



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias (Estructuras)

DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE CÓMPUTO PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO
DE CARGAS DE VEHÍCULOS EN MOVIMIENTO Y SUS EFECTOS DE FATIGA EN
PUENTES DE ACERO.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Victor Manuel Barcenás Otero

Dirigido por:

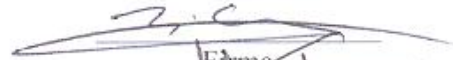
Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras

SINODALES

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras
Presidente


Firma

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Secretario


Firma

Dr. Eduardo Betanzo Quezada
Vocal

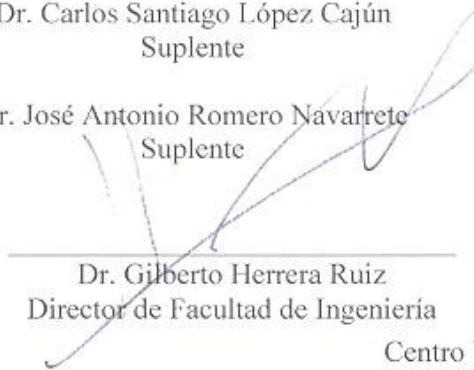

Firma

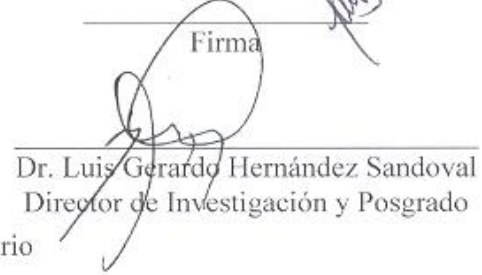
Dr. Carlos Santiago López Cajún
Suplente


Firma

Dr. José Antonio Romero Navarrete
Suplente


Firma


Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de Facultad de Ingeniería


Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre de 2011
México

RESUMEN

El tráfico vehicular, tanto en carreteras como en zonas urbanas, ha llegado a ser un tema de fuerte preocupación e intenso debate a nivel mundial. Actualmente, se observa un crecimiento pronunciado del parque vehicular aunado al envejecimiento y deterioro de la infraestructura vial. El costo de mantenimiento de puentes carreteros incrementa exponencialmente, ya que algunas de estas construcciones han llegado al fin de su periodo de vida útil. La evaluación de los puentes ante el fenómeno de fatiga es necesaria para realizar una prevención temprana y evitar fallas estructurales. En este trabajo de tesis se propone una metodología para el análisis estadístico de cargas de vehículos pesados, pronóstico de valores extremos de cargas y efectos de fatiga en puentes carreteros de acero. Dicha metodología se ha sistematizado creando un programa de cómputo que lleva por nombre “DIP - Diagnostico Estadístico y de Fatiga en Puentes”, desarrollado con algoritmos en lenguaje C en el compilador Visual Studio. En la parte de estadística se obtienen histogramas de frecuencia, sus distribuciones Gaussianas y bimodales, así como sus parámetros característicos, con el fin de conocer el comportamiento probabilístico de demanda. En el estudio de valores extremos se aplican cuatro métodos: Modelo de Gumbel Asintótico, Proceso de Poisson Suavizado, Valores Extremos Generalizado (GEV) y Picos de Rebase de Umbral (POT), destacando la implementación y precisión de éste último para la predicción de valores máximos de cargas esperados, en función del periodo de retorno. El análisis de fatiga se realiza mediante un proceso similar al recomendado por el Código Europeo (Eurocode), que consiste en la obtención de líneas de influencia, superposición de cargas, conteo de ciclos de esfuerzos y la aplicación de la Regla de Miner para la evaluación de daño acumulado y predicción de vida a fatiga. Todo el trabajo se sustenta, primordialmente, en la medición y manejo de datos de pesaje dinámico de vehículos (WIM). Para la aplicación del programa DIP se utilizaron registros de vialidades y características de puentes de Francia, proporcionados por el Laboratorio Central de Puentes y Caminos (LCPC), esperando tener próximamente registros de WIM de carreteras mexicanas.

Palabras clave: Puentes carreteros de acero, tráfico vehicular pesado, Programa DIP, análisis estadístico de cargas, valores extremos de cargas, GEV, POT, periodo de retorno, fatiga, Regla de Miner, daño acumulado, vida a fatiga, WIM.

SUMMARY

Vehicular traffic both on roads and in urban areas has become a topic of great concern and intense debate worldwide. Currently, there is a pronounced growth of vehicle fleet coupled with aging and increasing damage in road infrastructure. Maintenance cost of highway bridges increases exponentially, due to many of these constructions have reached the end of its useful life period. The assessment of the bridges to the phenomenon of fatigue is necessary for early prevention and avoids structural failure. In this document proposes a methodology to the statistical analysis of heavy vehicle loads, extreme values of loads and effects of fatigue in steel highway bridges. This methodology has been systematized by creating a computer program which is named "DIP - Diagnostico Estadístico y de Fatiga en Puentes", which was developed with algorithms of language C in the Visual Studio compiler. In the statistics part frequency histograms, their Gaussians and bimodal distributions and their characteristic parameters are obtained, in order to know probabilistic behavior of demand. In the study of extreme values apply four methods: Gumbel Asymptotic Model, Thinned Poisson Process, General Extreme Value (GEV) and Peaks Over Threshold (POT), highlighting the implementation and precision of the latter for maximums values load expected in function of return period. Fatigue analysis performs using a process similar to that recommended by the European Code (Eurocode), which consists in obtaining influence lines, overlapping of loads, count of stress cycles and application of Miner's Rule for the evaluation of cumulative damage and the prediction of fatigue life. All work is based primarily on the measurement and management of Weigh In Motion files (WIM). For application of DIP program roads records and France bridges were used, which were provided by Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), hoping to have soon WIM records of Mexican highways.

Keywords: Steel Highway Bridges, Heavy Vehicular Traffic, DIP Program, Statistical Analysis of Load, Extreme Values of Load, GEV, POT, Return Period, Fatigue, Miner's Rule, Cumulative Damage, Fatigue Life, WIM.

AGRADECIMIENTOS

Con este trabajo llego al final de un ciclo más en mi vida, agradeciendo a Dios, a mis padres y a mis hermanos que me brindan todo su apoyo incondicional, y son ellos el motor que me impulsa a cumplir con mis objetivos.

Una etapa especial ha concluido, llena de aprendizaje y enseñanzas, donde los conocimientos que me han transmitido los profesores que tuve el gusto de conocer, son el punto de partida para lograr mis metas profesionales, ya que la formación que he tenido en esta institución estará presente, desde ahora en adelante, en mi desempeño laboral y en todas las actividades que realice como profesionista. Por ello, agradezco a la institución y a estas personas, que no solo son mis maestros, sino también colegas y amigos.

Ahora es momento de ver hacia el futuro y enfrentar nuevos retos, donde estaré aprendiendo día con día, y de igual forma, estaré finalizando nuevas etapas.

Gracias...

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| RESUMEN..... | I |
| SUMMARY | II |
| AGRADECIMIENTOS | III |
| INDICE DE TABLAS | VI |
| INDICE DE FIGURAS..... | VII |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. ANTECEDENTES..... | 3 |
| 1.1.1. ANTECEDENTES EN EUROPA..... | 3 |
| 1.1.2. ANTECEDENTES EN ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA..... | 7 |
| 1.1.3. ANTECEDENTES EN ASIA | 8 |
| 1.1.4. ANTECEDENTES EN MÉXICO..... | 9 |
| 1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA..... | 11 |
| 1.3. JUSTIFICACIÓN..... | 13 |
| 1.4. HIPÓTESIS Y OBJETIVO | 14 |
| 1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES..... | 16 |
| 1.5.1. ALCANCES..... | 16 |
| 1.5.2. LIMITACIONES | 16 |
| II. MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA..... | 17 |
| 2.1. BASE DE DATOS DE REGISTROS DE WEIGH IN MOTION (WIM) | 19 |
| 2.1.1. ASPECTOS GENERALES DE LOS SISTEMAS WIM..... | 19 |
| 2.1.2. TIPOS DE SISTEMAS WIM | 22 |
| 2.1.3. SENSORES UTILIZADOS EN LOS SISTEMAS WIM | 22 |
| 2.1.4. CAPACIDAD DEL PROCESADOR DE LOS SISTEMAS WIM..... | 23 |
| 2.1.5. MÓDEM DE COMUNICACIÓN A DISTANCIA DE LOS SISTEMAS WIM..... | 26 |
| 2.1.6. SOFTWARE DE OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS WIM..... | 26 |
| 2.1.7. FORMATO DE DATOS DE SALIDA DE LOS SISTEMAS WIM | 27 |
| 2.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CARGAS VEHICULARES | 29 |
| 2.3. VALORES EXTREMOS DE CARGAS VEHICULARES | 32 |
| 2.3.1. MÉTODO DE POT: ENFOQUE DE REBASE DE UMBRAL | 34 |
| 2.3.2. MÉTODO DE GEV: ENFOQUE DE MÁXIMOS POR BLOQUE | 39 |
| 2.3.3. MÉTODO DE GUMBEL ASINTÓTICO..... | 44 |
| 2.3.4. PROCESO DE POISSON SUAVIZADO..... | 45 |
| 2.4. ANÁLISIS DE FATIGA EN PUENTES CARRETEROS | 46 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 2.4.1. | CONCEPTOS BÁSICOS DE FATIGA POR ALTO NÚMERO DE CICLOS..... | 48 |
| 2.4.2. | MODELO DE INTERACCIÓN TRÁFICO - PUENTE..... | 50 |
| 2.4.2.1. | LÍNEAS DE INFLUENCIA..... | 50 |
| 2.4.2.2. | MÉTODO DE RAINFLOW | 56 |
| 2.4.2.3. | HISTOGRAMAS DE RAINFLOW..... | 59 |
| 2.4.3. | CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ANTE FATIGA | 60 |
| 2.4.4. | DAÑO ACUMULADO Y VIDA A FATIGA..... | 62 |
| III. | SISTEMATIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA | 64 |
| 3.1. | MÓDULO DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO..... | 64 |
| 3.2. | MÓDULO DE VALORES EXTREMOS | 69 |
| 3.3. | MÓDULO DE ANÁLISIS DE FATIGA | 75 |
| 3.3.1. | MÓDULO DE LÍNEAS DE INFLUENCIA..... | 75 |
| 3.3.2. | MÓDULO DE CONTEO DE CICLOS DE ESFUERZOS CON EL MÉTODO DE RAINFLOW..... | 78 |
| 3.3.3. | MÓDULO DE ESTIMACIÓN DE DAÑO ACUMULADO Y VIDA A FATIGA | 80 |
| IV. | EJEMPLO DE APLICACIÓN Y RESULTADOS | 83 |
| 4.1. | PROCESAMIENTO DE DATOS DE WIM CON EL PROGRAMA DIP | 84 |
| 4.2. | ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS REGISTROS DE WIM CON EL PROGRAMA DIP..... | 86 |
| 4.3. | ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS DE LOS REGISTROS DE WIM CON EL PROGRAMA DIP..... | 93 |
| 4.3.1. | APLICACIÓN DEL MÉTODO DE PICOS DE REBASE DE UMBRAL (POT). | 93 |
| 4.3.2. | APLICACIÓN DEL MÉTODO DE VALORES EXTREMOS GENERALIZADOS (GEV)... | 97 |
| 4.3.3. | APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GUMBEL ASINTÓTICO | 101 |
| 4.3.4. | APLICACIÓN DEL PROCESO DE POISSON SUAVIZADO | 103 |
| 4.3.5. | COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE VALORES EXTREMOS | 105 |
| 4.4. | ANÁLISIS DE FATIGA EN PUENTES CARRETEROS DE ACERO CON EL PROGRAMA DIP | 107 |
| V. | CONCLUSIONES | 122 |
| VI. | REFERENCIAS | 124 |
| | ANEXO A..... | 129 |
| | ANEXO B | 148 |

INDICE DE TABLAS

| Tabla | | Página |
|--------------|---|---------------|
| 2.1 | Clasificación de los sistemas WIM. | 21 |
| 2.2 | Formato estándar de los registros de WIM. | 28 |
| 4.1 | Resultados del análisis estadístico de los registros de WIM de la autopista A64 y su comparación. | 90 |
| 4.2 | Resultados del análisis estadístico de los registros de WIM de la autopista A4 y su comparación. | 92 |
| 4.3 | Resultados del Método de POT con los registros de WIM de la autopista A64 y su comparación. | 95 |
| 4.4 | Resultados del Método de POT con los registros de WIM de la autopista A4 y su comparación. | 96 |
| 4.5 | Resultados del Método de GEV con los registros de WIM de la autopista A64 y su comparación. | 100 |
| 4.6 | Resultados del Método de GEV con los registros de WIM de la autopista A4 y su comparación. | 101 |
| 4.7 | Características geométricas principales de los puentes considerados para el análisis de fatiga. | 111 |
| 4.8 | Periodo de vida a fatiga de los puentes ante el tráfico del registro A6 de 1986. | 122 |

INDICE DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|---------------|--|---------------|
| 1.1 | Icono de DIP-Diagnostico Estadístico y de Fatiga en Puentes | 2 |
| 1.2 | Relación entre peso y longitud de los camiones y sus efectos. | 8 |
| 1.3 | Tipos de puentes en la red federal de carreteras de México; Fuente: IMT. | 10 |
| 2.1 | Metodología integral para el análisis y evaluación de puentes carreteros. | 18 |
| 2.2 | Sistema WIM de placa de flexión y de celda de carga. | 24 |
| 2.3 | Sistema WIM de sensores piezoeléctricos. | 25 |
| 2.4 | Archivo de registros de WIM. | 28 |
| 2.5 | Distribución de probabilidad multimodal. | 30 |
| 2.6 | Distribución de probabilidad bimodal. | 31 |
| 2.7 | Valores de rebase de un umbral. | 34 |
| 2.8 | Gráfica de umbrales contra excedencias medias. | 35 |
| 2.9 | Distribución de Pareto Generalizada (GPD); Fuente: Smith , 2001. | 36 |
| 2.10 | Valores máximos por bloque. | 39 |
| 2.11 | Ejemplos de distribuciones de valores extremos. | 41 |
| 2.12 | Elementos básicos del proceso de análisis de fatiga. Fuente: Seçil, 2004. | 49 |
| 2.13 | Ejemplos de líneas de influencia. | 51 |
| 2.14 | Determinación de la ecuación de los tres momentos. | 53 |
| 2.15 | Determinación de los parámetros complementarios para la ecuación de los tres momentos. | 54 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.16 | Historia de esfuerzos y ciclos de histéresis. Fuente: Seçil, 2004. | 57 |
| 2.17 | Método de Rainflow. a) Fin del flujo partiendo de un pico; b) Regla del flujo partiendo de un pico; c) Fin del flujo partiendo de un valle; d) Regla de flujo partiendo de un valle. Fuente: Seçil, 2004. | 57 |
| 2.18 | Aplicación del Método de Rainflow. | 58 |
| 2.19 | Histograma de Rainflow. | 60 |
| 2.20 | Ensayo de flexión rotativa. Fuente: Bangoura , 2007. | 61 |
| 2.21 | Curvas S-N. Fuente: López et al, 2006. | 61 |
| 3.1 | Diagrama de flujo del módulo estadístico. | 66 |
| 3.2 | Diagrama de flujo del módulo de valores extremos. | 70 |
| 3.2 | Diagrama de flujo del módulo de valores extremos (continuación). | 71 |
| 3.3 | Diagrama de flujo del módulo de fatiga (generación de líneas de influencia). | 76 |
| 3.4 | Diagrama de flujo del módulo de fatiga (aplicación del método de Rainflow). | 79 |
| 3.5 | Diagrama de flujo del módulo de fatiga (aplicación de la Regla de Miner). | 81 |
| 4.1 | Ubicación de la autopista A64; Fuente: Arroyo et al, 2009. | 83 |
| 4.2 | Ubicación de la autopista A4; Fuente: Arroyo et al, 2009. | 84 |
| 4.3 | Inicialización del módulo de procesamiento de datos. | 84 |
| 4.4 | Definición del rango de pesos. | 85 |
| 4.5 | Definición del rango de ejes. | 85 |
| 4.6 | Ajuste de columnas. | 86 |
| 4.7 | Asignación del rango de las barras del histograma y el número de columna del archivo de WIM. | 87 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.8 | Inicialización del análisis estadístico. | 87 |
| 4.9 | Carpeta de almacenamiento de datos generados en el análisis estadístico. | 87 |
| 4.10 | Selección del archivo para el análisis estadístico. | 88 |
| 4.11 | Histograma de frecuencia de las carga del registrado de la autopista A64. | 88 |
| 4.12 | Curva de distribución normal del histograma de cargas de la autopista A64. | 89 |
| 4.13 | Curva de distribución bimomal del histograma de cargas de la autopista A64. | 90 |
| 4.14 | Curva de distribución normal del histograma de cargas de la autopista A4. | 91 |
| 4.15 | Curva de distribución bimodal del histograma de cargas de la autopista A4. | 92 |
| 4.16 | Inicialización del módulo de valores extremos, Método de POT. | 93 |
| 4.17 | Asignación del rango de visualización para la gráfica de umbrales. | 94 |
| 4.18 | Gráfica de umbrales contra excedencias medias (registro de la autopista A64). | 94 |
| 4.19 | Gráfica de POT de los registros de WIM (autopista A64). | 95 |
| 4.20 | Gráfica de POT de los registros de WIM (autopista A4). | 96 |
| 4.21 | Inicialización del módulo de valores extremos, Método de GEV. | 97 |
| 4.22 | Ubicación de las columnas de fechas y pesos. | 97 |
| 4.23 | Carpeta de almacenamiento de datos generados durante el análisis de GEV. | 98 |
| 4.24 | Selección del archivo para el análisis de GEV. | 98 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.25 | Eliminación de días no hábiles del registro A64. | 99 |
| 4.26 | Gráfica de GEV de los registros de WIM (autopista A64). | 99 |
| 4.27 | Gráfica de GEV de los registros de WIM (autopista A4). | 100 |
| 4.28 | Inicialización del módulo de valores extremos, Método de Gumbel. | 101 |
| 4.29 | Parámetros del método de Gumbel (autopista A64). | 102 |
| 4.30 | Gráfica del método de Gumbel de los registros de WIM (autopista A64). | 102 |
| 4.31 | Gráfica del método de Gumbel de los registros de WIM (autopista A4). | 103 |
| 4.32 | Inicialización del módulo de valores extremos, Proceso de Poisson. | 103 |
| 4.33 | Gráfica del proceso de Poisson de los registros de WIM (autopista A64). | 104 |
| 4.34 | Gráfica del proceso de Poisson de los registros de WIM (autopista A4). | 104 |
| 4.35 | Inicialización del módulo de valores extremos, comparación de los métodos. | 105 |
| 4.36 | Comparación de las gráficas de valores extremos de cargas vehiculares, obtenidas por cada método (autopista A64). | 106 |
| 4.37 | Comparación de las gráficas de valores extremos de cargas vehiculares, obtenidas por cada método (autopista A4). | 106 |
| 4.38 | Inicialización del módulo de Análisis de Fatiga. | 107 |
| 4.39 | Panel inicial del módulo de Análisis de Fatiga. | 108 |
| 4.40 | Carpeta de almacenamiento de datos generados en el análisis de fatiga. | 108 |
| 4.41 | Selección del archivo para el análisis de fatiga. | 109 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.42 | Modelo del Puente Auxerre. | 109 |
| 4.43 | Sección del Puente Auxerre. | 110 |
| 4.44 | Modelo del Puente Kervitous. | 110 |
| 4.45 | Sección del Puente Kervitous. | 110 |
| 4.46 | Modelo del Puente Layrac. | 111 |
| 4.47 | Sección del Puente Layrac. | 111 |
| 4.48 | Asignación del número de claros para el puente Kervitous. | 112 |
| 4.49 | Visualización esquemática del puente Kervitous. | 112 |
| 4.50 | Generación de la línea de influencia unitaria del puente Kervitous. | 113 |
| 4.51 | Asignación de la inversa del módulo de sección del puente Kervitous. | 114 |
| 4.52 | Cuadro de información de las líneas de influencia por eje vehicular. | 114 |
| 4.53 | Opciones de animación gráfica del flujo vehicular. | 115 |
| 4.54 | Líneas de influencia del flujo vehicular sin animación. | 115 |
| 4.55 | Simulación animada del tráfico vehicular registrado (puente Kervitous). | 116 |
| 4.56 | Inicialización del conteo de ciclos de esfuerzos con el método de Rainflow. | 117 |
| 4.57 | Serie de historia de esfuerzos. | 117 |
| 4.58 | Histograma de Rainflow. | 118 |
| 4.59 | Inicialización de la evaluación de daño acumulado con la Regla de Miner. | 118 |
| 4.60 | Curvas S-N del manual AASHTO. | 119 |
| 4.61 | Asignación de parámetros para la evaluación de daño acumulado. | 120 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.62 | Asignación del Histograma de Rainflow. | 121 |
| 4.63 | Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. | 121 |

I. INTRODUCCIÓN

El tráfico vehicular en las redes viales y zonas urbanas ha llegado a ser un tema de fuerte preocupación e intenso debate a nivel mundial. Actualmente, se observa un crecimiento pronunciado del parque vehicular aunado al envejecimiento y deterioro de la infraestructura vial. La relación entre estas variables es ciertamente asunto de intensa discusión, como consecuencia de los efectos colaterales.

El transporte vehicular genera costos sociales importantes, como los asociados a la contaminación del aire, congestionamientos, accidentes, construcción y mantenimiento de infraestructura vial e incluso los costos ambientales relacionados directamente con el cambio climático.

Los puentes son una de las principales estructuras dentro de las redes viales que permiten librar obstáculos topográficos. La evaluación estructural de puentes es cada vez más frecuente, ya que la mayoría de estas estructuras fueron construidas a finales del siglo XIX o principios del siglo XX. Su mantenimiento y seguridad es una de las principales tareas de las autoridades gubernamentales (De Jesús et al, 2010).

Hasta hace poco, la mayor parte de la investigación en el área de diseño de puentes se ha concentrado en el estudio de la resistencia de los materiales y relativamente poco se ha realizado en el área de evaluación de cargas de tráfico real y sus efectos. La evolución de los vehículos, principalmente tracto-camiones, es cada vez más frecuente debido al crecimiento poblacional y a las necesidades que esto implica. Como consecuencia, las cargas vehiculares, los factores de seguridad y los factores dinámicos de amplificación, utilizados para el diseño y evaluación de puentes, pudieran estar en desapego con la demanda real.

Dentro de la comunidad de ingeniería de puentes, existe un interés considerable en el problema de medir las cargas de tráfico, así como también los efectos que éstas producen sobre la estructura (Liljencrantz et al, 2007). Los sistemas de WIM se han instalado en algunos lugares de Europa y Norteamérica con el fin de acelerar el proceso de pesaje vehicular. Sin embargo, la instrumentación de WIM en puentes de México es escasa y los métodos para su determinación son poco confiables.

Con el fin de dar una aportación para el estudio del tema planteado, se propone una metodología para el análisis estadístico de cargas de vehículos pesados, pronóstico de valores extremos de cargas y efectos de fatiga en puentes carreteros de acero. Dicha metodología se ha sistematizado creando un programa de cómputo que lleva por nombre “*DIP-Diagnostico Estadístico y de Fatiga en Puentes*”, desarrollado con algoritmos en lenguaje C en el compilador *Microsoft Visual Studio* (Figura 1.1). Todo el trabajo se sustenta, primordialmente, en la medición y manejo de datos de pesaje dinámico (*Weigh In Motion, WIM*).



Figura 1.1. Icono de DIP-Diagnostico Estadístico y de Fatiga en Puentes.

Para el análisis de fatiga se utiliza un proceso similar al recomendado por el Código Europeo (*Eurocode*), que consiste en la obtención de líneas de influencia, superposición de cargas, conteo de ciclos de esfuerzos y la aplicación de la Regla de Miner para la evaluación de daño acumulado y predicción de vida a fatiga. Además, la determinación de la vida a fatiga es el mejor punto de referencia para el diagnóstico y evaluación de este tipo de estructuras. En los cálculos de vida residual de puentes se debe tener en cuenta a la fatiga como un mecanismo de daño progresivo. Una predicción coherente de la vida residual debe basarse en datos reales registrados en los miembros del puente a evaluar (De Jesús et al, 2010).

Los trabajos realizados por O'Brien (2001) y Jacob (1989), para el modelo de carga del Eurocode (1989 –1996) y el *American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO)*, tienen un gran apego con respecto al presente tema de estudio.

Para aplicar el programa DIP, se utilizaron registros de WIM y características de puentes de Francia, proporcionados por el Laboratorio Central de Puentes y Caminos (LCPC), esperando pueda implementarse en un futuro en puentes mexicanos, cuando se disponga de registros de WIM suficientes y confiables.

En seguida, en la parte de antecedentes, se citan párrafos de algunos artículos que tratan temas relacionados con el contenido del presente estudio, de los cuales se han tomado algunos fundamentos.

1.1. ANTECEDENTES

1.1.1. ANTECEDENTES EN EUROPA

Europa es el lugar donde la implementación del pesaje en movimiento ha tenido mayor impacto, por ejemplo, en la publicación de O'Brien (2001) se menciona el proyecto denominado *WAVE (Weighing-in-motion of Axles and Vehicles for Europe)*, donde se realiza el estudio de pesaje dinámico en carreteras y puentes europeos, con el fin de hacer frente a los requisitos de las investigaciones actuales.

El sistema de pesaje WAVE fue un proyecto terminado en junio de 1999 y su objetivo era llevar a cabo un importante paso para el estudio de las vialidades europeas, facilitando el trabajo de los responsables de la restauración de carreteras a través de las siguientes acciones:

- Mejorando el funcionamiento y la capacidad de los sistemas convencionales de WIM, para estimar con precisión las cargas estáticas y las mediciones de impacto dinámico por eje vehicular, esto a través del uso de matrices de sensores, cuyos resultados permitan la interacción dinámica entre el vehículo y el pavimento.
- Desarrollando centros de recolección de datos, con formatos comunes y procedimientos de garantía de calidad, para facilitar el intercambio y la comparación de los datos de WIM en toda Europa, aumentando así la confianza de los registros.
- Realizando pruebas en los sistemas de pesaje para evaluar su durabilidad y rendimiento ante diferentes condiciones climáticas, especialmente en las regiones frías donde los pavimentos se deforman y los sensores son susceptibles a la sal del deshielo.

- Desarrollando métodos normalizados de calibración para que sean aplicados en diferentes climas del continente Europeo y con distintos tipos de sistemas de WIM.

Por otra parte, Jacob et al (1989) y O'Connor (1991), presentan en sus publicaciones un programa llamado *CASTOR*, elaborado por el *Road and Motorway Technical Studies Department-SETRA* para el LCPC en Paris, Francia. Este programa hace simulaciones utilizando registros de tráfico real y aplicando métodos teóricos de análisis estructural, realizando así la evaluación de puentes. En el programa *CASTOR* es necesario generar e ingresar los datos de las líneas o superficies de influencia para poder hacer el análisis de fatiga. Los efectos son calculados con principios elástico-lineales y la teoría de superposición de cargas, a medida que el programa mueve los registros de pesaje vehicular a lo largo de la estructura del puente, carril por carril, preservando los pesos y espacios de cada eje, así como la distancia entre los vehículos registrados. Finalmente, *CASTOR* hace la evaluación de fatiga a través del conteo de ciclos de esfuerzos, utilizando el método de Rainflow y la aplicación de la Regla de Miner, con lo cual se estima la vida remanente del puente. El programa de cómputo *DIP*, desarrollado en esta tesis, realiza un proceso similar, con la ventaja de que presenta los resultados en forma gráfica, calcula las líneas de influencia y hace el análisis estadístico de los registros de cargas vehiculares, para conocer y pronosticar los pesos máximos.

Caprani et al (2008), realizaron un estudio teórico de los efectos del tráfico vehicular ante algunos eventos de carga, registrados en puentes de claro corto y mediano. Mencionan la importancia de la evaluación de los puentes carreteros ante la demanda vehicular, lo cual ha sido reconocido como un área con la que se puede ahorrar y evitar rehabilitaciones o reemplazos estructurales. Además, desarrollan un enfoque alternativo con métodos estadísticos para encontrar los efectos ante fatiga típicos. Dentro del desarrollo muestran la aplicación de métodos de valores extremos, para el cálculo de pesos máximos probables, y se utilizan datos reales para mostrar la diferencia entre las técnicas estadísticas convencionales y el enfoque que han planteado.

Liljencrantz et al (2007) describen la instrumentación de un puente ferroviario construido en Estocolmo, Suecia. El objetivo fundamental de su publicación es conocer las cargas de tráfico real y sus efectos en puentes ferroviarios, a través de mediciones y simulaciones numéricas.

Mencionan una forma para determinar los parámetros característicos que se registran al paso de un tren, como la velocidad, la distancia entre ejes y las cargas por eje, con lo cual es posible medir la respuesta dinámica real del puente. Además, determinan factores de amplificación dinámica mediante simulaciones, basadas en registros de velocidades y cargas.

Leander et al (2010) hacen estudios sobre puentes de la red ferroviaria de Suecia, específicamente, analizan el Puente Söderström ubicado en el centro de Estocolmo, uno de los puentes ferroviarios más importantes de Europa. Un extenso programa de seguimiento fue diseñado para realizar un análisis exhaustivo del comportamiento real del puente, como un intento de aclarar la discrepancia entre los cálculos teóricos y la realidad de la inspección. Por otra parte, se describe una metodología para realizar el análisis de fatiga, basándose en datos registrados. El procedimiento para evaluar la vida a fatiga es a través de mediciones de esfuerzos en campo. Afirman que la manera más precisa para determinar el efecto de la carga viva es medir las deformaciones en los miembros críticos, utilizando medidores de esfuerzos como las galgas extensométricas. El procedimiento planteado para la evaluación se apega a lo establecido por el manual AASHTO.

De Jesús et al (2010) presentan estudios de fatiga realizados en algunas muestras de hierro de un antiguo puente portugués, llamado Puente de Fao. Estos datos se correlacionan con un modelo clásico de vida a tensión, conocido como modelo de Morrow. También se realizan sobrecargas de esfuerzos controladas en ensayos de fatiga, con el fin de identificar el modelo efectivo de vida a tensión, según lo propuesto por Du Quesnay dentro de la misma publicación. Por último, aplican los modelos para evaluar a los especímenes sin daño, sometidos a cargas similares a lo real.

Magalhães et al (2008) hacen un análisis del comportamiento dinámico de puentes, mediante la implementación de un sistema multicanal de monitoreo dinámico, instalado en un puente de concreto en forma de arco de claro largo, ubicado en el río Duero, ciudad de Porto, Portugal. También, describen algunos estudios experimentales y numéricos, desarrollados poco después de la construcción del puente, y presentan los resultados obtenidos con un software que han desarrollado para procesamiento de datos, con el cual se evalúa el estado del puente.

Righiniotis et al (2008) estudiaron los efectos de fatiga que presentan algunos puentes ferroviarios del Reino Unido, específicamente, los daños por fatiga vinculados a las conexiones. Dichos daños se han atribuido a efectos secundarios inducidos por la deformación, que sin duda, no se consideran en el diseño de los puentes. El comportamiento de las conexiones, entre los durmientes y las vigas, depende de la interacción de diferentes componentes, tales como remaches, clips de ángulo y ribetes. Mediante un análisis por elemento finito, se hizo un estudio local en las cercanías de las concentraciones de esfuerzos. Los autores de este artículo presentan técnicas de modelado en tres dimensiones y examinan el historial de esfuerzos principales registrado en un puente de conexión normal. Con la historia de esfuerzos y las curvas S-N del material se calcula la resistencia a fatiga y el daño acumulado utilizando la Regla de Miner.

Dowling (2009) muestra un estudio de los efectos que producen las cargas vehiculares sobre puentes carreteros, con respecto a un periodo de retorno determinado. Para considerar los efectos dinámicos, los efectos máximos de carga estática registrados deben multiplicarse por un factor, el cual tiene que ser conservador para que se cumpla ante cualquier requisito establecido en los diferentes códigos de puentes. Sin embargo, el tema principal se enfoca más en la evaluación del Radio Dinámico y la relación de éste con el periodo de retorno. Estudios recientes han demostrado que hay una tendencia a la baja del Radio Dinámico a medida que aumenta el período de retorno. Utilizando los registros de WIM de un puente específico, es posible extraer un valor de Radio Dinámico realista. Además, se evalúa la exactitud del sistema utilizado para la recopilación de datos, es decir, el algoritmo sobre el cual se basan los más populares sistemas de WIM.

En cuanto al análisis estadístico y el estudio de valores extremos de tráfico vehicular, Arroyo et al (2009) mencionan la importancia de los valores extremos para la predicción de pesos máximos esperados y el impacto que esto tiene con respecto a la vida remanente de los puentes. A su vez, hacen la comparación de varios métodos como el de Valores Extremos Generalizado (*General Extreme Value, GEV*), el Modelo de Gumbel Asintótico (*Gumbel Asymptotic Model*), el Proceso de Poisson Suavizado (*Thinned Poisson Process*) y un método empírico de máximos diarios-anual. Para la aplicación de estos métodos, se utilizaron registros de tráfico vehicular de autopistas y carreteras francesas, proporcionados por el LCPC.

1.1.2. ANTECEDENTES EN ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Los Estados Unidos de América es uno de los países con mayor avance en el estudio de puentes carreteros, debido a que su infraestructura vial está compuesta, en gran parte, por este tipo de construcciones. En 1974 la *Federal-Aid Highway Amendments* aumentó el peso permitido en el sistema vial interestatal a 20 mil libras en un solo eje, 34 mil libras en un doble eje y 80 mil libras de peso total bruto. Sin embargo, el Congreso de los Estados Unidos sopesó esta concesión mediante la promulgación de la *Fórmula Puente*, la cual limita la relación entre peso y longitud de los camiones ^[1]. Dicha fórmula se describe a continuación:

$$W = 500 \left(\frac{LN}{N-1} + 12N + 36 \right) \quad (1.1)$$

donde: W , es el peso máximo (en libras) que puede ser cargado un camión de dos o más ejes.

L , es el espacio (en pies) entre los ejes exteriores de un camión de dos o más ejes consecutivos.

N , es el número de ejes considerados.

La Fórmula Puente rebaja el límite de peso legal para camiones cortos, evitando que causen el deterioro prematuro de los puentes y carreteras (Figura 1.2). Entonces, los vehículos se pueden cargar con el peso máximo sólo si cada grupo de ejes y su separación satisfacen los requerimientos de dicha expresión.

Por otra parte, Przekop et al (2006) evalúan la calidad con que se estima la vida a fatiga, teniendo una historia de esfuerzos amplia, a través de un método para estructuras sometidas a vibraciones aleatorias y geoméricamente no lineales. La magnitud de los esfuerzos es obtenida por medio del conteo de Rainflow, con el cual se proporcionan estimaciones precisas de la vida a fatiga. La resistencia a la fatiga se calcula utilizando los rangos de tensión específicos del material (curvas S-N) y un principio lineal de cálculo de daño acumulado (Regla de Miner).

^[1] United States Department of Transportation - Federal Highway Administration: www.ops.fhwa.dot.gov

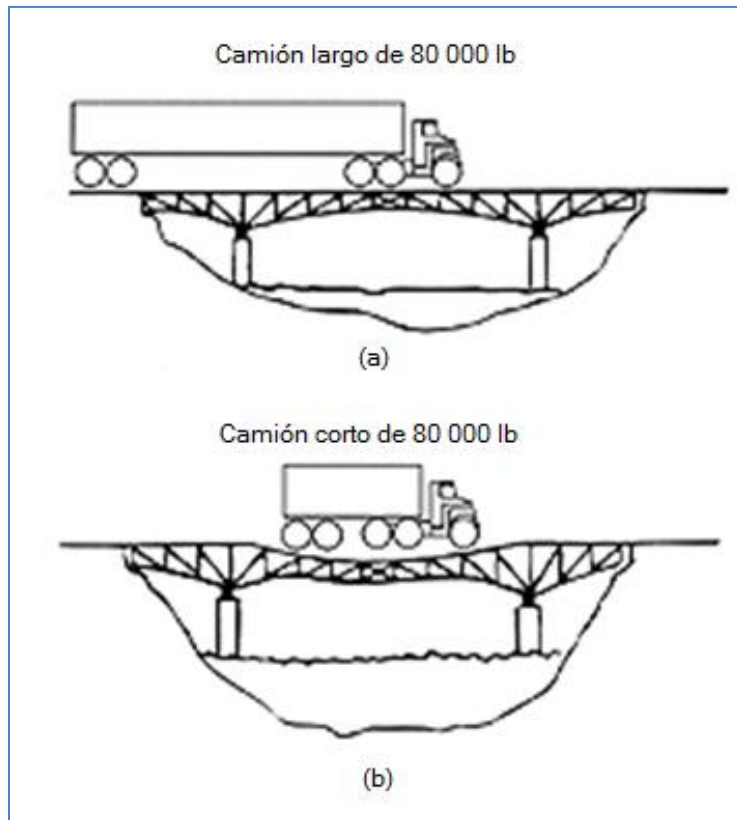


Figura 1.2. Relación entre peso y longitud de los camiones y sus efectos.

Ming Liu et al (2010) hacen la evaluación de la posibilidad de fatiga en los detalles de conexiones de puentes de acero, y a su vez, se basan en las curvas S-N de las especificaciones del AASHTO y en la regla de daño acumulado de Miner. El enfoque propuesto es aplicado a un puente real, el cual está controlado por un sistema de monitoreo estructural llamado ATLSS, el cual fue desarrollado en el Centro de Investigación Nacional de Ingeniería en la Universidad Lehigh. Con los datos de monitoreo de campo se estiman los esfuerzos efectivos y el número de ciclos de esfuerzo para la predicción de vida a fatiga.

1.1.3. ANTECEDENTES EN ASIA

Takeshi Mori et al (2007) mencionan en su trabajo el estudio de fatiga de algunos puentes de Japón. Los autores sugieren un parámetro para predeterminar la vida a fatiga de las vigas principales en puentes de claro corto y medio, con sección tipo I y rectangular, teniendo en cuenta su estructuración y las propiedades de carga. Este parámetro da un factor en función de una carga modificada, descrita de manera matemática y obtenida con la simulación Monte Carlo.

Los resultados pueden ser utilizados para determinar en qué condiciones un puente de acero presenta daños por fatiga durante la etapa de vida útil. Además, se describe un procedimiento de análisis de fatiga, similar al que se utiliza en este trabajo de tesis.

Asnachinda et al (2008) hacen el estudio de las cargas dinámicas que pasan a través de un puente continuo de varios claros. El objetivo de esta publicación fue desarrollar una técnica para la determinación de las cargas dinámicas por eje vehicular, basándose en la respuesta del puente. El problema consiste en convertir dichas respuestas en cargas puntuales a través del tiempo, y para ello se propone un método denominado USC. Con los resultados obtenidos, se observa que la técnica USC efectivamente mejora la precisión del proceso. La comparación entre los momentos de flexión medidos y los calculados indica que el enfoque es correcto. La precisión del cálculo de las cargas dinámicas, en todos los casos que se estudiaron, se encuentra dentro de un porcentaje de error relativo del 13%.

Sang-Hyo Kim et al (2004) realizaron procedimientos probabilísticos basados en teorías de confiabilidad, con el fin de lograr una estimación racional de los daños por fatiga en puentes ferroviarios de Corea del Sur. Los procedimientos sistemáticos para evaluar el nivel de confiabilidad y la resistencia a fatiga de un puente ferroviario de acero se muestran mediante el estudio de los miembros críticos, los cuales son seleccionados entre aquellos que experimentan rangos de esfuerzos máximos (superiores a 2 millones de ciclos). Las cargas aplicadas en el puente varían al azar debido a la incertidumbre de las condiciones de demanda, tales como horarios de tráfico, el volumen de pasajeros, días no hábiles, etc. Durante el proceso se identificaron miembros con fisuras, por lo cual se propuso un método de reparación que mejora la resistencia de los elementos ante el fenómeno de fatiga.

1.1.4. ANTECEDENTES EN MÉXICO

En México, la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) son los encargados de realizar la mayor parte de los estudios sobre las redes viales. Existen aproximadamente 9 mil puentes dentro de la red federal de carreteras de México. De estos puentes el 63% es de concreto reforzado, el 22% de concreto presforzado, el 8% de concreto y acero y sólo 4% de acero principalmente (Carrión et al, 2006). Con respecto a la base de datos que se tiene en México, la SCT y el IMT utilizan dos sistemas de gestión vial desde

1992, uno llamado SISTER (Simulación de Estrategias de Mantenimiento Carretero, por sus siglas en francés) y el SIPUMEX (Sistema de Puentes de México), que les permite determinar de manera sistemática, los trabajos de conservación requeridos en las carreteras federales libres de peaje ^[2].

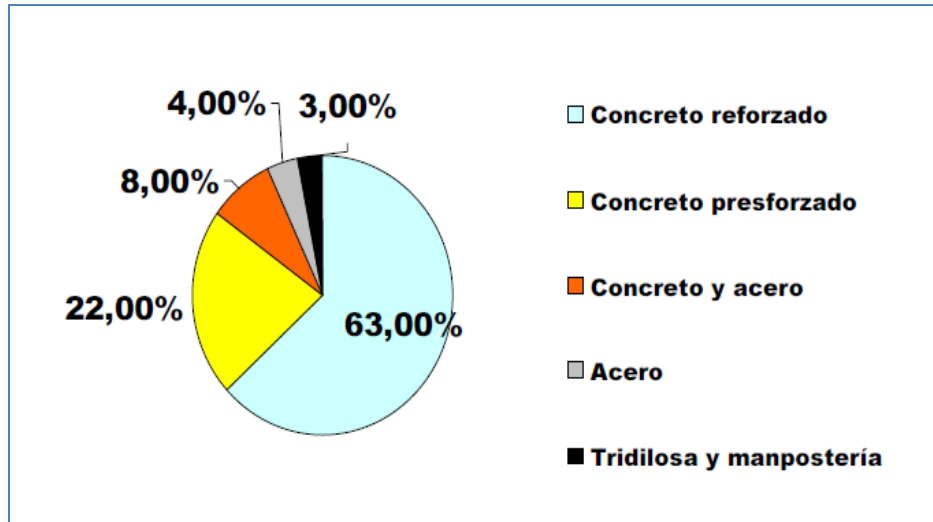


Figura 1.3. Tipos de puentes en la red federal de carreteras de México; Fuente: IMT.

El SIPUMEX cuenta con una base de datos en la que se tiene el inventario de todos los puentes con sus características geométricas y estructurales básicas, su ubicación, los materiales con que están contruidos, su estado físico y los datos de tránsito vehicular que soportan. El estado físico de los puentes se denota con una calificación que va de "cero" (puentes que no requieren atención) a "cinco" (condición crítica de los puentes que requieren atención en el año en curso o en el siguiente) ^[2]. Sin embargo, es necesario tener otro enfoque con respecto al estado actual de los puentes para complementar esta evaluación planteada.

^[2] Página de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte: www.sct.gob.mx

Mendoza et al (1992) realizaron para el IMT una serie de análisis estadísticos de pesos y dimensiones de los vehículos que circulan sobre las carreteras mexicanas para conformar un entorno de operación de los vehículos pesados, en materia de pesos y dimensiones, permitiendo proteger a los pavimentos y puentes de un excesivo deterioro y eventual colapso. Los análisis en este informe se basaron en los valores reglamentados en 1980. La carencia de un sistema adecuado de control de pesos y dimensiones ha traído como consecuencia que se observen muchas violaciones a la reglamentación. Parte de este estudio consistió en implementar, sobre las carreteras troncales más importantes de la República, una serie de estaciones para la medición de pesos y dimensiones de los vehículos de carga.

Otro de los trabajos que han realizado en el IMT es el publicado por Hernández et al (2004) donde se describe el desarrollo de un dispositivo prototipo para estimar el peso de vehículos ligeros desplazándose a bajas velocidades. El diseño se basa en el concepto de flexión de placas en voladizo y en la aplicación de la técnica de extensometría. Los sensores de deformación, comúnmente conocidos como galgas extensométricas, se disponen en un arreglo denominado puente de Wheatstone. El trabajo incluye pruebas con un prototipo preliminar simplificado de laboratorio y un prototipo con mayor capacidad de carga y mayor alcance de la instrumentación. Los resultados con el prototipo preliminar mostraron un buen comportamiento estático del diseño y de la instrumentación empleada, validando los principios aplicados. El prototipo final mostró un buen comportamiento en condiciones de pesaje estático, así como dinámico con vehículos pequeños circulando a velocidades menores a 10 km/h, independiente de la trayectoria del paso de las llantas sobre el dispositivo. Velocidades mayores, así como el paso de vehículos de mayor peso y dimensiones, produjeron un funcionamiento inadecuado del prototipo de pesaje.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Con el paso del tiempo, las estructuras van acumulando deformaciones, causadas por las cargas a las que están sometidas, y cuando estas deformaciones rebasan los límites elastoplásticos de los materiales, surgen fracturas que en ocasiones llegan a provocar el colapso.

Alrededor del mundo, se pueden ver construcciones antiguas que siguen siendo funcionales. Los puentes son una de las estructuras más comunes que existen desde hace varios siglos. Los puentes de acero y concreto reforzado se construyeron por primera vez a principios del siglo XX, con técnicas que para ese entonces eran las adecuadas. Como consecuencia, actualmente muchas de estas construcciones presentan daños estructurales importantes, debido al incremento del tráfico vehicular (De Jesús et al, 2010).

Es normal que estas estructuras ya no sean aptas para su finalidad, pero desafortunadamente, no solo los puentes de principios del siglo XX presentan daños severos, sino también algunos construidos hace apenas un par de décadas o menos.

Con lo anterior, entonces surge la pregunta: ¿por qué algunos puentes relativamente nuevos presentan daños severos en poco tiempo de uso?, la respuesta es que éstos han sido diseñados con cargas que no se apegan a la realidad. Por otra parte, el envejecimiento de las estructuras es inevitable y su remplazo tiene grandes dificultades físicas y económicas. Aunado a la falta de recursos, no existe suficiente información de las vialidades, lo que complica su estudio.

