_i \theta_{ic} \cdot u_{ic\sigma} \leq \sum_i \sum_y (1 - z_{iy}) \cdot p_{ict} + \sum_{\sigma=1}^{t} \sum_i \sum_y z_{iy} \cdot u_{ic\sigma} \quad \forall t \forall c$$

El pasillo de origen es el primero que se recorre.

$$\sum_{\sigma=1}^{t} u_{ict} \leq \sum_{\sigma=1}^{t} \sum_{j \in I} \theta_{jc} \cdot u_{jc\sigma} \quad \forall t \forall c \forall i$$

9. Cada curso está en máximo un pasillo a la vez.

$$\sum_i p_{ict} \leq 1 \quad \forall t \forall c$$

10. Cursos con discapacitados solo pueden pasar por pasillos aptos.

$$\sum_t u_{ict} \cdot m_c \leq a_i \quad \forall c \forall i$$

11. Los responsables de zona van sí o sí a su zona.

$$\sum_t \sum_c \sum_i r_{cy} \cdot u_{ict} \cdot z_{iy} \geq \sum_c r_{cy} \quad \forall y$$

12. Un curso pasa por un pasillo máximo una vez.

$$\sum_t u_{ict} \leq 1 \quad \forall c \forall i$$

13. Un curso puede estar en un pasillo si lo empieza a recorrer o si ya estaba en ese pasillo.

$$p_{ict} \leq u_{ict} + p_{ic(t-1)} \quad \forall i \forall c \forall (t \geq 1)$$

14. s_c corresponde al tiempo que el curso c espera en su sala antes de comenzar a recorrer su pasillo de origen.

$$\sum_t \left(1 - \sum_{\sigma=1}^{t} \sum_i \left(\theta_{ic} \cdot u_{ic\sigma} \right) \right) = s_c \quad \forall c$$

15. Los cursos no pueden empezar ocupando un pasillo.

$$p_{ic0},\ u_{ic0} = 0 \quad \forall i, \forall c$$

16. λ se encuentra dentro de T.

$$\lambda \leq \sum_c \sum_i \frac{d_i}{v_{ci}}$$

2.6. Naturaleza de las variables

- $s_c \leq 0 \qquad ; \forall c \in C$
- $p_{ict} \in \{0, 1\} \quad ; \forall i \in I\ \forall c \in C\ \forall t \in T$
- $u_{ict} \in \{0, 1\} \quad ; \forall i \in I\ \forall c \in C\ \forall t \in T$
- $\lambda \leq 0$

3. Origen y contextualización de Datos

A continuación se presentan 4 distintos establecimientos para probar el modelo:

- parametros_enano: modelo con 2 cursos, 5 pasillos y 2 zonas seguras.
- parametros_chico: modelo con 3 cursos, 9 pasillos y 3 zonas seguras.
- parametros_mediano: modelo con 6 cursos, 18 pasillos y 4 zonas seguras.
- parametros_dsla_parvulario : modelo basado en el colegio alemán de Los Ángeles.

Figura 1: Logo del establecimiento modelado

El Colegio Alemán de Los Ángeles es un establecimiento educacional ubicado en Los Ángeles, región del Bío Bío, para la elaboración del modelo, nos centraremos en su edificio de educación preescolar, este cuenta con 13 cursos y 3 zonas seguras, en el modelo se definen 36 pasillos. A continuación se tiene un mapa del establecimiento:

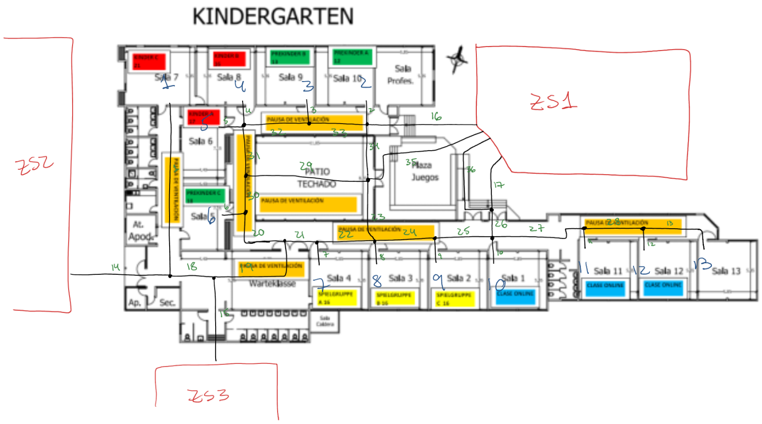


Figura 2: Mapa del edificio

Para tener una mejor visualización del modelo, se tiene a continuación un mapa de los pasillos y salas según lo escrito en los datos del modelo.