Gran parte del deterioro de los puentes, durante su vida útil, se debe al fenómeno de fatiga, uno de los temas principales que se analiza en este trabajo. La fatiga se presenta en elementos de acero y concreto reforzado sometidos a cargas cíclicas, pero en elementos de concreto presforzado, los cambios de tensión bajo cargas repetitivas no son críticos. Con la evolución de nuevas técnicas de construcción, ahora es común encontrar elementos parcialmente presforzados, en los cuales la fatiga debe considerarse (Gutiérrez et al 1991).

La mayoría de los estudios recientes sobre los efectos de fatiga en puentes de acero dependen de simulaciones de cargas, como aquellas obtenidas por el sistema Monte Carlo. Sin embargo, los efectos determinados a partir de escenarios de cargas de tráfico real, pueden ser más representativos que aquellos determinados a partir de escenarios de tráfico generados artificialmente (Getachew, 2003), razón por la cual, en este trabajo de tesis se utilizan valores reales de tráfico vehicular durante el proceso de cálculo de la vida a fatiga.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La demanda excesiva de tráfico vehicular que actualmente se presenta a nivel mundial, hace que el estudio de comportamiento de los puentes sea un tema prioritario. Se han realizado muchos estudios de cargas vehiculares y sus efectos en puentes, pero desafortunadamente, en la mayor parte de éstos se ha dependido, por un lado, de programas o herramientas con bases que se desconocen (tipo cajas negras), por otro lado, se utilizan varios programas para tratar los diferentes aspectos que implica el estudio (programas de análisis estadístico, de cálculo de líneas de influencia, de interacción carga-estructura, entre otros), además de extender el tiempo de trabajo por el hecho de no sistematizar los procesos.

El contar con una herramienta que permita hacer el análisis estadístico de cargas, identifique las leyes de distribución de las variables, pronostique valores extremos de pesos, realice el cálculo de líneas de influencia y estime la vida a fatiga, puede ser de gran ayuda para realizar la evaluación del comportamiento de puentes ante tráfico pesado.

Por otro lado, es necesario conocer los efectos de fatiga en puentes para poder realizar intervenciones tempranas y evitar fallas estructurales que llevarían a gastos excesivos. Actualmente, podemos disponer de programas como el CASTOR y la interfaz POLUX, que permiten hacer la evaluación de puentes ante escenarios de tráfico. Sin embargo, estos programas tienen ciertas limitantes que aumentan el tiempo de cálculo, como el hecho de tener que introducir las líneas de influencia, el no contar con un interfaz gráfico, entre otras, lo que conlleva a usar programas alternos para poder interpretar y visualizar los resultados. El programa CASTOR fue desarrollado en Francia, con sistemas operativos de los años ochentas y su actualización se ha atrasado. POLUX es de reciente creación, pero éste es sólo un interfaz para manipular la información de los registros de WIM, y utiliza el algoritmo de CASTOR para la evaluación de vida a fatiga.

En México no existen programas que integren tanto el análisis estadístico, el cálculo de valores extremos de cargas, la determinación de líneas de influencia y los efectos por fatiga, como lo hace el programa DIP, propuesto y desarrollado en esta tesis. Por lo anterior, el principal aporte de este trabajo de investigación es la elaboración de una herramienta de cómputo, llamada

DIP, que facilita el estudio analítico de fatiga en puentes de acero ante cargas de tráfico real, teniendo como base un proceso similar al recomendado por el código europeo, Eurocode. Además, se realiza el análisis estadístico y de valores extremos de pesos vehiculares, implementando métodos alternativos como el método de Picos de Rebase de Umbral (*Peak Over Threshold, POT*), el cual tiene la ventaja de usar muestras pequeñas de datos de tráfico (registros semanales o mensuales), a diferencia de los métodos usados hasta ahora, como el de Valores Extremos Generalizado (*General Extreme Value, GEV*), que necesita datos anuales y al menos veinte años de registro.

1.4. HIPÓTESIS Y OBJETIVO

Hipótesis General.

Teniendo como base registros de pesaje dinámico (Weigh In Motion, WIM) de vialidades de Francia, métodos estadísticos y de valores extremos, como el método de Picos de Rebase de Umbral (Peak Over Threshold, POT) y el método de Valores Extremos Generalizado (General Extreme Value, GEV), así como los procedimientos de evaluación de fatiga en que se sustenta el Eurocode, se puede generar una metodología integral y sistematizada para el análisis estadístico de cargas vehiculares, valores extremos de cargas y efectos de fatiga en puentes de acero, con lo cual se proporcione la información necesaria para diagnosticar el estado actual de los puentes, y así poder prevenir fallas estructurales, además de encausar y gestionar el tráfico pesado, acorde a la capacidad y uso de los puentes.

Objetivo General.

Elaborar un programa de cómputo para la sistematización de una metodología que integra el análisis estadístico de cargas vehiculares, predicción de valores extremos de cargas, cálculo de líneas de influencia y determinación de efectos de fatiga en puentes carreteros de acero, mediante la generación de algoritmos computacionales en lenguaje C, teniendo como base registros de pesaje dinámico vehicular (Weigh In Motion, WIM) de vialidades de Francia, métodos estadísticos y de valores extremos como el Picos de Rebase de Umbral (Peak Over Threshold, POT) y el de Valores Extremos Generalizado (General Extreme Value, GEV), así como los métodos de evaluación de puentes ante fatiga en que se sustenta el Código Europeo (Eurocode).

Objetivos particulares.

- **Objetivo 1:** Realizar la sistematización del análisis estadístico de los registros de tráfico vehicular (WIM) y determinar los parámetros característicos de las curvas de distribución, tanto Gaussianas como bimodales, que se ajustan a los histogramas de cargas vehiculares.
- **Objetivo 2:** Realizar la sistematización para el análisis y cálculo de los valores extremos de cargas, implementando el uso del método Picos de Rebase de Umbral (POT), para el estudio de cargas vehiculares, comparándolo con los métodos tradicionales de GEV, Gumbel Asintótico y Poisson Suavizado, obteniendo los parámetros probabilísticos de cada ley de distribución extrema y determinando las gráficas de periodos de retorno contra valores máximos de cargas esperados.
- **Objetivo 3:** Sistematizar el cálculo de las líneas de influencia para puentes de acero, modelados como vigas simplemente apoyadas y continuas, considerando los casos de un claro, dos claros (iguales o diferentes) y tres claros (iguales los extremos y diferente el central), haciendo uso de métodos de análisis estructural y principios de comportamiento elástico-lineal.
- **Objetivo 4:** Sistematizar el proceso de evaluación de puentes de acero ante el fenómeno de fatiga, determinando la variación de esfuerzos en las secciones de interés y aplicando el método de Rainflow para el conteo de ciclos de esfuerzos. Además, generar los histogramas de Rainflow correspondientes, para la determinación de índice de daño y el cálculo de vida a fatiga utilizando la Regla de Miner.
- **Objetivo 5:** Integrar la sistematización de la metodología propuesta en un sólo programa de cómputo, mediante la unión de los módulos de análisis estadístico de cargas, análisis de valores extremos de cargas y análisis de fatiga, implementando un interfaz gráfico que genere los resultados necesarios para la evaluación de puentes.
- **Objetivo 6:** Aplicar y validar la sistematización de la metodología propuesta ante escenarios reales de tráfico vehicular, registrados en vialidades y puentes de Francia, aprovechando la información proporcionada por LCPC.

1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.5.1. ALCANCES

Los alcances engloban sólo el análisis estadístico de cargas vehiculares, predicción de valores extremos de cargas, cálculo de daño acumulado y la estimación de vida a fatiga en puentes carreteros de acero (de uno a tres claros). En particular, se realiza la sistematización y la aplicación del análisis estadístico con el propósito de conocer las distribuciones probabilísticas, así como la magnitud de demanda que presentan algunos puentes carreteros de Francia. Además, se realiza el análisis de valores extremos para predecir los valores máximos esperados de cargas vehiculares, en diferentes periodos de retorno.

En el estudio de fatiga se realiza un análisis estructural estático lineal, aplicando el método de rigideces y el principio de superposición de cargas y efectos. El programa DIP proporcionará resultados de manera numérica y gráfica, facilitando el estudio de los puentes y generando la información necesaria para la evaluación de los mismos.

1.5.2. LIMITACIONES

Este trabajo de tesis se limita a proponer y sistematizar una metodología de análisis estadístico y probabilista de cargas vehiculares de tráfico pesado y sus efectos de fatiga en puentes carreteros de acero, donde no se toman en cuenta el peso propio, las vibraciones, efectos dinámicos, fenómeno de corrosión, intemperismo y comportamiento estructural no lineal, entre otros, con el propósito de aislar sólo los efectos que producen las cargas vehiculares sobre los puentes.

II. MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA

Las cargas vehiculares de tráfico pesado, a las que está sometido un puente carretero, se pueden considerar variables aleatorias, dado que no se conocen con precisión. El desarrollo tecnológico y social ha logrado que en las últimas décadas los vehículos de carga sean mejores, tanto en velocidad como en capacidad de tonelaje. Por otro lado, los puentes han sido diseñados con criterios y reglamentos previos a su construcción, por lo que dependiendo de su antigüedad será su vulnerabilidad ante las nuevas demandas.

El presente análisis de comportamiento de puentes ante el fenómeno de fatiga, enmarca un entorno de riesgo probabilista, con variables de cargas aleatorias y predicciones de comportamiento futuro ante dicho fenómeno. Además, con el afán de facilitar el cálculo, en este trabajo se sistematiza la metodología de análisis estadístico y riesgo de fatiga en puentes de acero ante cargas aleatorias de tráfico pesado, a través de un programa de interfaz gráfico llamado DIP, elaborado en el lenguaje C, con el compilador Microsoft Visual Studio.

Desde finales de los años ochentas, en el LCPC se han realizado trabajos encaminados al estudio de la demanda de tráfico pesado en puentes de Francia (Jacob et al, 1989). En 1999 O'Connor y O'Brien continuaron realizando análisis de cargas de tráfico y sus efectos, utilizando simulaciones basadas en datos estadísticos. A partir de éstos y otros trabajos recientes, el interés del tema se ha incrementado, dada la necesidad de seguir operando a los puentes en las condiciones existentes y a la escasez de recursos económicos para mantenerlos, rehabilitarlos, o en el peor de los casos, demolerlos y hacer su reposición.

La metodología que se desarrolla en este trabajo engloba procesos estadísticos, de valores extremos y de análisis de fatiga, tomando en cuenta un conjunto de criterios que permiten dar un mejor enfoque a la problemática de deterioro de los puentes, producto del tráfico vehicular pesado.

En la Figura 2.1 se muestra el esquema general de la metodología, donde se puntualizan los procesos a seguir, así como algunas consideraciones propias de esta investigación. También la Figura 2.1, en cierta manera, muestra de forma general el diagrama de flujo que sigue el programa DIP durante el proceso de análisis y evaluación de puentes.

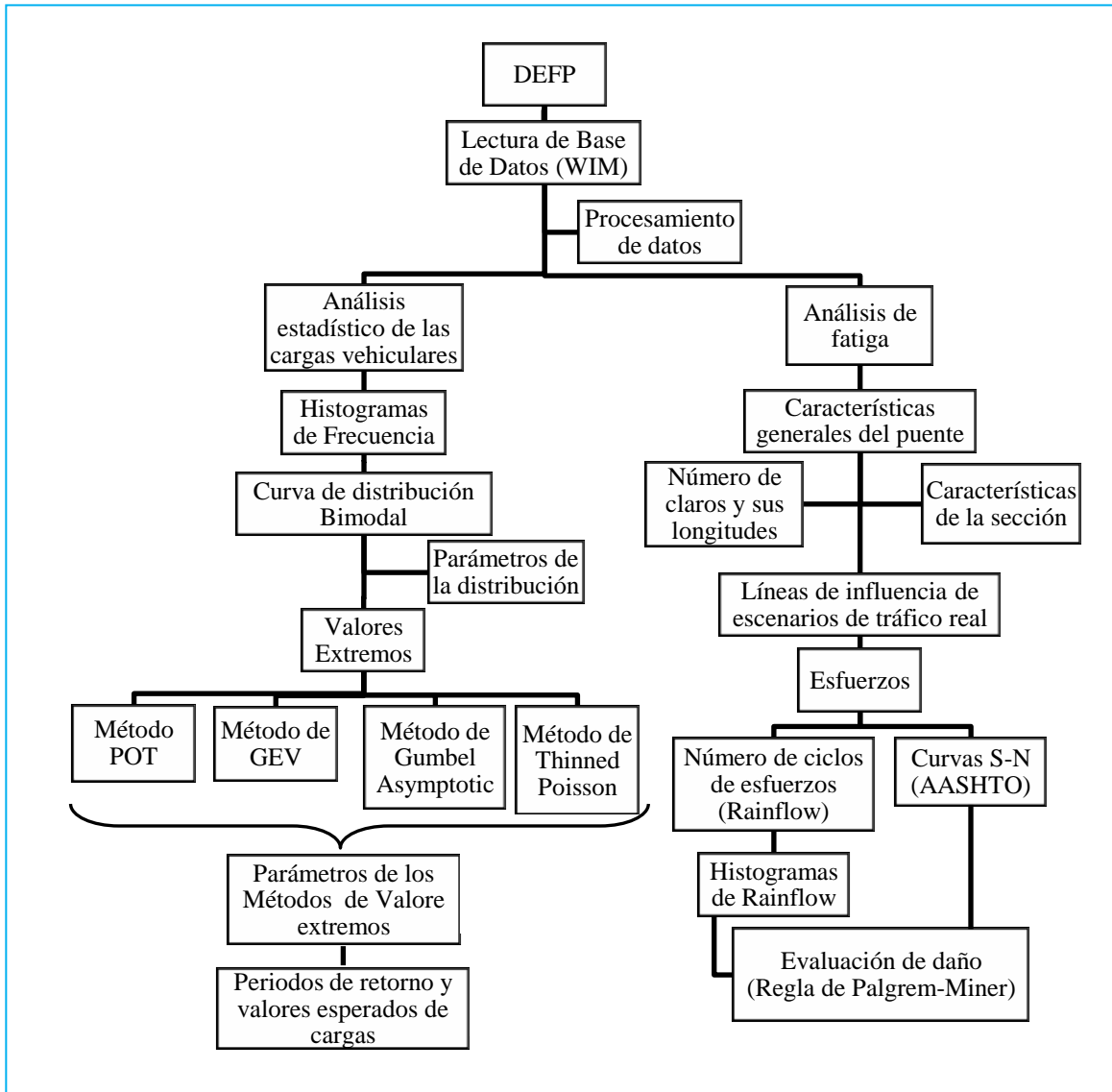


Figura 2.1. Metodología integral para el análisis y evaluación de puentes carreteros.

En los siguientes párrafos se describe la metodología que sustenta a este trabajo de investigación, así como también la teoría correspondiente a cada tema, utilizando un conjunto de procedimientos y principios lógicos que permiten alcanzar los objetivos establecidos. Las bases de los métodos y procesos utilizados se tratan a detalle, haciendo que cada tema se comprenda con claridad. La metodología nace a partir de una posición teórica y conlleva a una selección de técnicas y métodos concretos para su realización.

2.1. BASE DE DATOS DE REGISTROS DE WEIGH IN MOTION (WIM)

Las estaciones de pesaje estático son la forma más común de medir las cargas vehiculares, por lo que han estado en funcionamiento durante muchos años en la mayoría de las carreteras federales de muchos países, con el fin de garantizar que los camiones de carga no sobrepasen los pesos jurídicamente permitidos en las localidades correspondientes. Desafortunadamente, las estaciones existentes no son suficientes ante el aumento del parque vehicular de transporte pesado, lo que provoca que aumente la longitud de las colas durante el pesaje. Como consecuencia, se ven transitando ilegalmente camiones con sobrecarga a través de las redes viales (Katz, 2001).

Con el fin de acelerar el proceso de pesaje vehicular, los sistemas de *Weigh In Motion* (WIM) se han instalado en muchos lugares de Europa y Norteamérica. Cabe resaltar que los registros almacenados de WIM de carreteras de Francia son la base principal de este trabajo de tesis, ya que con estos datos se han realizado todos los procesos de la metodología propuesta.

2.1.1. ASPECTOS GENERALES DE LOS SISTEMAS WIM

Una visión general de la tecnología de pesaje dinámico, con la cual fueron obtenidos los datos utilizados en este trabajo de tesis, se describe a continuación. El sistema automatizado de pesaje dinámico conocido como *Weigh In Motion* (WIM) está definido por las normas de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) como un conjunto de sensores e instrumentos de apoyo que miden la presencia de un vehículo en movimiento y las fuerzas dinámicas relacionadas con los neumáticos, en ubicaciones específicas con respecto al tiempo, además, mide la velocidad, distancia entre ejes, cargas por neumáticos, cargas por ejes y peso total del vehículo (Katz, 2001).

Por lo tanto, el sistema WIM convierte a una vialidad en una balanza que pesa el tráfico mientras fluye (Jacob et al, 1989). Dicho sistema ofrece un mejor panorama de las variables aleatorias del tráfico vehicular. Como consecuencia, los efectos de fatiga en puentes, determinados a partir de escenarios de cargas vehiculares reales, son más representativos que aquellos determinados a partir de datos de tráfico generado artificialmente (Getachew, 2003).

Los proveedores de estos sistemas recomiendan realizar una evaluación del sitio donde se ubicará el equipo de WIM, antes de hacer su instalación, así como establecer el periodo de registro de datos. Dentro del presupuesto que integra la instalación y el buen funcionamiento del sistema WIM deben considerarse los recursos apropiados, partiendo del nivel de precisión de datos requerido, entonces, un adecuado procedimiento de control de calidad debe ser desarrollado e implementado para garantizar que los datos registrados sean válidos. Aunado a lo anterior, es importante asegurar que el periodo de garantía del equipo es el suficiente para recolectar los datos necesarios.

Entonces, la instalación del sistema WIM debe ser supervisada por la parte interesada (representante gubernamental o particular) y el proveedor, asegurando que los requisitos se cumplan durante el proceso de instalación.

En general, los sistemas WIM pueden clasificarse en tres tipos: por placas de flexión, por sensores piezoeléctricos y por celda de carga. Los principios básicos que deben tenerse en cuenta antes de seleccionar un sistema WIM son:

1. Definir claramente el periodo de vida, el nivel de rendimiento y la precisión del sistema, dependiendo del sitio de ubicación.
2. Destinar los recursos financieros y técnicos necesarios para alcanzar la vida de diseño y el nivel de rendimiento.
3. Considerar los siguientes aspectos del sistema:
 - 3.1. Tipo de sensor.
 - 3.2. Ubicación del procesador de datos.
 - 3.3. Comunicación de módem remoto.
 - 3.4. Software de operación.
 - 3.5. Formato de datos de salida.

La ASTM clasifica a los sistemas WIM en cuatro tipos, de acuerdo a su solicitud, funcionamiento y rendimiento. Estos sistemas tienen diferentes rangos de velocidad, así como distintas aplicaciones y capacidades de recopilación de datos. La Tabla 2.1 muestra la información de los cuatro tipos de sistemas.

Tabla 2.1. Clasificación de los sistemas WIM.

| Característica \ Tipo de WIM | Clasificación | | | |
|--|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | TIPO I | TIPO II | TIPO III | TIPO IV |
| Rango de Velocidad | 16 - 113 km/h (10 - 70 mph) | 16 - 113 km/h (10 - 70 mph) | 24 - 80 km/h (15 - 50 mph) | 24 - 80 km/h (15 - 50 mph) |
| Aplicación | Recolección de datos de tráfico | Recolección de datos de tráfico | Estación de peso aplicado | Estación de peso aplicado |
| Número de carriles | Hasta cuatro | Hasta cuatro | Hasta cuatro | Hasta cuatro |
| Placa de flexión | X | X | X | X |
| Sensor piezoeléctrico | X | X | | |
| Celda de carga | X | X | X | X |
| Carga por rueda | X | | X | X |
| Carga por eje | X | X | X | X |
| Carga por grupo de ejes | X | X | X | X |
| Peso bruto del vehículo | X | X | X | X |
| Velocidad | X | X | X | X |
| Distancia de eje a eje | X | X | X | X |
| Clase de vehículo | X | X | | |
| Código de identificación del sitio | X | X | X | X |
| Carril y dirección del tráfico | X | X | X | |
| Fecha y hora de paso | X | X | X | X |
| Numeración secuencial de vehículos registrados | X | X | X | X |
| Distancia del eje frontal al eje final | X | X | | |
| Carga equivalente de un solo eje | X | X | | |
| Violación al Código | X | X | X | X |

2.1.2. TIPOS DE SISTEMAS WIM

Como ya se ha mencionado, existen tres tipos de sistemas WIM: por placas de flexión, por sensores piezoeléctricos y por celda de carga. Los sistemas WIM de placa de flexión utilizan placas con galgas extensométricas colocadas en la parte inferior. Cuando un vehículo pasa por encima de la placa de flexión, el sistema registra el esfuerzo, medido con la galga extensométrica, y calcula la carga dinámica. La carga estática se calcula utilizando la carga dinámica y parámetros de calibración. Los parámetros de calibración toman en cuenta factores como la velocidad del vehículo y la relación pavimento-suspensión vehicular dinámica.

Los sistemas WIM de sensores piezoeléctricos utilizan sensores para detectar un cambio en los esfuerzos, a causa de la presión que ejerce un eje vehicular, midiendo así su peso. Cuando un vehículo pasa por el sistema piezoeléctrico, el sistema registra la carga eléctrica generada en el sensor y calcula la carga dinámica. La carga estática se obtiene utilizando la carga dinámica y parámetros de calibración.

Los sistemas WIM de celda de carga utilizan una sola celda con dos básculas para detectar un eje, y pesar a la vez, las cargas ejercidas en el neumático derecho e izquierdo. Como el vehículo pasa por encima de la celda de carga, el sistema registra el peso en cada báscula y obtiene el peso por eje. La carga estática se calcula de manera similar a los sistemas anteriores.

2.1.3. SENSORES UTILIZADOS EN LOS SISTEMAS WIM

El sistema de placa de flexión WIM consiste de al menos una báscula y dos circuitos indicadores de presencia vehicular. Las básculas se colocan en el carril de circulación en forma perpendicular a la dirección del tráfico. Cuando se utilizan dos básculas en un carril, cada una se coloca en el lugar donde pasarán los neumáticos sobre la vía de circulación, así las ruedas izquierda y derecha son pesadas individualmente. Los circuitos indicadores de presencia son colocados aguas arriba y aguas abajo de las básculas. El circuito aguas arriba se utiliza para detectar a los vehículos y activar el sistema de alerta cuando un vehículo se aproxima. La velocidad del vehículo se utiliza para estimar la distancia entre ejes, y ésta se puede determinar ya sea midiendo el tiempo de la plataforma de peso al circuito indicador de presencia, de la plataforma de peso al eje del sensor o de plataforma a plataforma de peso, si éstas están

escalonadas. Sí un sensor de eje se utiliza para determinar la velocidad del vehículo, éste se coloca debajo de la plataforma de peso. Un ejemplo del diseño de un sistema WIM de placa de flexión se muestra en la Figura 2.2.

Los sistemas WIM piezoeléctricos consisten de uno o más sensores colocados en la vía de circulación, además deben de tener por lo menos un circuito indicador de presencia vehicular. Los sensores están encapsulados en un canal metálico (generalmente de aluminio). Este sistema se clasifica según la ASTM como tipo I o II, en función de la utilización prevista del producto y el número de sensores situados en la vialidad. El sensor se coloca en el carril de circulación en forma perpendicular a la dirección del tráfico. Los circuitos indicadores de presencia se colocan aguas arriba y aguas abajo del sensor. El circuito de aguas arriba se utiliza para detectar los vehículos y activar el sistema de alerta cuando un vehículo se aproxima. El circuito de aguas abajo se utiliza para determinar la velocidad y distancias entre ejes, basándose en el tiempo de paso. Un ejemplo de la forma de un sistema WIM piezoeléctrico se muestra en la Figura 2.3.

El sistema WIM de celda de carga contiene por lo menos una celda, un circuito indicador de presencia vehicular y un sensor de ejes. Este sistema es clasificado por la ASTM como tipo I, II, III o IV según el diseño requerido. La celda tiene dos básculas en línea que operan de forma independiente. Detectores fuera de escala se integran en el conjunto de básculas para registrar cualquier vehículo que pase sobre la superficie de pesaje. La celda de carga se coloca en el carril de circulación en forma perpendicular a la dirección del tráfico. El circuito indicador de presencia se coloca aguas arriba de la celda de carga para detectar los vehículos y activar el sistema de alerta cuando un vehículo se aproxima. Si un segundo circuito indicador de presencia es usado, éste se coloca aguas abajo de la celda de carga para obtener las distancias entre ejes y la velocidad del vehículo. Un ejemplo de la forma de un sistema WIM de celda de carga se muestra en la Figura 2.2.

2.1.4. CAPACIDAD DEL PROCESADOR DE LOS SISTEMAS WIM

Los sistemas WIM utilizan unidades de procesamiento para clasificar y analizar la información obtenida por los sensores colocados en las vialidades. Un típico sistema WIM (de cualquier tipo) puede procesar más de 15,000 vehículos al día y almacenar datos de pesaje por lo menos durante 30 días continuos para una instalación de cuatro carriles.

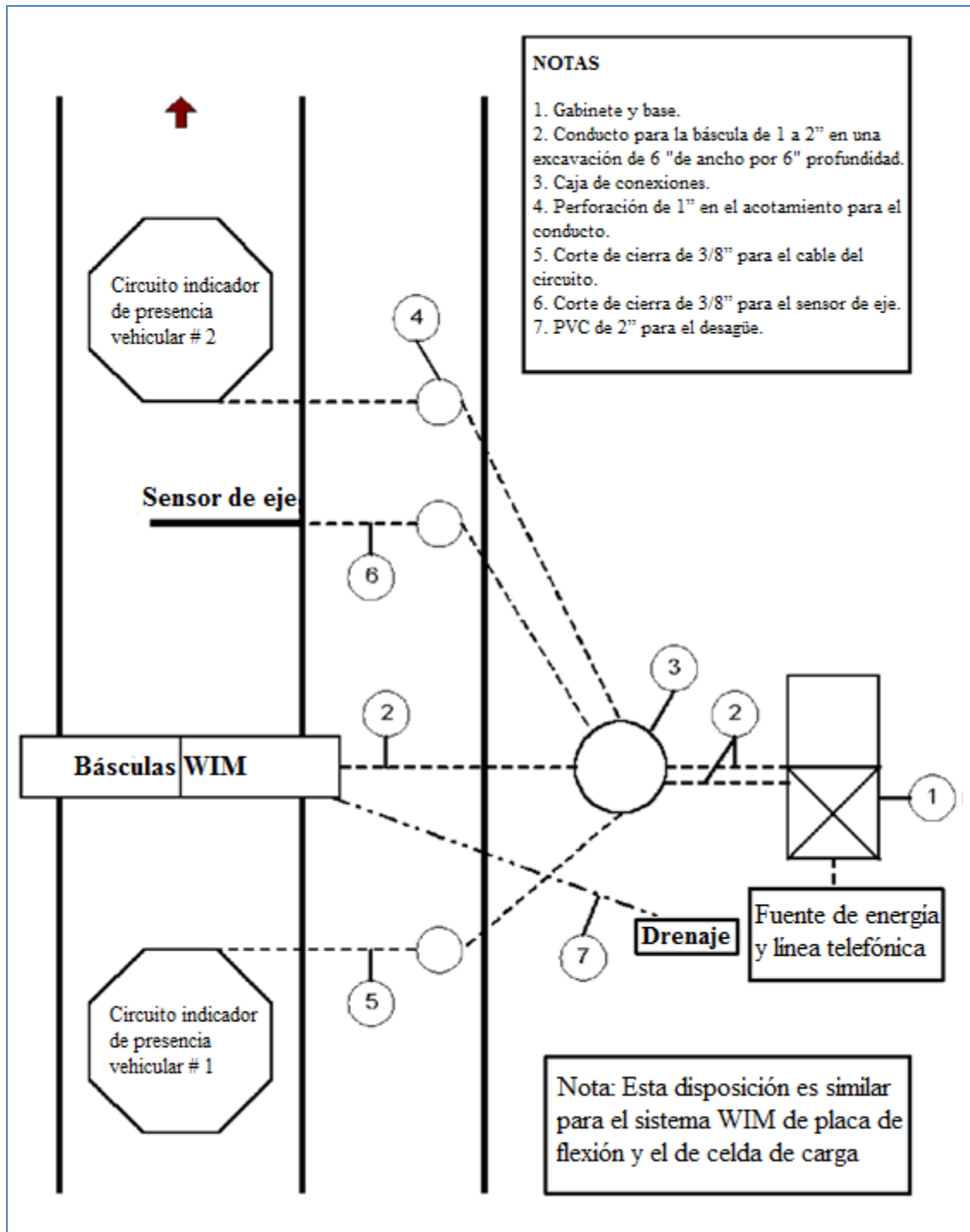


Figura 2.2. Sistema WIM de placa de flexión y de celda de carga.

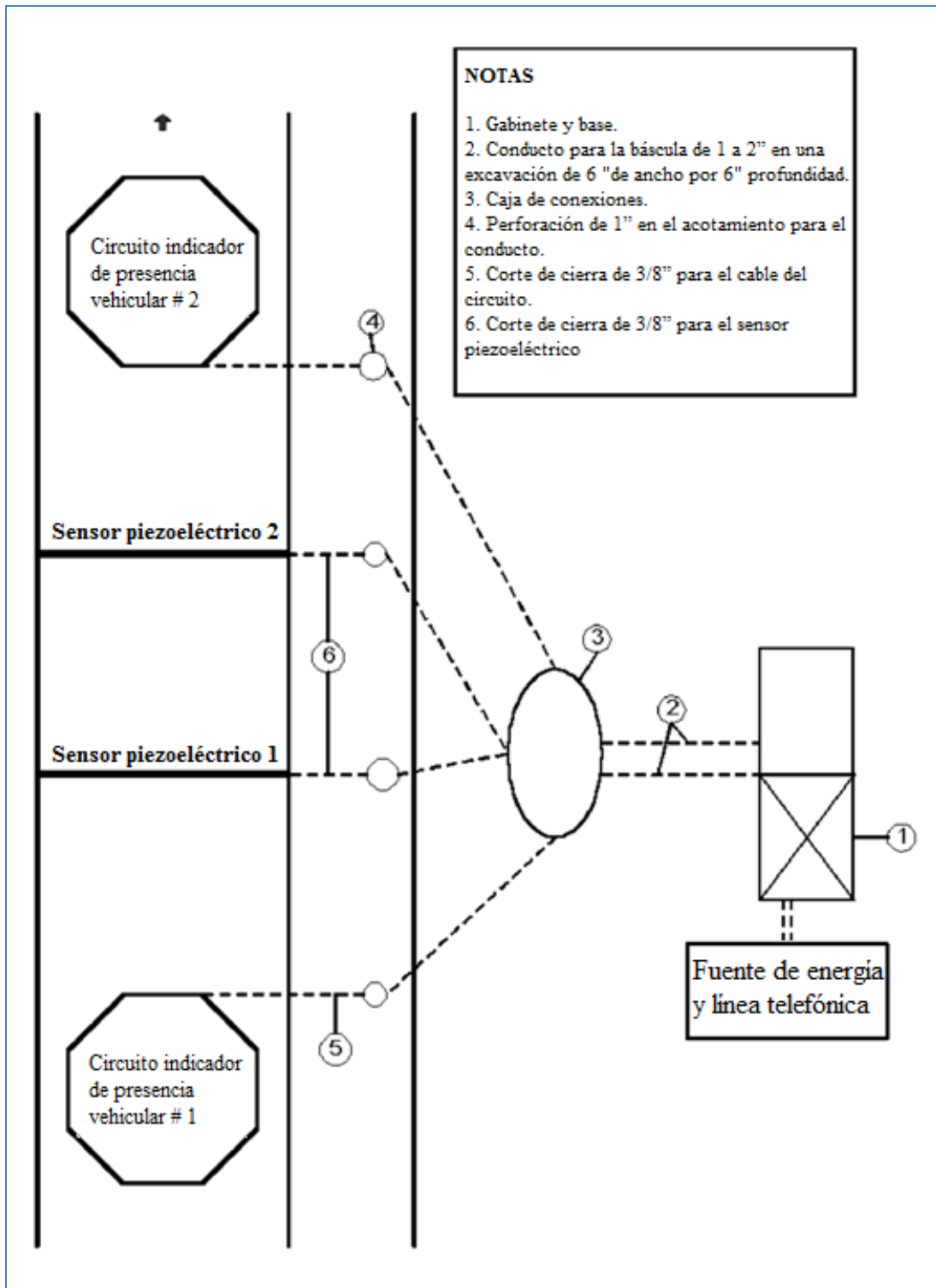


Figura 2.3. Sistema WIM de sensores piezoeléctricos.

2.1.5. MÓDEM DE COMUNICACIÓN A DISTANCIA DE LOS SISTEMAS WIM

El módem utilizado para la recopilación de datos de monitoreo de los sistemas WIM de placa de flexión y de celda de carga necesitan funcionar en una línea telefónica estándar de al menos 1,200 bits por segundo (bps), mientras que el sistema WIM de sensor piezoeléctrico necesita de 2,400 bps, pero preferiblemente se recomienda usar por lo menos 9,600 bps en cualquiera de los tres sistemas. La cantidad de datos registrados en el lugar y la frecuencia de descarga deben considerarse al momento de seleccionar la línea telefónica y el módem de comunicación.

2.1.6. SOFTWARE DE OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS WIM

El software general de los sistemas WIM incluye tres paquetes de software independientes: software in situ (en el sitio de instalación), software de comunicaciones (en el módem) y software receptor (en la empresa o lugar de destino). Un típico software in situ interpreta las señales de la báscula de WIM y genera los archivos en el sitio, incluyendo información tal como:

- Identificación del sitio
- Fecha y hora de paso
- Número de carriles
- Número secuencial de vehículo
- Velocidad del vehículo
- Clasificación del vehículo
- Peso de todos los ejes o grupos de ejes
- Código para medición no válida
- Configuración gráfica opcional
- Valor equivalente de carga por eje

El software de comunicaciones permite hacer cambios a la configuración del software in situ y también permite modificar los factores de calibración de la computadora en el sitio receptor. El software receptor genera listas de información de los datos obtenidos y permite que los

informes sean generados durante el registro de pesaje vehicular. Tanto el software de comunicaciones como el software receptor hacen posible realizar las siguientes tareas:

- Registro del tiempo real del paso de los vehículos (por carril).
- Ajuste del reloj del sistema.
- Monitoreo de la memoria de almacenamiento de datos (en términos de espacio restante).
- Generación del informe de datos almacenados.
- Visualización de informes generados.
- Generación y visualización de informes de errores que incluyen: tiempo de inactividad, tiempo de acceso al sistema, calibración automática, y registros mal completados.
- Transferencia de informes generados, desde el sistema in situ hasta el equipo receptor.
- Eliminación de archivos antiguos en el sistema.

2.1.7. FORMATO DE DATOS DE SALIDA DE LOS SISTEMAS WIM

El software receptor es capaz de generar informes de tráfico vehicular diarios, semanales o mensuales. También puede generar informes sobre los errores, auto-calibración, historia del sitio, historia de calibración y registro de vehículos con sobrecarga.

Como ya se ha mencionado, los sistemas WIM proporcionan información que puede ser utilizada para la evaluación de los puentes ante cargas de tráfico real. Dentro de esta información se manejan variables como el tiempo de llegada de los vehículos, la magnitud y distribución de cargas, así como también las distancias entre ejes.

La Tabla 2.2 muestra el formato estándar en que los sistemas WIM dan a conocer los datos de tráfico vehicular. La Figura 2.4 muestra la forma en que se presentan los registros de WIM en formato de texto.

Para realizar el estudio de tráfico mediante el programa DIP, el archivo de datos de WIM debe de tener éste formato estándar, pues sólo así, podrá manipularse la información.

Tabla 2.2. Formato estándar de los registros de WIM.

| Datos por columna | Unidad |
|--|--------|
| Encabezado | - |
| Día | - |
| Mes | - |
| Año | - |
| Hora | - |
| Minuto | - |
| Segundo | - |
| Centésima de segundo (segundo/100) | - |
| Velocidad | dm/s |
| Peso total del vehículo | kN |
| Longitud total del vehículo (del eje inicial al eje final) | dm |
| Numero de ejes | |
| Peso en el eje 1 | kN |
| Longitud del eje 1 al eje 2 | dm |
| Peso en el eje 2 | kN |
| Longitud del eje 2 al eje 3 | dm |
| ... | ... |
| Longitud del eje n-1 al eje n | dm |
| Peso en el eje n | kN |

The image shows a screenshot of a data file with 33 rows and 33 columns. Each row represents a record with 33 numerical values. The values are organized into groups of 5, 5, 5, 5, and 3 values per row. The first five columns correspond to the 'Encabezado' (header) fields: Day, Month, Year, Hour, and Minute. The next five columns correspond to the 'Velocidad' (velocity) field. The following five columns correspond to the 'Peso total del vehículo' (total weight) field. The next five columns correspond to the 'Longitud total del vehículo' (total length) field. The final three columns correspond to the 'Numero de ejes' (number of axles) field. The values are mostly zeros, with some non-zero values appearing in the later columns, particularly in the 26th, 27th, and 28th columns.

Figura 2.4. Archivo de registros de WIM.

2.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CARGAS VEHICULARES

Históricamente los ingenieros han propuesto modelos, principalmente basados en estudios estadísticos, para la determinación de las cargas de diseño, sobre todo cuando se trata de obras importantes, por ejemplo, en los años setentas con la construcción de cortinas de presas de gran magnitud, se determinaban las avenidas máximas que se podrían presentar de 1,000 a 10,000 años y con ello se obtenían los datos de diseño. Por lo anterior, se han desarrollado modelos de predicción de valores extremos para diferentes periodos, basados en las distribuciones estadísticas de variables críticas como lo son: avenidas máximas, precipitaciones de lluvia, magnitudes e intensidades sísmicas, velocidades máximas de viento, etc. Para este trabajo de tesis, las variables de interés son los pesos en movimiento de los vehículos y su distribución.

Teniendo una base de registros de cargas vehiculares, como lo es la de WIM, la metodología presentada en este trabajo inicia con el análisis estadístico de cargas, con lo que se identificarán las distribuciones probabilistas y se determinarán los parámetros necesarios para el análisis de valores extremos.

En primera instancia, el análisis estadístico de cargas conlleva a la generación de histogramas de frecuencia, los cuales son gráficas de barras que describen la distribución de las variables aleatorias para diferentes intervalos de magnitud de los registros.

El programa DIP genera este tipo de gráficos con tan solo ingresar el archivo de registro de WIM en formato de texto, procurando que éste tenga la configuración mencionada en el subcapítulo 2.1.6. Enseguida, se le tiene que dar el parámetro de rango o intervalo de cargas y se selecciona la columna de los datos que se desea analizar. Con estos pasos se obtienen los histogramas de frecuencia normal y relativa. El algoritmo que sustenta a este proceso viene incluido dentro del CD del Anexo B.

Dentro del estudio estadístico, a menudo se presentan curvas de ajuste para describir la distribución de los datos. De estas curvas de distribución la más conocida es la Distribución Normal o campana de Gauss. Sin embargo, la mayoría de los datos de cargas vehiculares presentan distribuciones de tipo multimodal (Figura 2.5), debido a la forma de los histogramas de frecuencia. Estas distribuciones se expresan de la siguiente manera:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n p_i \Phi\left(\frac{x - \mu_i}{\sigma_i}\right) \quad (2.1)$$

donde:

Φ , es la función que se ajusta a la curva de distribución (normalmente exponencial).

p_i , es la constante de proporcionalidad que divide a las poblaciones de datos.

μ_i , es la media aritmética de la población i .

σ_i , es la desviación estándar de la población i .

x , son las variables aleatorias (cargas de tráfico vehicular).

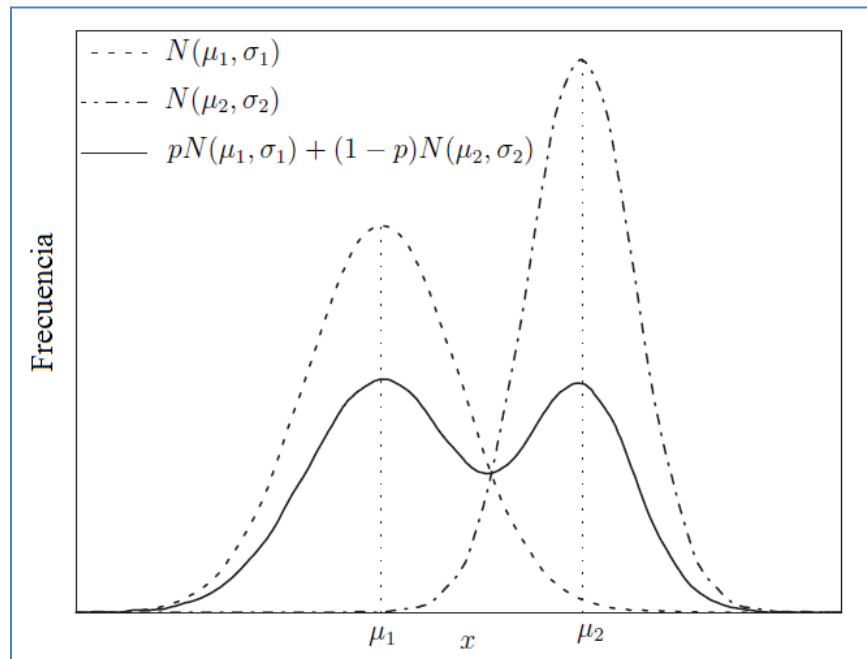


Figura 2.5. Distribución de probabilidad multimodal.

Para la distribución de probabilidad de todos los datos, descrita por la ecuación (2.1), son validas las siguientes ecuaciones:

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (2.2)$$

$$\mu = \sum_{i=1}^n p_i \mu_i \quad (2.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^n p_i (\mu - \mu_i)^2} \quad (2.4)$$

El conocer la distribución multimodal de los histogramas de frecuencia relativa, permite determinar los parámetros característicos de dicha distribución, necesarios para el estudio de valores extremos, específicamente, al utilizar el Método de Gumbel y el Proceso de Poisson Suavizado (Arroyo, 2009), que se describirán en capítulos posteriores.

Debido a la forma que presenta la mayoría de los histogramas de frecuencia de cargas de vehículos pesados, se ha llegado a la conclusión que la distribución de probabilidad *bimodal* es la que mejor se ajusta (Figura 2.6), debido a que se tiene una tendencia bien definida de dos modas (Arroyo, 2009). La distribución bimodal se expresa de la forma:

$$f(x) = \frac{p}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + \frac{1-p}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (2.5)$$

donde: p , es la constante de proporcionalidad para la primera población de datos.

m_i , es la media aritmética de la población i .

σ_i , es la desviación estándar de la población i .

x , son las variables aleatorias.

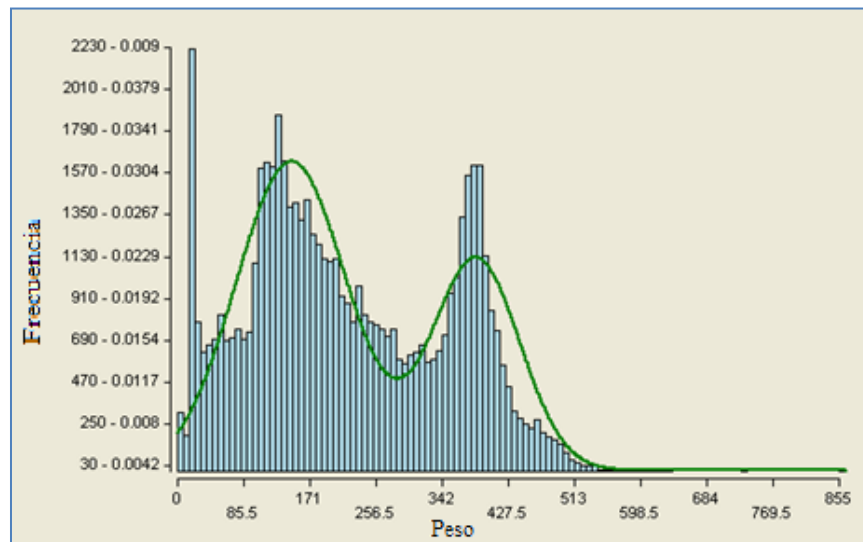


Figura 2.6. Distribución de probabilidad bimodal.

Tomando como referencia el histograma de frecuencia relativa que se haya generado, el programa DIP realiza de manera numérica el proceso de cálculo de los parámetros de la distribución normal y bimodal, además, expresa los resultados imprimiendo la gráfica correspondiente (Figura 2.6).

En el algoritmo desarrollado dentro del programa DIP, el parámetro p se determina mediante un proceso de interacción, variándolo desde cero hasta el valor máximo de carga registrado. En cada interacción, se van obteniendo los parámetros y se mide la distancia entre los puntos de la curva de distribución y las barras del histograma. La curva de distribución final será aquella que tenga la menor sumatoria de distancias, es decir, la que más de ajusta.

Conociendo el parámetro p , se deducen los parámetros restantes de la distribución (m_1, m_2, σ_1 y σ_2), para cada población de datos. Las características de la curva bimodal serán determinantes para el análisis de valores extremos.

2.3. VALORES EXTREMOS DE CARGAS VEHICULARES

El siguiente proceso de la metodología, consiste en el estudio de valores extremos de pesaje vehicular, partiendo de los parámetros probabilísticos obtenidos en el análisis estadístico. La teoría de valores extremos proporciona técnicas simples para la estimación de probabilidades de ocurrencia de niveles extremos en registros de datos históricos. Para la evaluación del estado de deterioro de los puentes, es necesario conocer la frecuencia y el periodo de retorno de un intervalo de registros de cargas. Las distribuciones de valores extremos son a menudo usadas para analizar estadísticamente eventos máximos de ocurrencia, ya sea en fenómenos naturales, o como en este caso, en cargas de tráfico vehicular. La teoría de valores extremos fue desarrollada, entre otros, por Frechet (1927), Fisher y Tippet (1928) y Gumbel (1958). Los trabajos realizados por estas personas han sido la base para la deducción de las principales distribuciones de valores extremos.

Como consecuencia de la constante evolución de los vehículos de carga, la ocurrencia de eventos extremos puede estar cambiando de manera no trivial, de forma tal que éstos tienden a ocasionar mayores riesgos de falla estructural en puentes carreteros.

Los eventos raros o valores extremos están asociados a bajas probabilidades de ocurrencia, por lo tanto son la cola de cualquier función de distribución de probabilidad. La definición de valores extremos o “raros” varía, pero podría ser normalmente cuando su probabilidad de ocurrencia es inferior al 10 %. En el estudio de valores extremos es necesario separar estos valores de la distribución de referencia.

Las distribuciones de valores extremos son, generalmente, expresadas como funciones de densidad de probabilidad. Estas funciones son específicamente utilizadas para estimar sucesos de baja probabilidad (tradicionalmente expresados como un periodo de retorno). Las funciones son asimiladas a los datos usando varios procesos de prueba, de los cuales los más utilizados son la máxima verosimilitud (ML) y la probabilidad de momentos ponderados, también conocida como M-Momentos.

Los métodos de análisis de valores extremos de una sola variable se pueden clasificar en dos principales categorías:

- Enfoque de umbral, usando todas las excedencias que sobrepasen un determinado umbral alto, descrito por la distribución de Pareto Generalizada (GPD).
- Enfoque de máximos por bloque, estudiando los tres tipos de distribuciones límites de la teoría de valores extremos: Valores Extremos Generalizados (GEV), Weibull y Gumbel.

En investigaciones precedentes sobre el análisis de tráfico vehicular en puentes, comúnmente se ha usado el segundo método. Sin embargo, al utilizar el enfoque de máximos por bloque se desperdician datos, haciendo que el análisis sea un tanto impreciso.

Por lo anterior, se decidió que en este trabajo se realice el análisis de valores extremos del pesaje dinámico, aprovechando todos los registros disponibles, del orden diario y no anual, mediante la aplicación del método de POT. Básicamente se utilizan los datos que se encuentran por encima de un umbral establecido, que se supone siguen una distribución paramétrica de GPD.

2.3.1. MÉTODO DE POT: ENFOQUE DE REBASE DE UMBRAL

El enfoque de rebase de umbral es el método implementado en este trabajo de tesis para el análisis de valores extremos de cargas de tráfico real. Este método es comúnmente utilizado en otros tipos de estudios, como en el fenómeno de oleaje (González J. et al, 2005). La caracterización de los valores extremos de la altura del oleaje es de vital importancia en la construcción de estructuras marítimas expuestas a las inclemencias oceánicas durante largos periodos de tiempo. La teoría en la que se basa el estudio de valores extremos se ha ganado un apartado propio dentro de la estadística clásica debido a las particularidades que presenta. El objetivo fundamental que se persigue es la estimación de valores máximos a periodos de retorno muy largos, por ejemplo, de 100, 500 o 1000 años, a través del ajuste de funciones de distribución de probabilidad de los datos observados.

Debido a los buenos resultados que se han obtenido en los estudios del oleaje, el método de POT es aplicado dentro de la metodología propuesta en esta tesis. Se sabe que la modelación de máximos por bloque (método de GEV) está limitada para el análisis de valores extremos cuando los datos disponibles se presentan en series de valores horarios, diarios o mensuales. En la Figura 2.7 las observaciones $x_1, x_2, x_7, x_8, x_{11}$ exceden el umbral (u), por lo que se pueden considerar como sucesos extremos.

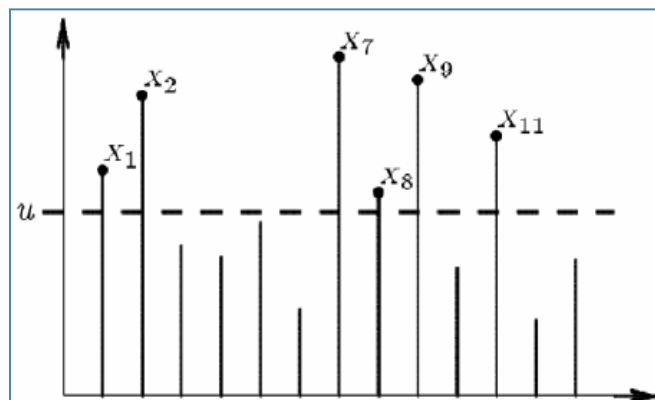


Figura 2.7. Valores de rebase de un umbral.

Uno de los puntos principales de este proceso es la selección de un umbral adecuado, con el cual se determinarán las excedencias. El método de POT establece que la selección del umbral puede ser realizada basándose en gráficas de comportamiento de rebases promedios de umbrales.

En estas gráficas se visualizan las excedencias medias que se tienen al asignar un determinado umbral. En el eje de las abscisas se encuentran los valores del umbral (u), mientras que en el eje de las ordenadas están los valores medios de excedencias, correspondientes a cada umbral, los cuales son calculados con la siguiente expresión:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{(i)} - u) : u < x_{\max} \quad (2.6)$$

donde $x_{(i)}$ son los valores que exceden el umbral u ; y n es el número total de excedencias para dicho umbral. En la Figura 2.8 se muestra una gráfica de umbrales tipo, que resulta a partir de la ecuación (2.6).

El umbral u se seleccionará del intervalo de valores donde la gráfica tiene un comportamiento lineal y horizontal (paralelo al eje de las abscisas).

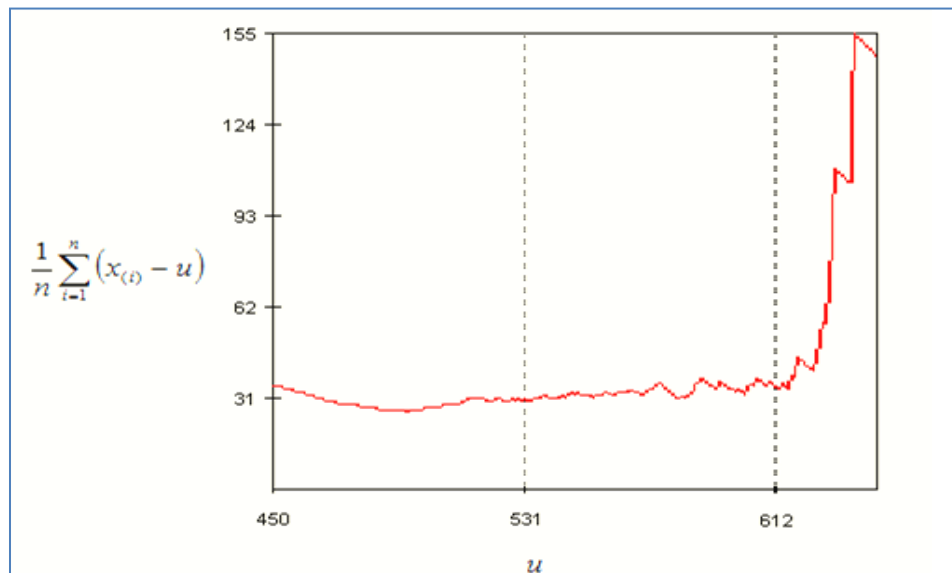


Figura 2.8. Gráfica de umbrales contra excedencias medias.

El método de POT tiene dos principales cuestiones: cuántas excedencias sobrepasan el umbral establecido en un periodo de tiempo dado, y cuáles son los valores de sus excedencias. Por lo anterior, se usa la distribución de Pareto Generalizada (GPD), mostrada en la Figura 2.9.

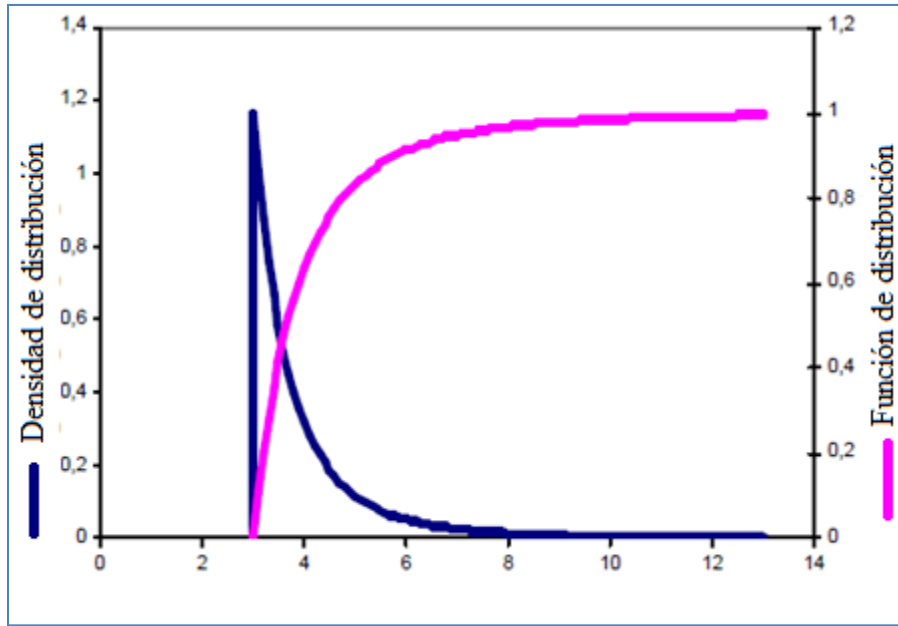


Figura 2.9. Distribución de Pareto Generalizada (GPD); Fuente: Smith, 2001.

Sabiendo que X es una variable aleatoria cuya función de distribución es F y siendo $Y = X - u$, condicionado en $X > u$, entonces:

$$\Pr[Y \leq y] = \Pr\{X \leq u + y \mid X > u\} = F_u(y) = \frac{F(u + y) - F(u)}{1 - F(u)} \quad (2.7)$$

Lo interesante se presenta cuando u se acerca al punto límite superior. En este caso se tendrá siguiente aproximación:

$$F_u(y) = G(y, \sigma, \xi) \quad (2.8)$$

donde G es la Distribución de Pareto Generalizada (GPD) dada por:

$$G(y, \sigma, \xi) = 1 - \left(1 + \xi \left(\frac{y}{\sigma}\right)\right)^{-\frac{1}{\xi}} \quad (2.9)$$

donde μ , σ y ξ son los parámetros de localización, escala y forma respectivamente. Esta aproximación fue desarrollada por Pickands en el año de 1975.

Para la distribución GPD hay tres casos según el signo de ξ :

1. Si $\xi > 0$, entonces la ecuación 2.9 es válida entre $0 < x < \infty$
2. Si $\xi = 0$, entonces se tiene:

$$G(y, \sigma, \xi) = 1 - \exp\left(-\frac{y}{\sigma}\right) \quad (2.10)$$

que representa una distribución exponencial con media σ .

3. Si $\xi < 0$, la distribución G tiene un punto final superior finito en $-\sigma/\xi$. Entonces los resultados elementales de GPD son:

$$E(Y) = \frac{\sigma}{1-\xi}, \quad (\xi < 1),$$

$$Var(Y) = \frac{\sigma^2}{(1-\xi)^2(1-2\xi)}, \quad \left(\xi < \frac{1}{2}\right),$$

$$E(Y - y | Y > y > 0) = \frac{\sigma + \xi y}{1-\xi}, \quad (\xi < 1), \quad (2.11)$$

En el programa DIP se desarrollaron algoritmos con los que se obtiene la distribución de POT, calculando los parámetros de escala y forma mediante la estimación que deduce De Haan en su publicación de 1994. Dicha estimación se basa en ajustes matemáticos de la curva de GPD y la solución de las ecuaciones generadas a partir del proceso de máxima verosimilitud, haciendo uso de métodos numéricos. Las expresiones que De Haan dedujo para el cálculo de los estimadores del método de POT son:

$$\hat{\sigma} = \rho X_{n-k}^* H_{k,n} \quad y \quad \hat{\xi} = H_{k,n} + 1 - \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{(H_{k,n})^2}{H_{k,n}^{(2)}} \right\}^{-1} \quad (2.12)$$

donde X_{n-k}^* es el umbral establecido (u); $\rho = 1$ si $\xi \geq 0$ y $\rho = 1 - \xi$ si $\xi < 0$. Los valores de $H_{k,n}$ y $H_{k,n}^{(2)}$ se determinan de la siguiente manera:

$$H_{k,n} = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} \{ \ln(X_{n-i}^*) - \ln(X_{n-k}^*) \} \quad \text{y} \quad H_{k,n}^{(2)} = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} \{ \ln(X_{n-i}^*) - \ln(X_{n-k}^*) \}^2 \quad (2.13)$$

donde X_{n-i}^* son los valores que sobrepasan el umbral establecido ($X_{n-k}^* = u$); k es el número de observaciones sobre el umbral; n es el número total de datos.

Conociendo los parámetros anteriores, se pueden calcular los valores máximos de pesos esperados para ciertos periodos de retorno. A menudo, es más conveniente dar los valores máximos de cargas para periodos de retorno anuales. Este valor máximo esperado (z_N) es el peso que se supone superará los estándares una vez cada N años. Si hay n_y observaciones por año, esto corresponde a m -observaciones por valor de retorno, donde $m = N \times n_y$.

Por lo tanto, el valor de z_N , para un periodo de retorno de N -años, se define como la inversa de la ecuación de POT, expresada de la siguiente manera:

$$z_N = u + \frac{\sigma}{\xi} \left[(N n_y \zeta_u)^\xi - 1 \right] \quad \text{para } \xi > 0 \quad (2.14)$$

$$z_N = u + \sigma \log(N n_y \zeta_u) \quad \text{para } \xi = 0 \quad (2.15)$$

donde ζ_u es el cociente entre la cantidad de valores que rebasan el umbral (u) y el número de eventos de la población analizada. Estas expresiones forman parte del algoritmo del programa DIP, con las cuales hace el análisis de valores extremos, generando gráficas y resultados en un interfaz visual.

2.3.2. MÉTODO DE GEV: ENFOQUE DE MÁXIMOS POR BLOQUE

El enfoque de máximos por bloque considera los valores máximos de una variable aleatoria obtenidos durante periodos sucesivos, por ejemplo años o décadas.

Las observaciones máximas, seleccionadas en cada intervalo de tiempo, constituyen los sucesos extremos, también conocido como conjunto de máximos por periodo. La Figura 2.10 muestra que las observaciones x_2 , x_5 , x_7 y x_{11} son los valores máximos por bloque durante cuatro periodos respectivamente.

La elección del tamaño del bloque puede ser crítica, pues la selección de bloques demasiado pequeños puede inducir a tendencias diferentes a las que se obtienen con bloques demasiado grandes (Coles, 2001), El enfoque de máximos por bloque está relacionado con el uso del método de GEV.

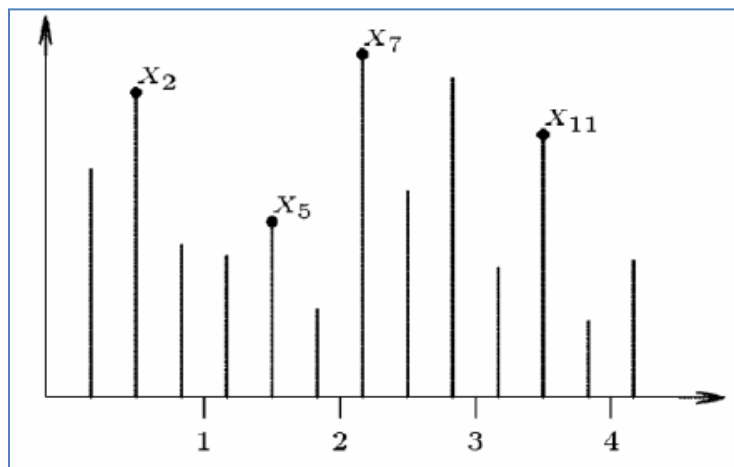


Figura 2.10. Valores máximos por bloque.

Las distribuciones de valores extremos son formalmente distribuciones límite para máximos, dada una secuencia de variables aleatorias. Suponiendo que X_1, \dots, X_n es una secuencia de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas (v.a.i.i.d.) con una función de distribución F , la función de distribución de máximos $M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\}$ está dada por:

$$\begin{aligned}
\Pr(M_n \leq x) &= \Pr(X_1 \leq x, X_2 \leq x, \dots, X_n \leq x) \\
&= \Pr(X_1 \leq x) \Pr(X_2 \leq x) \dots \Pr(X_n \leq x) \\
&= F^n(x)
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Si F es desconocida y se desea conocer M_n , entonces esta fórmula, obviamente, no es de ninguna ayuda. No obstante, aunque F sea desconocida, asintóticamente se puede deducir la distribución de M_n . Normalizando el uso de constantes enteras $a_n > 0$ y b_n se tiene:

$$\begin{aligned}
\Pr\left(\frac{M_n - b_n}{a_n} \leq x\right) &= \Pr(M_n \leq a_n x + b_n) \\
&= F^n(a_n x + b_n) \\
&\rightarrow H(x) \text{ cuando } n \rightarrow \infty
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Donde H es una función de distribución de probabilidad que no siempre es 0 ó 1. Entonces, resulta que hay solo tres tipos de distribuciones de valores extremos (máximos o mínimos) a pesar del tipo de distribución de datos de entrada (Fisher y Tippett, 1928). Estas distribuciones en su forma estándar son:

- Gumbel: $H(x) = \exp(-\exp(-x))$ para $-\infty < x < \infty$ (2.18)

- Weibull: $H(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ \exp(-(-x)^\alpha) & \text{si } -\infty < x < 0 \end{cases}$ (2.19)

- Fréchet: $H(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ \exp(-x^{-\alpha}) & \text{si } 0 < x < \infty \end{cases}$ (2.20)

Las distribuciones anteriores, con parámetros de localización, escala y forma, se expresan de la siguiente manera (Castillo, 1988):

- Gumbel: $H(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right)$ para $-\infty < x < \infty$, $\sigma > 0$ (2.21)

- Weibull: $H(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < \mu, \xi > 0, \sigma > 0 \\ \exp\left(-\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^\xi\right) & \text{si } x \geq \mu, \xi > 0, \sigma > 0 \end{cases}$ (2.22)

- Fréchet:
$$H(x) = \begin{cases} \exp\left(-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\xi}\right) & \text{si } x \geq \mu, \xi > 0, \sigma > 0 \\ 0 & \text{si } x < \mu, \xi > 0, \sigma > 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

Donde σ , μ y ξ son, respectivamente, los parámetros de escala, posición y forma de la función de distribución. En la Figura 2.11 se muestran algunos ejemplos de distribuciones de valores extremos.

De la Figura 2.11 se desprende claramente que los tres tipos de distribuciones tienen una sustentación diferente y un comportamiento desigual en las colas. La distribución de Gumbel decae exponencialmente hacia la derecha, la distribución de Weibull cae de forma algebraica por la cola izquierda y la distribución Fréchet cae por la cola derecha. Por lo tanto, no es conveniente desde el punto de vista estadístico, trabajar con tres clases distintas de distribuciones.

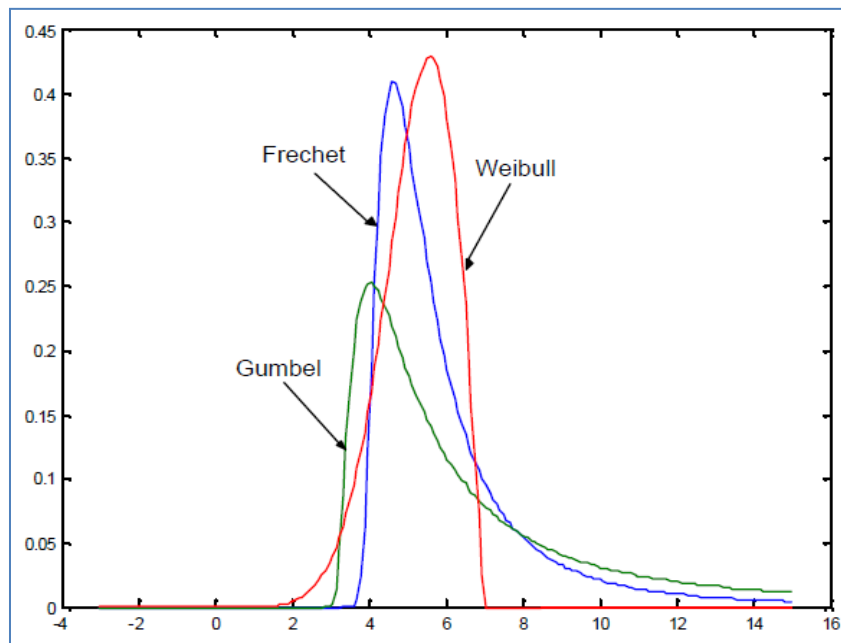


Figura 2.11. Ejemplos de distribuciones de valores extremos.

Von Mises (1954) y Jenkinson (1955) obtuvieron una forma de distribución de Valores Extremos Generalizada (GEV), donde se unifican estas distribuciones, la cual se expresa como:

$$G(x) = \exp \left(- \left(1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right)^{-1/\xi} \right) \quad (2.24)$$

donde, de manera similar, σ, μ, ξ son respectivamente los parámetros de escala, posición y forma de la distribución. Cuando $x_+ = \max(x, 0)$ y $\sigma > 0$, la distribución de GEV es:

$$G(x) = \exp \left(- \left(1 + \xi x \right)_+^{1/\xi} \right) \quad (2.25)$$

La distribución de Frechet corresponde cuando $\xi > 0$, la de Weibull negativa cuando $\xi < 0$. El caso cuando $\xi = 0$ depende del resultado del cálculo elemental de:

$$\lim_{\xi \rightarrow 0} G(x, \mu, \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \exp \left(- \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right\} \quad (2.26)$$

En otras palabras, la distribución de Gumbel es una posición arbitraria con parámetros de escala y forma.

En este trabajo de tesis se estiman los parámetros de GEV utilizando el método de M-Momentos. Este método fue publicado por Greenwood et al (1979), y desde entonces ha sido utilizado para la deducción de los parámetros de varias funciones de distribución de probabilidad, cuyas formas inversas pueden definirse explícitamente, y entre las cuales están: la distribución de Weibull, Gumbel, GEV, lambda generalizada, Wakeby y Kappa, entre otras. El método de M-Momentos es una forma de solucionar el sistema de ecuaciones de GEV que se genera al aplicar el método de máxima verosimilitud. Por lo tanto, las expresiones para el cálculo de los estimadores se describen a continuación:

Una función de distribución de probabilidad $f(x) = Prob (n\text{-parámetros})$ puede ser caracterizada por sus momentos de probabilidad pesada (ec 2.27).

$$M_{i,j,k} = \int x^i F^j(x) (1 - F(x))^k dF(x) \quad (2.27)$$

donde i, j y k son números reales. Si se toma la siguiente convención:

$$M_{i,0,k} = M_{(k)} \quad (2.28)$$

Un estimador insesgado de $M_{(k)}$ es:

$$\hat{M}_{(k)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} x_i \frac{\binom{n-i}{k}}{\binom{n-1}{k}} \quad (2.29)$$

donde k es un entero no-negativo y las x_i (con $i = 1, 2, \dots, n$) han sido ordenadas de menor a mayor $x_1 < x_2 < \dots < x_n$.

Para el caso de la función de GEV, los momentos de probabilidad pesada son expresados como:

$$\hat{b}_r = (r+1)^{-1} \left[\mu + \frac{\sigma}{\xi} \left(1 - (r+1)^{-\xi} \right) \cdot \Gamma(1 + \xi) \right] \quad (2.30)$$

Usando la ecuación anterior para generar un sistema de ecuaciones simultaneas, se puede llegar a las siguientes expresiones, con las que se determinarán los parámetros de GEV:

$$\hat{\xi} = 7.8590 C_H + 2.9554 C_H^2 \quad (2.31)$$

donde la constante C_H se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_H = \frac{2\hat{b}_1 - \hat{b}_0}{3\hat{b}_2 - \hat{b}_0} - \frac{\log_{10}(2)}{\log_{10}(3)} \quad (2.32)$$

donde los momentos de probabilidad pesada pueden ser obtenidos de la siguiente forma:

$$\hat{b}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.33)$$

$$\hat{b}_1 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n x_i(i-1) \quad (2.34)$$

$$\hat{b}_2 = \frac{1}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=2}^n x_i(i-1)(i-2) \quad (2.35)$$

y los parámetros restantes se calculan como:

$$\hat{\sigma} = \frac{(2\hat{b}_1 - \hat{b}_0) \hat{\xi}}{\Gamma(1 + \hat{\xi}) (1 - 2^{-\hat{\xi}})} \quad (2.36)$$

$$\hat{\mu} = \hat{b}_0 + \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\xi}} [\Gamma(1 + \hat{\xi}) - 1] \quad (2.37)$$

donde $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ y $\hat{\xi}$ son los estimadores de los parámetros de localización, escala y forma respectivamente.

Para el cálculo de los valores máximos de pesos esperados (z_p) en diferentes periodos de retorno, es necesario tener la forma inversa de la ecuación de GEV, la cual se expresa como:

$$z_p = \mu - \sigma \log x_p \quad \text{si } \xi = 0 \quad z_p = \mu - \frac{\sigma}{\xi} (1 - x_p^{-\xi}) \quad \text{si } \xi \neq 0 \quad (2.38)$$

donde:

$$x_p = -\ln(1 - f) \quad \text{y} \quad f = \frac{1}{T_d} \quad (2.39)$$

donde f es la frecuencia y T_d es el periodo de retorno (expresado en días).

2.3.3. MÉTODO DE GUMBEL ASINTÓTICO

El método de Gumbel Asintótico es propuesto por B. Jacob (1989) para el cálculo de cargas vehiculares extremas, sin embargo, la propuesta original de este método fue hecha por O. Ditlevsen, quien lo aplica en su publicación de 1988. El proceso es una aproximación para determinar los valores extremos de una población finita de vehículos. Este método se basa en la idea de que los escenarios de cargas son infinitos y que los pesos de los vehículos pueden ser descritos por una distribución Gaussiana. Si la segunda moda (que es la media de la segunda

población que divide p) gobierna la máxima cantidad de la población total de pesos vehiculares de N cantidad, esta distribución descrita por $n = pN$ puede ser caracterizada como una distribución Gaussiana independiente, con media $W_2 = \mu_2$ y desviación típica $\sigma_{W_2} = \sigma_2$ (parámetros obtenidos de la distribución bimodal). Con lo anterior Ditlevsen propone la siguiente expresión para la distribución de densidades:

$$F_{Y_n}(y) = \exp(-\exp(-a_n(y - u_n))) \quad (2.40)$$

donde y son los valores máximos esperados (los cuales se proponen para determinar posteriormente los periodos de retorno correspondientes). Los parámetros restantes se determinan de la siguiente manera:

$$a_n = \frac{\sqrt{2 \ln(n)}}{\sigma_{W_2}} ; \quad u_n = W_2 + \sigma_{W_2} \left(\sqrt{2 \ln(n)} - \frac{\ln(\ln(n)) + \ln(4\pi)}{\sqrt{2 \ln(n)}} \right) \quad (2.41)$$

Una vez conocida la distribución de densidades, es común presentar los resultados en función de los periodos de retorno:

$$f = \frac{1}{1 - F_{Y_n}(y)} = \frac{1}{T} \quad (2.42)$$

donde f es la frecuencia y T es el periodo de retorno, calculado en años como:

$$T = \frac{f}{250} \quad (2.43)$$

La constante 250 representa el número de días hábiles durante un año.

2.3.4. PROCESO DE POISSON SUAVIZADO

Al igual que el método de Gumbel, el método de Poisson, también conocido como Proceso de Poisson Suavizado, es propuesto por Ditlevsen en su publicación de 1995. Este proceso es otra aproximación estadística de valores extremos, tomando como base la distribución

bimodal de los histogramas de pesos vehiculares. Ditlevsen, en este caso, propone que la función de distribución de densidades puede ser descrita por la siguiente ecuación:

$$G(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(pNT_u)^n \exp(-pNT_u) \left(\Phi\left(\frac{x - \mu_2}{\sigma_2}\right) \right)^n}{n!} = \exp\left(-pNT_u \left(1 - \Phi\left(\frac{x - \mu_2}{\sigma_2}\right)\right)\right) \quad (2.44)$$

donde x son los valores máximos de pesos esperados (los cuales se proponen para determinar posteriormente los periodos de retorno correspondientes); N es el total de vehículos considerados; p es el porcentaje poblacional de la primera parte de la distribución bimodal; q es el porcentaje poblacional de la segunda parte de la distribución bimodal; T_u es la unidad mínima de periodo considerada, que para este proceso será de un día ($T_u = 1$); μ_2 y σ_2 son la media y la desviación estándar de la segunda población de la distribución bimodal; Φ es la distribución normal acumulada y $1 - \Phi\left(\frac{x - \mu_2}{\sigma_2}\right)$ es el decremento de la probabilidad.

Finalmente, el periodo de retorno correspondiente a los valores máximos de pesos esperados se determina con la siguiente expresión:

$$T = \frac{1}{(1 - G(x)) / 250} \quad (2.45)$$

donde T es el periodo de retorno expresado en años.

En el programa DIP se desarrollaron los algoritmos con los que se sistematizaron cada uno de los métodos de valores extremos mencionados.

2.4. ANÁLISIS DE FATIGA EN PUENTES CARRETEROS

El costo de mantenimiento de puentes carreteros aumenta exponencialmente, ya que muchas de estas estructuras han llegado al final de su vida útil, debido a la demanda actual. Por lo tanto, la evaluación de la vida remanente de los puentes es prioritaria para estar en condiciones de realizar una prevención temprana, y así, evitar accidentes relacionados con posibles fallas estructurales.

Dentro del estudio de puentes ante el fenómeno de fatiga, hasta ahora, se distinguen tres teorías para su análisis con diferentes enfoques (Bangoura, 2007):

- Teoría de Fatiga por Alto Número de Ciclos (Modelo de Historia de Esfuerzos).
- Teoría de Fatiga por Bajo Número de Ciclos (Modelo de Historia de Deformación).
- Teoría de Mecánica de Fracturas.

La caracterización de la fatiga en puentes carreteros, mediante el análisis de alto número de ciclos de esfuerzos, es lo más adecuado cuando la estructura está sometida a una constante variación de cargas, como ocurre con el tráfico vehicular.

El sistema de WIM proporciona la información de cargas en movimiento que puede ser utilizada para determinar teóricamente los esfuerzos, haciendo uso del cálculo de líneas de influencia y teorías de comportamiento elástico-lineal (Jacob et al, 1989). Los esfuerzos también pueden obtenerse por medio de galgas extensométricas, sensores de deformación u otros instrumentos.

Los fundamentos para la predicción de *vida a fatiga* se basan en las propiedades de los materiales ante este fenómeno, obtenidas en laboratorio con pequeños especímenes sujetos a cargas dinámicas hasta provocar la falla o cuando aparece la primera grieta, generando así, gráficas de esfuerzos contra número de ciclos, también conocidas como *curvas S-N*. El método de historia de esfuerzos asume que la vida del espécimen en el laboratorio se puede relacionar con la vida de la estructura real (Lindorf et al, 2010, Castillo et al, 1985). Es más, se asume que las cargas utilizadas en la estimación de vida a fatiga de la estructura son tensiones o deformaciones locales en posiciones críticas.

Con el método de *Rainflow* y los *histogramas de Rainflow* correspondientes, se obtiene el número de ciclos de esfuerzos y sus magnitudes, posteriormente se puede evaluar teóricamente la vida a fatiga usando la *Regla de Palmgren-Miner*, que proporciona valores de *índices de daño* (Jacob et al, 1989).

Uno de los objetivos de este trabajo es aplicar la metodología de predicción de vida a fatiga en algunos puentes carreteros de Francia, mediante el análisis de alto número de ciclos, partiendo del cálculo teórico de esfuerzos y teniendo como base escenarios de tráfico real.

El programa DIP, en esta etapa de desarrollo, realiza el análisis de fatiga en puentes carreteros de acero de uno, dos y tres claros, modelados como vigas simplemente apoyadas y continuas. Los algoritmos de este módulo de DIP se basan en la teoría que sustenta al Eurocode, el cual analiza la fatiga por medio del Modelo de Historia de Esfuerzos, anteriormente mencionado. DIP realiza todos sus procesos mediante un interfaz visual simple, proporcionando las gráficas y los resultados necesarios para este trabajo de investigación.

2.4.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE FATIGA POR ALTO NÚMERO DE CICLOS

En la práctica se observa que repetidos ciclos de carga y descarga deshabilitan las piezas o elementos estructurales, incluso cuando las cargas inducidas están considerablemente por debajo del esfuerzo de falla estática y del límite elástico del material. Este fenómeno se le conoce como fatiga. Si el esfuerzo máximo en el elemento no supera el límite elástico del material, éste recupera su estado inicial al retirarse la carga. Una carga dada puede ser repetida muchas veces, siempre que los esfuerzos permanezcan en el rango elástico. Tal aseveración es correcta para cargas repetidas cientos de veces, sin embargo, es incorrecta cuando las cargas se repiten miles o millones de veces. En tales casos, la ruptura se producirá con un esfuerzo menor que el esfuerzo crítico o último, esto debido al fenómeno de fatiga (Kwon, 2010).

El diseño por fatiga es una de las formas de prevención de falla mecánica muy utilizada en la práctica, con el cual se pueden evitar colapsos repentinos (Kwon, 2010). Por esta razón, la fatiga se convierte en una consideración de diseño obvia para muchas estructuras como: puentes, vagones de ferrocarril, vigas carril de grúas viajeras, entre otras, donde comúnmente existe la acción de cargas cíclicas que podrían causar dicha falla. El proceso básico de diseño por fatiga (Figura 2.12) está descrito por los siguientes elementos:

- a) *Cargas de servicio y sus efectos*: En primer lugar, una descripción del entorno de servicio debe ser obtenido. El objetivo es desarrollar una representación precisa de las cargas,

deformaciones, esfuerzos, ruido, vibraciones, etc. que probablemente se han presentado durante la vida útil de la estructura o elemento (Seçil, 2004; Rise, 1988).

b) *Análisis de esfuerzos*: La topología, las características geométricas y las condiciones de contorno dictarán la respuesta del sistema estructural ante las cargas de servicio, en términos de esfuerzos y deformaciones. Los métodos analíticos disponibles para cuantificar este comportamiento, como las líneas de influencia y la ecuación de la escuadría, se pueden emplear para identificar las zonas de esfuerzos máximos, donde existen problemas potenciales de fatiga. La acción de cargas secuenciales genera registros de esfuerzos medidos y almacenados durante periodos específicos.

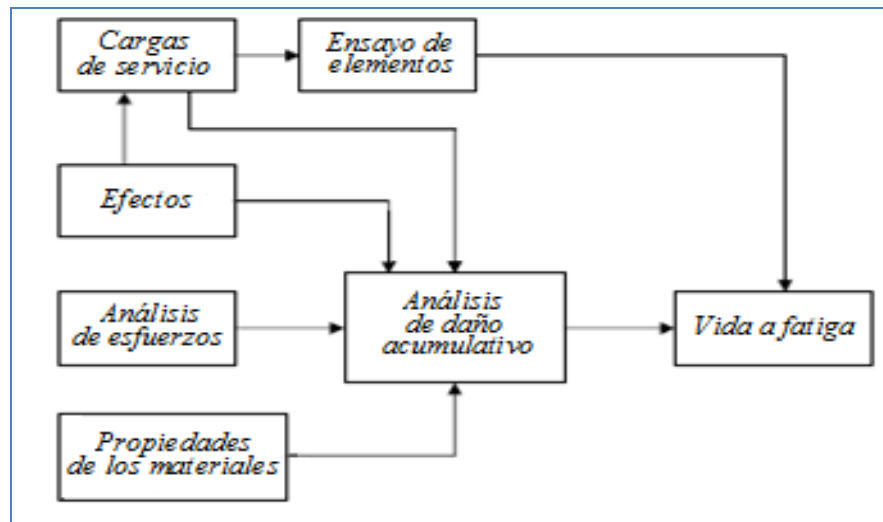


Figura 2.12. Elementos básicos del proceso de análisis de fatiga. Fuente: Seçil, 2004.

c) *Propiedades de los materiales*: Un requisito fundamental para evaluar la durabilidad de un puente es conocer la relación entre los esfuerzos y deformaciones de un material. La fatiga es un fenómeno muy común que depende en gran medida de los esfuerzos experimentados en las regiones críticas de un elemento o estructura. Por lo tanto, una muestra pequeña probada en laboratorio bajo condiciones similares a las reales, a menudo puede ser utilizada para reflejar adecuadamente el comportamiento de un elemento del mismo material en un área crítica (Seçil, 2004; Rise, 1988). Las curvas S-N son la forma típica de mostrar la resistencia a fatiga de cualquier material.

- d) *Análisis de daño acumulado*: El proceso de predicción de fatiga y el análisis de daño acumulado para una región crítica de una estructura, consta de varios pasos estrechamente relacionados. El conocer la historia de cargas, la concentración de esfuerzos y las propiedades de los materiales ante cargas cíclicas, es fundamental para la simulación y el cálculo de la respuesta local uniaxial en zonas críticas (Seçil, 2004; Rise, 1988).
- e) *Ensayo de elementos*: Deben de realizarse en algún momento las pruebas de laboratorio para ciertos elementos, y así, garantizar la confianza de su desempeño durante la vida de servicio (Seçil, 2004).

2.4.2. MODELO DE INTERACCIÓN TRÁFICO - PUENTE

Al tener una descripción del entorno de servicio, así como también las características principales de la topología del puente, el siguiente proceso para el análisis de fatiga consiste en obtener los efectos que las cargas generan sobre la estructura.

En el programa DIP se han desarrollado algoritmos que permiten realizar la interacción tráfico-puente generando líneas de influencia, tal como se describe en los siguientes párrafos.

2.4.2.1. LÍNEAS DE INFLUENCIA

Es común analizar estructuras sometidas a cargas fijas o estáticas equivalentes, sin embargo, en la práctica también es necesario considerar que las estructuras están sujetas a cargas dinámicas o móviles. Un ejemplo típico de estas estructuras son los puentes, que están sujetos al constante tráfico vehicular.

Los elementos estructurales deben diseñarse para las condiciones más severas o críticas que puedan presentarse en ellos. En un puente es posible determinar por inspección donde colocar las cargas para obtener los efectos críticos, pero cuando esto no sea tan evidente, es necesario recurrir a criterios y diagramas que permitan encontrar su ubicación (Mc Cormac, 2002). Uno de los procedimientos típicos es a través de la determinación de *líneas de influencia* (Figura 2.13). Éstas se definen como diagramas que representan la variación de las reacciones, momentos o cortantes en un punto específico de un miembro estructural, a medida que una fuerza concentrada se desplaza a lo largo del elemento (Hibbeler, 1997).

Una manera de obtener teóricamente los esfuerzos, en las secciones críticas de un puente, es a partir del cálculo de líneas de influencia. Para la sistematización de este proceso en el programa DIP, fue necesario determinar las expresiones que describen la variación de estas líneas (ver Anexo A). Para esto se usaron métodos de análisis estructural, basados en principios de comportamiento elástico-lineal, como el método de los Tres Momentos, el equilibrio estático y el principio de superposición de cargas. Además, se corroboraron los resultados con el método de análisis matricial de rigideces. En la Figura 2.13 se muestran algunos ejemplos de líneas de influencia para distintos casos de ubicación de la sección de interés.

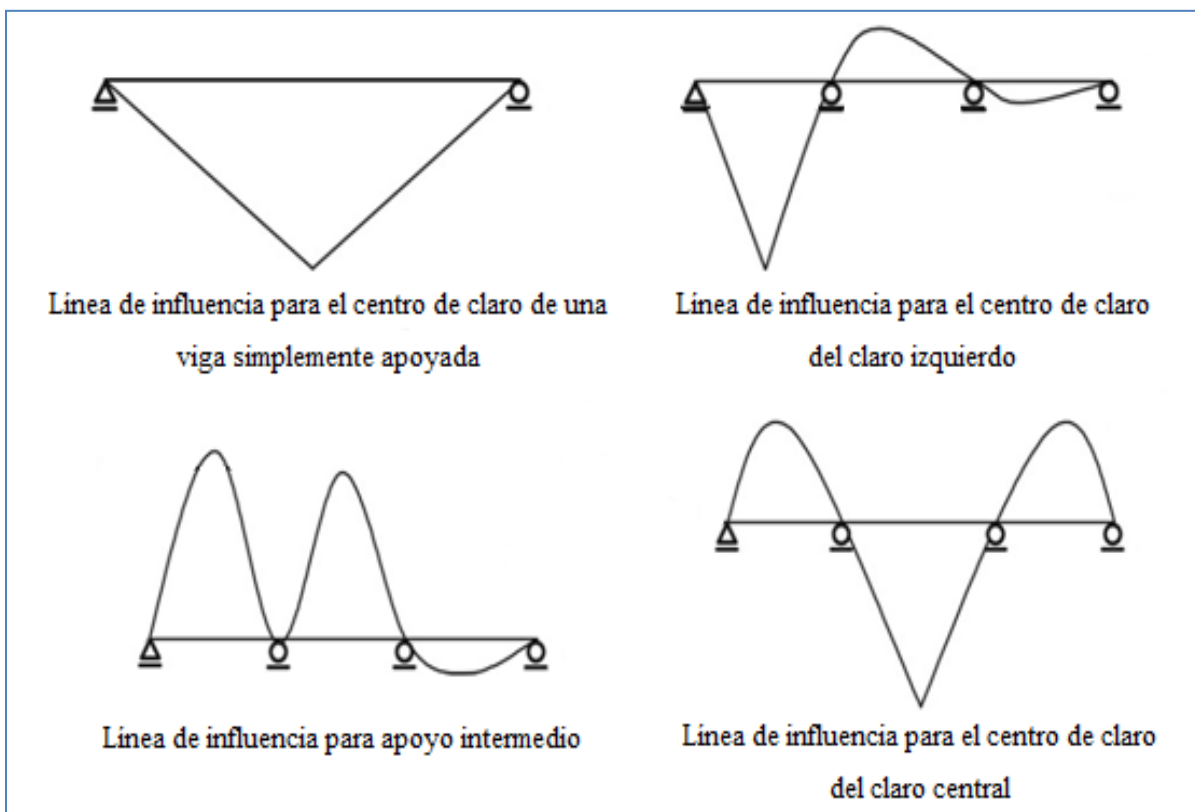


Figura 2.13. Ejemplos de líneas de influencia.

En el método de los tres momentos, desarrollado por el ingeniero francés Clapeyron, se relaciona a los momentos internos de una viga continua en tres puntos de soporte con las cargas que actúan entre los apoyos (ver figura 2.14).

Haciendo una aplicación sucesiva de esta ecuación por segmentos de la viga, se obtienen un conjunto de ecuaciones que pueden resolverse simultáneamente para los momentos internos desconocidos ubicados en los soportes.

Una forma general de la ecuación de los tres momentos, puede ser al considerar un segmento de la viga continua mostrada en la Figura 2.14a, delimitada por los apoyos izquierdo, central y derecho, L , C y R respectivamente. Las cargas entre los soportes son arbitrarias y a los momentos internos desconocidos en los soportes se les llamará M_L , M_C y M_R . Además, la parte izquierda de la viga tiene propiedades geométricas I_L y L_L y la parte derecha tiene propiedades I_R y L_R respectivamente.

Se supone que los apoyos simples tienen restringido el desplazamiento vertical, es decir, no sufren asentamientos. Para determinar los momentos internos en L , C y R , que actúan en las direcciones definidas como positivas sobre la viga en la Figura 2.14a, se aplica el método de la viga conjugada.

Como la viga real es continua sobre los apoyos intermedios, la viga conjugada se considera con articulaciones en los soportes L , C y R . Mediante el principio de la superposición, los diagramas M/EI de las cargas aplicadas y para cada uno de los momentos internos se muestran, para mayor claridad, separados en las figuras 2.14b y 2.14c.

En particular, A_L/EI y A_R/EI representan el área total bajo sus respectivos diagramas M/EI , y \bar{x}_L , \bar{x}_R localizan sus centroides. Como la pendiente de la viga real es continua sobre el soporte central, se requiere que las fuerzas cortantes $C_{L1} + C_{L2} = -(C_{R1} + C_{R2})$ para la viga conjugada.