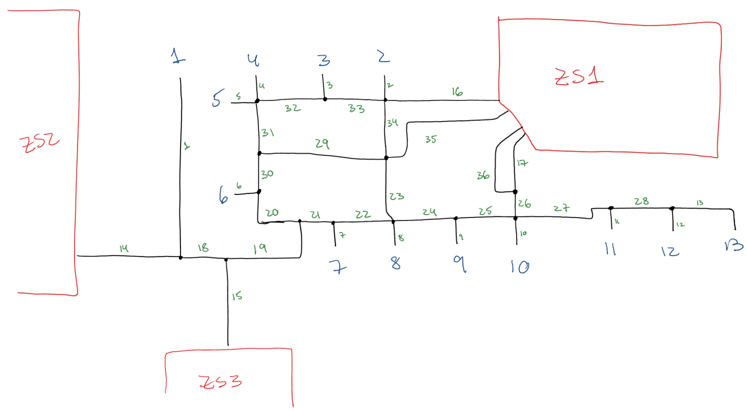


Figura 3: Diagrama del establecimiento

Supuestos Adicionales

- Se consideraron periodos t correspondientes a 5 segundos reales; es decir en $t = 4$ se corresponde a 20 segundos iniciada la operación.

- La velocidad de movimiento de los alumnos fue de 1 m/s para todos los cursos, considerando los periodos de 5 segundos, es de $5m/5s$

- El cursos con discapacitados es el número 13, esto es un supuesto para probar todas las restricciones del modelo.

- Los pasillos que no permiten discapacitados son: 16, 17 y 35, que son los que tienen escaleras.

- Los responsables de cada zona de seguridad son: el de la primera zona está en el curso 11, el de la zona 2 en el curso 1, y el de la zona 3 está en el curso 6 (Esto se encuentra también en los archivos . csv).

4. Formato Datos

4.1. cantidad_curso.csv

Archivo con 1 columna y $|C|$ filas, donde el valor en cada fila corresponde a la cantidad n_c de personas en el curso.

4.2. capacidad_pasillos.csv

Archivo con 1 columna y $|I|$ filas, donde el valor en cada fila corresponde a la capacidad k_i de personas en un pasillo.

4.3. capacidad_zona.csv

Archivo con 1 columna y $|Y|$ filas, donde el valor en cada fila corresponde a la capacidad q_y máxima de personas en una zona segura.

4.4. conexion_pasillos.csv

Archivo con $|I|$ filas y $|I|$ columnas, en donde el valor en cada posición corresponde a c_{ij} indicando (de forma binaria) si los pasillos están conectados.

4.5. discapacitado_curso.csv

Archivo con 1 columna y $|C|$ filas, donde el valor en cada fila corresponde a la binaria m_c si el curso tiene minusválidos o no.

4.6. discapacitado_pasillo.csv

Archivo con 1 columna y $|I|$ filas, donde el valor en cada fila corresponde a la binaria a_i si el pasillo es apto para minusválidos o no.

4.7. distancia_pasillos.csv

Archivo con 1 columna y $|I|$ filas, donde el valor en cada fila corresponde a la distancia d_i del pasillo a recorrer.

4.8. pasillo_llega_zona_segura.csv

Archivo con $|I|$ filas y $|Y|$ columnas, en donde el valor en cada posición corresponde a z_{iy} indicando (de forma binaria) si el pasillo llega o no a esa zona segura.

4.9. pasillo_origen.csv

Archivo con $|I|$ filas y $|C|$ columnas, en donde el valor en cada posición corresponde a θ_{ic} indicando (de forma binaria) si el pasillo es el pasillo de origen de ese curso.