Sumando momentos respecto al punto L' para el segmento izquierdo, se tiene:

$$C_{L1} + C_{L2} = \frac{1}{L_L} \left(\frac{A_L \bar{x}_L}{EI_L} \right) + \frac{1}{L_L} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{M_L}{EI_L} \right) (L_L) \left(\frac{1}{3} L_L \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{M_C}{EI_L} \right) (L_L) \left(\frac{2}{3} L_L \right) \right] = \frac{A_L \bar{x}_L}{EI_L L_L} + \frac{M_L L_L}{6EI_L} + \frac{M_C L_L}{3EI_L} \quad (2.46)$$

Se suma ahora los momentos respecto al punto R' para el segmento derecho, se obtiene:

$$C_{R1} + C_{R2} = \frac{1}{L_R} \left(\frac{A_R \bar{x}_R}{EI_R} \right) + \frac{1}{L_R} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{M_R}{EI_R} \right) (L_R) \left(\frac{1}{3} L_R \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{M_C}{EI_R} \right) (L_R) \left(\frac{2}{3} L_R \right) \right] = \frac{A_R \bar{x}_R}{EI_R L_R} + \frac{M_R L_R}{6EI_R} + \frac{M_C L_R}{3EI_R} \quad (2.47)$$

Al igualar $C_{L1} + C_{L2} = -(C_{R1} + C_{R2})$ y simplificando, se obtiene:

$$\frac{M_L L_L}{I_L} + 2M_C \left(\frac{L_L}{I_L} + \frac{L_R}{I_R} \right) + \frac{M_R L_R}{I_R} = -\sum \frac{6A_L \bar{x}_L}{I_L L_L} - \sum \frac{6A_R \bar{x}_R}{I_R L_R} \quad (2.48)$$

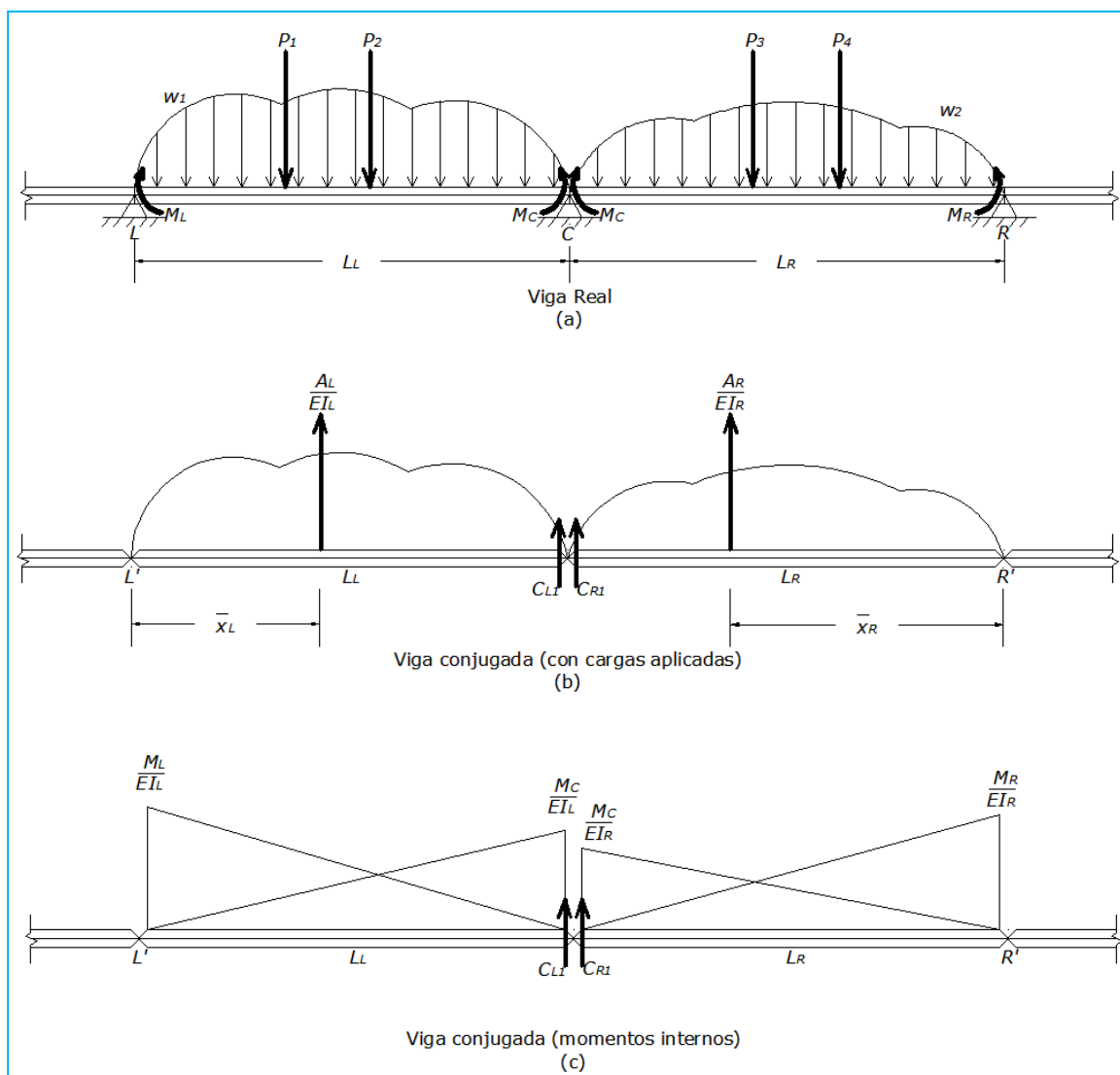


Figura 2.14. Determinación de la ecuación de los tres momentos.

Las sumatorias se han agregado a los términos de la derecha de la ecuación para que los diagramas M/EI de cada tipo de carga aplicada puedan tratarse por separado. En la práctica, los tipos más comunes de cargas son las concentradas y las distribuidas, como se muestra en la

Figura 2.15. Si las áreas y distancias centroidales, para los diagramas M/EI , se calculan y sustituyen en la ecuación (2.48), se tiene:

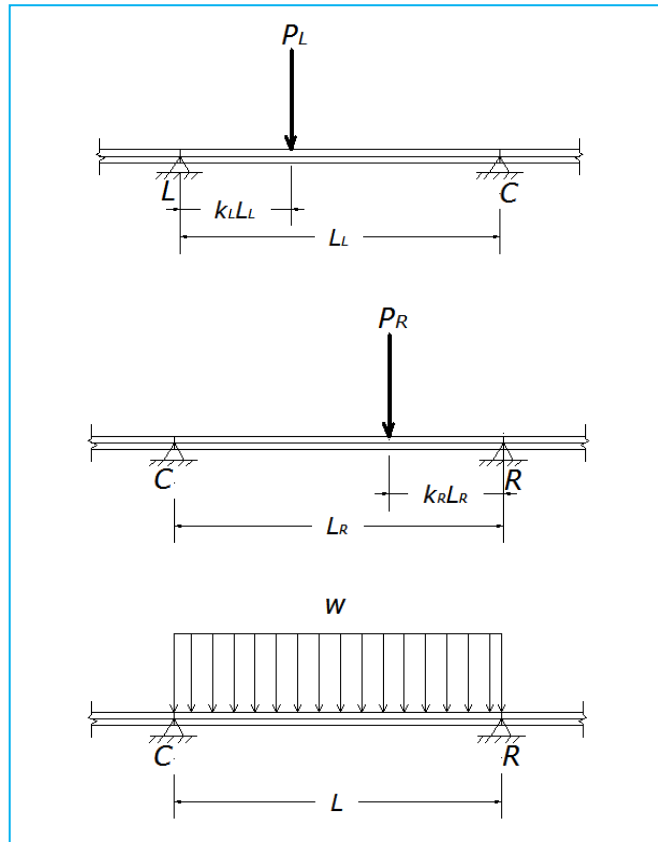


Figura 2.15. Determinación de los parámetros complementarios para la ecuación de los tres momentos.

$$\frac{M_L L_L}{I_L} + 2M_C \left(\frac{L_L}{I_L} + \frac{L_R}{I_R} \right) + \frac{M_R L_R}{I_R} = - \sum \frac{P_L L_L^2}{I_L} (k_L - k_L^3) - \sum \frac{P_R L_R^2}{I_R} (k_R - k_R^3) - \frac{w_L L_L^3}{4I_L} - \frac{w_R L_R^3}{4I_R} \quad (2.49)$$

donde: M_L, M_C, M_R ; son los momentos internos en los soportes izquierdo, central y derecho respectivamente. Se supone que actúan en el sentido positivo, como se muestra en la Figura 2.14a.

I_L, L_L, I_R, L_R ; son los momentos de inercia y las longitudes de los claros izquierdo y derecho de la viga respectivamente (Figura 2.14b).

P_L, w_L, P_R, w_R ; son las cargas concentradas y las cargas uniformes, distribuidas en los lados izquierdo y derecho respectivamente. Se supone que actúan en el sentido positivo, como se muestra en la Figura 2.14 a.

k_L, k_R ; son la fracción de la longitud del claro donde actúa la carga concentrada, en el soporte izquierdo o derecho respectivamente (Figura 2.15).

Como caso especial, si el momento de inercia es constante para el claro entero, esto es, $I_L = I_R$, se tiene:

$$M_L L_L + 2M_C(L_L + L_R) + M_R L_R = -\sum P_L L_L^2(k_L - k_L^3) - \sum P_R L_R^2(k_R - k_R^3) - \frac{w_L L_L^3}{4} - \frac{w_R L_R^3}{4} \quad (2.50)$$

La aplicación de las ecuaciones 2.49 y 2.50 es bastante directa, aunque debe tenerse cuidado de respetar la convención de signos para los términos de momento y carga. Además, debe usarse un conjunto de unidades que sea consistente.

Las ecuaciones que permiten al programa DIP obtener los momentos, reacciones y líneas de influencia son mostradas en el Anexo A, donde se puede ver la deducción de dichas ecuaciones para su mejor entendimiento.

Con estas expresiones, el programa DIP obtiene las gráficas de líneas de influencia, las cuales se usan para la determinación de los esfuerzos. Al igual que en el análisis estadístico y de valores extremos, la generación de líneas de influencia se realiza con tan solo abrir el archivo de WIM en formato de texto, además de proporcionar las características geométricas de la sección del puente y la ubicación del punto que se desea analizar.

De acuerdo a la teoría elástica, la determinación de los esfuerzos producto del paso vehicular sobre el puente, se deriva de obtener los momentos, y la ecuación de la escuadría es comúnmente utilizada para este fin (ecuación 2.51).

$$\sigma = \frac{M c}{I} \quad (2.51)$$

Se sabe que el módulo de sección S representa la relación $\frac{I}{c}$, entonces:

$$\sigma = \frac{M}{S} \quad (2.52)$$

El programa DIP muestra gráficamente las líneas de influencia que se generan con el paso de cada eje, limitando la visualización a un intervalo máximo de 5 vehículos, así mismo, calcula los momentos máximos y mínimos con los esfuerzos correspondientes de todo el archivo de tráfico vehicular.

Con estos resultados se genera una gráfica de serie de historia de esfuerzos, y su magnitud depende de la cantidad de datos que se tengan almacenados en el archivo de WIM. Los resultados que DIP obtiene son guardados dentro de una carpeta que se asigna previamente.

2.4.2.2. MÉTODO DE RAINFLOW

Los métodos de conteo de ciclos de esfuerzos inicialmente fueron desarrollados para el estudio de daños por fatiga en estructuras aeronáuticas, donde la acción continua del viento y del agua debilita a los elementos. Existen otros métodos de conteo que fueron desarrollados posteriormente, tales como: el conteo de cruces a nivel, conteo de picos, conteo por Range Pair y conteo por *Rainflow* (Seçil, 2004).

El método Rainflow creado por M. Matsuishi y T. Endo, originalmente se hacía llamar “método de techo de pagoda” ya que si se pone la gráfica de historia de esfuerzos en vertical (Figura 2.16), los picos de los esfuerzos representan una serie de techos en los que el agua cae.

El algoritmo de Rainflow, usado en el programa DIP, es el método más común para el conteo de ciclos de esfuerzos, ya que sigue la forma de los ciclos de histéresis de las curvas de esfuerzo contra deformación (Figura 2.16). Para poder aplicar este método, es necesario conocer cómo está estructurado su algoritmo. En los siguientes párrafos se describe la forma en que DIP calcula los ciclos de esfuerzos y sus magnitudes.

De acuerdo a los trabajos realizados por Seçil (2004) y McInnes (2008), las reglas del flujo de este método se muestran en la Figura 2.17. El origen del esfuerzo, elegido al azar, se

coloca en el eje de las abscisas en uno de los picos de tensión máximos. Las gotas de agua son liberadas de forma secuencial en cada extremo (Figura 2.17 a).

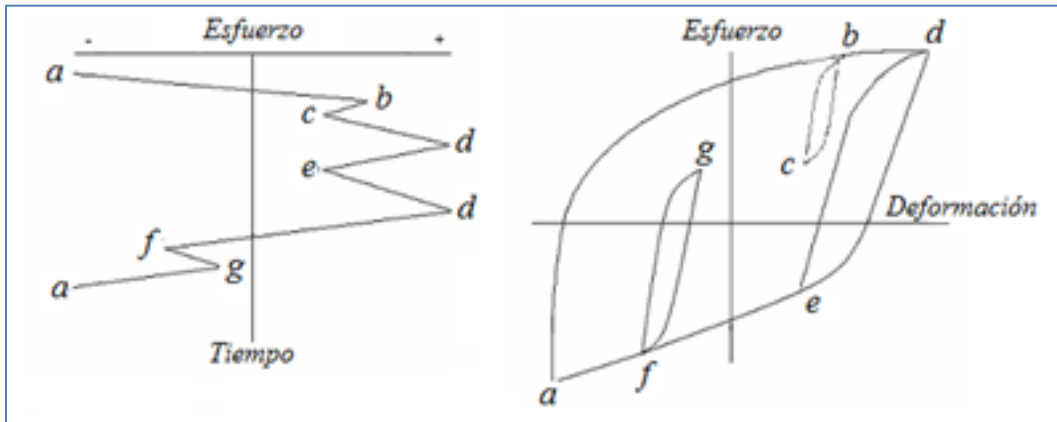


Figura 2.16. Historia de esfuerzos y ciclos de histéresis. Fuente: Seçil, 2004.

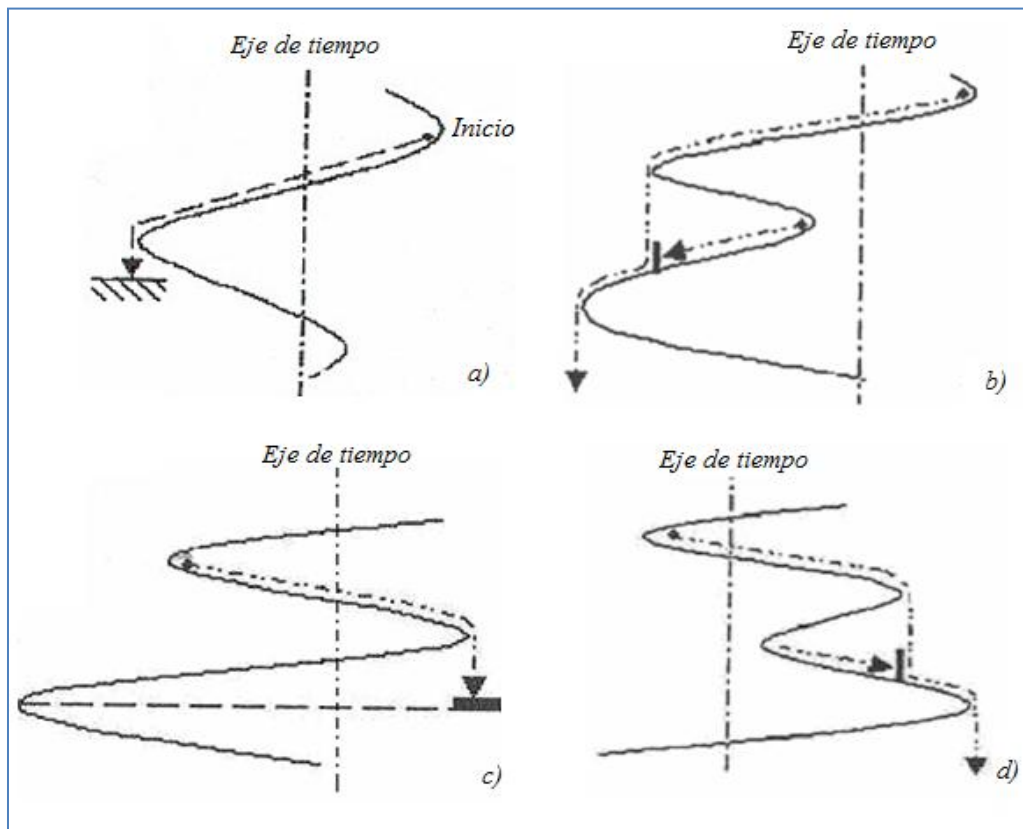


Figura 2.17. Método de Rainflow. a) Fin del flujo partiendo de un pico; b) Regla del flujo partiendo de un pico; c) Fin del flujo partiendo de un valle; d) Regla de flujo partiendo de un valle. Fuente: Seçil, 2004.

Se puede establecer que la parte superior de los techos está a la derecha del eje y el fondo a la izquierda.

Si el flujo se inicia desde un máximo entonces:

- a) El flujo se detiene si se encuentra con un pico de oposición más grande que el de partida,
- b) También se detiene si se encuentra con el camino recorrido de otra gota, como se muestra en la Figura 2.17 b,
- c) El flujo puede caer en otro techo y seguir su deslizamiento de acuerdo a las reglas a) y b)

Si la caída se inicia desde un valle:

- d) El flujo se detiene si la caída se encuentra con un valle más profundo que el de salida como se muestra en la Figura 2.17 c,
- e) El flujo se detiene si se cruza en el camino de una gota procedente de un valle anterior como se indica en la Figura 2.17 d,
- f) El flujo puede caer en otro tejado y continuar de acuerdo a las reglas d) y e).

La longitud horizontal de cada fin de flujo define un valor equivalente a la mitad de un ciclo de amplitud constante.

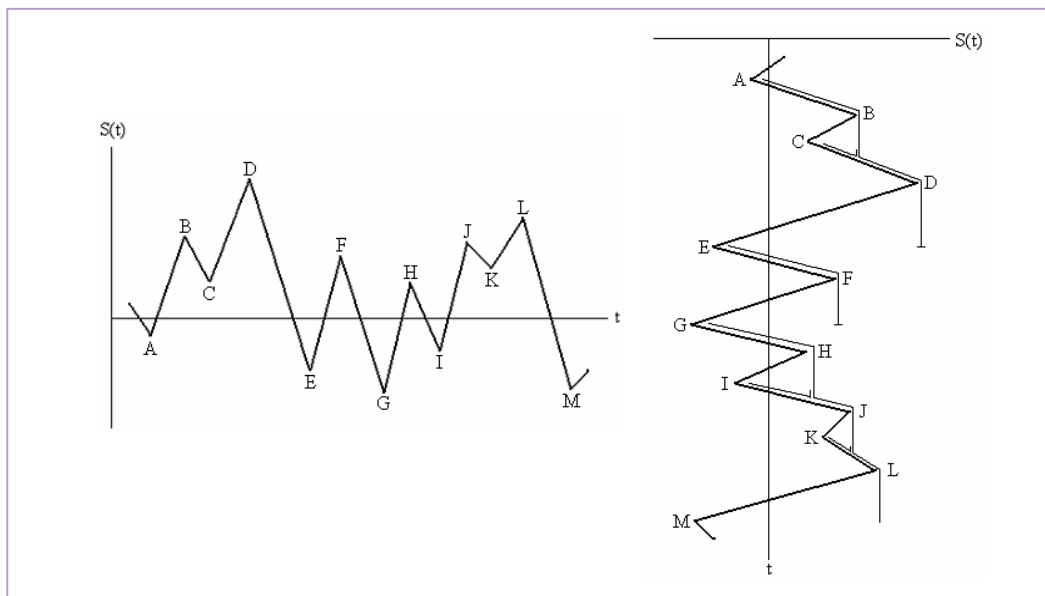


Figura 2.18. Aplicación del Método de Rainflow.

Para un mejor entendimiento de los fundamentos de Rainflow anteriormente expuestos, éstos se aplican en el ejemplo de la Figura 2.18, donde se identifican los ciclos de esfuerzos en una secuencia aleatoria de cargas con amplitud variable. En primer lugar, los esfuerzos se transforman en un arreglo de picos y valles. Entonces, el eje de tiempo se hace girar de modo que apunte hacia abajo. En los picos y valles, se considera el inicio del flujo. El agua fluye hacia abajo de acuerdo a lo siguiente:

1. Un camino que empieza en un valle termina hasta que encuentra otro valle que es igual o más negativo que el de origen. En la figura 2.18, el camino que se inicia en A terminará en E.
2. Un camino se termina cuando se encuentra con el flujo de una trayectoria anterior. Por ejemplo, la ruta que comienza en C termina como se muestra en la figura 2.18.
3. Un nuevo camino no se inicia hasta que el camino en cuestión se ha detenido.
4. Los caminos obtenidos a partir de un valle representan la mitad de los ciclos para la totalidad del expediente. Para cada ciclo, el rango de esfuerzos (S_i) es la longitud del camino proyectada horizontalmente.
5. El proceso se repite a la inversa, ahora empezando desde un pico. Para un registro lo suficientemente largo, cada camino obtenido empezando en un valle representa un medio ciclo, el cual coincidirá con otro medio ciclo generado a partir de un pico, y cuando las magnitudes de estos coincidan, se formará un ciclo completo.

2.4.2.3. HISTOGRAMAS DE RAINFLOW

Teniendo los ciclos de esfuerzos y sus magnitudes, éstos se clasifican en intervalos de magnitud constante y se grafican en forma de histograma (número de ciclos contra intervalos de magnitud), mejor conocido como *histograma de Rainflow* (Figura 2.19).

La precisión de los resultados en la estimación de la vida a fatiga dependerá de la anchura de las barras que se le asigne al histograma de Rainflow. Sin embargo, debe tenerse precaución al asignar dicho valor, ya que un rango demasiado pequeño provocaría que el programa DIP se sature de información, haciendo que el proceso tarde demasiado tiempo.

Una vez asignado el rango de las barras del histograma, el programa DIP genera el gráfico al leer el archivo de WIM. Esta aplicación de DIP es la misma que la del análisis estadístico mencionada anteriormente.

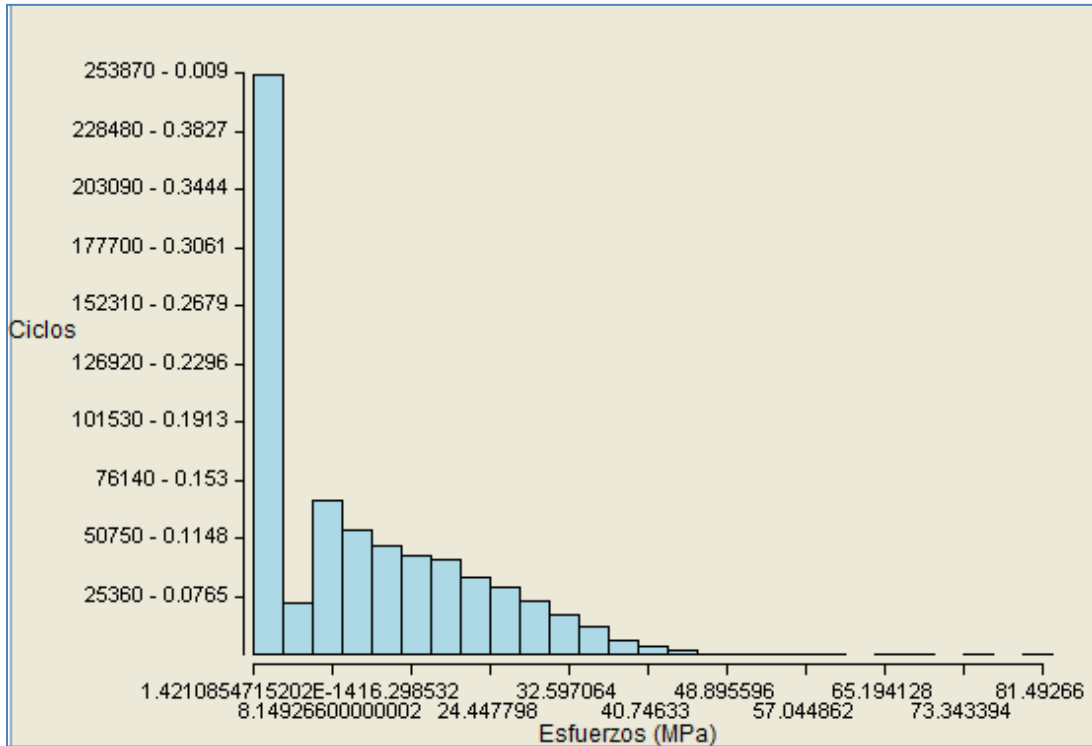


Figura 2.19. Histograma de Rainflow.

2.4.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ANTE FATIGA

El análisis de fatiga en las estructuras requiere conocer el comportamiento de los materiales ante dicho fenómeno. El campo S-N o campo de Wöhler es uno de los modelos más utilizados para la caracterización de los materiales ante fatiga (Bangoura , 2007; López et al, 2006).

En el campo S-N, se definen dos variables aleatorias relacionadas entre sí: la vida a fatiga N y el rango de tensiones $\Delta\sigma$ (Castillo et al, 1985). El problema consiste, en encontrar un modelo de regresión no-lineal que permita definir las curvas S-N de fatiga, y evaluar los parámetros del modelo.

Para determinar la resistencia de los materiales bajo la acción de cargas cíclicas, las probetas se someten a fuerzas variables y se cuentan los ciclos de esfuerzos que soporta el material hasta la falla.

El dispositivo para ensayos de fatiga más empleado es la máquina de flexión rotativa de alta velocidad de R.R. Moore (Bangoura, 2007; Badiola, 2004). Ésta máquina somete a la probeta a flexión pura por medio de la acción de pesas (Figura 2.20).

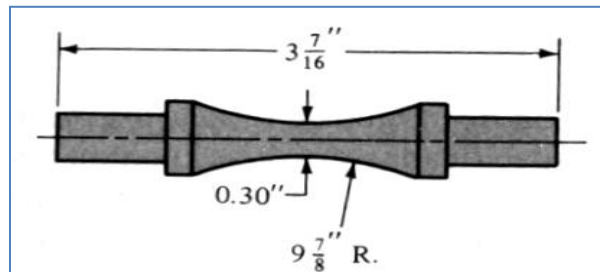


Figura 2.20. Ensayo de flexión rotativa. Fuente: Bangoura, 2007.

Otras maquinas para ensayos de fatiga permiten aplicar a las probetas esfuerzos axiales, torsionales, combinados, entre otros.

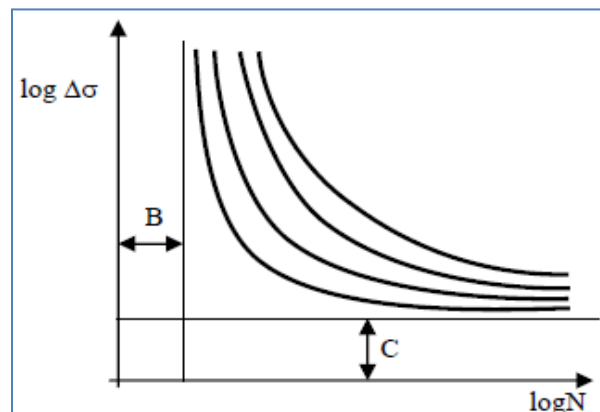


Figura 2.21. Curvas S-N. Fuente: López et al, 2006.

Este análisis no es sencillo debido al limitado número de resultados experimentales del que se dispone. Castillo et al (1985) han desarrollado un modelo estadístico para el análisis de resultados de fatiga, derivado de una ecuación funcional que tiene en cuenta aspectos físicos y estadísticos (López et al, 2006 y 2001). La Figura 2.21 define el campo S-N como una

distribución acumulativa, en función del número de ciclos N , que para un nivel de amplitud de tensiones dado, se define como:

$$F(\log N_i; \Delta\sigma_i) = 1 - \exp \left[\left(\frac{(\log N - B)(\log \Delta\sigma_i - C)}{D_s} + E \right)^A \right] \quad (2.53)$$

y las curvas S-N se ajustan a una expresión del tipo:

$$(\log N - B)(\log \Delta\sigma_i - C) = D_s \left[[-\log(1 - P)]^{1/A} - E \right] \quad (2.54)$$

donde N es la vida a fatiga medida en ciclos; $\Delta\sigma_i$ es el rango de tensión; P es la probabilidad de falla; A es el parámetro de forma de la distribución de Weibull; B es el valor umbral o número de ciclos límite; C es el límite de fatiga para una vida infinita; D_s es el parámetro de escala; y E es el parámetro que fija la posición de la curva límite, o de probabilidad nula (Real, 2005).

2.4.4. DAÑO ACUMULADO Y VIDA A FATIGA

Una vez que se conoce el campo de tensiones de la estructura, se ubican los puntos en los que se realizará el análisis de fatiga. Sin embargo, muchas estructuras están sometidas a cargas dinámicas cuya amplitud varía con el tiempo, por lo que la historia de tensiones en cada punto de la estructura será de amplitud variable.

Como consecuencia, el campo S-N no es suficiente para realizar el análisis completo, por lo que se suele aplicar un modelo de acumulación de daño para el estudio de fatiga (López et al, 2006). La regla de Palmgren-Miner, más conocida como regla de Miner, ha sido ampliamente utilizada para la evaluación de las estructuras ante el fenómeno de fatiga. El concepto de daño acumulado, propuesto por Miner, mantiene que el daño es proporcional a la fracción de vida de los diferentes niveles de tensión (López et al, 2006 y 2001). Si se realiza n_i ciclos en el nivel de tensión $\Delta\sigma_i$ constante, el daño acumulado según el criterio de Miner es:

$$D = \frac{n_i}{N_i} \quad (2.55)$$

donde D es el índice de daño (número de Miner); n_i es el número de ciclos contados; N_i es el número de ciclos hasta la falla.

Si el ensayo de fatiga se realiza a varios niveles de tensión, la regla de Miner establece que el daño es proporcional, es decir:

$$D = \sum_i^p \frac{n_i}{N_i} \quad (2.56)$$

donde p es el número de niveles de tensión que se presentan.

La falla se producirá cuando la suma de estos incrementos de daño, a los diferentes niveles de tensión, alcance la unidad ($D = 1$).

La regla de Miner no tiene ninguna base experimental o estadística, es decir, se trata de una medida semiempírica del grado de daño en los materiales, ya que no responde a la medida de una magnitud física. No obstante, la regla de Miner aparece, en la mayoría de las normas del mundo, como método para la evaluación de estructuras ante el fenómeno de fatiga (López et al, 2006).

Finalmente, la vida a fatiga o vida remanente se obtiene al sacar la inversa del número de Miner, es decir:

$$Vida \ a \ fatiga = \frac{1}{D} \quad (2.57)$$

Con lo anterior, se puede predecir el número de años que faltan antes de que un elemento estructural presente los primeros agrietamientos. Este tipo de evaluación que se ha integrado dentro del programa DIP es un análisis preventivo, pues con el valor de la vida a fatiga, obtenido con el proceso planteado, se tendrá una aproximación del tiempo restante que un puente tiene antes de presentar daños de mayor magnitud, los cuales podrían provocar el colapso de la estructura.

III. SISTEMATIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA

El desarrollo de un programa de cómputo que integra la metodología descrita en el capítulo II, es una parte esencial de este trabajo de tesis. Con los fundamentos teóricos ya vistos, se han generado algoritmos computacionales que realizan el proceso de análisis estadístico de cargas, calculan valores extremos de pesos y evalúan los efectos de fatiga en puentes carreteros de acero. Se ha elegido el lenguaje C para realizar esta sistematización, debido a que es el lenguaje de mayor uso en los desarrollos de programas de ingeniería. De esta manera, cualquier persona que conozca dicho lenguaje podrá seguir detalladamente el proceso de los algoritmos que integran a DIP, los cuales se incluyen en el disco del Anexo B.

En los siguientes subcapítulos se describe la forma en que se desarrolló el programa DIP, desglosando los módulos que lo integran.

3.1. MÓDULO DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico es importante para cualquier investigación donde se manejan series de datos. A partir de esta necesidad, se requiere de herramientas de cómputo que faciliten este proceso.

Después de los años ochentas, los estudios dentro del ámbito de ingeniería se han enfocado en el comportamiento de las estructuras mediante el análisis de esfuerzos y deformaciones. En Europa y América del Norte la instrumentación y la automatización de edificios, puentes y otras construcciones empezaron a generar datos, que a la fecha, son fundamentales para poder predecir el comportamiento de estas estructuras ante la demanda solicitada. Sin embargo, cuando se hace un estudio específico de fatiga en puentes, producto del flujo de cargas vehiculares, el manejo de datos sigue siendo complicado al no contar con una herramienta que realice todo el proceso de análisis. Por esta razón, se ha creado el programa DIP.

El primer requisito para que el programa pueda procesar los registros de cargas vehiculares es que los datos tengan un formato específico, mencionado en el subcapítulo 2.1.6, y que además estén almacenados en un archivo de texto.

Al ejecutar el programa DIP, la primera pestaña del interfaz que se observa es el módulo de análisis estadístico, junto con el menú principal ubicado en la parte superior. La opción de “*procesamiento de datos*” se encuentra dentro del módulo de análisis estadístico, y ésta fue desarrollada para adecuar el formato de los registros de WIM. Dentro de este módulo está la opción de separar datos, ya sea por número de ejes o por rangos de peso, con el fin de analizar sólo los registros de vehículos seleccionados.

Además del filtro de datos anterior, también se tiene la opción de suprimir o insertar columnas, ya que algunos registros de WIM en ocasiones presentan variaciones en este aspecto, entonces, se debe de adecuar el archivo antes de continuar con los siguientes módulos.

Una vez que los registros de pesaje se han acomodado, puede iniciarse el análisis estadístico. DIP cuenta con un interfaz sencillo para dicho análisis, el cual empieza con la generación de los histogramas de frecuencia, donde el primer paso es especificar la columna del archivo que se desea analizar, así como también el rango o intervalo que tendrán las barras del histograma (ver el manual de usuario en disco del Anexo B).

Enseguida, se selecciona el archivo de registros de WIM que se analizará. Inmediatamente el programa calcula los valores de frecuencia del histograma y hace la gráfica correspondiente. Todos los datos que se generan durante el proceso se almacenan en la carpeta asignada previamente (ver capítulo III y el manual de usuario en Anexo B).

Después del proceso anterior, al activar la opción de distribuciones, DIP permite deducir las curvas de distribución tanto normal como bimodal, correspondientes a los registros e histogramas de frecuencia. DIP muestra en su interfaz las curvas de distribución sobre los histogramas, de esta manera, se observa la aproximación de ajuste de curvas. El programa también almacena los resultados de las curvas de distribución normal y bimodal en formato de texto. Los parámetros de la distribución bimodal (media, desviación estándar, porcentaje de población, etc.) serán el punto de partida para el análisis de valores extremos aplicando el método de Gumbel y el Proceso de Poisson.

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo que describe el proceso del análisis estadístico.

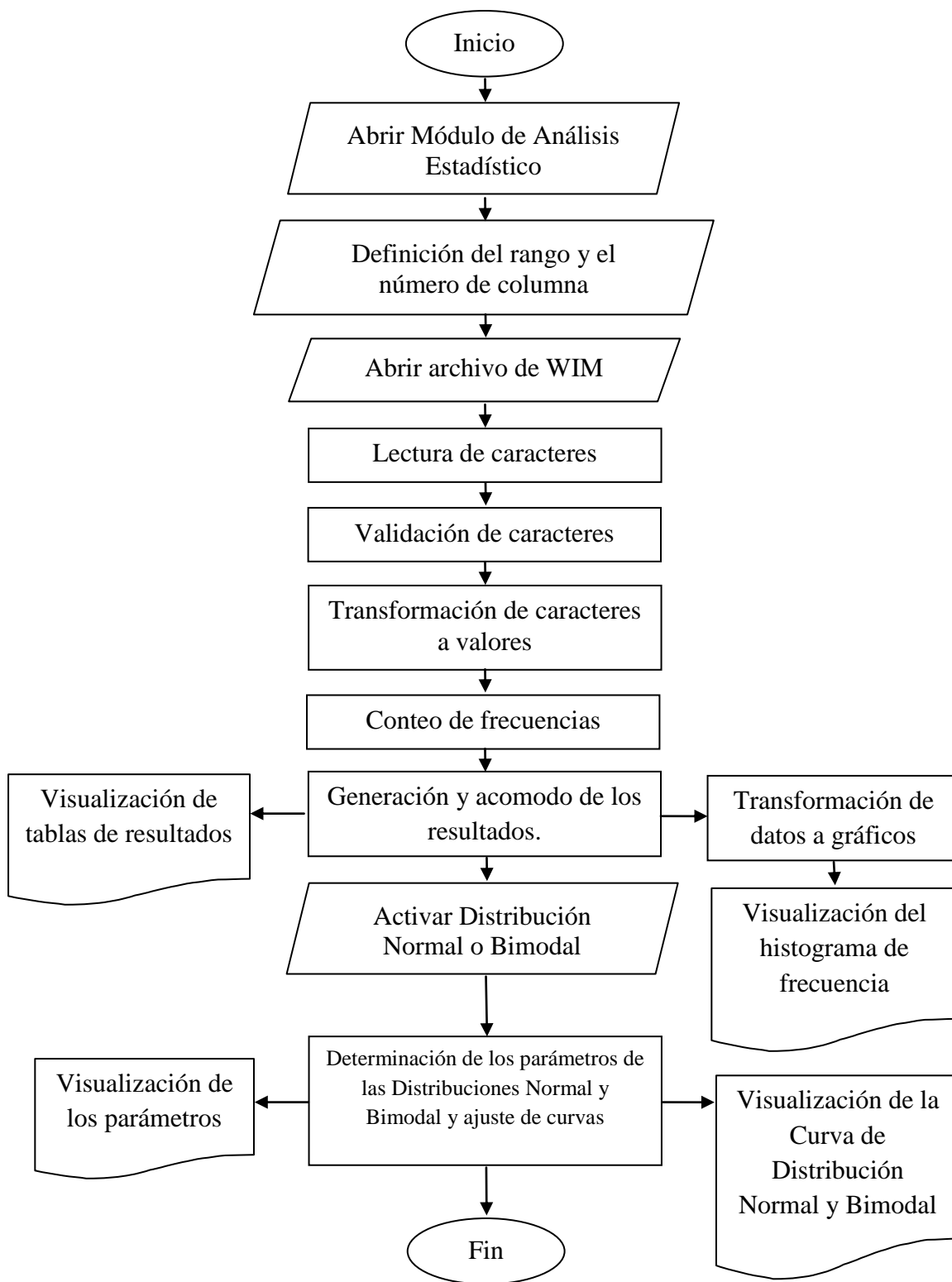


Figura 3.1. Diagrama de flujo del módulo estadístico.

Descripción del proceso de análisis estadístico:

A continuación se describe el proceso que sigue el algoritmo desarrollado para este módulo. Cabe mencionar que la programación completa en lenguaje C de dicho algoritmo se ha incluido en el CD del Anexo B de esta tesis, dentro de la carpeta llamada “algoritmos desarrollados”, ya que por su amplia extensión no puede ser agregado dentro de este capítulo.

Abrir Módulo de Análisis Estadístico. Este comando es el inicio de DIP, por lo tanto, al empezar el programa, el módulo de Análisis Estadístico aparece en el cuadro principal e inmediatamente se empiezan a validar todas las variables.

Definición del rango y el número de columna. El usuario define la magnitud de los grupos que conformarán el histograma de frecuencia relativa, es decir, el intervalo constante que tendrán las barras, y selecciona el número de la columna que se analizará, de esta manera, el algoritmo va dividiendo la información en varios grupos, con lo cual se generará la gráfica correspondiente.

Abrir archivo de WIM. Definidas las constantes de rango y columna, se busca el archivo de tráfico vehicular que se desee analizar, el cual debe de estar en formato de texto.

Lectura de caracteres. Una vez seleccionado el archivo de WIM, el proceso empieza identificando todos los caracteres que contiene dicho archivo, reconociendo así renglones y columnas.

Validación de caracteres. Terminada la lectura del archivo de WIM, el proceso de validación de datos consiste en identificar sólo aquellos que representen valores numéricos, con el fin de hacer el análisis estadístico. Con este proceso se eliminan espacios, letras o cualquier otro signo que no represente una cantidad numérica. También se eliminan aquellos caracteres que pudieran causar errores dentro del proceso.

Transformación de caracteres a valores. En este paso se transforman los caracteres numéricos a cantidades. El programa por sí solo no puede identificar si el archivo contiene cantidades numéricas, por ello es necesaria esta transformación.

Conteo de frecuencias. Se van agrupando las cantidades por rangos de valores. Con un contador incluido en el algoritmo se determina la cantidad de datos que existen por grupo, lo cual indicará la magnitud de la altura de cada barra del histograma.

Generación y acomodo de los resultados. Después del proceso de conteo, todas las variables tienen un valor asignado (producto del análisis), entonces, la información es acomodada en renglones y columnas para facilitar la visualización de los resultados. En este proceso ya se ha generado el histograma de frecuencia en formato de texto.

Visualización de tablas de resultados. Los resultados del histograma de frecuencia son impresos y visualizados en las tablas que aparecen dentro del interfaz de DIP.

Transformación de datos a gráficos. Los resultados son asignados a nuevas variables que servirán para el proceso de dibujo. Ahora los valores numéricos serán representados por medio de gráficas dibujadas a base de píxeles.

Visualización del histograma de frecuencia. Por medio de puntos, líneas y rellenos se va dando forma a los histogramas, para así interpretar mejor los resultados. Los histogramas de frecuencia se auto escalan dependiendo del espacio disponible y de la magnitud de cada barra. Finalmente, en la gráfica se tiene en el eje de las abscisas los rangos de pesos (en kN) y en el eje de las ordenadas la frecuencia, tanto normal como relativa.

Activar Distribución Normal y Bimodal. Los datos del histograma de frecuencia son la base para la aproximación de las curvas de distribución normal y bimodal. Cuando es activada esta opción, el algoritmo empieza un nuevo procesamiento de datos. Se realiza la lectura del archivo de texto que contiene los resultados del histograma, con los cuales se hace la aproximación de las curvas normal y bimodal utilizando la teoría expuesta en el subcapítulo 2.2.1.

Determinación de los parámetros de las Distribuciones Normal y Bimodal y ajuste de curvas. En esta parte se aplican las ecuaciones del subcapítulo 2.2, donde el parámetro p (porcentaje de la primera población de datos) se determina por medio de interacciones hasta que se encuentra la curva que se ajuste mejor al histograma. En el proceso de interacción se va variando el parámetro p , empezando de cero hasta el valor de peso máximo. El programa DIP

asigna la curva con mayor aproximación, cuando la suma de distancias entre dicha curva y el histograma de frecuencias tiene la menor cantidad. En seguida se determina el parámetro q (porcentaje de la segunda población de datos, igual a $1 - p$). A partir de esto se comienzan a obtener los parámetros de primer orden de la distribución (medias y desviaciones estándar m_1, m_2, σ_2 y σ_3) para cada población, utilizando las mismas ecuaciones citadas.

Visualización de los parámetros. Los valores de cada parámetro son guardados en un archivo de texto y se imprimen en los recuadros del interfaz gráfico de DIP.

Visualización de las Curvas de Distribución Normal y Bimodal. Las curvas se superponen en el histograma de frecuencia, para que de tal manera se pueda observar el ajuste de las curvas de distribución. Los datos de estas curvas también se guardan en un archivo de texto.

3.2. MÓDULO DE VALORES EXTREMOS

Partiendo de los resultados obtenidos en el análisis estadístico de cargas, el siguiente paso es el análisis de valores extremos de los registros de pesaje vehicular. La teoría de valores extremos de POT, GEV, Gumbel y Poisson, presentada en el capítulo anterior, se integra en el algoritmo del programa DIP para realizar este proceso.

El módulo de valores extremos pronostica los valores de pesos máximos esperados para ciertos periodos de retorno, mostrándose los resultados tanto en tablas como en gráficas. En el diagrama de flujo de la Figura 3.2 se observa el proceso descrito.

Descripción del proceso del método de POT:

Activar Módulo de Valores Extremos. Terminado el análisis estadístico, puede ser activado el módulo de Valores Extremos, el cual se ubica en la parte superior del cuadro principal. Inmediatamente se despliega un recuadro donde se podrá observar la información requerida.

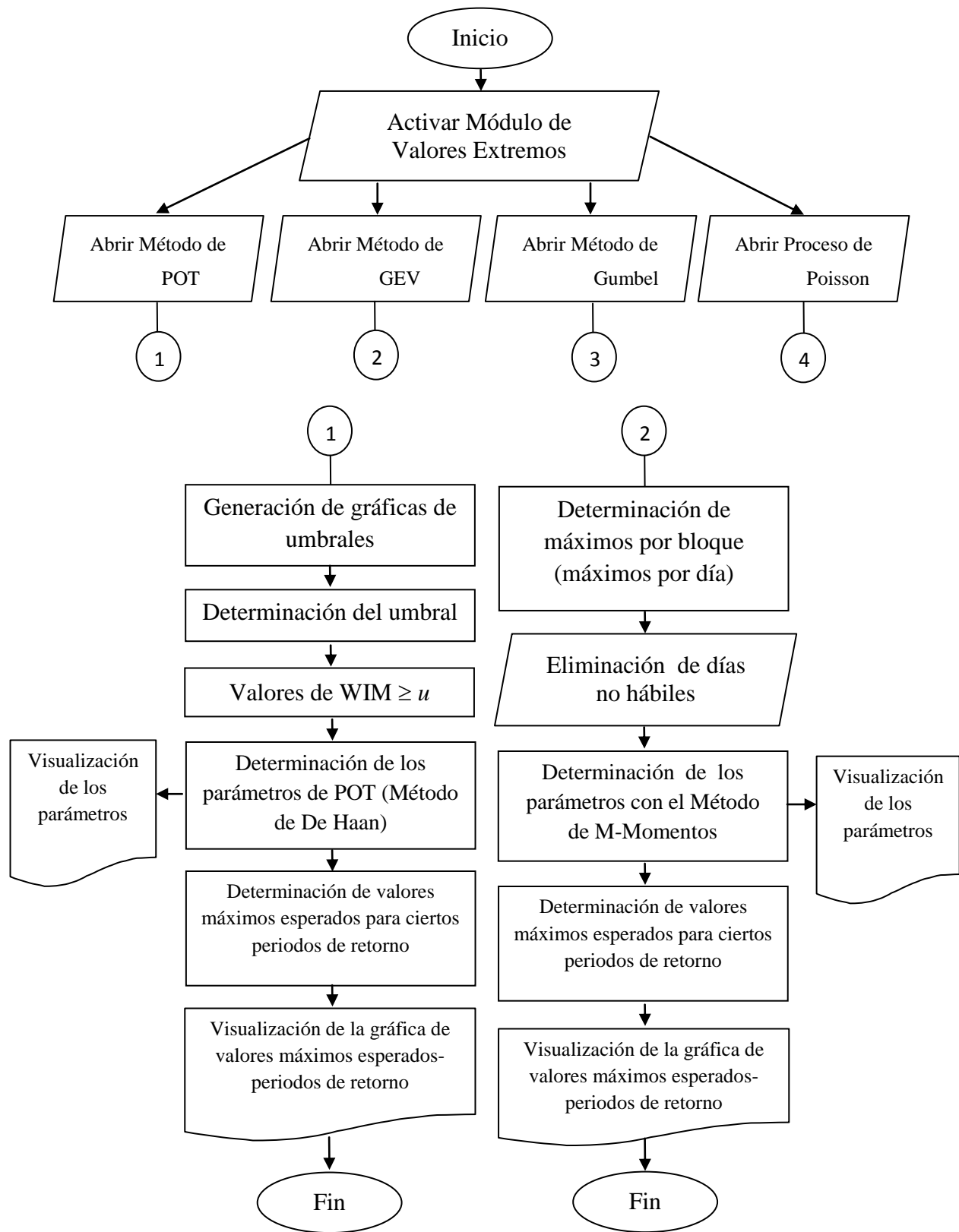


Figura 3.2. Diagrama de flujo del módulo de valores extremos.

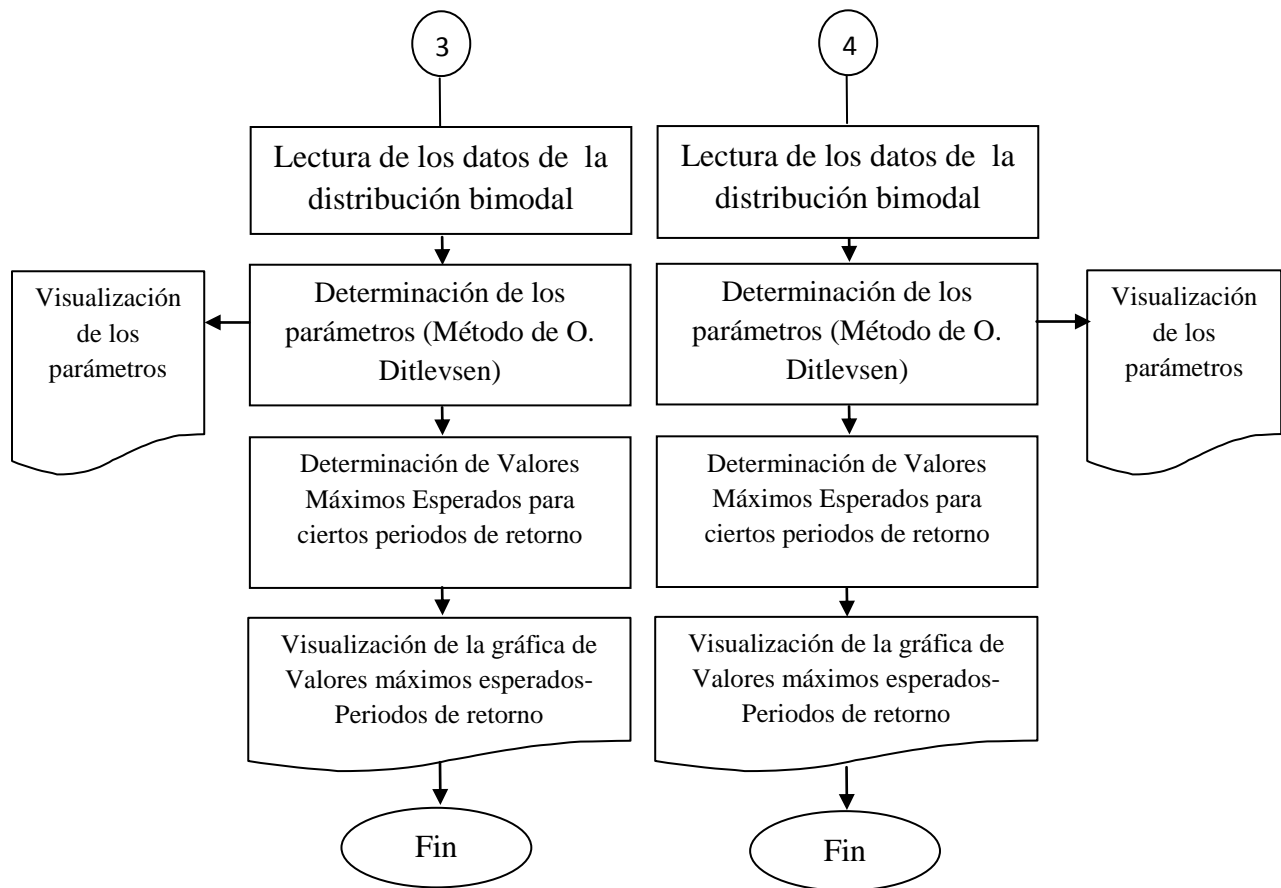


Figura 3.2. Diagrama de flujo del módulo de valores extremos (continuación).

Abrir Método de POT. Dentro del módulo de valores extremos se encuentran varias opciones, entre las cuales está el método de POT. Cabe destacar que este método utiliza todos los datos disponibles, a diferencia del método de GEV que sólo utiliza los máximos diarios por bloques. Al abrir esta opción, se empiezan a definir variables y a establecer los criterios mencionados en el subcapítulo 2.3.3.

Generación de gráficas de umbrales. Para poder seleccionar un valor adecuado del umbral, es necesario analizar las gráficas de umbrales. Estas gráficas corresponden al cálculo de las medias de la población de valores que superan a cada valor de umbral (ver subcapítulo 2.3.3).

Determinación del umbral. Una forma teórica de determinar el umbral es visualizando las gráficas de umbral, que se determinan aplicando la teoría expuesta en el subcapítulo 2.3.3. El umbral es la parte principal del método de POT, ya que sólo los valores que rebasen dicho umbral serán considerados en el análisis. El rango de valores que pueden asignarse al umbral debe de estar en la parte donde la gráfica tiene un comportamiento constante, lineal y horizontal.

Valores de WIM mayores o iguales que el umbral. Nuevamente los datos del archivo WIM son leídos para separar aquellos que sean mayores o igual que el umbral asignado. A los datos filtrados por el umbral se les aplicará la teoría del método de POT.

Determinación de los parámetros de POT (Método de De Hann). Con los datos anteriores se calculan los parámetros de la distribución de POT aplicando los estimadores determinados por De Hann en su publicación de 1994. Esta es una de las aproximaciones para estimar los parámetros de POT. También existe el método de máxima verosimilitud, sin embargo, se eligió el método de De Hann por tener un algoritmo sencillo y con bases sólidas. Además, con el método de la máxima verosimilitud se genera un sistema de ecuaciones donde el número de incógnitas supera el número de ecuaciones, haciendo un sistema indeterminado.

Visualización de los parámetros. Los parámetros calculados se imprimen en los recuadros del módulo de POT.

Determinación de los valores máximos esperados para ciertos periodos de retorno. En esta parte se pronostican los valores de pesos máximos que pueden presentarse en los periodos de retorno de 1 a 1,000 años. El proceso es directo una vez conocidos los parámetros de la distribución.

Visualización de la gráfica de valores máximos esperados contra periodos de retorno. DIP interpreta los resultados numéricos y genera los gráficos correspondientes a este análisis. El programa muestra la curva de tendencia de valores de pesos máximos esperados contra periodos de retorno, en escala Log-Normal.

Descripción del proceso del método de GEV:

Abrir Método de GEV. La segunda opción de valores extremos es el método de GEV, ubicado en el menú después del método de POT.

Determinación de máximos por bloque (máximos por día). El programa lee nuevamente el archivo de WIM y determina los valores máximos de cargas por cada día. Previamente se tiene que asignar el número de columna que corresponde a la fecha y el que corresponde a los pesos. Cabe destacar que el método necesita los máximos anuales, sin embargo, el proponer los máximos por día fue a falta de información anual, asumiendo que existe una equivalencia hipotética.

Eliminación de días no hábiles. Con esta opción se pueden suprimir aquellos valores de pesos registrados en días con flujo de tráfico menor, comúnmente los fines de semana (sábados y domingos) y los días festivos.

Determinación de los parámetros con el Método de M-Momentos. Los parámetros de GEV se pueden obtener a partir del método de máxima verosimilitud, sin embargo, el sistema de ecuaciones que se generan a partir de este proceso complica el cálculo de los parámetros. Por eso se eligió el método de aproximaciones de M-Momentos, descrito en el subcapítulo 2.3.2.

Visualización de los parámetros. Una vez que se calculan los parámetros de GEV, el programa DIP los imprime en los recuadros ubicados dentro del mismo módulo.

Determinación de valores máximos esperados para ciertos periodos de retorno. En este paso se calculan los valores máximos esperados para los periodos de retorno de 1 a 1,000 años. Los parámetros de escala y forma son los datos principales para la determinación de estos valores.

Visualización de la gráfica de valores máximos esperados-periodos de retorno. DIP interpreta los resultados numéricos y genera los gráficos correspondientes a este análisis. El programa muestra la curva de tendencia de valores de pesos máximos esperados (en kN) contra periodos de retorno (en años), en escala Log-Normal.

Descripción del método de Gumbel y el proceso de Poisson:

El proceso de estos métodos es similar, ya que ambos dependen de los parámetros de la distribución bimodal del análisis estadístico previo. Con los parámetros de la distribución bimodal, el cálculo de valores extremos de cargas para estos dos casos es simplemente una aplicación de las expresiones correspondientes de cada método.

Abrir Método de Gumbel o Proceso de Poisson. Se selecciona el método de valores extremos con el cual se realizará la estimación de los valores máximos de cargas esperados.

Lectura de los datos de la distribución bimodal. Ambos métodos dependen tanto del porcentaje de población (p) como de las medias y desviaciones estándar correspondientes (m_1, m_2, σ_2 y σ_3), calculadas a partir de la forma del histograma.

Determinación de los parámetros (Método de O. Ditlevsen). El programa DIP únicamente retoma los parámetros del análisis estadístico anterior y aplica las aproximaciones propuestas por Ditlevsen en 1989. Con este método se calcula los parámetros de forma y escala.

Visualización de los parámetros. Los parámetros calculados se imprimen dentro de los recuadros correspondientes, ubicados en cada módulo.

Determinación de valores máximos esperados para ciertos periodos de retorno. A diferencia de los métodos de POT y GEV, donde se calcula el valor de carga máximo esperado variando el periodo de retorno, en los métodos de Gumbel y Poisson se calcula el periodo de retorno variando la cantidad de carga. Al igual que los pasos anteriores, se utilizan las expresiones de estimación propuestas por Ditlevsen.

Visualización de la gráfica de valores máximos esperados-periodos de retorno. Los resultados se transforman en gráficos mediante el manejo de pixeles. DIP muestra la curva de tendencia de valores de pesos máximos esperados contra periodos de retorno, en escala Log-Normal.

3.3. MÓDULO DE ANÁLISIS DE FATIGA

El programa DIP también realiza el análisis de fatiga para puentes carreteros de acero. La teoría que sustenta al reglamento Eurcode es la base del algoritmo generado en este módulo. Esta teoría se basa en la obtención de series de esfuerzos para la evaluación del daño acumulado y predicción de vida a fatiga con la Regla de Miner.

El proceso comienza al seleccionar el archivo de tráfico vehicular que se desea analizar. Una vez elegido, se establece el tipo de puente, ya sea de uno, dos o tres claros, proporcionando las dimensiones de los claros, las características de la sección del puente y la ubicación del punto que se desea analizar.

A partir de esto, empieza la interacción tráfico-puente, con lo que se determinarán teóricamente los efectos que provoca el flujo vehicular.

3.3.1. MÓDULO DE LÍNEAS DE INFLUENCIA

Habiendo asignado las características generales del puente (número de claros, longitud de claros y módulo de sección), el programa realiza el análisis estructural con los registros de pesaje en movimiento. Las ecuaciones y el procedimiento planteados en el subcapítulo 2.4, se han integrado en el algoritmo de DIP para agilizar este proceso.

En el interfaz gráfico, DIP muestra la simulación del paso de los automóviles sobre el puente (de manera lineal), generando a su vez las líneas de influencia correspondientes a las cargas puntuales de los ejes vehiculares. En la Figura 3.3 se muestra el diagrama de flujo del proceso descrito. A continuación se describen las partes que integran dicho proceso.

Descripción del proceso de cálculo de líneas de influencia:

Activar módulo de Análisis de Fatiga. Al seleccionar la opción de Análisis de Fatiga se despliega el cuadro de menú para el cálculo de líneas de influencia. En esta parte se asignan las propiedades características del puente y se establecerá la demanda de tráfico vehicular real.

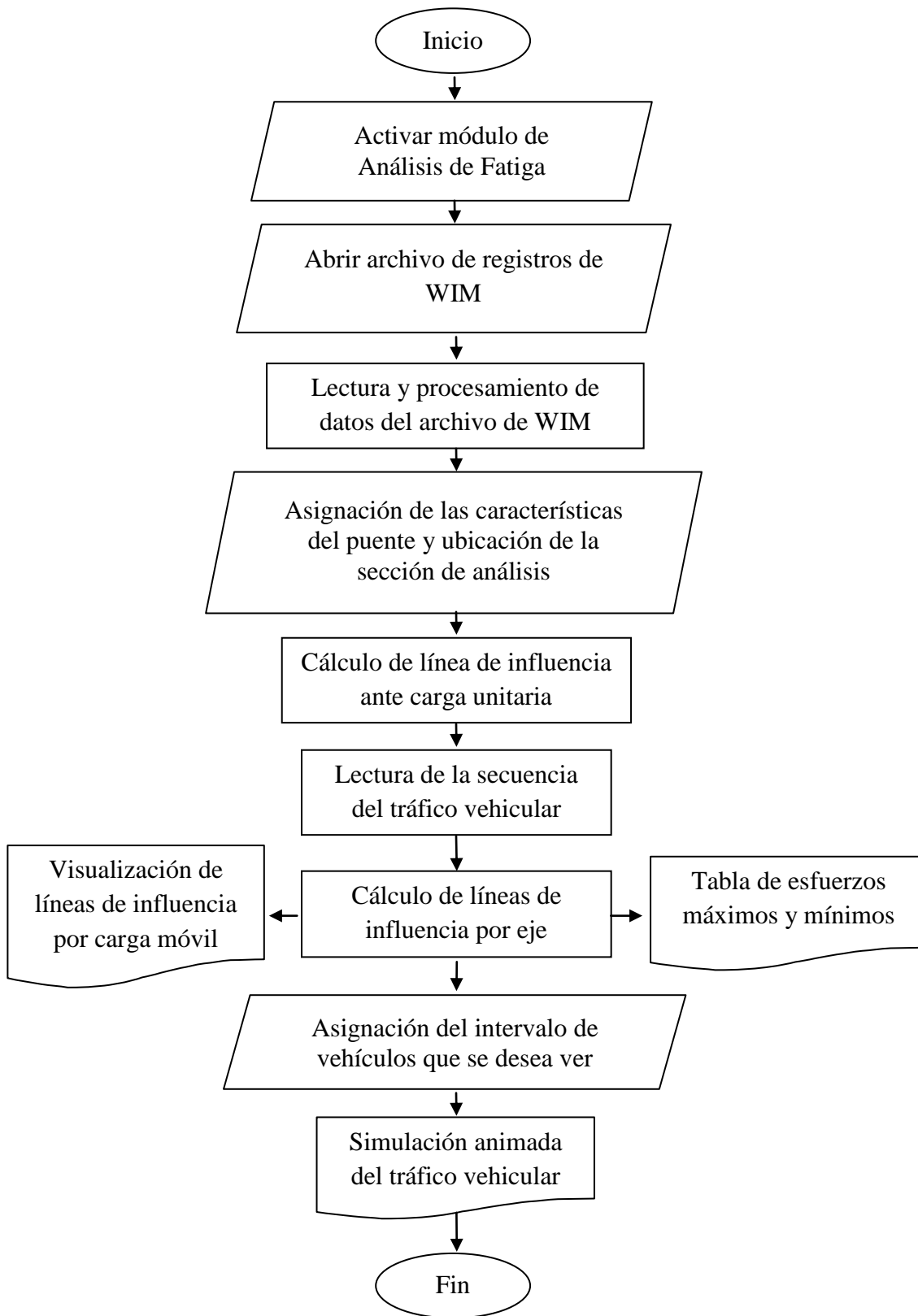


Figura 3.3. Diagrama de flujo del módulo de fatiga (generación de líneas de influencia).

Abrir archivo de registros de WIM. Antes de asignar las propiedades del puente, DIP debe de reconocer el tráfico vehicular al cual estará sometido. Entonces debe de buscarse el archivo de WIM en formato de texto.

Lectura y procesamiento de datos del archivo de WIM. El sistema reconoce los caracteres que están dentro del registro de WIM y los transforma en cantidades para poder iniciar con el cálculo de líneas de influencia.

Asignación de las características del puente y ubicación de la sección de análisis. En esta parte se asigna el número de claros, la longitud de éstos, el módulo de sección del puente y la distancia donde se ubica la sección de interés para el análisis.

Cálculo de línea de influencia ante carga unitaria. Con los parámetros anteriores, y dependiendo del caso, DIP calcula la línea de influencia de esfuerzos unitaria para puentes de uno, dos o tres claros. Esta información es visualizada en forma gráfica y se imprimen los valores en tablas. Las unidades de tensión que se manejan son N/m^2 , es decir Pascales, contra su ubicación dentro del puente en metros.

Lectura de la secuencia del tráfico vehicular. Para empezar con el cálculo de líneas de influencia, DIP lee el archivo de WIM para conocer como están ordenadas las cargas por eje vehicular, entonces, genera nuevos archivos de texto separando las cargas y las distancias de la demás información.

Cálculo de líneas de influencia por eje. Una vez que se tiene la línea de influencia de esfuerzos unitaria y los datos de cargas y distancias, ordenadas de manera secuencial, DIP hace pasar el tráfico por el puente de manera gráfica, con lo cual se van generando una línea de influencia por cada eje. La teoría de superposición de cargas y efectos se aplica en este paso.

Visualización de líneas de influencia por carga móvil. DIP imprime las líneas de influencia a base de pixeles en una gráfica, además presenta la opción de mostrar la simulación del tráfico vehicular en forma animada.

Tabla de esfuerzos máximos y mínimos. DIP imprime los esfuerzos máximos y mínimos obtenidos por cada línea de influencia, además da su ubicación a lo largo del puente, donde éstos fueron registrados.

Asignación del intervalo de vehículos que se desea ver. Aquí se debe de establecer cuáles son aquellos vehículos que se verán dentro de la simulación animada. El intervalo máximo es de 5 vehículos, ya que si fueran más, las líneas de influencia no se verían claramente.

Simulación animada del tráfico vehicular. DIP muestra el paso del tráfico, dibujando cada uno de los vehículos en forma secuencial, y a su vez, se puede visualizar como se van generando las líneas de influencia correspondientes a cada eje.

3.3.2. MÓDULO DE CONTEO DE CICLOS DE ESFUERZOS CON EL MÉTODO DE RAINFLOW

Teniendo las líneas de influencia calculadas, se puede generar la gráfica de historia de ciclos de esfuerzos que se presenta en la sección de interés del puente. Las líneas de influencia son acumuladas en forma de serie dentro del módulo de Rainflow, donde se utiliza este método para obtener los ciclos de esfuerzos y sus magnitudes, aplicando las expresiones del subcapítulo 2.4.2.2. Para esto es necesario saber las características principales de la sección del puente, como lo son el módulo de inercia y la distancia del centroide al paño inferior. DIP despliega la serie de historia de esfuerzos de manera gráfica, además genera un archivo en formato de texto donde se almacenan los resultados. En la Figura 3.4 se describe el diagrama de flujo de este proceso.

Descripción del proceso de conteo de ciclos de esfuerzos:

Activar la opción de Rainflow. Dentro del módulo de líneas de influencia se encuentra la opción de Rainflow con lo cual se habilita este análisis.

Lectura de los resultados de las líneas de influencia de esfuerzos. El programa vuelve a leer los resultados del cálculo de líneas de influencia y ordena la información necesaria para iniciar el conteo de ciclos.

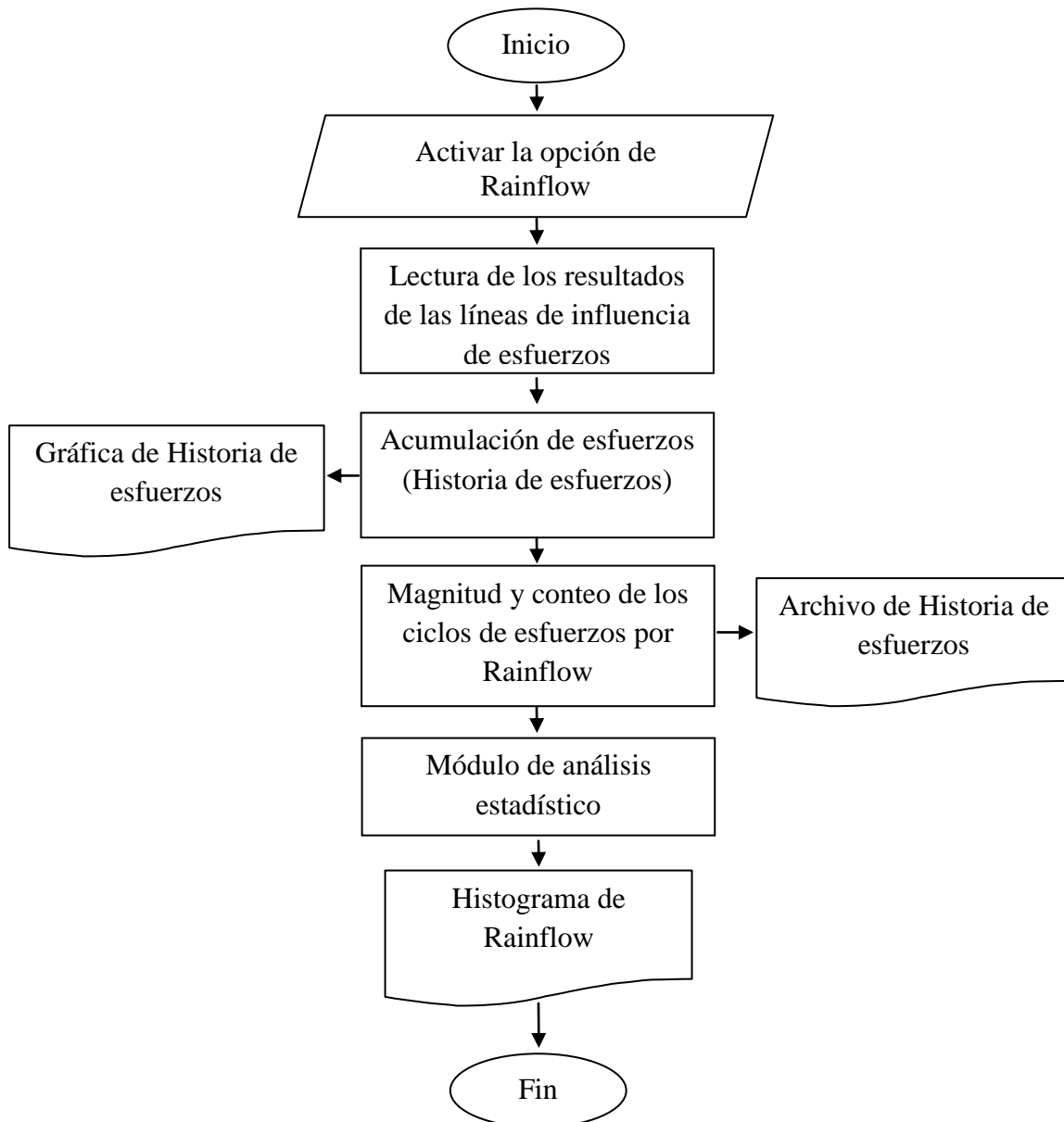


Figura 3.4. Diagrama de flujo del módulo de fatiga (aplicación del método de Rainflow).

Acumulación de esfuerzos (Historia de esfuerzos). Todas las líneas de influencia se van acumulando dentro de un archivo de texto y posteriormente se graficarán en forma de serie.

Gráfica de Historia de esfuerzos. Entonces se imprimen los ciclos de carga y descarga a los que estuvo sometida la sección de análisis. Los resultados de esfuerzos en este módulo están dados en Pascales.

Magnitud y conteo de los ciclos de esfuerzos por Rainflow. El método de Rainflow descrito en el subcapítulo 2.4.2.2 es aplicado a la serie de historia de esfuerzos generada. Se calcula la magnitud de los esfuerzos y se hace el conteo correspondiente.

Archivo de Historia de esfuerzos. Los resultados del conteo de Rainflow se almacenan dentro de un archivo de texto, creado en la carpeta asignada al inicio del proceso.

Módulo de análisis estadístico. Nuevamente se utiliza el módulo estadístico para analizar los resultados del conteo de Rainflow.

Histograma de Rainflow. Se genera el histograma de los esfuerzos calculados con el método de Rainflow, entonces se imprime dicha gráfica y se almacenan los resultados en un archivo de texto. Este archivo se genera con el nombre de “Histograma.txt”

3.3.3. MÓDULO DE ESTIMACIÓN DE DAÑO ACUMULADO Y VIDA A FATIGA

Conociendo los esfuerzos, el módulo estadístico es nuevamente utilizado para obtener los histogramas de los ciclos de esfuerzos, mejor conocidos como Histogramas de Rainflow. Entonces se puede ahora habilitar la opción de “Regla de Miner” la cual tiene un algoritmo basado en los principios de dicho proceso. El programa DIP da como resultado el valor de daño acumulado o número de Miner (D) y una aproximación teórica del periodo de vida que le falta al puente para que se presenten daños estructurales (primeras grietas o deformaciones excesivas). En la Figura 3.5 se observa el diagrama de flujo de la estimación de daño acumulado y predicción de vida a fatiga. Cada paso de este análisis se describe a continuación.

Descripción del proceso de estimación de daño acumulado y predicción de vida a fatiga:

Activar Análisis de Fatiga. Esta opción aparece dentro del menú principal de DIP. Para iniciar este proceso es necesario haber realizado el análisis estadístico de los esfuerzos, es decir, tener el histograma de Rainflow.

Lectura del Histograma de Rainflow. Se elige el archivo de texto que contiene los datos del histograma de Rainflow.

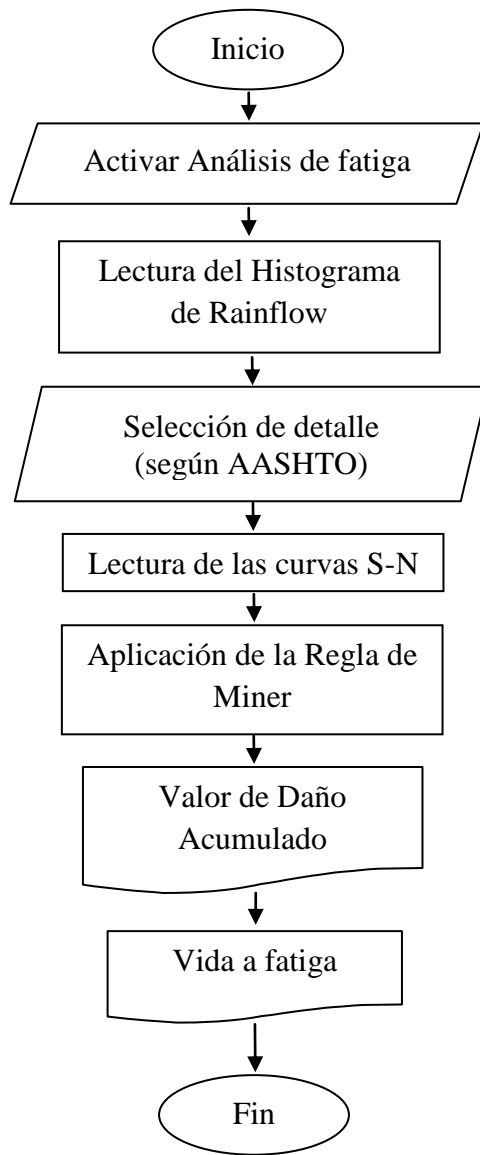


Figura 3.5. Diagrama de flujo del módulo de fatiga (aplicación de la Regla de Miner).

Selección de detalle (según AASHTO). Ahora se elige el tipo de detalle que corresponde a la sección de análisis. A diferencia del reglamento Eurocode, en este paso se utilizaron los tipos de detalle descritos en el manual AASHTO, por la razón de que presentan las curvas S-N necesarias para la estimación de daño. El Eurocode no contiene dichas curvas y sugiere generarlas a base de mediciones y pruebas de laboratorio.

Lectura de las curvas S-N. Establecido el tipo de detalle, automáticamente DIP utiliza las ecuaciones de las curvas S-N para estimar el número de ciclos que producirán la falla por fatiga en los detalles. En este paso se conoce la cantidad de ciclos de esfuerzos y su magnitud, con los cuales se puede presentar la falla estructural debido al fenómeno de fatiga.

Aplicación de la Regla de Miner. Conocido la anterior, se aplica la Regla de Miner descrita en el subcapítulo 2.4.4.

Valor de Daño Acumulado. Con la regla de Miner se calcula el valor de daño acumulado (o también llamado número de Miner). Cuando el valor se aproxima a la unidad, significa que el daño está a punto de ocurrir.

Vida a Fatiga. Teniendo el Valor de daño acumulado, se estima la vida a fatiga haciendo la inversa del número de Miner y restándole la vida actual del puente.

IV. EJEMPLO DE APLICACIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se muestra la aplicación del programa DIP para ciertos escenarios reales de tráfico vehicular. Con la finalidad de corroborar los resultados, estos se han comparado con los obtenidos en estudios precedentes realizados por M. Arroyo en su publicación 2009, en la cual ha utilizado programas como el CASTOR, el compilador POLLUX y el programa de estadística R.

En seguida se presenta el análisis estadístico, el estudio de valores extremos y la obtención de los efectos de fatiga para los registros de pesaje en movimiento de las autopistas A64 (Figura 4.1) y A4 (Figura 4.2). La autopista A64 pasa por las ciudades de Toulouse, Trèbes y Pau, Francia. El tráfico vehicular de la A64 fue registrado durante los meses de junio y septiembre de 2007, quitando los días no hábiles (sábados y domingos). Por otra parte, la autopista A4 es aquella que conecta a las ciudades de Metz y Stasbourg. El tráfico de la A4 se registró del 1 al 26 de Marzo de 2008.

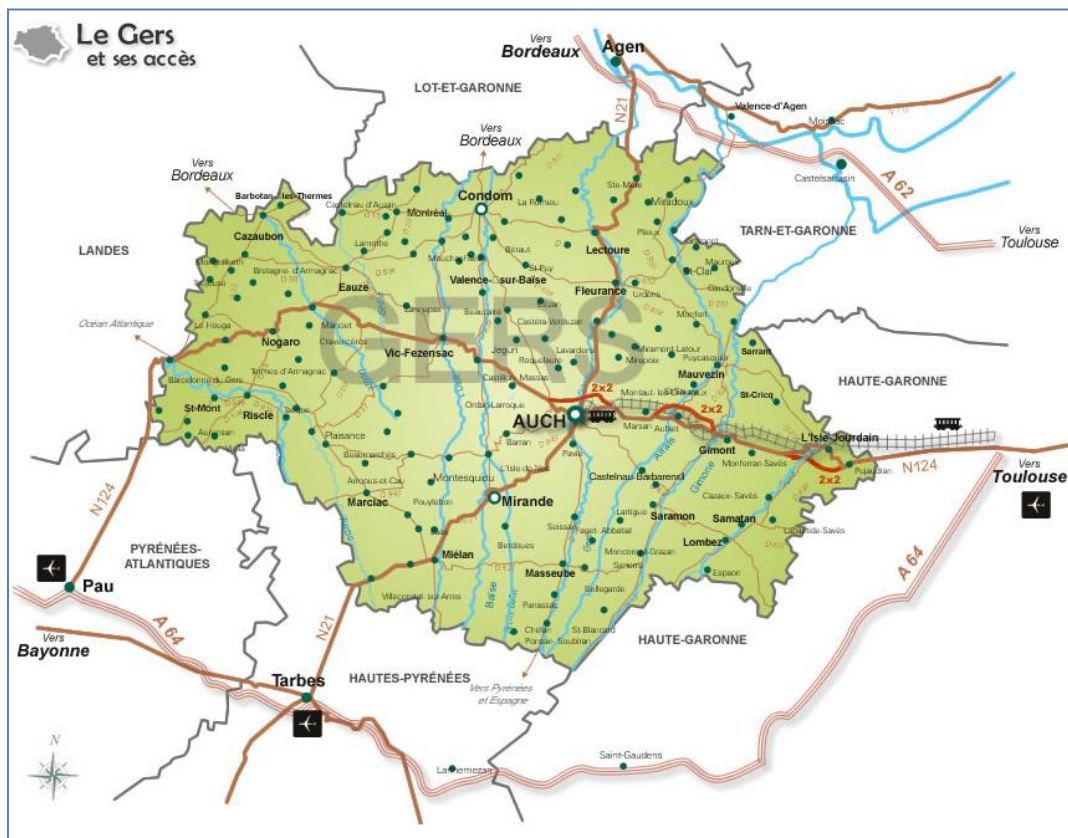


Figura 4.1. Ubicación de la autopista A64; Fuente: Arroyo et al, 2009.

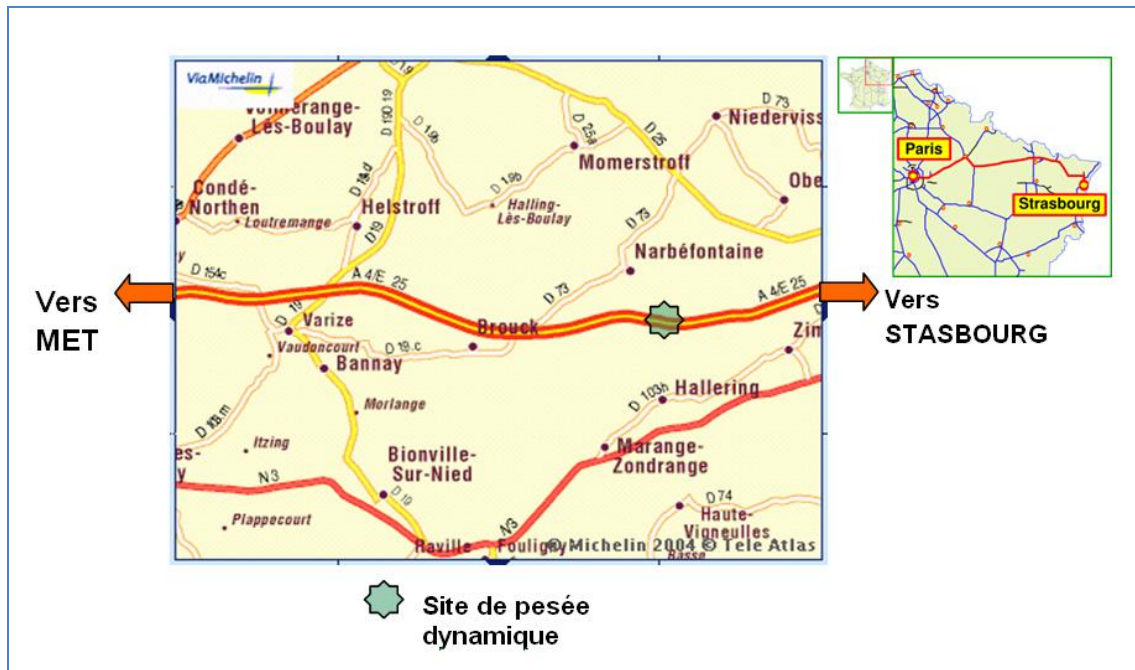


Figura 4.2. Ubicación de la autopista A4; Fuente: Arroyo et al, 2009.

4.1. PROCESAMIENTO DE DATOS DE WIM CON EL PROGRAMA DIP

Para los análisis tanto estadístico como de valores extremos y el estudio de fatiga, es necesario filtrar la base de datos de WIM. Primero se debe asegurar que el formato del archivo WIM sea el correcto para que el programa DIP lo pueda procesar. Para ello existe un módulo de *procesamiento de datos* (Figura 4.3), con el cual se puede arreglar el archivo y así éste tenga la forma adecuada para su estudio.

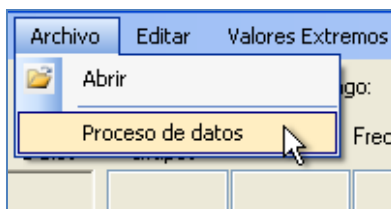


Figura 4.3. Inicialización del módulo de procesamiento de datos.

Para el ejemplo de la autopista A64, se han despreciado los vehículos con un peso menor de 35 kN (Figura 4.4), ya que estos no logran generar efectos considerables sobre las vialidades.

En este módulo se selecciona el archivo de WIM que se desea procesar, dando posteriormente los pesos que serán considerados. El archivo de WIM del ejemplo de la autopista A64 tiene el nombre A64 JunSep.txt

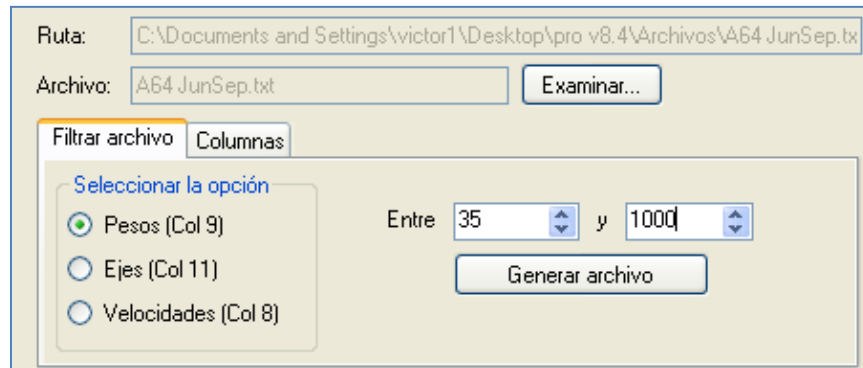


Figura 4.4. Definición del rango de pesos.

Después de establecer los límites de pesos, también se asigno el intervalo de ejes para el análisis, que para este caso fue de 2 a 7 ejes (Figura 4.5).

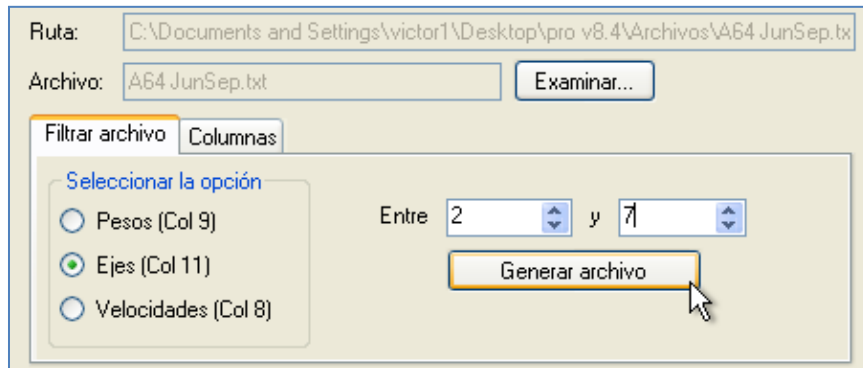


Figura 4.5. Definición del rango de ejes.

Comúnmente, los archivos de registro contienen los datos del peso total de cada vehículo en la columna 9. En caso de que ésta no corresponda al peso vehicular, el módulo de procesamiento tiene la opción de eliminar o insertar columnas, para que de esta manera se destine la novena columna a los datos de pesos (Figura 4.6).

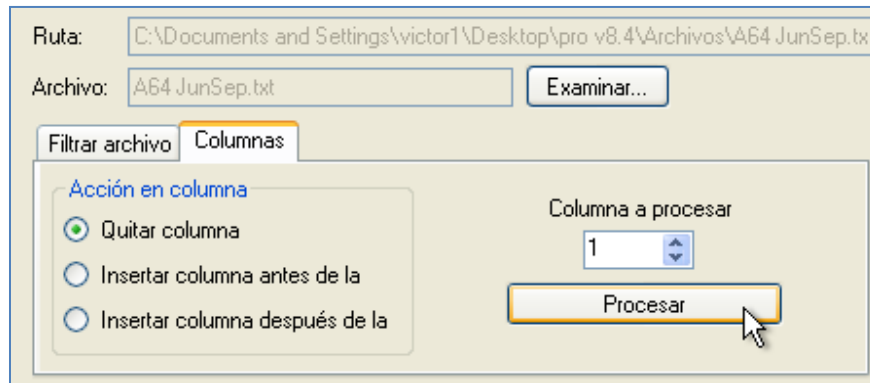


Figura 4.6. Ajuste de columnas.

Establecido lo anterior, se genera el nuevo archivo en formato de texto del pesaje vehicular de la carretera A64, el cual contiene sólo vehículos de 2 a 7 ejes y los cuales tienen un peso mayor o igual que 35kN. Este archivo se guarda con un nombre distinto para que posteriormente sea utilizado en el análisis estadístico y en la predicción de valores extremos. Para el primer ejemplo, el archivo quedó con el nombre A64 W35 PL2a7.txt. El mismo proceso se realizó para los datos de la autopista A4, de igual forma sólo se consideraron los vehículos con pesos mayores o igual a 35kN, además de seleccionar aquellos vehículos que tienen de 2 a 9 ejes. En este caso el nombre del archivo quedó como A4 W35 PL2a9.txt

4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS REGISTROS DE WIM CON EL PROGRAMA DIP

El objetivo del análisis estadístico es encontrar los parámetros necesarios que se utilizarán en el análisis de valores extremos con el método de Gumbel y el Proceso Poisson, además de proporcionar los histogramas y las curvas de distribución que presentan los diferentes escenarios de cargas registrados.

Una vez procesado el archivo de tráfico vehicular, se puede pasar al análisis estadístico. En este módulo se establece el número de la columna del archivo de texto de WIM, a la cual se le realizará el análisis, además se asigna el rango o intervalo que tendrá cada una de las barras del histograma (anchura de barras). En el caso de la autopista A64 se ha considerado un rango de 7.2 (tomado a criterio), con lo que el histograma tendrá aproximadamente 100 barras (Figura 4.7).

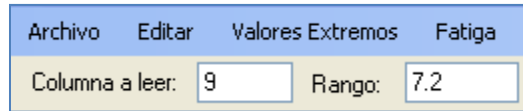


Figura 4.7. Asignación del rango de las barras del histograma y el número de columna del archivo de WIM.

Establecidos el número de columna y el rango, el análisis estadístico se realiza abriendo el archivo ya procesado (Figura 4.8).

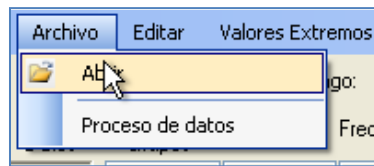


Figura 4.8. Inicialización del análisis estadístico.

Antes de continuar con el análisis, el programa DIP pide que se asigne la ruta donde se guardaran los archivos de texto que se generan durante el proceso (Figura 4.9).

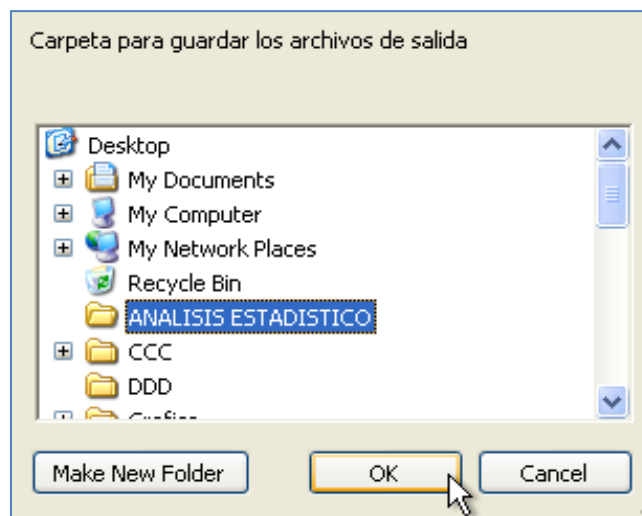


Figura 4.9. Carpeta de almacenamiento de datos generados en el análisis estadístico.

En seguida se busca el archivo de WIM y se abre. Para el caso de la autopista A64 el archivo de texto se llama A64 W35 PL2a7.txt (Figura 4.10).

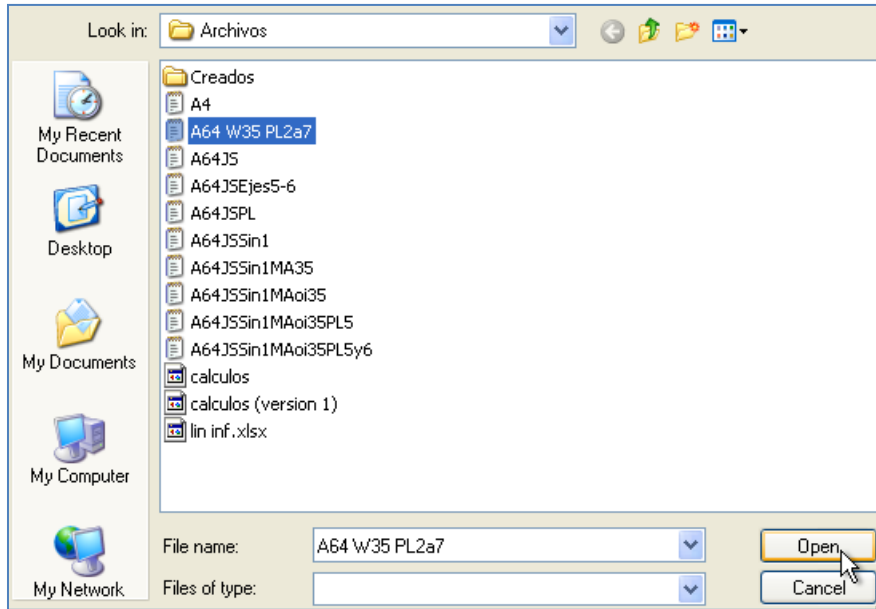


Figura 4.10. Selección del archivo para el análisis estadístico.

El programa DIP lee los registros de pesaje en movimiento y calcula los parámetros del histograma, con los cuales se realiza la gráfica correspondiente (Figura 4.11).