4.10. responsable_zona_curso.csv

Archivo con $|C|$ filas y $|Y|$ columnas, en donde el valor en cada posición corresponde a r_{cy} indicando (de forma binaria) si el pasillo es el pasillo de origen de ese curso.

4.11. velocidad_curso.csv

Archivo con una matriz de $|C|$ filas y $|I|$ columnas. Contiene la información del parámetro v_{ci}, en donde cada posición indica la velocidad máxima de cada curso c en el pasillo i específico

5. Resultados

El resultado obtenido por la implementación computacional fue de $\lambda = 14$ equivalente a 14 periodos de 5 segundos, es decir, el tiempo mínimo que se tarda en llevar a los 13 cursos a la zona segura sería de 1 minuto y 10 segundos.

En Anexo 1, se encuentra una tabla que indica el mapeo de la variable x para cada tiempo en casa pasillo, indicando en qué momento cuáles cursos comienzan a utilizar cierto pasillo.
Con esta tabla podemos determinar el camino recorrido por cada curso a través del tiempo, por ejemplo, para el curso 13: este sería el camino que debe tomar.

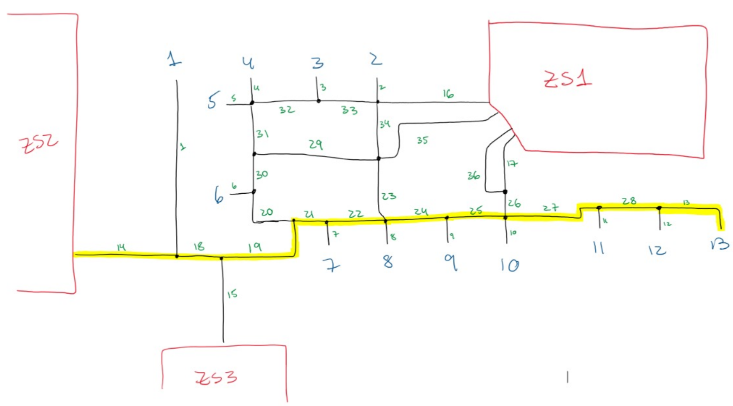


Figura 4: Recorrido curso 13

6. Validación de Resultados

6.1. Factibilidad y optimalidad de la solución

La solución obtenida $\lambda = 14$, es decir, 1 minuto y 10 segundos es factible porque, primero cumple con las 16 restricciones aparte de las de naturaleza de las variables, los cursos con discapacitados no utilizan caminos indebidos, cada jefe de una zona segura llega a la que le corresponde y todos los cursos terminan en una zona segura al final de la operación.

Los valores son realistas porque es posible hacer caminar a los cursos a una velocidad de $1m/s$. La solución es óptima debido a que dentro de todas las otras soluciones efectivas del modelo, esta es la que entrega el valor mínimo para el tiempo en que el último curso del establecimiento llega a una zona segura. Considerando la representación de la solución. Además, se puede asegurar que la solución es factible ya que según las distancias definidas para los pasillos y la velocidad determinada para los cursos, los tiempos obtenidos para cada curso son posibles. Por ejemplo, si se analiza el recorrido realizado por el curso 13 se obtiene que recorren 53 metros en 70 segundos, y teniendo que la velocidad promedio de un niño es de $1m/s$ se puede concluir que la solución es factible.

6.2. Valoración Cuantitativa del potencial de Implementación de la solución en la Operación DEYSE en el Colegio Alemán de Los Ángeles