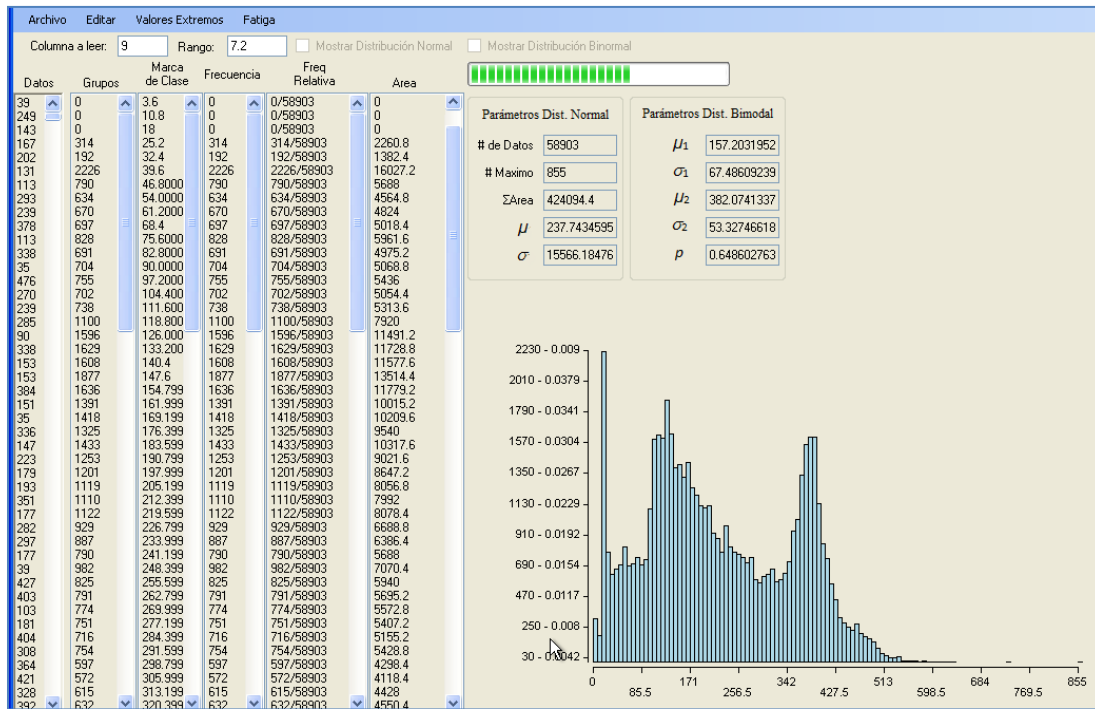


Figura 4.11. Histograma de frecuencia de las carga del registrado de la autopista A64.

El programa muestra en la pantalla los datos que se han leído, las marcas de clase, la frecuencia, la frecuencia relativa y el área de las barras (Figuras 4.12 y 4.13), además de guardar toda la información en un archivo de texto, el cual se ubica dentro de la carpeta asignada al inicio.

DIP también realiza la aproximación de las curvas de distribución normal (o Gaussiana) y bimodal (Figuras 4.12 y 4.13). Esta última será utilizada en el análisis de valores extremos, tanto para el método de Gumbel como para el Proceso de Poisson.

La teoría del subcapítulo 2.2.1 es aplicada en los algoritmos que integran este módulo de análisis estadístico.

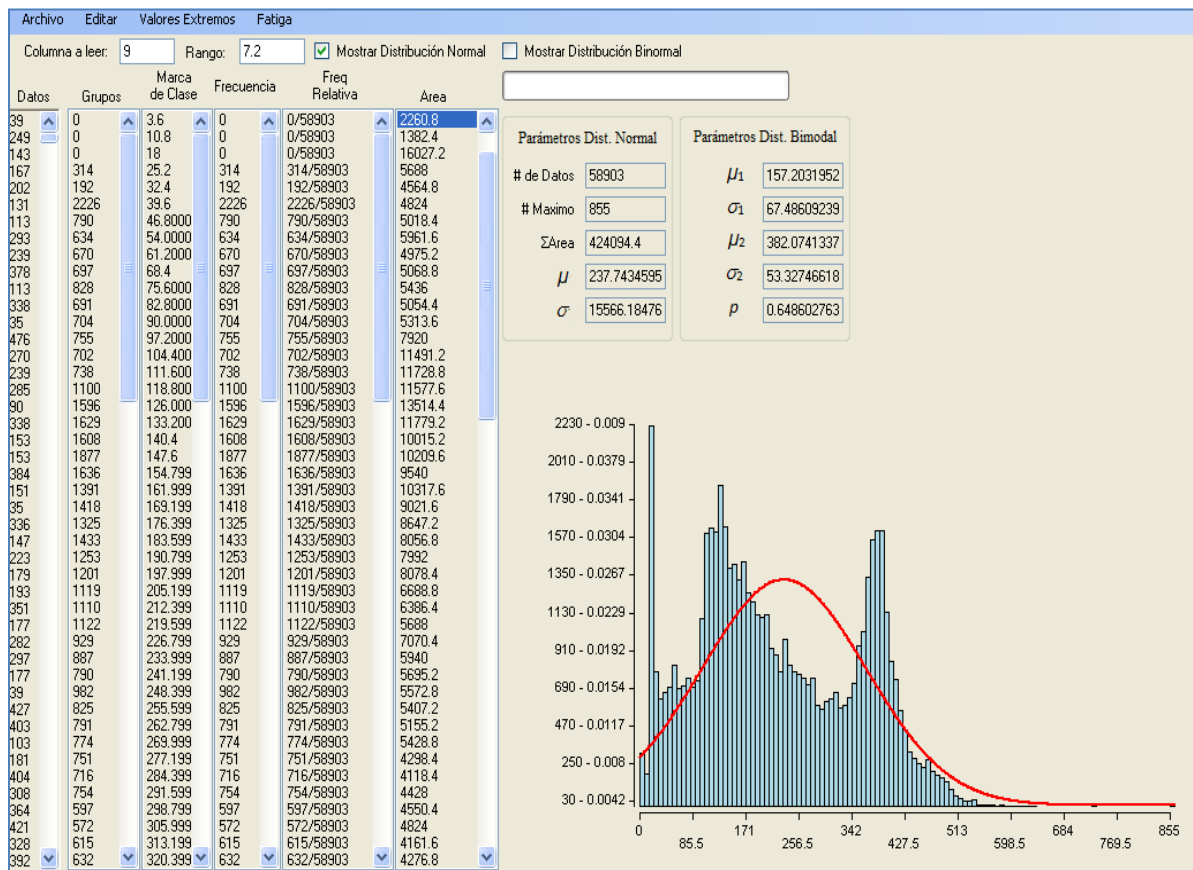


Figura 4.12. Curva de distribución normal del histograma de cargas de la autopista A64.

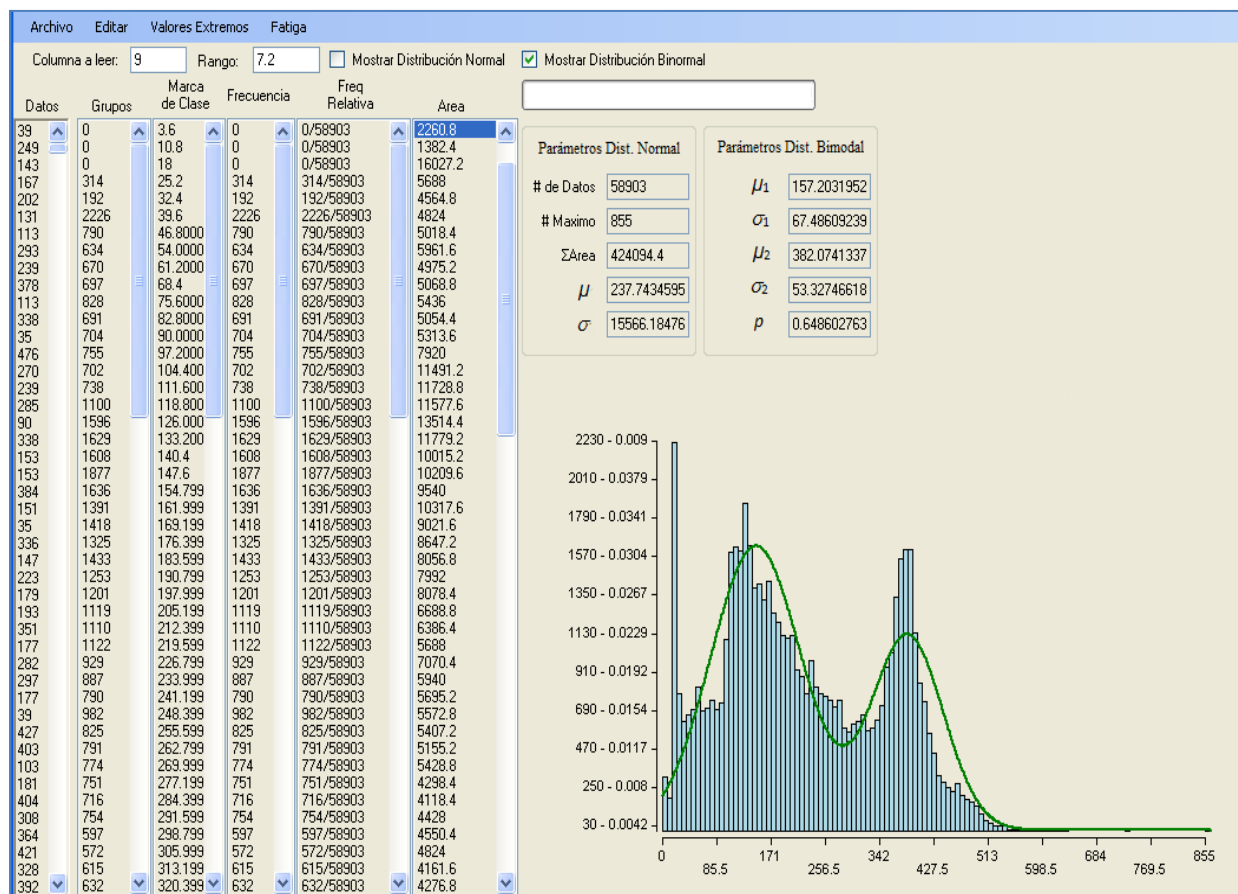


Figura 4.13. Curva de distribución bimodal del histograma de cargas de la autopista A64.

Para el escenario de tráfico real de la autopista A64, se obtuvieron los parámetros de la curva de distribución bimodal mostrados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resultados del análisis estadístico de los registros de WIM de la autopista A64 y su comparación.

| Parámetro | Valor obtenido con DIP | Valor obtenido con R (Arroyo M., 2009) | % de Diferencia |
|------------|------------------------|--|-----------------|
| μ_1 | 157.20 | 161.08 | 3% |
| σ_1 | 67.48 | 72.27 | 6.5% |
| μ_2 | 382.07 | 381.83 | 0.1% |
| σ_2 | 53.33 | 56.54 | 6.5% |
| p | 0.648 | 0.65 | 0.4% |

Existen diferencias que oscilan entre el 0.1 y 6.5%. Estas diferencias no son errores, ya que fueron utilizados procesos y fundamentos distintos, aunque finalmente ambas aproximaciones son muy similares. La ventaja que se tiene con el programa DIP es que se evita “la caja negra” que representa el uso de otros programas.

La forma del histograma es otra de las variantes que se debe de tomar en cuenta para la aproximación de curvas de distribución, ya que existirán variaciones en los resultados dependiendo de la cantidad de barras y su intervalo.

El mismo proceso se aplicó para el registro de WIM de la autopista A4 (archivo A4.txt), obteniendo las gráficas y los resultados mostrados en las Figuras 4.14 y 4.15.

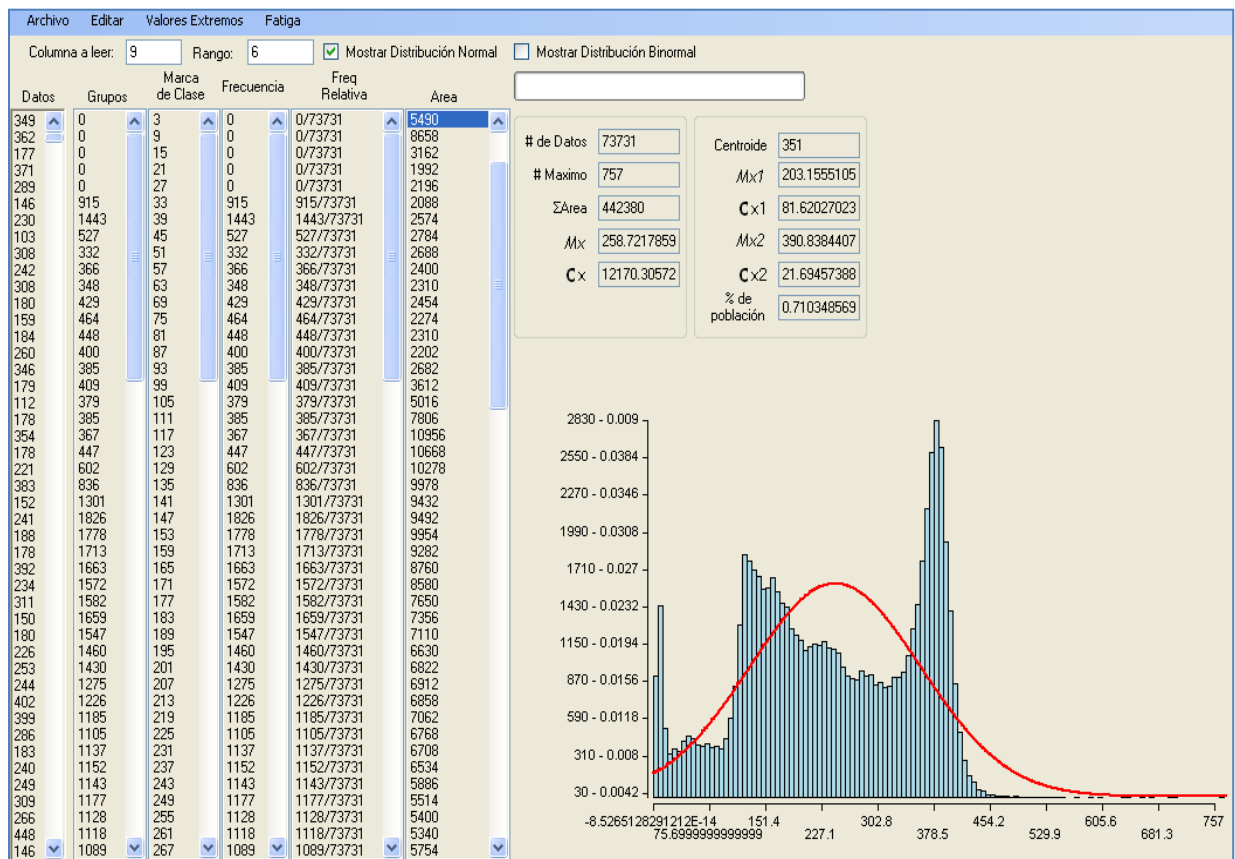


Figura 4.14. Curva de distribución normal del histograma de cargas de la autopista A4.

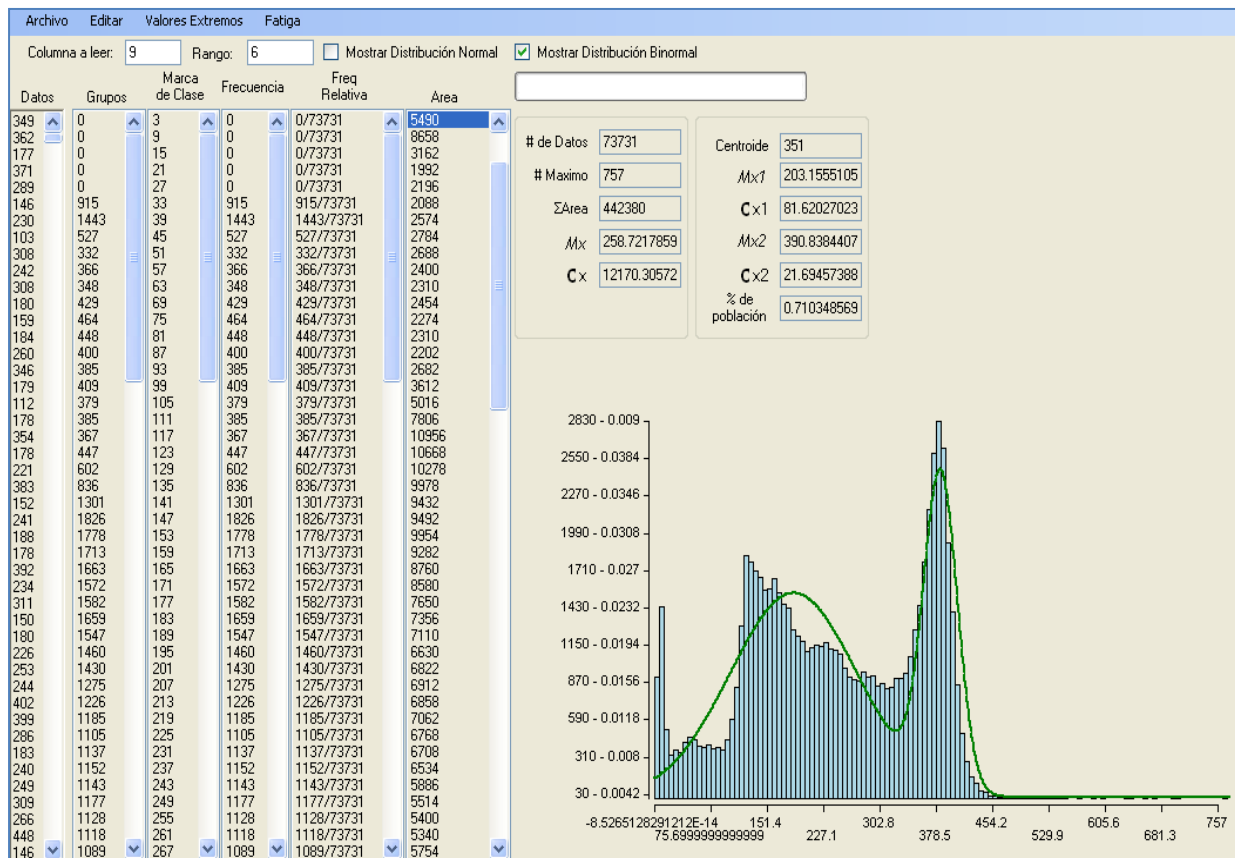


Figura 4.15. Curva de distribución bimodal del histograma de cargas de la autopista A4.

Para el escenario de tráfico real de la autopista A4, se obtuvieron los parámetros de la curva de distribución bimodal mostrados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Resultados del análisis estadístico de los registros de WIM de la autopista A4 y su comparación.

| Parámetro | Valor obtenido con DIP | Valor obtenido con R (Arroyo M., 2009) |
|------------|------------------------|--|
| μ_1 | 203.16 | 213.31 |
| σ_1 | 81.62 | 90.9 |
| μ_2 | 390.84 | 389.57 |
| σ_2 | 21.69 | 19.07 |
| p | 0.71 | 0.7423 |

También existen algunas diferencia, sin embargo, la aproximación es muy similar.

4.3. ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS DE LOS REGISTROS DE WIM CON EL PROGRAMA DIP

La primera parte del análisis ha sido realizada, obteniendo resultados favorables en el proceso estadístico, por lo tanto, la predicción de los valores extremos para las cargas vehiculares es el siguiente paso. En los métodos de GEV y POT no es necesario el análisis estadístico anterior, ya que estos procesos no dependen de los parámetros de la distribución bimodal, sin embargo, tanto el método de Gumbel como el Proceso de Poisson si son dependientes de ello.

En los siguientes párrafos se describe el análisis de valores extremos de cargas que se realizó para los registros de WIM de las carreteras A64 y A4.

4.3.1. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE PICOS DE REBASE DE UMBRAL (POT).

DIP tiene el módulo de valores extremos en la parte superior de la página principal. En esta pestaña se encuentran las cuatro opciones de las que se disponen. También existe una quinta opción donde se puede realizar la comparación de los cuatro métodos simultáneamente (Figura 4.16).

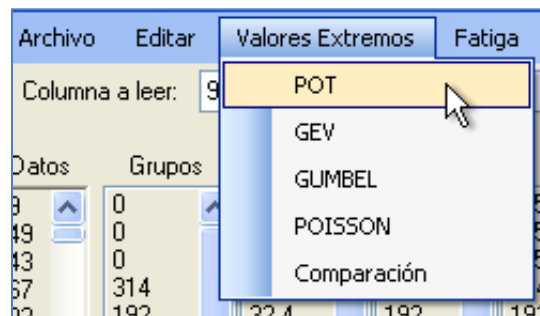


Figura 4.16. Inicialización del módulo de valores extremos, Método de POT.

Al seleccionar la opción de POT se despliega la pantalla de inicio del método. Como primer paso se establece el valor del umbral (u), el cual se selecciona de la gráfica de umbrales que el mismo programa genera. Esta gráfica muestra en el eje de las abscisas los valores de los umbrales, mientras que en el eje de las ordenadas están los valores de las medias de excedencias correspondientes a cada umbral. El algoritmo de este módulo se sustenta en la teoría del subcapítulo 2.3.1.

En el menú del programa se asigna el intervalo de valores que se visualizarán en la gráfica de umbrales. En seguida, DIP muestra dicha gráfica al oprimir el botón *Gráfica de U* (Figuras 4.17 y 4.18).

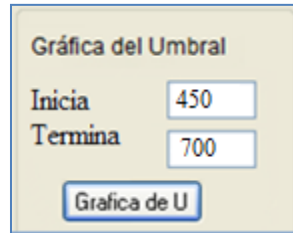


Figura 4.17. Asignación del rango de visualización para la gráfica de umbrales.

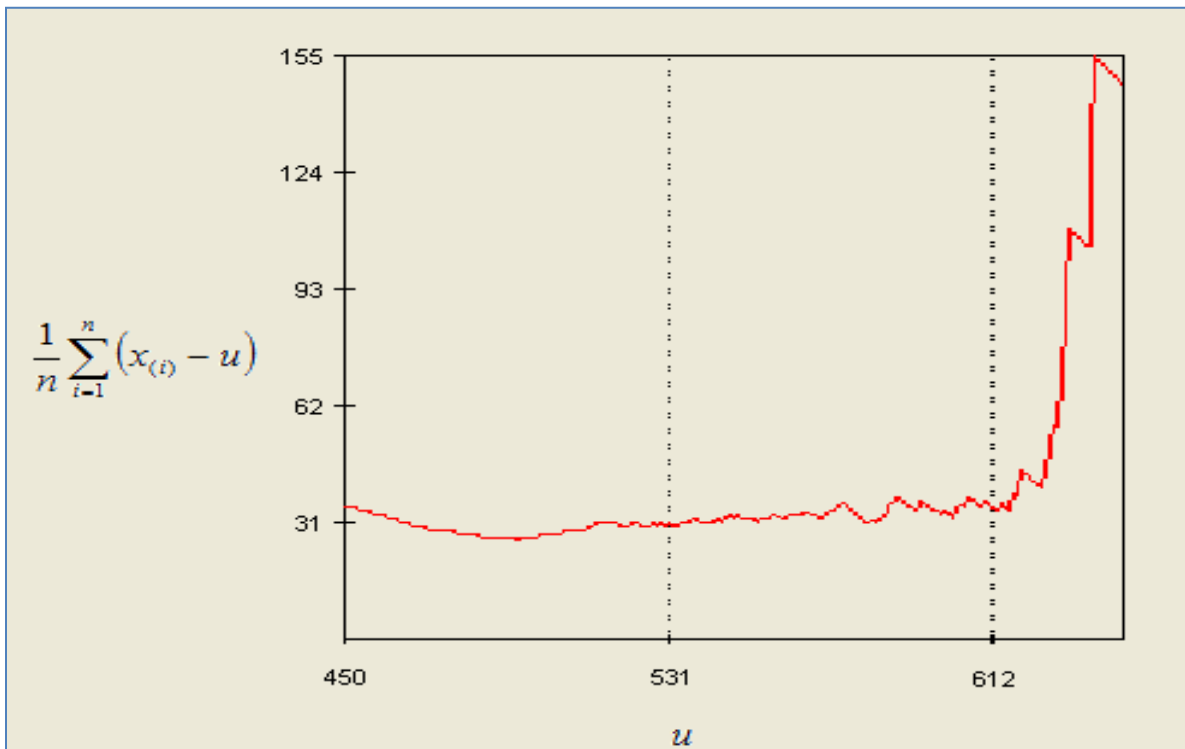


Figura 4.18. Gráfica de umbrales contra excedencias medias (registro de la autopista A64).

Observando la gráfica de umbrales del registro de WIM de A64, se puede visualizar que la zona donde la línea es semirrecta y horizontal tiene como valores de umbral entre 500 y 550kN aproximadamente.

Por criterio, se ha asignado un umbral de 512 kN. También se ha indicado la fracción de año que representa el archivo de A64, para este caso es un sexto de año (por ser dos meses).

Finalmente DIP calculó los valores auxiliares de POT y los parámetros correspondientes. Además, generó la gráfica de valores de pesos máximos esperados contra periodos de retorno en escala log-normal. También muestra los resultados de manera numérica dentro de la tabla ubicada en la parte superior (Figura 4.19).

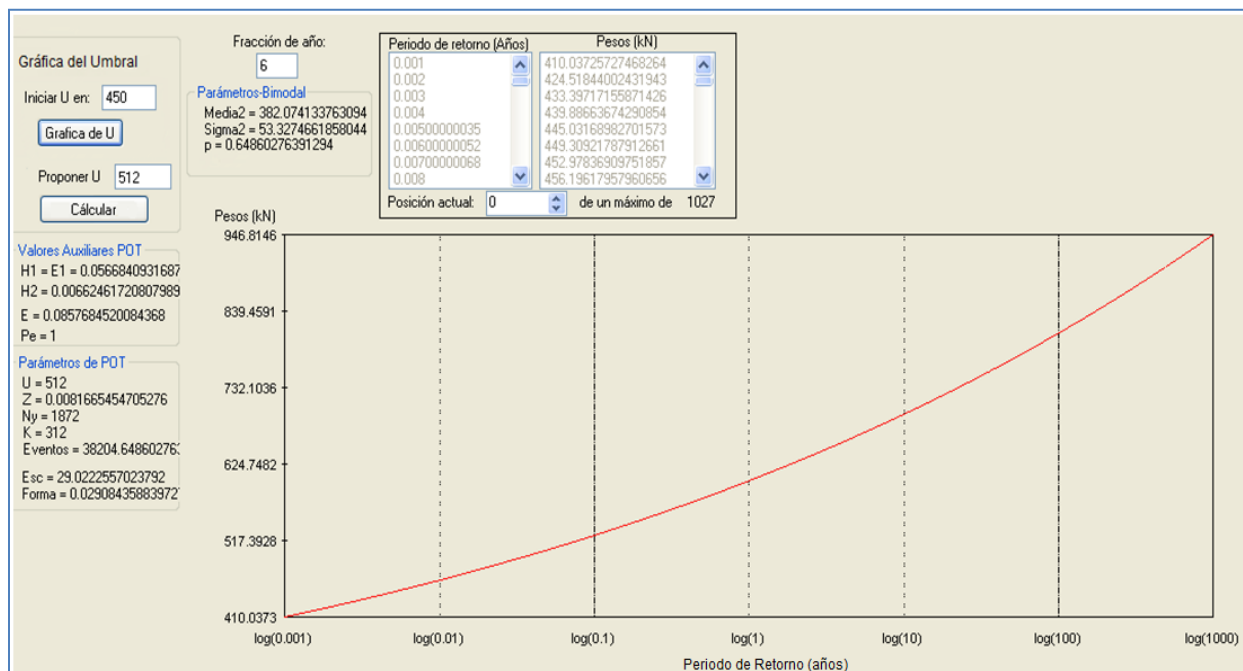


Figura 4.19. Gráfica de POT de los registros de WIM (autopista A64).

Los valores de los parámetros de POT calculados para el escenario de tráfico real de la autopista A64 se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Resultados del Método de POT con los registros de WIM de la autopista A64 y su comparación.

| Parámetro | Valor obtenido con DIP | Valor obtenido con R (Arroyo M., 2009) | % de Diferencia |
|---------------------|------------------------|--|-----------------|
| Escala (σ) | 29.022 | 31.618 | 8.3% |
| Forma (ξ) | 0.029 | 0.033 | 12% |

Existen diferencias que oscilan entre el 8 y 12%. Estas diferencias no significan errores, pues los métodos de aproximación son diferentes.

Un proceso similar se realizó para el registro de WIM de la autopista A4, considerando para este caso un umbral de 470 (por la forma de la gráfica de umbrales). A diferencia del archivo de WIM A64, el A4 corresponde a 1/12 de año, por contener sólo un mes de registro (Figura 4.20).

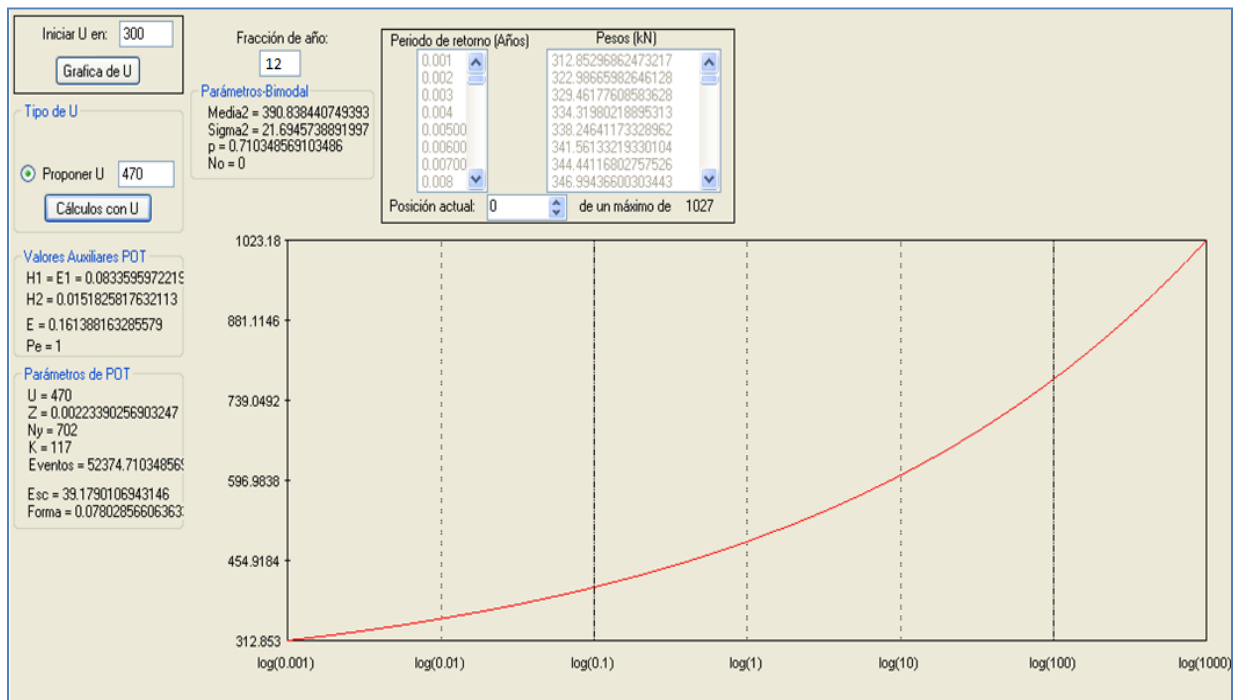


Figura 4.20. Gráfica de POT de los registros de WIM (autopista A4).

Los valores de los parámetros de POT calculados para el escenario de tráfico real de la autopista A4 se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Resultados del Método de POT con los registros de WIM de la autopista A4 y su comparación.

| Parámetro | Valor obtenido con DIP | Valor obtenido con R (Arroyo M., 2009) |
|---------------------|------------------------|--|
| Escala (σ) | 39.18 | 36.55 |
| Forma (ξ) | 0.10 | 0.15 |

También existen algunas diferencia, sin embargo, la aproximación es muy similar.

4.3.2. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE VALORES EXTREMOS GENERALIZADOS (GEV).

La siguiente opción de los métodos de valores extremos es el método de GEV (Figura 4.21). De igual forma, el algoritmo que sustenta este proceso y con el cual se genera la gráfica correspondiente se basa en la teoría del subcapítulo 2.3.2.

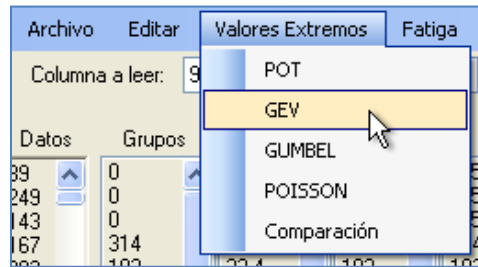


Figura 4.21. Inicialización del módulo de valores extremos, Método de GEV.

Al inicializar el módulo de GEV, el programa pide que se defina la columna donde se tiene registradas las fechas y la columna donde se tiene el peso bruto de cada vehículo (Figura 4.22). Por lo general, los archivos de WIM traen la fecha en la columna 3 y los pesos en la columna 9.

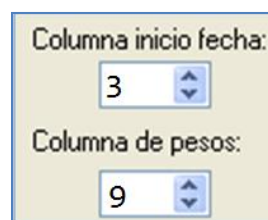


Figura 4.22. Ubicación de las columnas de fechas y pesos.

Establecido lo anterior, se busca el archivo de WIM que se analizará. El primer caso es el A64 W35 PL2a7.txt (Figura 4.24). Antes de realizar el proceso, el programa DIP pide la ubicación de la carpeta donde se guardan todos los archivos generados (Figura 4.23).

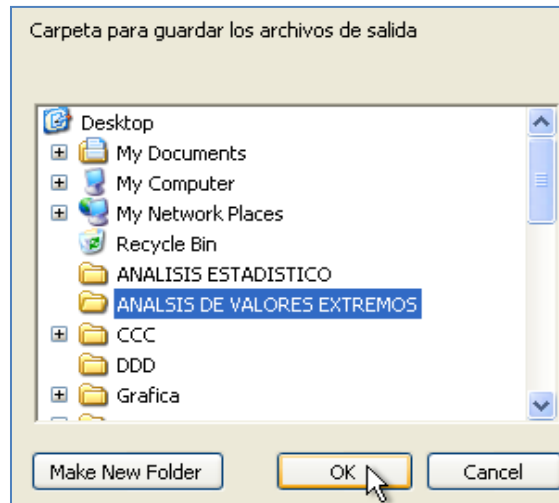


Figura 4.23. Carpeta de almacenamiento de datos generados durante el análisis de GEV.

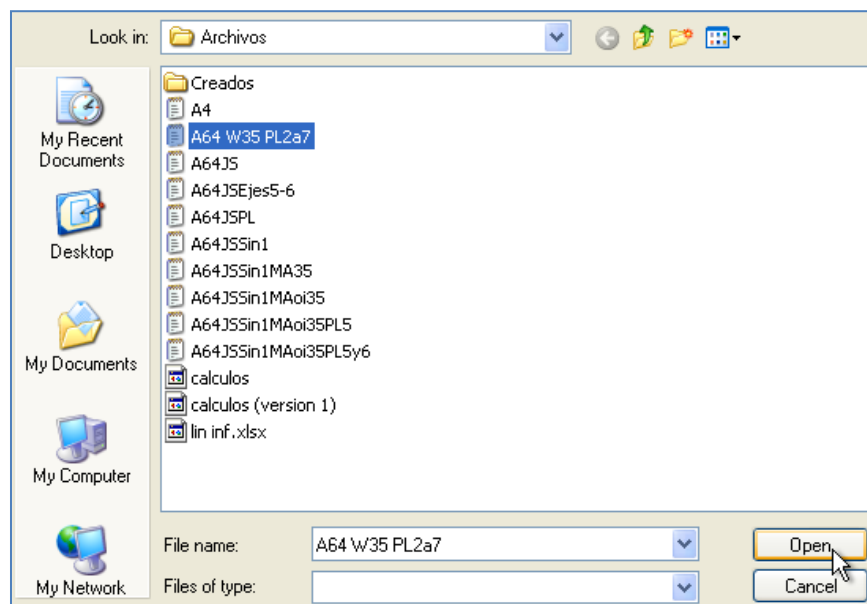


Figura 4.24. Selección del archivo para el análisis de GEV.

Al leer el archivo de WIM, el programa encuentra los valores de pesos máximos por día y su fecha correspondiente, además de imprimirlos en un cuadro de texto. Dentro de este cuadro, es posible eliminar los valores de cargas que no sean representativos, como aquellos de los días festivos o fines de semana (Figura 4.25).

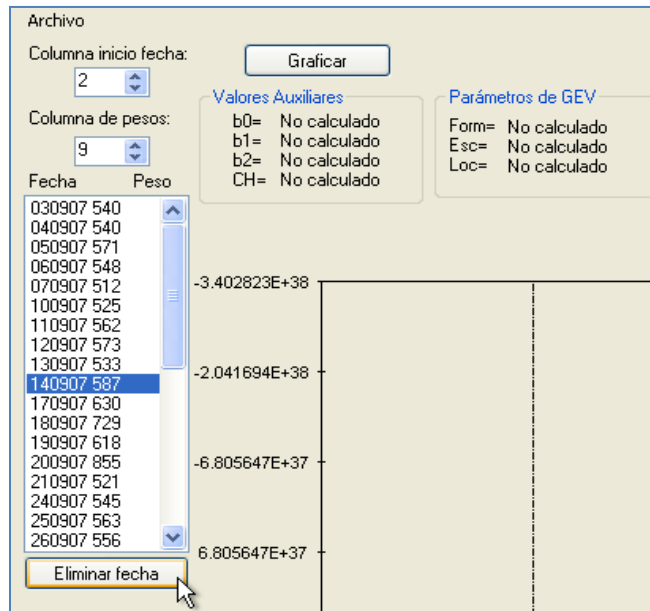


Figura 4.25. Eliminación de días no hábiles del registro A64.

Establecido lo anterior, el programa DIP realiza el cálculo correspondiente. En la pantalla se pueden visualizar los parámetros calculados, las tablas de periodo de retorno contra valores máximos de cargas, así como su gráfica (Figura 4.26).

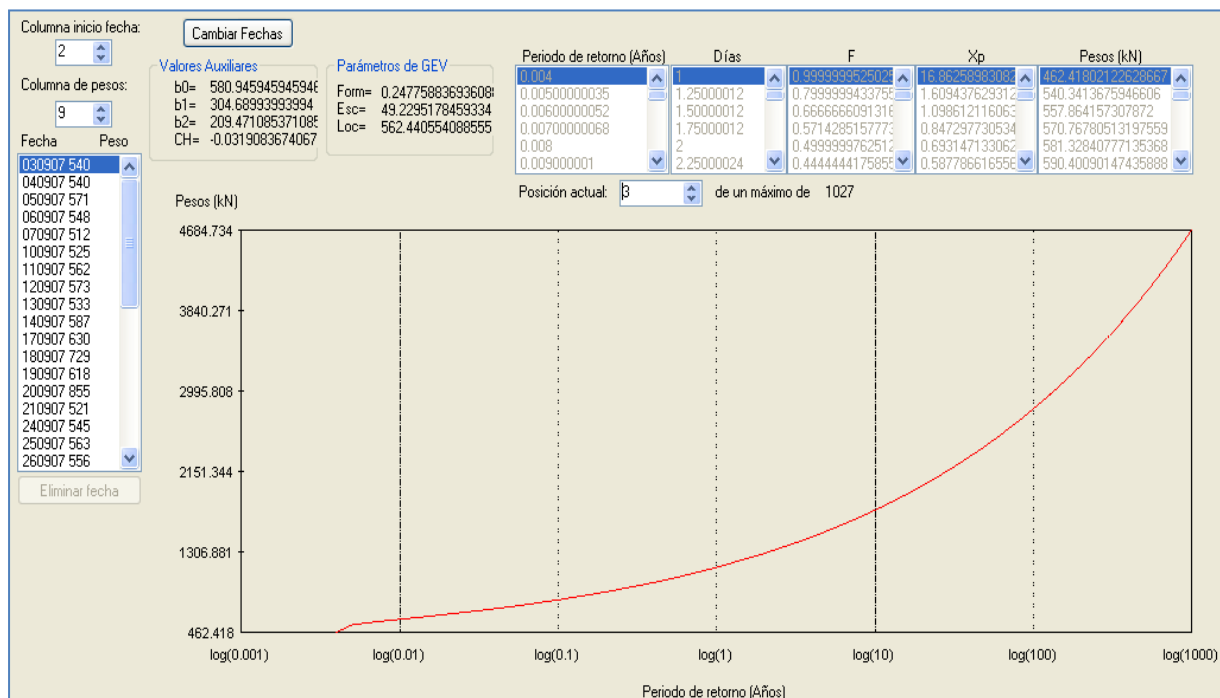


Figura 4.26. Gráfica de GEV de los registros de WIM (autopista A64).

La comparación de los resultados que generó el programa DIP contra los obtenidos en el trabajo de Arroyo (2009) se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Resultados del Método de GEV con los registros de WIM de la autopista A64 y su comparación.

| Parámetro | Valor obtenido con DIP | Valor obtenido con R (Arroyo M., 2009) | % de Diferencia |
|------------------------|------------------------|--|-----------------|
| Escala (σ) | 49.23 | 47.083 | 5% |
| Forma (ξ) | 0.247 | 0.225 | 9% |
| Localización (μ) | 562.44 | 553.87 | 2% |

Existen diferencias que oscilan entre el 2 y 9%, y la razón de esto es que se utilizaron métodos de aproximación distintos, sin embargo los resultados son similares.

Nuevamente se realizó el mismo proceso para el registro de la autopista A4. El programa DIP generó los resultados y la gráfica de la Figura 4.27.

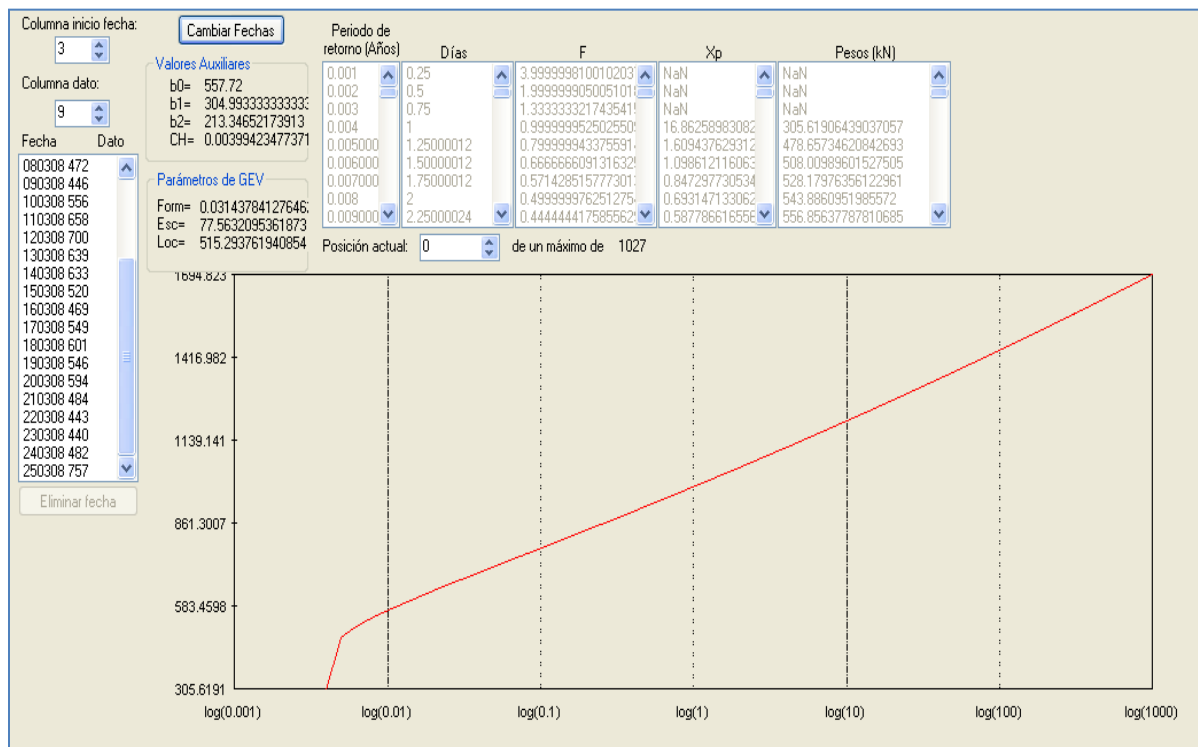


Figura 4.27. Gráfica de GEV de los registros de WIM (autopista A4).

La comparación de los resultados de DIP contra los obtenidos en el trabajo de Arroyo (2009) se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Resultados del Método de GEV con los registros de WIM de la autopista A4 y su comparación.

| Parámetro | Valor obtenido con DIP | Valor obtenido con R (Arroyo M., 2009) |
|------------------------|------------------------|--|
| Escala (σ) | 77.56 | 67.75 |
| Forma (ξ) | 0.13 | 0.12 |
| Localización (μ) | 515.29 | 562.15 |

También existen algunas diferencia, sin embargo, la aproximación es muy similar.

4.3.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GUMBEL ASINTÓTICO

El método de Gumbel es uno de los métodos que depende de los resultados obtenidos en el análisis estadístico, por lo tanto, las diferencias que pudieran existir con respecto al trabajo de comparación de Arroyo (2009) estarían reflejadas en el análisis estadístico precedente.

Este método tiene un algoritmo basado en la teoría del subcapítulo 2.3.3. De igual forma, se elige la opción de Gumbel en la pestaña de valores extremos para empezar el análisis (Figura 4.28).

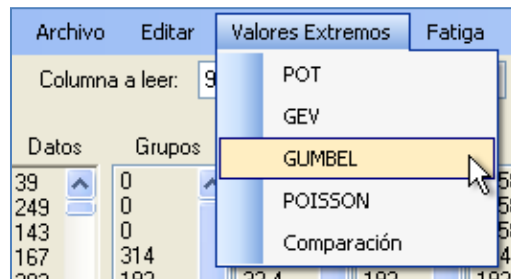


Figura 4.28. Inicialización del módulo de valores extremos, Método de Gumbel.

Para este método, los datos de inicio son obtenidos de la distribución bimodal, por lo que el análisis es realizado directamente al oprimir el botón de “Graficar”, calculando así los parámetros y los valores auxiliares correspondientes (Figura 4.29).

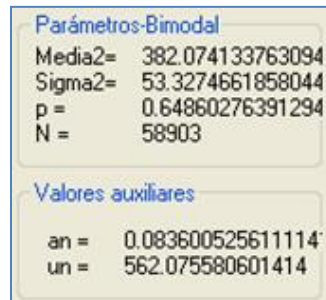


Figura 4.29. Parámetros del método de Gumbel (autopista A64).

Los resultados son vistos en la gráfica de pesos máximos esperados (en kN) contra periodos de retorno (en años), en escala log-normal, y por medio de tablas ubicadas en parte superior (Figura 4.30).

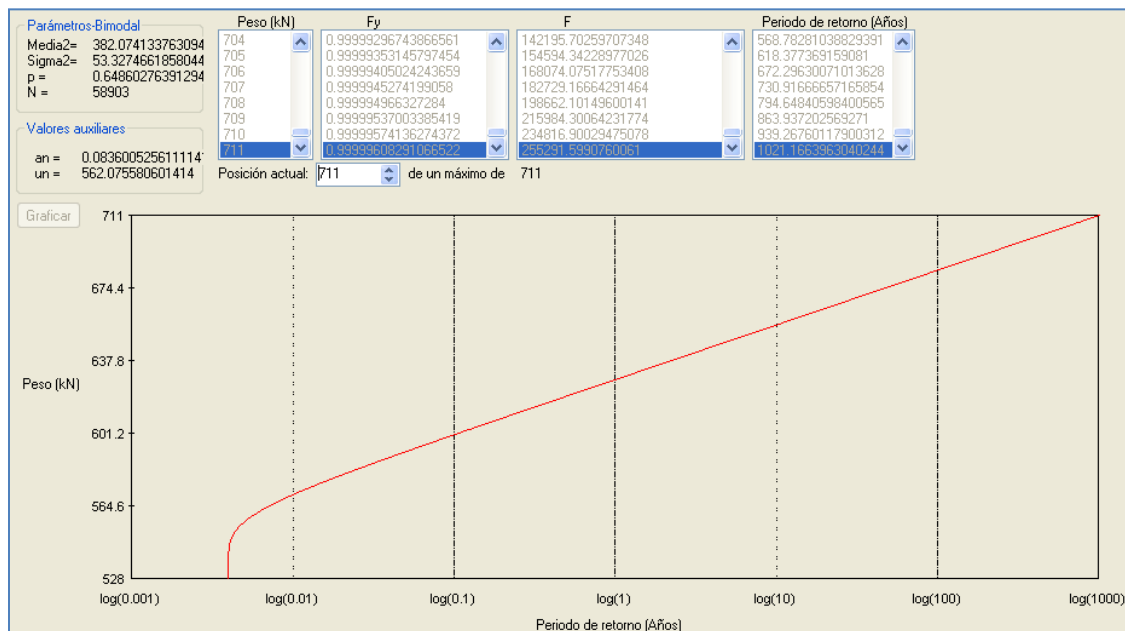


Figura 4.30. Gráfica del método de Gumbel de los registros de WIM (autopista A64).

El algoritmo de este método es bastante sencillo, por lo que los resultados deberían ser iguales, sin embargo, como se ha mencionado, las diferencias entre los resultados obtenidos

radica en lo que se obtuvo dentro del análisis estadístico. También se ha generado la gráfica correspondiente del registro de WIM de la autopista A4, la cual se muestra en la Figura 4.31.

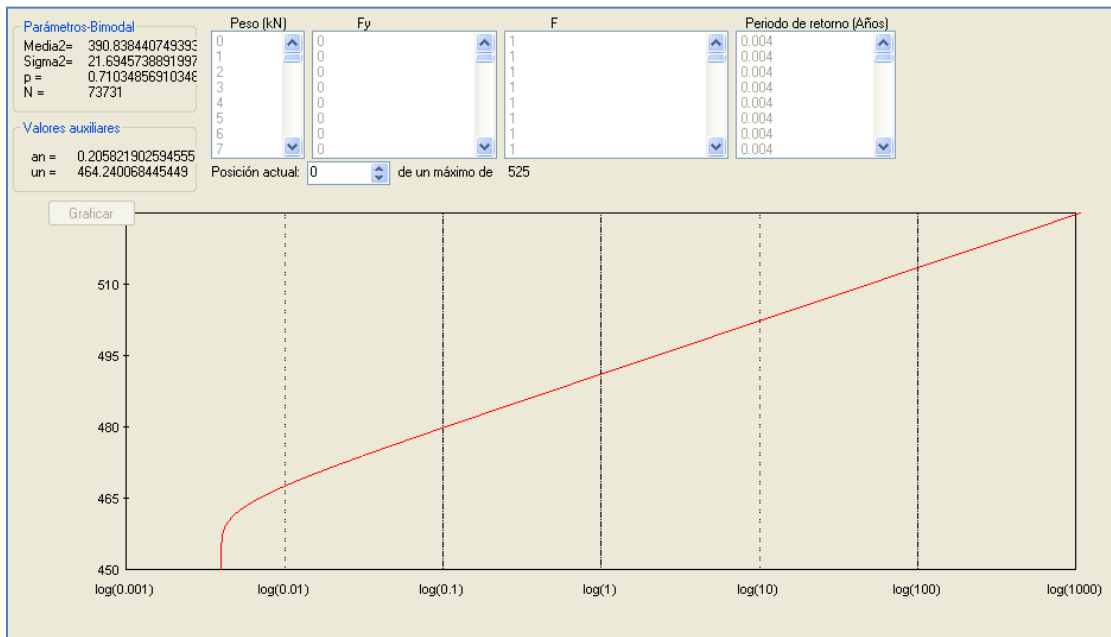


Figura 4.31. Gráfica del método de Gumbel de los registros de WIM (autopista A4).

4.3.4. APLICACIÓN DEL PROCESO DE POISSON SUAIVZADO

Dentro de la misma opción de valores extremos se encuentra el Proceso de Poisson (Figura 4.32). Al igual que el método de Gumbel, el Thinned Poisson Process depende de los resultados de la distribución bimodal (ver la teoría del subcapítulo 2.3.4), por lo que el análisis fue de manera directa. En su interfaz gráfico (Figura 4.33), el programa DIP muestra como resultado la gráfica de pesos máximos esperados (en kN) contra periodos de retorno (en años).

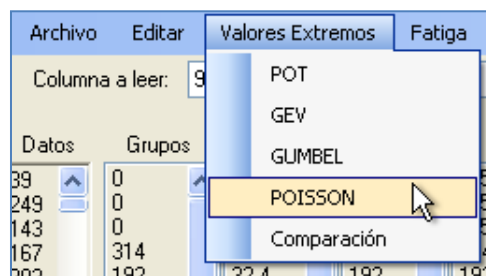


Figura 4.32. Inicialización del módulo de valores extremos, Proceso de Poisson.

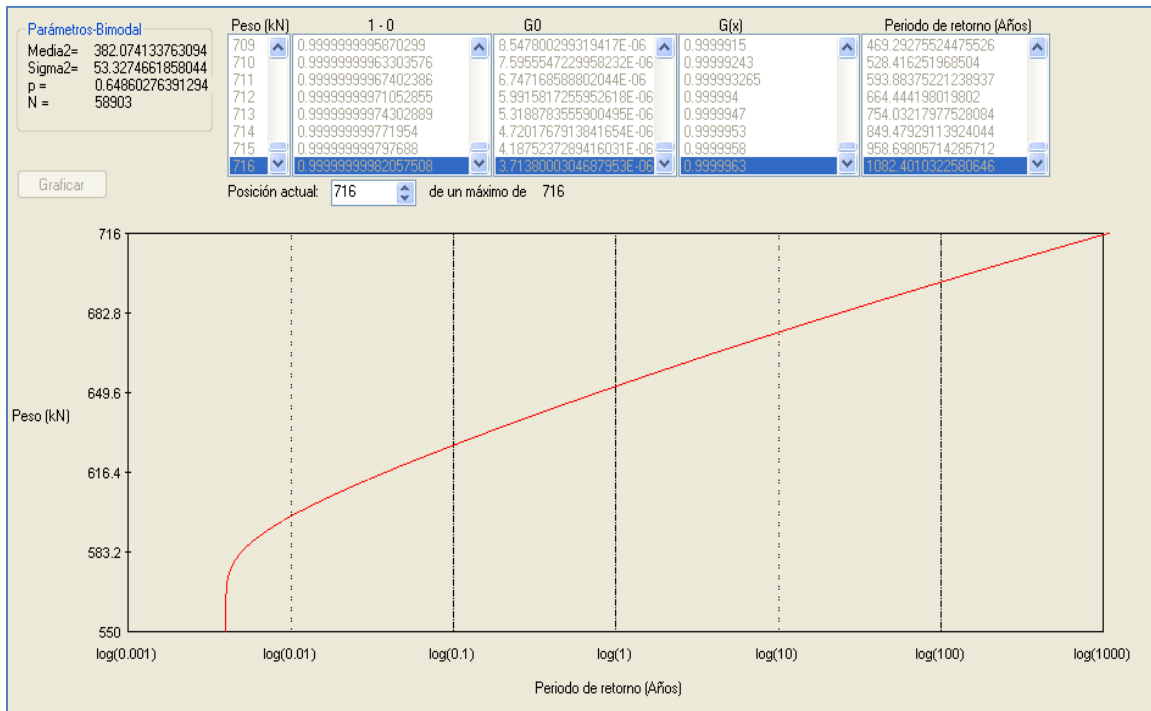


Figura 4.33. Gráfica del proceso de Poisson de los registros de WIM (autopista A64).

El mismo proceso se ha aplicado al archivo de los registros de A4, obteniendo lo mostrado en la Figura 4.34.

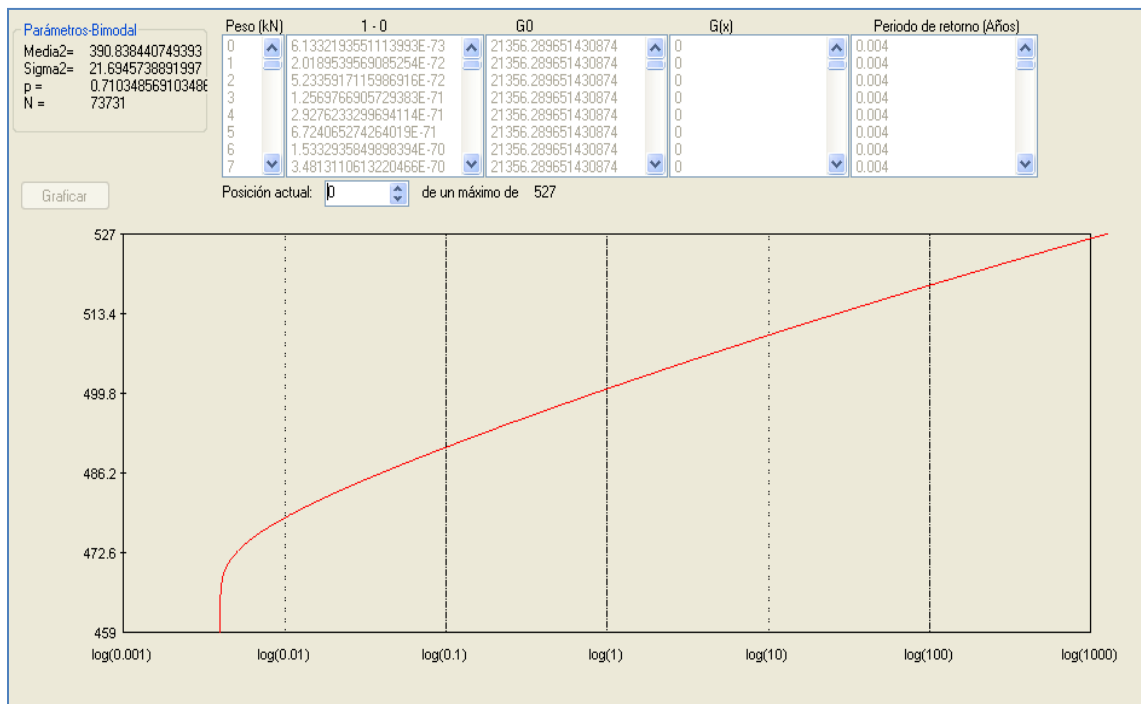


Figura 4.34. Gráfica del proceso de Poisson de los registros de WIM (autopista A4).

4.3.5. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE VALORES EXTREMOS

Finalmente DIP muestra como quinta opción la comparación de los métodos de valores extremos (Figura 4.35). Ésta puede ser aplicada directamente para realizar el análisis de los cuatro métodos sin necesidad de hacer cada uno en su módulo correspondiente.

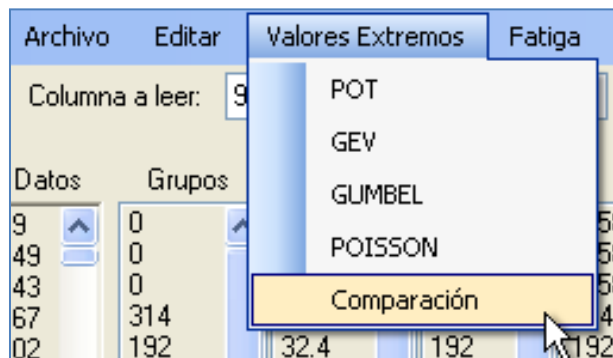


Figura 4.35. Inicialización del módulo de valores extremos, comparación de los métodos.

En el módulo de comparación se observa el menú y los resultados de cada método en una pestaña independiente.

De manera gráfica, se visualizan los resultados de pesos máximos esperados (en kN) contra periodos de retorno (en años) en escala log-normal.

En la Figura 4.36 se muestra la comparación de los resultados obtenidos por cada método de valores extremos para los registros de la autopista A64.

De igual forma, En la Figura 4.37 se muestra la comparación de los resultados obtenidos por cada método de valores extremos para los registros de la autopista A4.

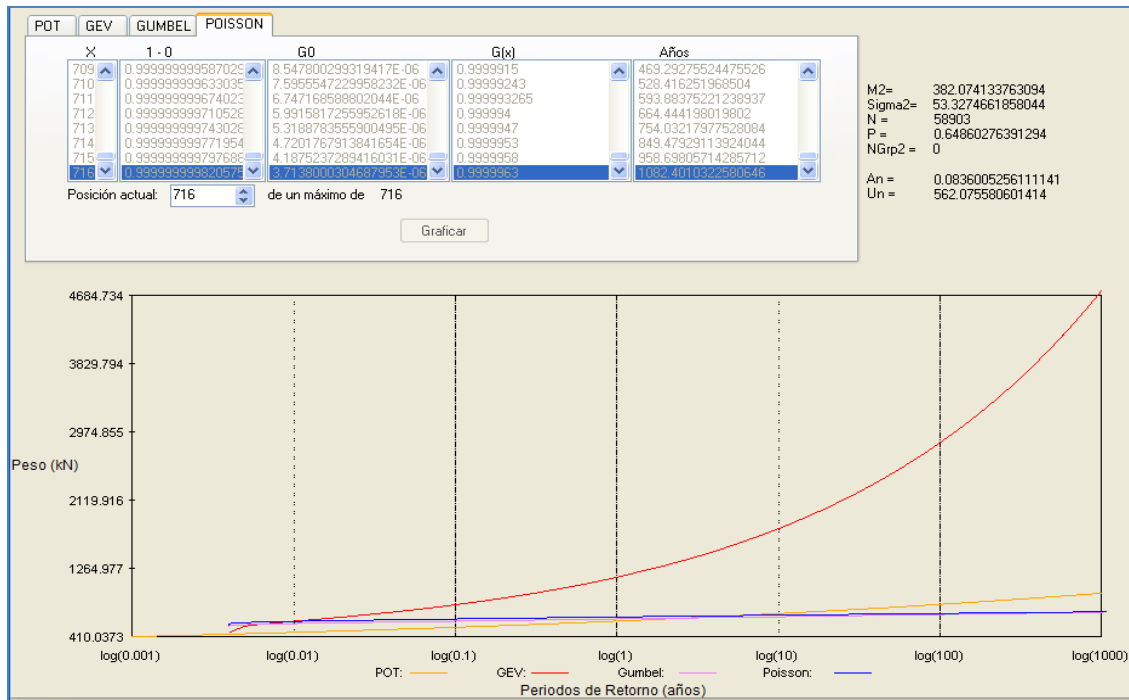


Figura 4.36. Comparación de las gráficas de valores extremos de cargas vehiculares, obtenidas por cada método (autopista A64).

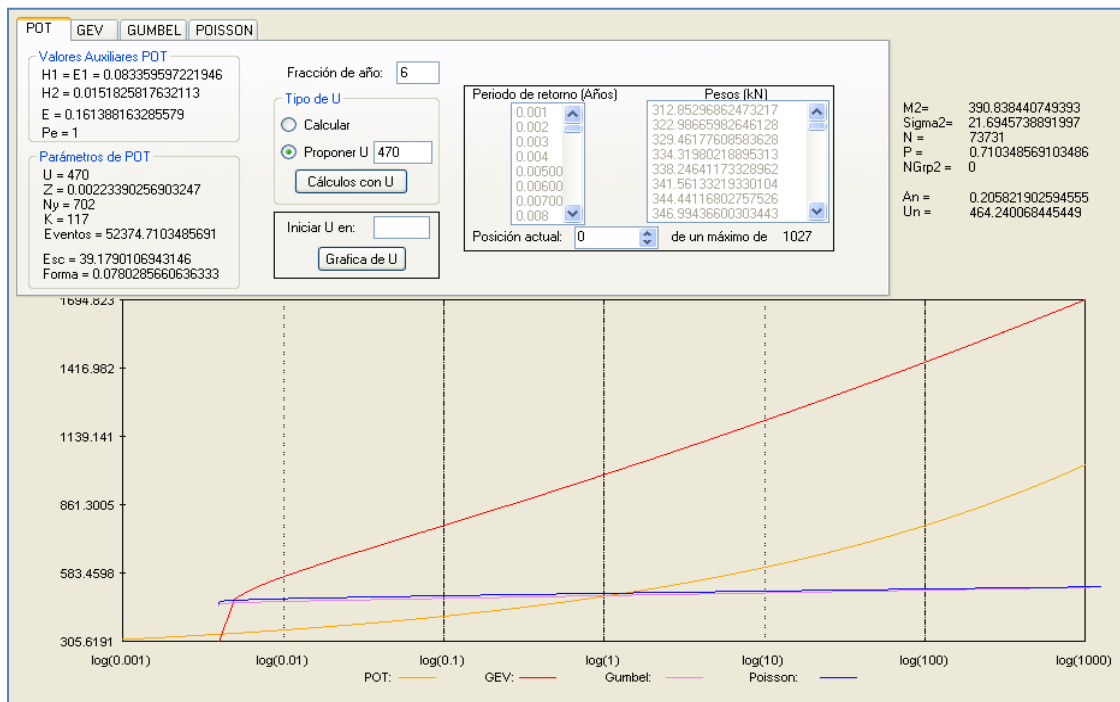


Figura 4.37. Comparación de las gráficas de valores extremos de cargas vehiculares, obtenidas por cada método (autopista A4).

4.4. ANÁLISIS DE FATIGA EN PUENTES CARRETEROS DE ACERO CON EL PROGRAMA DIP

El programa DIP tiene la opción de realizar el análisis de fatiga para puentes carreteros de acero que tengan de uno a tres claros (Figura 4.38). A continuación se muestra el análisis de tres puentes de Francia: el puente Auxerre (Figuras 4.42 y 4.43), el puente Kervitous (Figuras 4.44 y 4.45) y el puente Layrac (Figuras 4.46 y 4.47), considerando para todos los casos un registro de WIM de la autopista A6 obtenido en el año de 1986, el cual se ha seleccionado para poder realizar la comparación de los resultados con el trabajo precedente de Arroyo (2009).

El algoritmo de DIP que sustenta este proceso se basa en la teoría del subcapítulo 2.4. El módulo de fatiga está ubicado en la parte superior del menú principal de DIP (Figura 4.38).

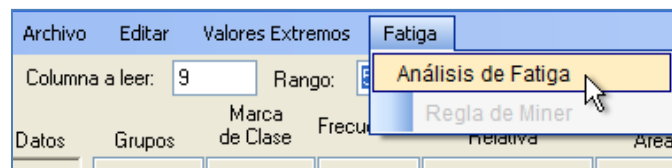


Figura 4.38. Inicialización del módulo de Análisis de Fatiga.

Al seleccionar esta opción se abre el cuadro de menú para el análisis de fatiga. Como se ha mencionado en el subcapítulo 2.4, este proceso se basa en la teoría de líneas de influencia, en el método de conteo de ciclos de Rainflow y en la regla de Miner. Cabe destacar que el programa DIP puede realizar el análisis de fatiga de cualquier configuración de puentes de acero, pero para el caso de un puente con más de tres claros será necesario ingresar la línea de influencia unitaria dentro de la carpeta donde se guardan los archivos generados. El archivo de la línea de influencia llevará el nombre de Linfluencia.txt. También existe la posibilidad de realizar este análisis para superficies de influencia, pero la superficie deberá estar discretizada como una composición de varias líneas de influencia.

El análisis comienza al abrir el archivo de registro de tráfico (Figura 4.39), el cual contiene la información de pesaje en movimiento por cada eje vehicular. Este archivo debe tener el formato adecuado (mencionado en el subcapítulo 2.1.6) para que DIP pueda procesarlo, de lo contrario será necesario utilizar el módulo de procesamiento de datos para corregir dicho formato.

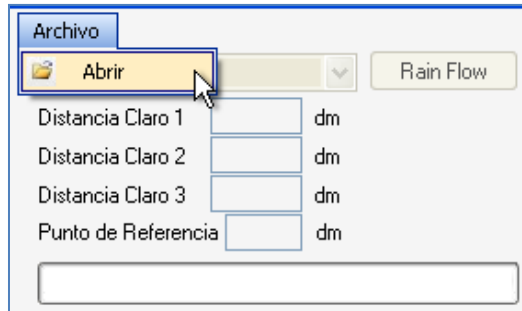


Figura 4.39. Panel inicial del módulo de Análisis de Fatiga.

Como en todos los procesos, antes de asignar el archivo que se analizará, DIP pide la ruta donde será almacenada la información generada durante el proceso (Figura 4.40).

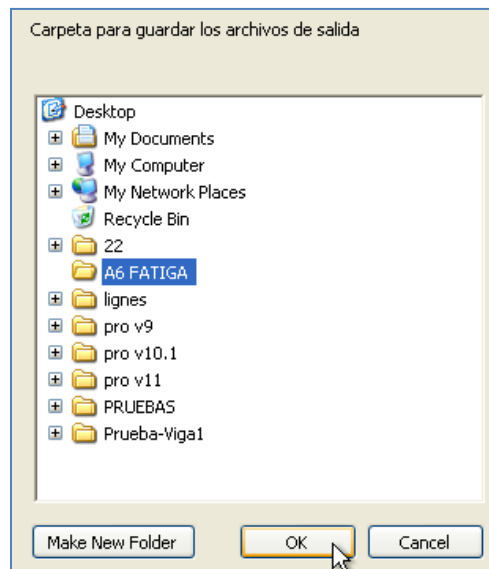


Figura 4.40. Carpeta de almacenamiento de datos generados en el análisis de fatiga.

En seguida, se busca el archivo del tráfico registrado en formato de texto. Como ejemplo de aplicación, se ha utilizado es el archivo A6 1986.txt (Figura 4.41). A la par, este archivo fue procesado también con el programa CASTOR para fines de comparación de resultados.

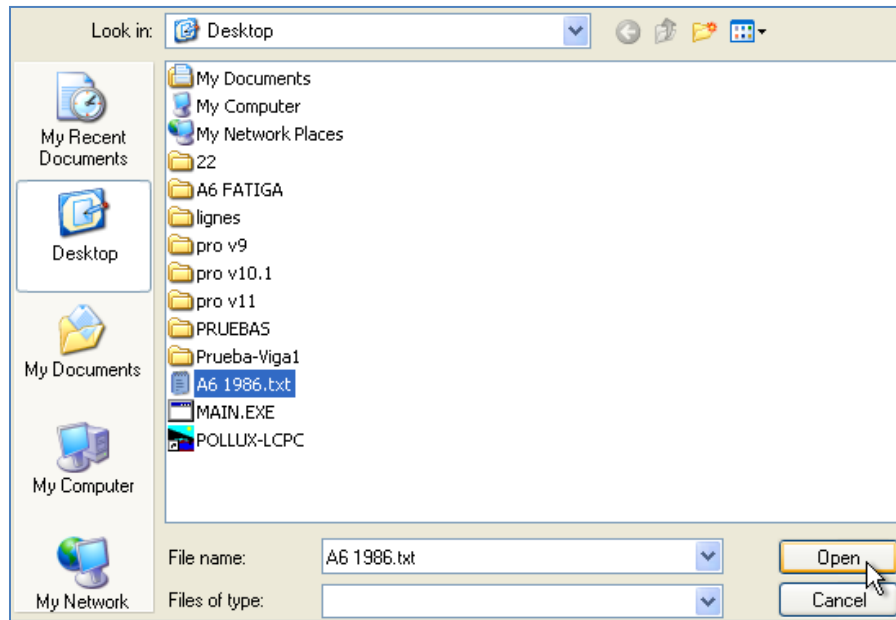


Figura 4.41. Selección del archivo para el análisis de fatiga.

En seguida se asigna el número de claros que tendrá el puente carretero de acero. Como ejemplo ilustrativo, en los siguientes párrafos se describe el proceso que se hizo para el puente Kervitous (Figuras 4.48). Sin embargo, el análisis se realizó para todos los puentes de Francia mencionados.

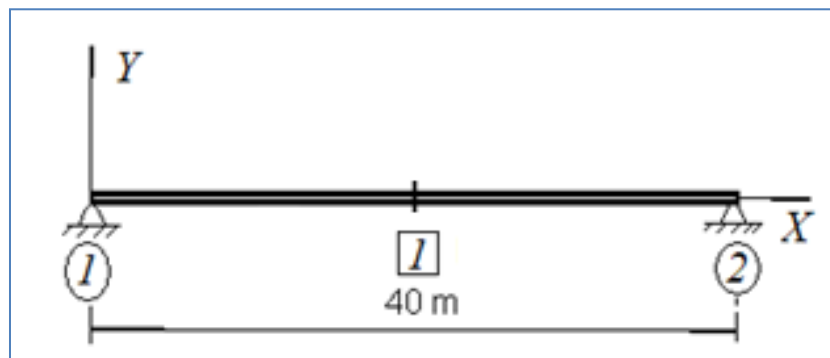


Figura 4.42. Modelo del Puente Auxerre.

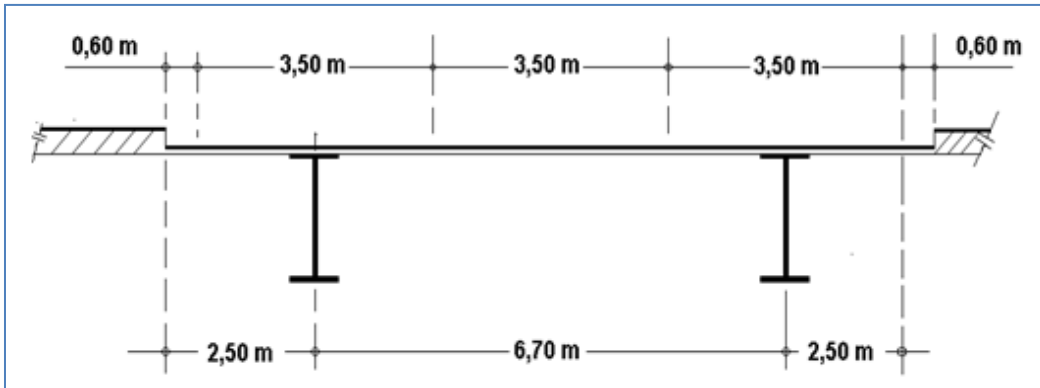


Figura 4.43. Sección del Puente Auxerre.

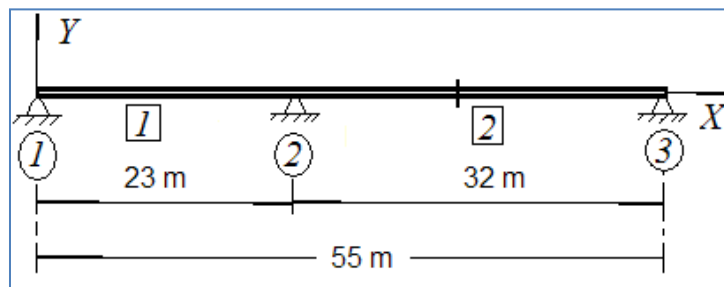


Figura 4.44. Modelo del Puente Kervitovs.

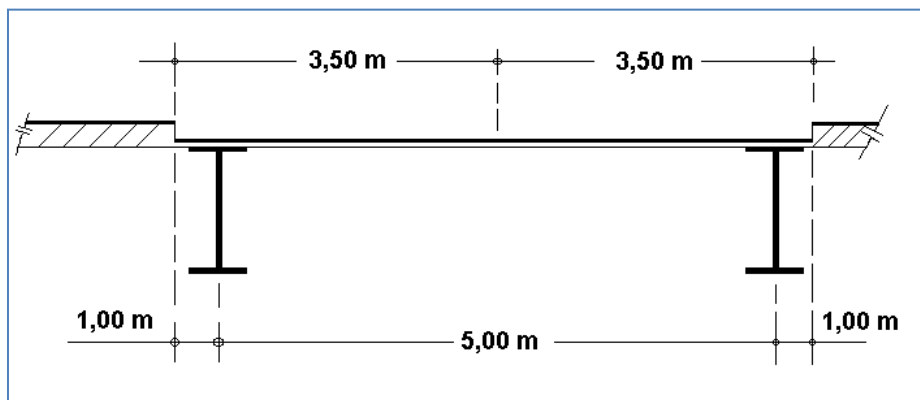


Figura 4.45. Sección del Puente Kervitovs.

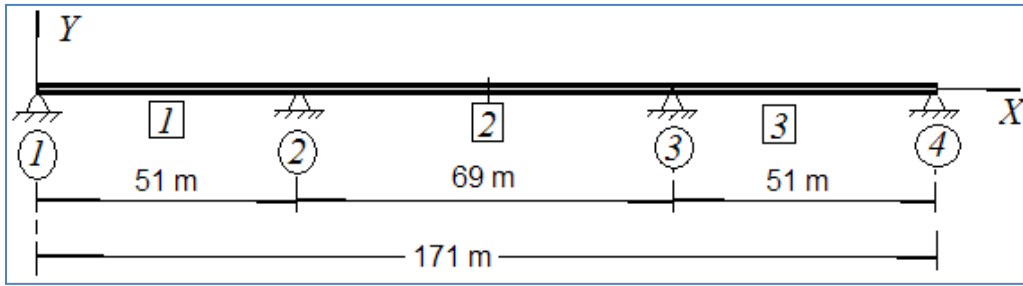


Figura 4.46. Modelo del Puente Layrac.

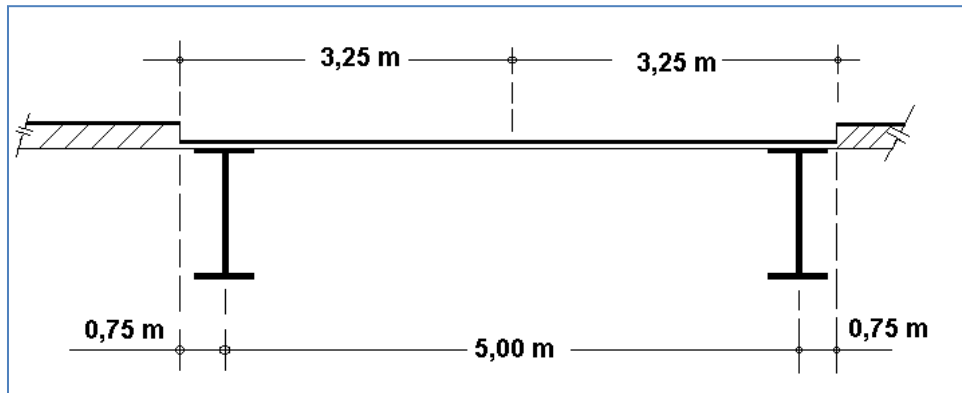


Figura 4.47. Sección del Puente Layrac.

Tabla 4.7. Características geométricas principales de los puentes considerados para el análisis de fatiga.

| Puente | No. De Claros | Dimensión (m) | | | Módulo de sección ($S = I/c$) (m^3) |
|-----------|---------------|---------------|---------|---------|---|
| | | Claro 1 | Claro 2 | Claro 3 | |
| Auxerre | 1 | 40 | NA | NA | 109.80 |
| Kervitous | 2 | 23 | 32 | NA | 59.00 |
| Layrac | 3 | 51 | 69 | 51 | 87.40 |

Archivo

Num de claros: Rain Flow

Dist. Claro 1 1/m3

Dist. Claro 2 1/m3

Dist. Claro 3 1/m3

Pto Referencia 1/m3

Animación

Total de carros: 56404

Carro Inicial Carro Final

Cargar archivo gen

Figura 4.48. Asignación del número de claros para el puente Kervitous.

Como se muestra en la Tabla 4.7, las dimensiones de los dos claros del puente Kervitous son 23 y 32 metros respectivamente. DIP pide las dimensiones en decímetros (dm), ya así han sido registradas y ésta es la unidad estándar que se utiliza en los archivos de WIM. Para el caso de un puente de dos claros, la opción de distancia del claro 3 no se habilita (Figura 4.49), de igual forma para el caso de un claro no se habilitarían los cuadros de distancia 2 y 3.

La sección por analizar debe de establecerse en el recuadro de “Punto de Referencia”, donde se asigna la ubicación en términos de distancia con respecto al primer punto de apoyo del lado izquierdo. En este ejemplo se analizó el centro de claro ubicado entre el segundo y tercer apoyo. Asignadas todas las características geométricas, DIP muestra un esquema gráfico del puente (Figura 4.49).

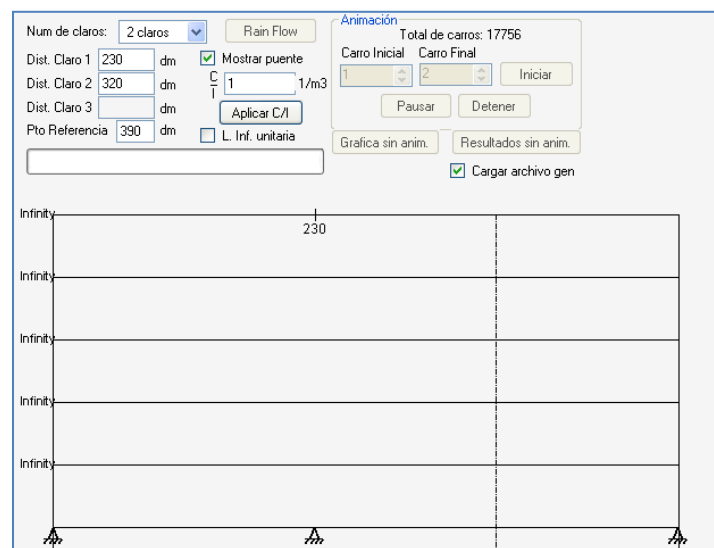


Figura 4.49. Visualización esquemática del puente Kervitous.

El programa calcula la línea de influencia unitaria, con la cual se obtienen los efectos que se producen en el puente ante el fenómeno de fatiga (Figura 4.50). Dicha línea se muestra en unidades de N-m (cuando se trata de momentos) y en unidades de Pascales (cuando se trata de esfuerzos).

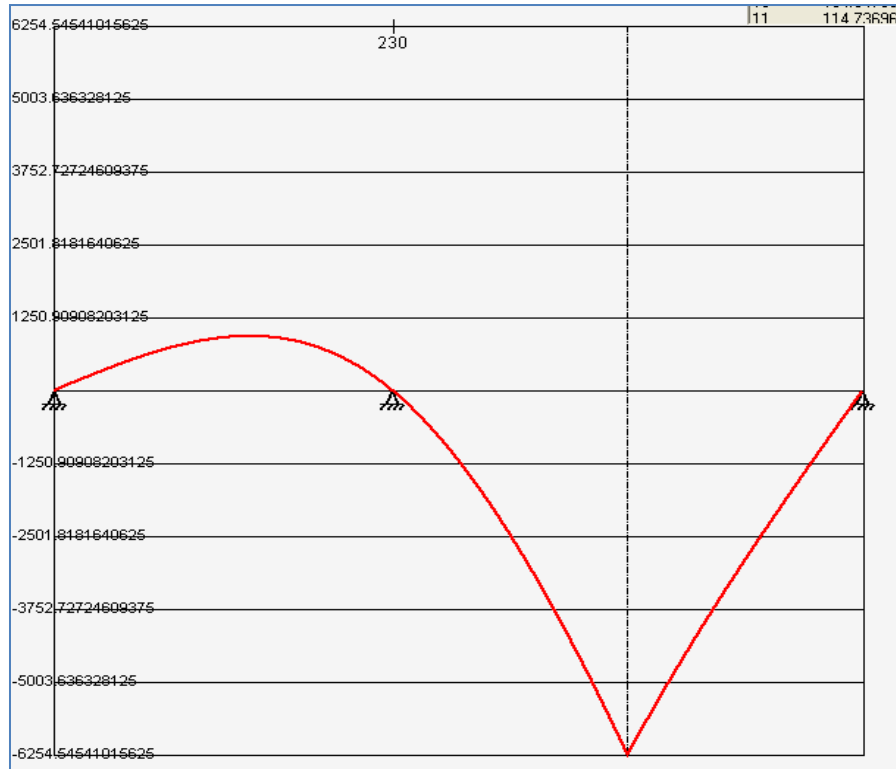


Figura 4.50. Generación de la línea de influencia unitaria del puente Kervitous.

En el proceso, internamente se ha generado un archivo en formato de texto de la línea de influencia unitaria, el cual podrá ser remplazado si se requiere otra configuración. Para analizar un puente con más de tres claros es necesario establecer la línea de influencia en un archivo de texto con las unidades mencionadas (N-m) y con el formato estándar establecido. Cabe mencionar que de analizarse un puente con más de tres claros, las opciones de visualización y simulación gráfica no podrán ser utilizadas.

En seguida debe de asignarse en el cuadro con la etiqueta “C/I” el valor correspondiente a la inversa del módulo de sección S (Figura 4.51). En la Tabla 4.7 se observa que el puente Kervitous tiene un $S = 59.00 \text{ m}^3$, y su inversa de este valor es 0.0169 1/m^3 .

Num de claros: 2 claros Rain Flow
 Dist. Claro 1: 230 dm Mostrar puente
 Dist. Claro 2: 320 dm C 0.0169 1/m3
 Dist. Claro 3: dm T
 Pto Referencia: 390 dm L. Inf. unitaria

Figura 4.51. Asignación de la inversa del módulo de sección del puente Kervitous.

El programa calcula las líneas de influencia generadas por el paso de las cargas vehiculares, descritas por cada eje. Al oprimir la opción “Resultados sin animación” se obtienen todas las líneas de influencia por cada registro de carga móvil. De igual forma, DIP obtiene los esfuerzos máximos y mínimos, así como su ubicación a lo largo del puente (Figura 4.52).

Animación Total de carros: 17756

Carro Inicial: 1 Carro Final: 5

Cargar archivo gen

| dist | Li | Car | Eje | IDist | I Minimo | IDist | I Maximo | |
|------|-----------|--------------------------|-----|-------|------------|-------|-------------|--|
| 0 | 0 | MIN = Primero Encontrado | | | | | | |
| 1 | 10.45435 | 1 | 11 | 390 | -7504829 | 133 | 1110515.25 | |
| 2 | 20.90751 | 1 | 12 | 390 | -21772540 | 120 | 3417523.5 | |
| 3 | 31.3583 | 1 | 13 | 335 | -27447064 | 182 | 4533220 | |
| 4 | 41.80553 | 1 | 14 | 325 | -31945714 | 183 | 5577829.5 | |
| 5 | 52.24802 | 1 | 15 | 368 | -36930972 | 178 | 6330607 | |
| 6 | 62.68458 | 2 | 11 | 390 | -4862283.5 | 133 | 719488.8125 | |
| 7 | 73.11403 | 2 | 12 | 390 | -12182761 | 120 | 1927660.875 | |
| 8 | 83.53518 | 2 | 13 | 322 | -14840490 | 171 | 2464755 | |
| 9 | 93.94684 | 2 | 14 | 311 | -16921364 | 172 | 2990995.5 | |
| 10 | 104.34783 | 3 | 11 | 390 | -8350444 | 133 | 1235643.75 | |
| 11 | 114.73598 | 3 | 12 | 390 | -121012526 | 116 | 3349921.5 | |

Figura 4.52. Cuadro de información de las líneas de influencia por eje vehicular.

Dentro de la Figura 4.52 se observa el interfaz de DIP para el análisis de fatiga, donde se han impreso dos tablas. En la tabla de la izquierda se observa la línea de influencia unitaria en unidades de Pascales. En la tabla de la derecha se visualizan los resultados de esfuerzos (en Pascales) y su ubicación a lo largo del puente (en decímetros). DIP tiene la opción de animación gráfica para observar la simulación del flujo vehicular. En esta animación se muestra la variación de las líneas de influencia por cada eje. Las líneas de influencia se generan debido a la configuración de las cargas móviles por eje y son visualizadas en intervalos de 5 vehículos. Antes de graficar las líneas, se debe de establece el intervalo de vehículos que se desea visualizar (Figura 4.53).

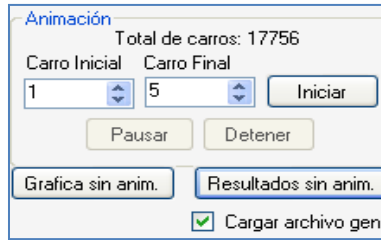


Figura 4.53. Opciones de animación gráfica del flujo vehicular.

Al oprimir el botón “Gráfica sin animación” se observan las líneas de influencia sin hacer la simulación del tráfico vehicular (Figura 4.54).

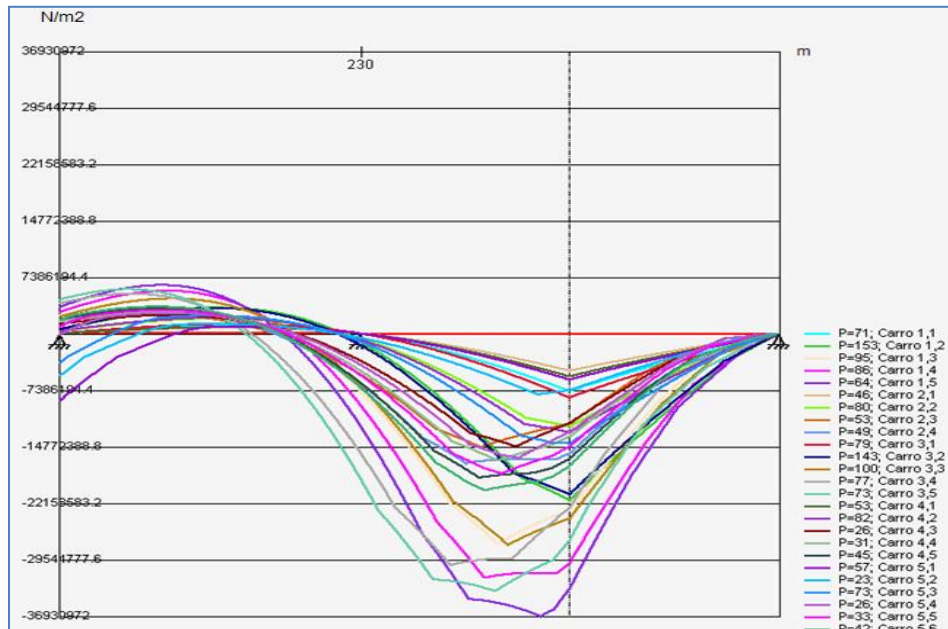


Figura 4.54. Líneas de influencia del flujo vehicular sin animación.

El programa DIP tiene la opción de hacer fluir en forma animada el tráfico vehicular registrado. Como el archivo de WIM contiene millones de cargas por cada eje vehicular, la animación del tráfico fue limitada a un intervalo de 5 vehículos, con el fin de poder apreciar todas las líneas de influencia generas y evitar la saturación de gráficas. Para comenzar con el proceso se oprime el botón “iniciar” y entonces podrá verse el paso de cada vehículo de manera esquemática (Figura 4.55).

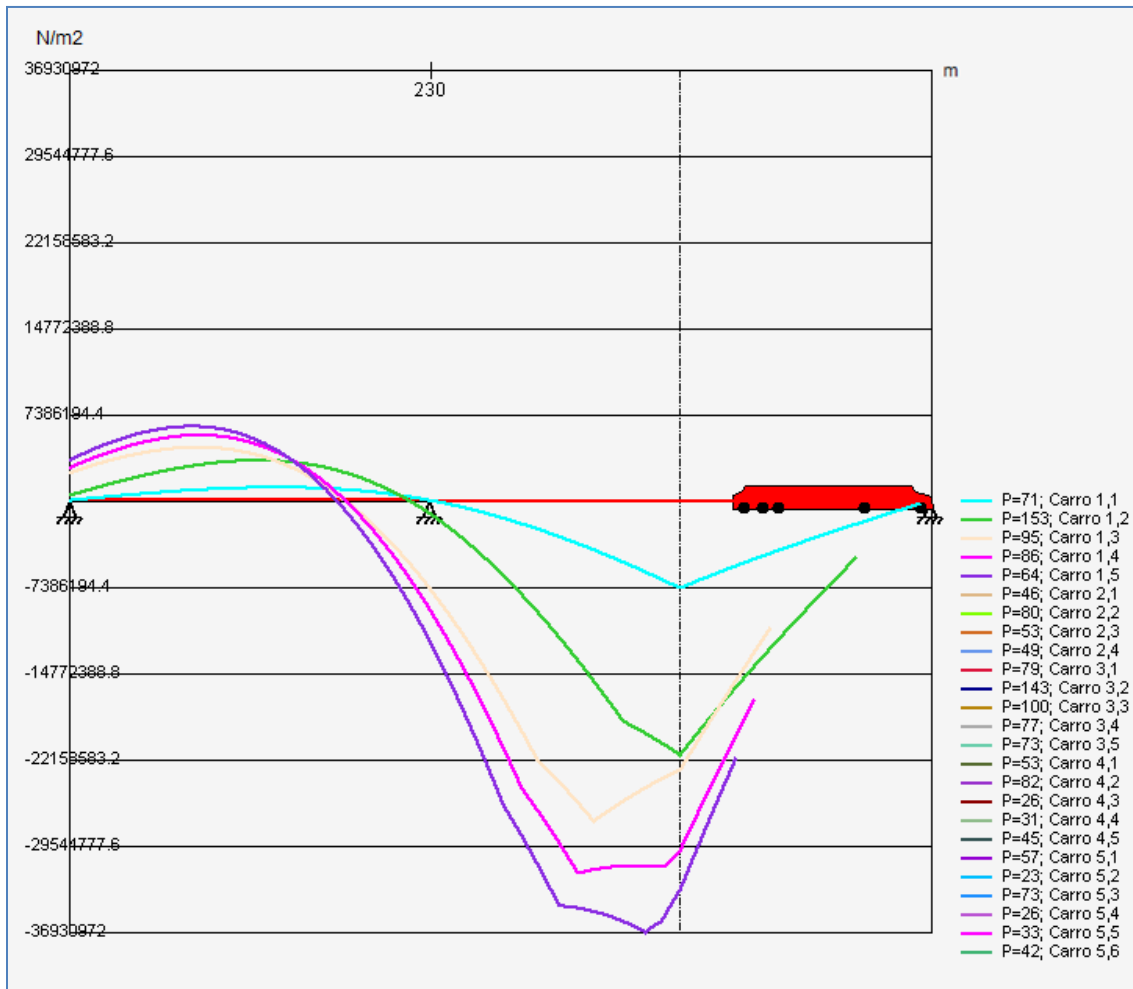


Figura 4.55. Simulación animada del tráfico vehicular registrado (puente Kervitous).