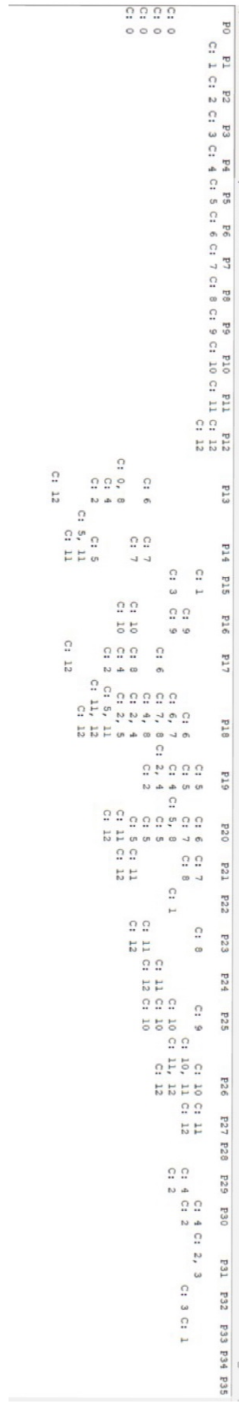
La implementación de esta solución conlleva diversos beneficios cuantificables que pueden tener un impacto significativo en la seguridad y eficiencia de la institución. Particularmente el proyecto tiene injerencia en el ahorro de costos, la reducción de los tiempos y el aumento de la seguridad.

El proceso de la asignación de recursos humanos y materiales en los colegios se realiza manualmente con metodologías no optimizadas. Es por esto que la solución es tan valiosa, ya que la competencia es bastante más ineficiente. El caso base asociado podría ser sacar cada curso a medida que el anterior va llegando a la zona segura, lo que sería el tiempo máximo en el cual se lleva a cabo la operación.

Suponiendo que cada curso se demora en promedio 1 minuto entre que sale de la sala y llega a la zona de seguridad, el colegio se demoraría 13 minutos en completar el evento. Comparándolo con lo que se demoraría si siguiese nuestro modelo de optimización (1 minuto 10 segundos), se puede apreciar como se gana una cantidad importante de tiempo: cada uno de los 390 alumnos del parvulario ganaría 11 minutos y 50 segundos. Este periodo pudiese ser utilizado en horas de aprendizaje en el aula de clase, y sumando este tiempo entre los 390 alumnos tenemos que se ganan aproximadamente 77 horas de educación para la sociedad chilena en cada operación DEYSE.

Además de ahorrar el tiempo que se puede utilizar en educación, también se considera que uno de los factores más importantes durante una evacuación es el tiempo, ya que mientras más tiempo ocurre entre el inicio del desastre y el final de la evacuación, mayor es el riesgo de las personas. Por lo tanto, si el establecimiento es capaz de evacuar a todas las personas en 1 minuto y 10 segundos en vez de 13 minutos, disminuye también considerablemente la probabilidad de accidentes.

7. Anexo



Anexo 1: Tabla Resultados

Comentario: Dado la naturaleza de nuestro modelo está en nuestro interés encontrar una buena cota superior para el tiempo de la evacuación. Esto dado que varias de las restricciones usan en conjunto T, el cual está definido con esta cota máxima. Si usamos una cota máxima muy alta, se demora mucho en encontrar una solución óptima. Para encontrar una mejor cota máxima lo que se hace es resolver el mismo modelo pero con períodos más largos, de esta manera el conjunto T es más pequeño. Al llegar a un valor óptimo en este modelo, podemos utilizarlo como cota para resolver el modelo con periodos más cortos, así mejorando su precisión.

8. Bibliografía

Ministerio de Educación, ONEMI. Plan Integral de Seguridad Escolar (Diciembre, 2017) https://convivenciaparaciudadania.mineduc.cl/wp-content/uploads/2020/11/Plan-Integral-de-Seguridad-Escolar.pdf

Pujado, J. (2024, marzo 5). Comienza el año escolar 2024: más de dos millones de estudiantes entran a clases y autoridades piden “fortalecer con ímpetu la asistencia y la presencialidad” - Ministerio de educación. Ministerio de educación.
https://www.mineduc.cl/comienza-el-ano-escolar-2024-mas-de-dos-millones-de-estudiantes-entran-a-clases-y-autoridades-piden-fortalecer-con-impetu-la-asistencia-y-la-presencialidad/

BBC News Mundo. (2020, mayo 21). Chile. BBC.
https://www.bbc.com/mundo/noticias-52704487

Chile - Población. (s/f). Datosmacro.com. Recuperado el 8 de abril de 2024, de
https://datosmacro.expansion.com/demografia/poblacion/chile?anio=1960

MovimientoCl, A. C.-. (s. f.). Colegio Alemán Los Angeles - Planos Colegio.
https://www.dsla.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=994