Hasta este paso, se ha realizado el cálculo de las líneas de influencia y de los esfuerzos debido al tráfico vehicular sobre el puente Kervitous. Prosiguiendo con la metodología planteada, el siguiente proceso que se realiza es el conteo de ciclos de esfuerzos con el método de Rainflow, el cual fue programado mediante algoritmos basados en la teoría descrita en el subcapítulo 2.4.2.2. Para inicializar el conteo de ciclos de esfuerzos se oprime el botón de “Rainflow” y automáticamente se realiza el proceso (Figura 4.56).

Archivo

Num de claros: 2 claros

Dist. Claro 1: 230 dm Mostrar puente

Dist. Claro 2: 320 dm $\frac{C}{I}$ 1/m3

Dist. Claro 3: dm

Pto Referencia: 390 dm L. Inf. unitaria

Figura 4.56. Inicialización del conteo de ciclos de esfuerzos con el método de Rainflow.

En seguida, el programa DIP despliega un recuadro donde se observa la gráfica de historia de esfuerzos, la cual se origina de la simulación del paso de los vehículos registrados el archivo A6 1986.txt (Figura 4.57).

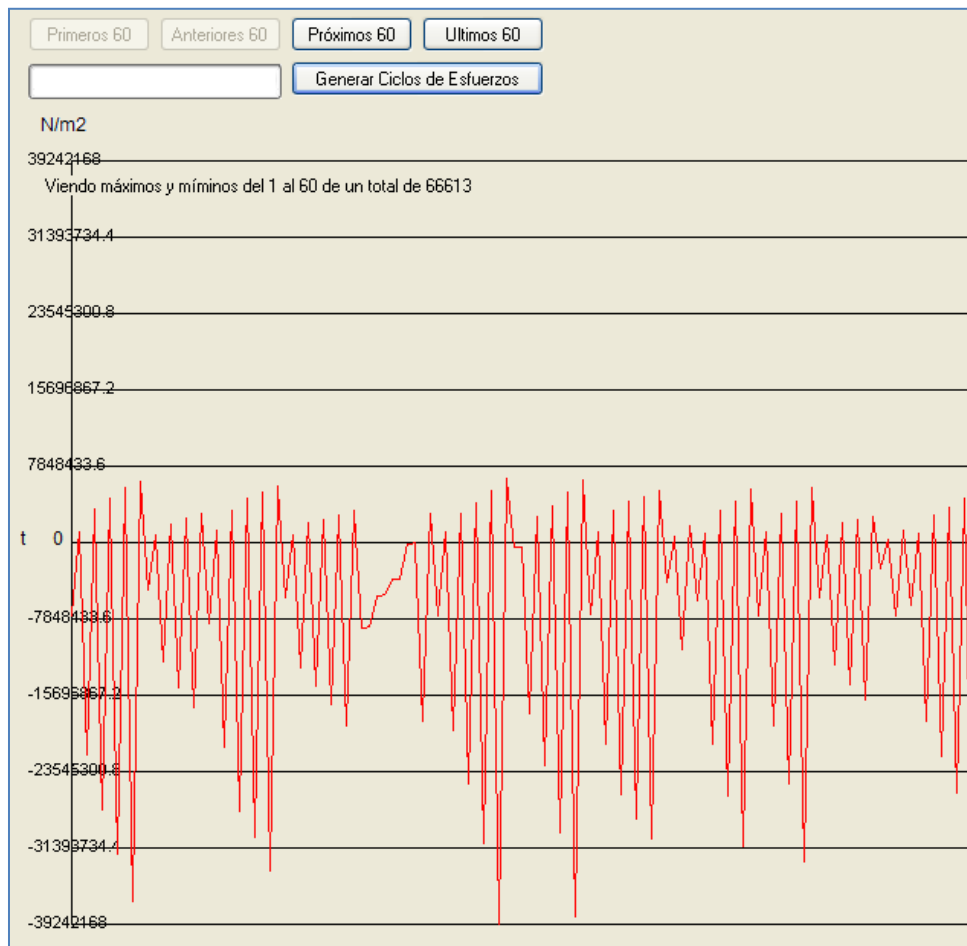


Figura 4.57. Serie de historia de esfuerzos.

Al oprimir el botón de “*Generar ciclos de esfuerzo*”, ubicado dentro del mismo interfaz (Figura 4.57), el algoritmo de Rainflow, programado dentro de DIP, determina la magnitud de los ciclos de esfuerzos, los cuenta y almacena en un archivo llamado EsfuerzosMod.txt., el cual tiene el formato adecuado para ser manipulado en el módulo estadístico, permitiendo generar el histograma de los ciclos de esfuerzos, mejor conocido como *Histograma de Rainflow* (Figura 4.58).

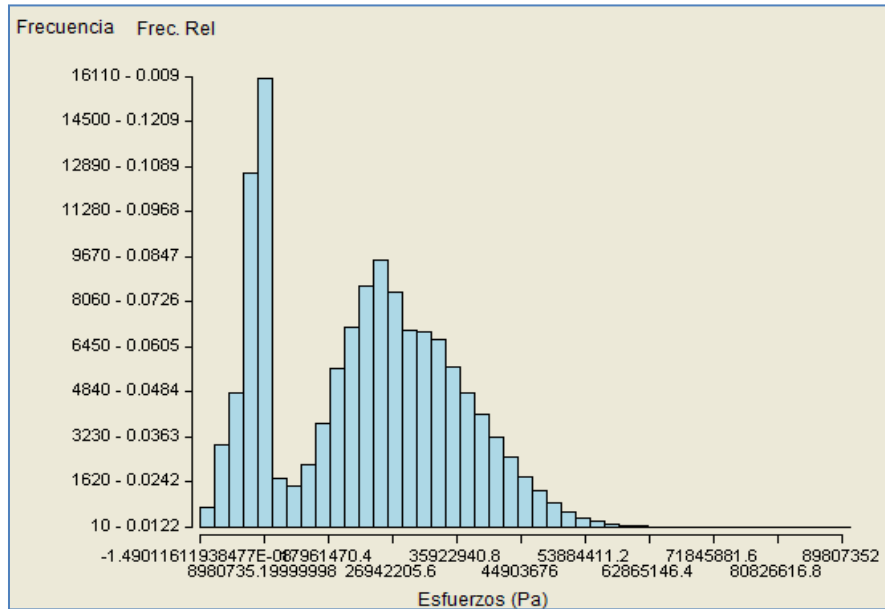


Figura 4.58. Histograma de Rainflow.

Con esto se observa la multifuncionalidad del módulo estadístico, ya que además de realizar el análisis estadístico de cargas, también puede realizar el análisis estadístico del los esfuerzo calculados. Como consecuencia, los métodos de valores extremos también pueden ser aplicados en la estimación de los valores de esfuerzos máximos para ciertos periodos de retorno, sin embargo, este proceso no está dentro de los alcances planteados. Continuando con el análisis de fatiga del puente Kervitous, se realizó la estimación de daño por fatiga mediante la Regla de Miner. El programa DIP integra este proceso en el módulo de fatiga (Figura 4.59).



Figura 4.59. Inicialización de la evaluación de daño acumulado con la Regla de Miner.

Dentro del análisis de daño acumulado, una de las constantes que se pide es la vida actual del puente, expresada en años. También se tiene que asigna la fracción de año que representa el registro de WIM, en este caso, el archivo A6 1986.txt es el registro de 8 días, lo que significa que la fracción de año correspondiente es de $1/31.25$, considerando que un año tiene 250 días (quitando sábados, domingos y días festivos). El valor del dividendo, 31.25, se asigna en el recuadro correspondiente (Figura 4.61).

Para aplicar la Regla de Miner descrita en los subcapítulos 2.4.3 y 2.4.4, es necesario conocer las curvas S-N que describen el comportamiento ante fatiga de los detalles estructurales del puente de acero. El Eurocode sugiere realizar pruebas de laboratorio por cada detalle para obtener las curvas S-N, sin embargo, en este trabajo se tomó la decisión de utilizar las curvas S-N propuestas por el manual AASHTO (Figura 4.60), las cuales se ubican en el capítulo 6, figura C6.6.1.2.5-1 de dicho manual. En la práctica se ha demostrado que el uso de esta gráfica genera resultados aceptables para una estimación aproximada de la vida remanente de un puente.

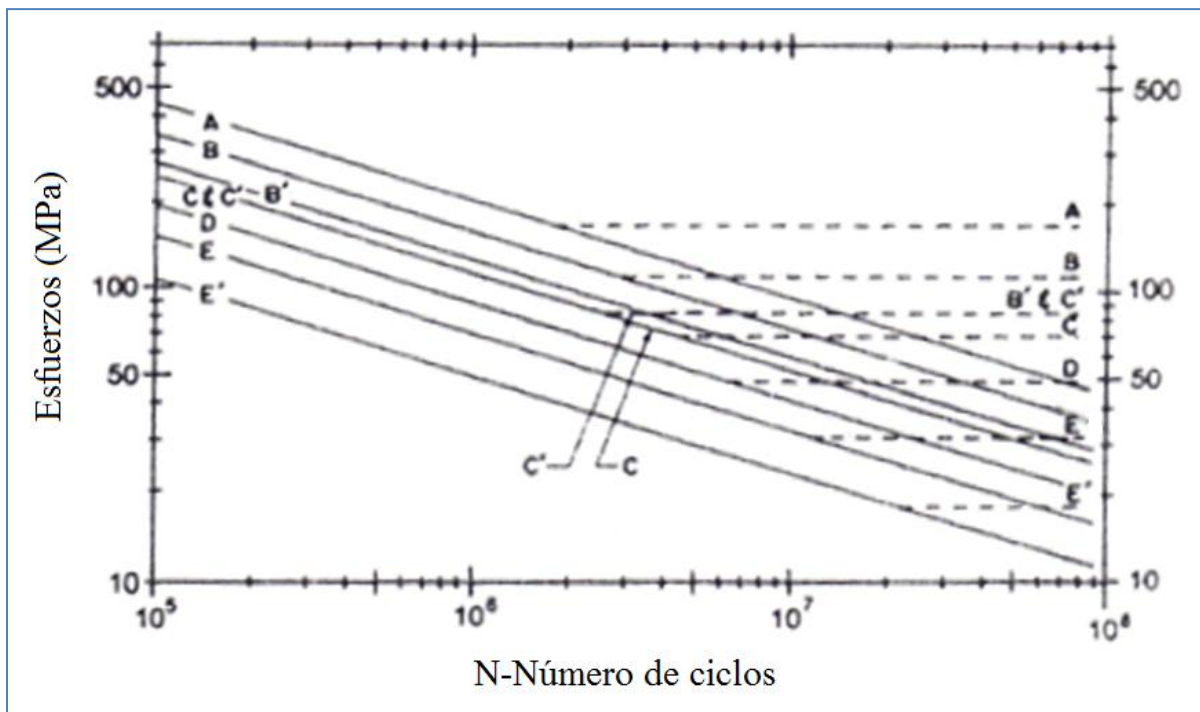


Figura 4.60. Curvas S-N del manual AASHTO.

Se dedujeron las expresiones que describen a cada una de las curvas S-N, con el fin de sistematizar el proceso dentro del programa DIP. Para seleccionar alguna curva específica, se selecciona el tipo de detalle al que corresponde la sección analizada. En el recuadro correspondiente, ubicado dentro del módulo, se despliegan todas las opciones de detalles (Figura 4.61). Para este ejemplo, la parte inferior de las traveses de acero, que constituyen al puentes Kervitous corresponde, según la descripción de AASHTO, a un detalle tipo B. La descripción de los detalles se encuentra en el capítulo 6 páginas 6-20 a 6-25 del manual AASHTO. Estos detalles tienen una equivalencia a los que maneja el Eurocode.

Para comparar los resultados, se ha observado que el detalle B del manual AASHTO equivale a los detalles 80, 71 y 56 del Eurocode. Se utiliza el detalle 80 cuando el espesor del patín es menor que 50 mm, el detalle 71 cuando el espesor del patín es mayor que 50 mm, pero menor que 100 mm, y el detalle 90 cuando el peso del patín es mayor que 100 mm. Conociendo la geometría de los elementos de cada puente, el detalle B para el puente Auxerre equivale al detalle 71, para el puente Kervitous equivale al detalle 80 y para el puente Layrac equivale el detalle 56.

The image shows a software interface for parameter assignment. It includes a menu bar with 'Archivo'. Below it, there are input fields for 'Vida actual (días):' with the value '0' and 'Fracc de año' with the value '31.25'. A dropdown menu labeled 'Detalle:' is open, showing a list of options: A, B, B', C, C', D, E, and E'. The option 'B' is highlighted with a mouse cursor. Below the dropdown, there are two empty input fields labeled 'Valor de Miner (D):' and 'Vida remanente a fatiga:'.

Figura 4.61. Asignación de parámetros para la evaluación de daño acumulado.

Finalmente, se abre el archivo del histograma de Rainflow (generado en el paso anterior) y automáticamente DIP hace la evaluación de daño con la Regla de Minern (Figura 4.62).

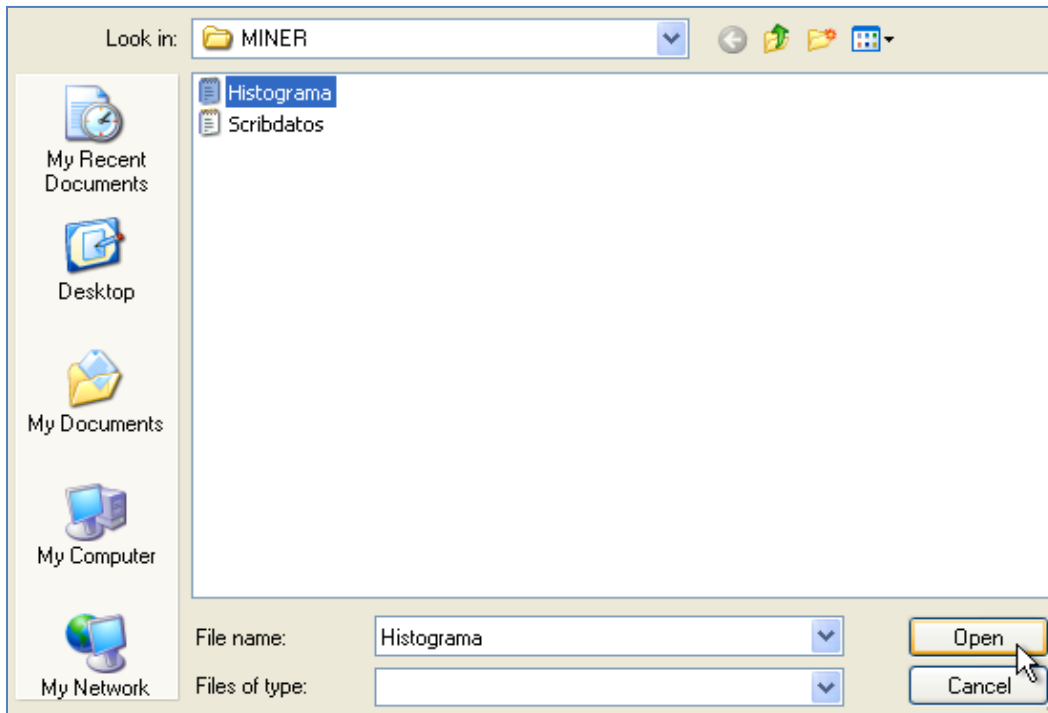


Figura 4.62. Asignación del Histograma de Rainflow.

Para el ejemplo del puente Kervitous se observa que la vida remanente teórica, antes de que se presenten las primeras grietas en la parte inferior de las traves de acero, es aproximadamente de 31 años (Figura 4.63).

| | |
|--------------------------|--------------------|
| Valor de Miner (D): | 0.0010283558603491 |
| Vida a fatiga: (años) | 31.11763275 |

Figura 4.63. Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga.

El método de Palmgren Miner o Regla de Miner no tiene un fundamento teórico formal, en realidad es un proceso que ha justificado sus buenos resultados en la práctica, por ello manuales de gran importancia a nivel mundial (como el Eurocode) lo siguen incluyendo en sus bases.

El proceso descrito hasta ahora, también fue aplicado para el análisis de los puentes Auxerre y Layrac. La Tabla 4.8 muestra los resultados obtenidos y su comparación con los resultados de Arroyo y Jacob (2009).

Tabla 4.8. Periodo de vida a fatiga de los puentes ante el tráfico del registro A6 de 1986.

| Puente | Longitud (m) | No. De Claros | Loc. de la sección | Programa DIP | M. Arroyo y B. Jacob (2009) (Programa Castor) | | |
|-----------|--------------|---------------|--------------------|---|---|------|-----|
| | | | | Periodo de vida o vida remanente (años) | Periodo de vida o vida remanente (años) | | |
| | | | | Detalle (Según AASHTO) | Detalle (Según Eurocode) | | |
| | | | | B | 71 | 80 | 56 |
| Auxerre | 40 | 1 | CL | 61.98 | 56.9 | - | - |
| Kervitous | 55 | 2 | CL del 2do claro | 31.12 | - | 30.9 | - |
| Layrac | 171 | 3 | CL del 2do claro | 8.58 | - | - | 7.9 |

Nota: CL= centro de claro.

Existe variaciones que van de 0.001 al 9 %, lo cual es bastante aceptable, considerando que las metodologías y los programa de computo son diferentes, aunque conservan un enfoque similar con respecto a la evaluación de daño acumulado y estimación de vida a fatiga.

V. CONCLUSIONES

El trabajo de tesis presentado muestra, principalmente, el desarrollo de una herramienta computacional llamada DIP, con la que se realiza el análisis estadístico de cargas vehiculares, se obtienen los valores extremos de pesos para ciertos periodos de retorno y se hace el análisis de fatiga en puentes carreteros de acero. Este programa integra una metodología similar a la que se basa el Eurocode, con la cual se realiza la evaluación de puentes ante fatiga.

En el análisis estadístico y en la predicción de valores extremos no existe limitante hacia qué tipo de puente se realizará dicho estudio, pues sólo es una aplicación estadística de valores. Con el análisis estadístico se obtuvo la información del entorno de demanda de tráfico que pasa por las vialidades de Francia A64 y A4, presentando los resultados en forma gráfica y numérica, los cuales tuvieron una buena aproximación, ya que la comparación con respecto al estudio

precedente (Arroyo et al, 2009) muestra diferencias que oscilan entre 0 y 10%, lo cual está dentro de un rango aceptable, tratándose de dos aplicaciones distintas. Con esto fue posible conocer el volumen de flujo vehicular que pasa por esta zona.

Por otro lado, con el análisis de valores extremos de cargas, se dio a conocer la predicción de los pesos máximos que pudieran presentarse para distintos periodos de retorno en las vialidades A64 y A4 de Francia, con base a los registros de WIM disponibles. De igual forma, los resultados tuvieron diferencias con respecto al trabajo de Arroyo et al (2009) que oscilan entre 0 y 12%, considerándolo como una buena aproximación. Esta información sirve como punto de partida para regular el tráfico vehicular en aquellas autopistas donde los límites superiores han sido rebasados. De esta manera, se pueden prevenir daños estructurales causados por la sobrecarga vial.

Con el análisis de fatiga y la evaluación de daño acumulado se obtuvo una aproximación de la vida remanente de tres puentes de acero de vialidades de Francia, sometidos a un escenario de tráfico real de la autopista A6. Los resultados de la Tabla 4.8 muestran que ambos enfoques arrojan resultados parecidos, aun tratándose de dos procesos diferentes. Con lo anterior se tiene un punto de referencia para saber, teóricamente, cuáles son aquellos puentes que están a punto de sufrir algún tipo de daño estructural.

En México existe la necesidad de conocer la vida remanente de los puentes carreteros, y con este trabajo, se da un paso más para cubrir esta carencia de información. Desafortunadamente el registro de pesaje en movimiento (WIM) en las carreteras mexicanas es nulo o de baja calidad. Por lo tanto, es urgente que las autoridades gubernamentales pongan los recursos necesarios para realizar la instrumentación de estas estructuras viales. Finalmente, se espera que en trabajos posteriores este programa se vaya ampliando para que en un futuro pueda aplicarse en la práctica.

VI. REFERENCIAS

- Arroyo Moises, Hannachi M., Siegert D., Jacob B., 2009,** *Extreme Traffic Load Effects on Medium Span Bridges*, Universidad Autónoma de Querétaro, Mexico and Université Paris-Est, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Paris, France.
- Badiola V., 2004,** *Diseño de Máquinas-Cargas Variables*, Dpto. Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales, pp. 55-79.
- Bangoura A., 2007,** *Metodología para la Optimización de Análisis de Esfuerzos por Fatiga de Alto Ciclo en Componentes de Maquinas*, Instituto Politécnico Nacional, D.F., México, pp.25- 48.
- Caprani Colin, O'Brien Eugene , McLachlan Geoff , 2008,** *Characteristic traffic load effects from a mixture of loading events on short to medium span bridges*, Department of Civil/Structural Engineering, Dublin Institute of Technology, Ireland; School Urban Institute Ireland, University College Dublin, Ireland, Department of Statistics, University of Queensland, Brisbane, Australia, *Structural Safety* 30 (2008) 394–404, Edit: Elsevier, pp. 394-404.
- Carrión Viramontes F., Quintana Rodríguez J., López López J., Balankin A., Samayoa Ochoa D., 2006,** *Metodologías de Inspección No Destructiva Aplicables a Sistemas de Gestión De Puentes*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes e Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No 302, Sanfandila, Qro
- Castillo E., Fernández Canteli A., Esslinger V., Thürlimann B., 1985,** *Statistical Model for Fatigue Analysis of Wires, Strands and Cables*. IABSE Proceedings, pp.82-85.
- Coles S., 2001,** *An Introduction to statistical modeling of extreme values*, Springer-Verlag London.
- De Haan L.,1994,** *Extreme Value Statistics. Extreme Value Theory and Applications*, J. Galambos, J. Lechner and E. Simiu (eds.), Volumen 1, pp. 93-122.

- Dowling Jason, 2009**, *Calculating A Bridge Assessment Dynamic Ratio Using A Bridge Weigh-In-Motion System*, Session 6, Road Transport, University College Dublin, Dublin, Ireland.
- Getachew Abraham, 2003**, *Traffic Load Effects on Bridges Statistical Analysis of Collected and Monte Carlo Simulated Vehicle Data*, Structural Engineering, Royal Institute of Technology, SE-100 44 Stockholm, Sweden.
- González J., Vega J., Rodríguez G., 2005**, *Análisis Extremal del Oleaje en Canarias Mediante El Método De Picos Sobre Umbral*. Departamento de Física, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus de Tafira, 35017, Las Palmas, España, Artículo.
- Greenwood J.A., Landwher J., Matalas N.C., Wallis J.R., 1979**, *Probability Weighted Moments: Definition and Relation to Parameters of Several Distributions Expressable in Inverse Form*, Wat. Res. Res., 15 (5), pp. 1049-1054.
- Gutiérrez S., Cudmani R., Danesi R., 1991**, *Estudio del Comportamiento de Vigas Parcialmente Pretensadas Sometidas a Cargas de Fatiga*. XXV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estructural, Porto Alegre, Brasil., pp. 379-390.
- Hernández Jiménez José Ricardo, Fabela Gallegos Manuel de Jesús, 2004**, *Diseño y construcción de un prototipo para determinar el peso de vehículos ligeros en movimiento*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 247, Sanfandila, Querétaro, México.
- Hibbeler R. C., 1997**, *Análisis Estructural*, 3a edición, Edit: Pearson/Prentice Hall.
- Jacob Bernard and Eymard R., 1989**, *Un Nouveau Logiciel : le programme CASTOR pour le Calcul des Actions et Sollicitations du Trafic dans les Ouvrages Routiers*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).
- Kashefi Kiana, Zandi A. Peyman and Zeinoddini Mostafa, 2010**, *Fatigue life evaluation through field measurements and laboratory tests*, Procedia Engineering, , Edit: Elsevier, Volume 2, Issue 1, pp. 573-582.

- Katz Bryan J., 2001**, *Field And Modeling Framework For Evaluating Truck Weigh Station Operations*, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg Virginia, pp 4-12.
- Kwon Kihyon and Frangopol Dan, 2010**, *Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data*, Department of Civil and Environmental Engineering, ATLSS Center, Lehigh University, 117 ATLSS Dr., Bethlehem, USA.
- Laurita J., G. Sellner, and D. Du Plessis, 1994**, *Weigh-In-Motion Technology Improves Highway Truck Weight Regulation*, Public Works, pp. 41-42.
- Liljencrantz Axel , Karoumi Raid, Olofsson Per, 2007**, *Implementing bridge weigh-in-motion for railway traffic*; Computers and Structures 85, Edit: Elsevier, pp. 80–88.
- Lindorf Alexander and Curbach Manfred, 2010**, *S–N curves for fatigue of bond in reinforced concrete structures under transverse tension*, Engineering Structures, Edit: Elsevier, Volume 32, Issue 10, pp. 3068-3074.
- López Aenlle M., Brincker R., Fernández Canteli A., Villa L.M., 2006**, *Mejora De La Fiabilidad En El Dimensionamiento A Fatiga Utilizando Análisis Modal*, Dpto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación. Universidad de Oviedo, Anales de Mecánica de la Fractura Vol. II, pp. 623-628.
- López Aenlle M., Fernández Canteli A., Lamela Rey M.J., Castillo Ron E., 2001**, *Predicción De Vida A Fatiga En Materiales Compuestos De Fibra De Carbono Bajo Carga De Amplitud Variable*, Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. 18, pp. 375-383.
- Masahiro Jono, 2005**, *Fatigue damage and crack growth under variable amplitude loading with reference to the counting methods of stress–strain ranges*, International Journal of Fatigue, Volume 27, Issue 8, Edit: Elsevier, (2005), pp. 1006-1015.
- Mc Cormac Jack, 2002**, *Análisis de Estructuras métodos clásicos y matriciales*, 2ª edición, Edit: Alfaomega.

McInnes C.H. and Meehan P.A., 2008, *Equivalence of four-point and three-point rainflow cycle counting algorithms*, International Journal of Fatigue, Volume 30, Issue 3, Edit: Elsevier, pp. 547-559.

Mendoza Díaz Alberto, Cadena Rodríguez Arturo, De Buen Richkarday Arturo, Domínguez Pommerencke Luis, Rico Rodríguez Alfonso, 1991, *Análisis estadístico del peso y las dimensiones de los vehículos de carga que circulan por la red nacional de carreteras. Estaciones instaladas durante 1991*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No.8, Sanfandila, Querétaro, México.

O'Brien Eugene, Znidaric Ales, 2001, *Weighing-in-motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE)*, Report of Work Package 1.2, Bridge WIM systems (B- WIM), European Commission DG VII – Transport, 4th Framework Programme Transport, Ljubljana, Slovenia.

O'Connor Alan, 1991, *User's Manual CASTOR-LCPC*, Trinity College Dublin, Ireland, Department of Civil Structural & Environmental Engineering, Museum Building, College Green, Dublin.

Real E., Rodríguez C., Canteli A. F., Belzunce F. J., Aenlle M. L., 2005, *Efecto De La Tensión Media En El Comportamiento A Fatiga De Barras Corrugadas De Acero Inoxidable Dúplex*, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón, Universidad de Oviedo Campus de Viesques, Gijón, España, Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. 22, pp. 353-358.

Rise Richard, Leis Brian, Nelson Drew, Berns Henry, Lingenfelter, Mitchell M., 1988, *Fatigue Design Handbook*, Society of Automotive Engineers, Inc.

Seçil Ariduru, 2004, *Fatigue Life Calculation By Rainflow Cycle Counting Method*, Middle East Technical University, thesis.

Smith R. L., 2001, *Environmental Statistics Lecture Notes v.5* , University of North California.

Solidworks, 2009, *Diseño para evitar la fatiga*, Documento temático, publicaciones de Real Inspiración.

Takeshi Mori, Hee-Hyun Lee, Kab-Soo Kyung, 2007, *Fatigue life estimation parameter for short and medium span steel highway girder bridges*, Engineering Structures 29, Edit: Elsevier, pp. 2762–2774.

Yongming Liu and Sankaran Mahadevan, 2007, *Stochastic fatigue damage modeling under variable amplitude loading*, International Journal of Fatigue, Volume 29, Issue 6, Edit: Elsevier, pp.1149-1161.

ANEXO A

ANEXO A. DETERMINACIÓN DE LAS ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LÍNEAS DE INFLUENCIA.

A.1. Obtención de los momentos para el puente de dos claros

El primer caso que se analizó es el de un puente de dos claros (Figura A.1). Se aplica la ecuación (2.49) para obtener los momentos.

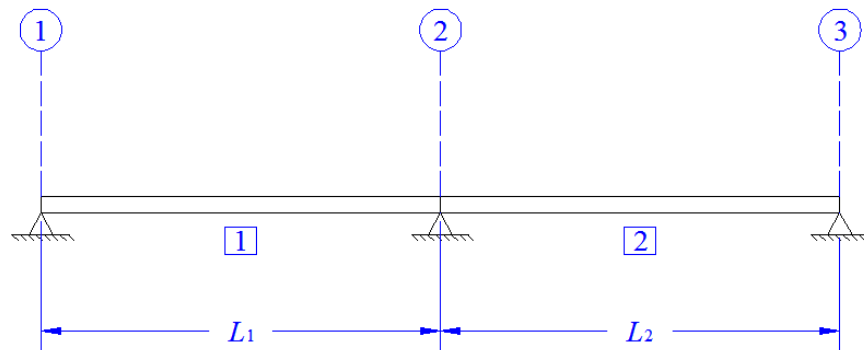


Figura A.1. Modelación de un puente de dos claros como viga simplemente apoyada y continua

A.1.1. Cuando P está en el claro 1.

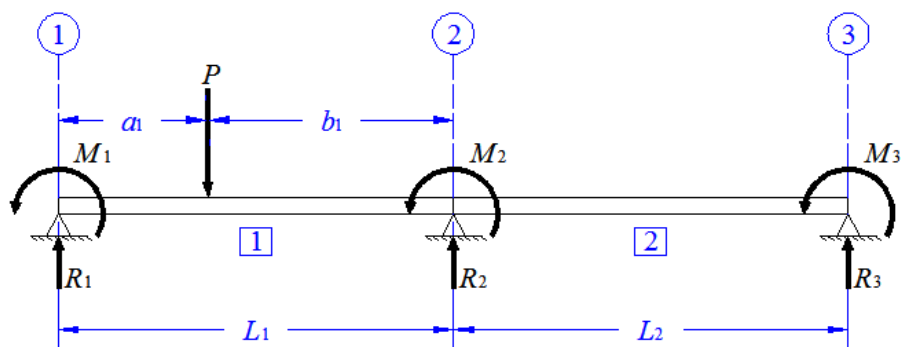


Figura A.2. Carga P en el claro 1.

Aplicando la ecuación de los tres momentos se tiene:

$$M_1 = M_3 = 0$$

$$0 + 2M_2(L_1 + L_2) + 0 = -PL_1^2 \left(\frac{a_1}{L_1} - \frac{a_1^3}{L_1^3} \right)$$

$$M_2 = -\frac{PL_1^2}{2(L_1 + L_2)} \left(\frac{a_1}{L_1} - \frac{a_1^3}{L_1^3} \right) \quad (\text{A.1})$$

Usando el momento M_2 de la ecuación (A.1), se obtienen las reacciones:

$$R_1 = \frac{M_2}{L_1} + \frac{Pb_1}{L_1} = \frac{Pb_1 + M_2}{L_1} \quad (\text{A.2})$$

$$R_{21} = -\left(\frac{M_2}{L_1} \right) + \frac{Pa_1}{L_1}$$

$$R_{22} = -\frac{M_2}{L_2}$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} = -\left(\frac{M_2}{L_1} \right) + \frac{Pa_1}{L_1} - \frac{M_2}{L_2} = \frac{Pa_1 - M_2}{L_1} - \frac{M_2}{L_2} \quad (\text{A.3})$$

$$R_3 = \frac{M_2}{L_2} \quad (\text{A.4})$$

En base a estas reacciones se obtienen las líneas de influencia en la siguiente sección.

A.1.2. Cuando P está en el claro 2.

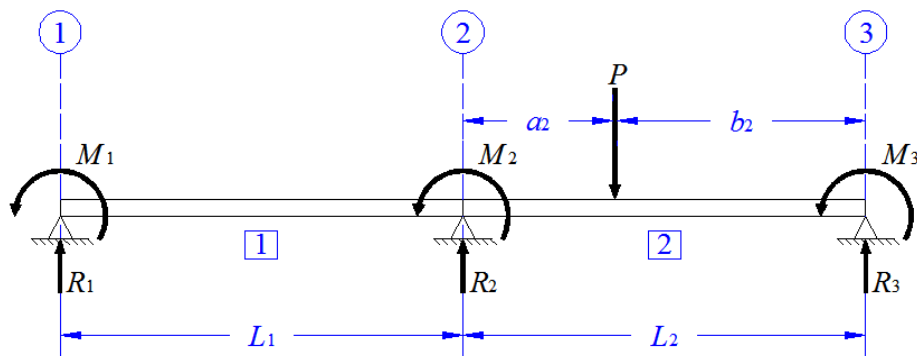


Figura A.3. Carga P en el claro 2.

Aplicando la ecuación de los tres momentos se tiene:

$$\begin{aligned}M_1 &= M_3 = 0 \\0 + 2M_2(L_1 + L_2) + 0 &= -PL_2^2 \left(\frac{a_2}{L_2} - \frac{a_2^3}{L_2^3} \right) \\M_2 &= -\frac{PL_2^2}{2(L_1 + L_2)} \left(\frac{a_2}{L_2} - \frac{a_2^3}{L_2^3} \right)\end{aligned}\tag{A.5}$$

Usando el momento M_2 de la ecuación (A.5), se obtienen las reacciones:

$$R_1 = \frac{M_2}{L_1}\tag{A.6}$$

$$\begin{aligned}R_{21} &= -\frac{M_2}{L_1} \\R_{22} &= -\frac{M_2}{L_2} + \frac{Pb_2}{L_2} = \frac{Pb_2 - M_2}{L_2}\end{aligned}$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} = -\frac{M_2}{L_1} + \frac{Pb_2 - M_2}{L_2}\tag{A.7}$$

$$R_3 = \frac{M_2}{L_2} + \frac{Pa_2}{L_2} = \frac{Pa_2 + M_2}{L_2}\tag{A.8}$$

En base a estas reacciones se obtienen las líneas de influencia en la siguiente sección.

A.2. Ecuaciones para las líneas de Influencia del puente de dos claros.

A.2.1. Cuando el Punto de Referencia (PR) de la sección se encuentra en el claro 1.

Si PR y P están en el claro 1, y P está antes de PR (Figura A.4):

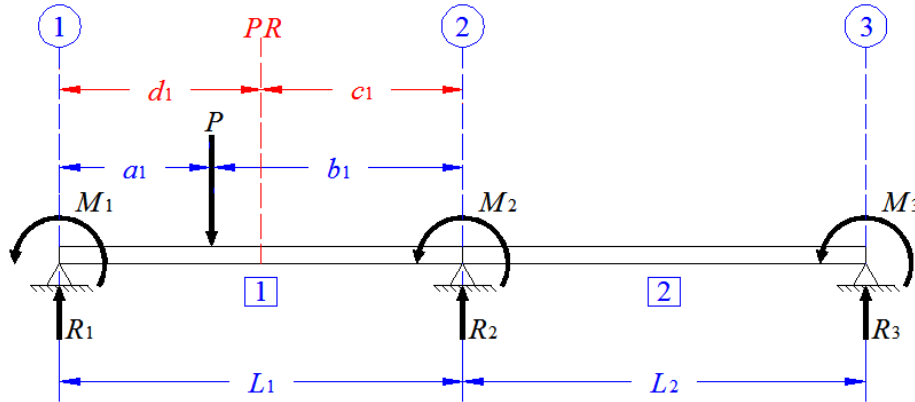


Figura A.4. PR y P en el claro 1, con P antes de PR.

La variación de la línea de influencia de momentos (L_i) en este caso es:

$$L_i = -R_1(d_1) + P(b_1 - c_1) \quad (\text{A.9})$$

Donde R_1 es obtenida a partir de la ecuación (A.2).

Si PR y P están en el claro 1, y P está después de PR (Figura A.5):

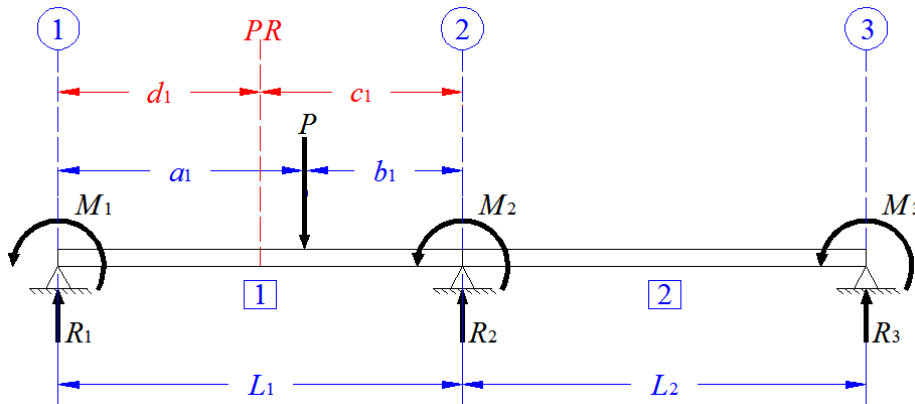


Figura 5. PR y P en el claro 1, con P después de PR.

La variación de la línea de influencia de momentos (L_i) en este caso es:

$$L_i = -R_1(d_1) \quad (\text{A.10})$$

Donde R_1 es obtenida a partir de la ecuación (A.2).

Si PR está en el claro 1, y P está en el claro 2 (Figura A.6):

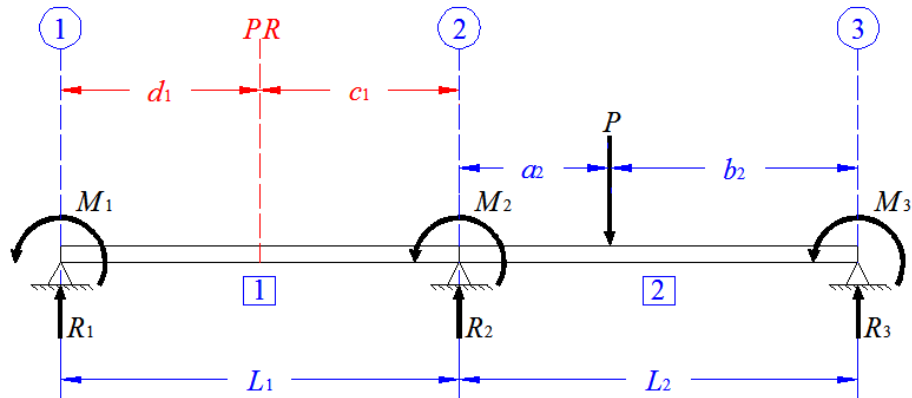


Figura A.6. P en el claro 2 y PR en el claro 1.

La variación de la línea de influencia de momentos (Li) en este caso es:

$$Li = -R_1(d_1) \quad (A.11)$$

Donde R_1 es obtenida a partir de la ecuación (A.6).

A.2.2. Cuando el Punto de Referencia (PR) de la sección se encuentra en el claro 2.

Si PR está en el claro 2, y P está en el claro 1 (Figura A.7):

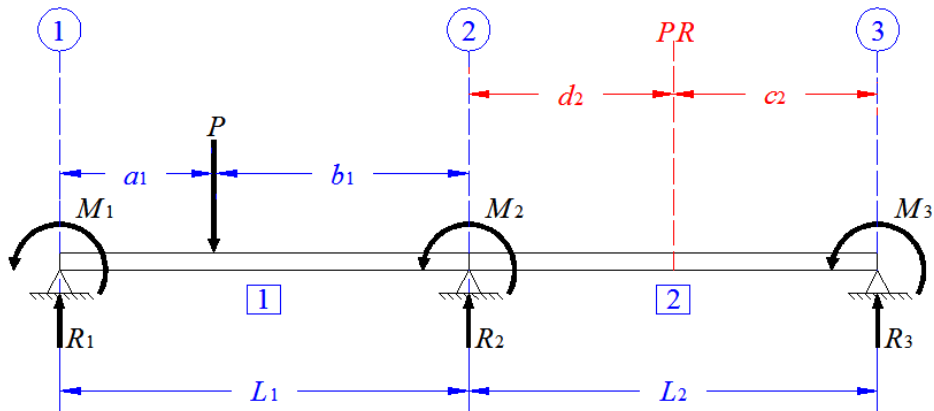


Figura A.7. P en el claro 1 y PR en claro 2.

La variación de la línea de influencia de momentos (Li) en este caso es:

$$Li = -R_1(L_1 + d_2) - R_2(d_2) + P(b_1 + d_2) \quad (A.12)$$

Donde R_1 es obtenida a partir de la ecuación (A.2) y R_2 a partir de la ecuación (A.3).

Si PR y P están en el claro 2, y P está antes de PR (Figura A.8):

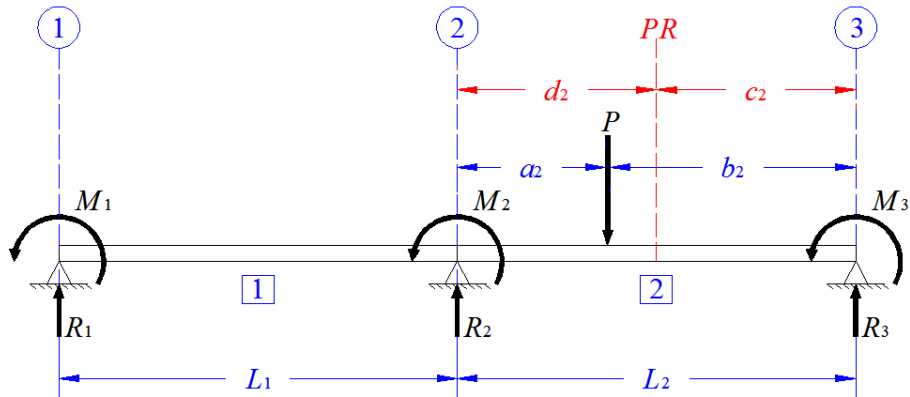


Figura A.8. PR y P en el claro 2, con P antes de PR.

La variación de la línea de influencia de momentos (\$Li\$) en este caso es:

$$Li = -R_1(L_1 + d_2) - R_2(d_2) + P(b_2 - c_2) \quad (A.13)$$

Donde \$R_1\$ es obtenida a partir de la ecuación (A.6) y \$R_2\$ a partir de la ecuación (A.7).

Si PR y P están en el claro 2, y P está después de PR (Figura A.9):

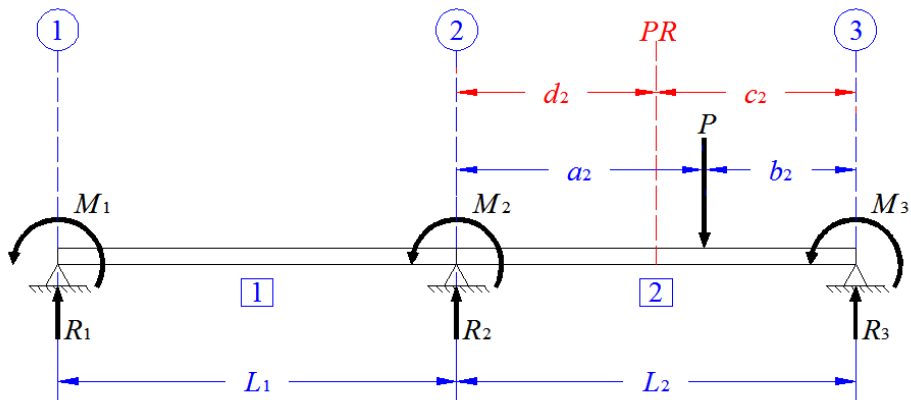


Figura A.9. PR y P en el claro 2, con P después de PR.

La variación de la línea de influencia de momentos (\$Li\$) en este caso es:

$$Li = -R_1(L_1 + d_2) - R_2(d_2) \quad (A.14)$$

Donde \$R_1\$ es obtenida a partir de la ecuación (A.6) y \$R_2\$ a partir de la ecuación (A.7).

A.3. Obtención de los momentos para el puente de tres claros.

En el puente de tres claros (Figura A.10), se aplica la ecuación (2.49) para obtener los momentos.

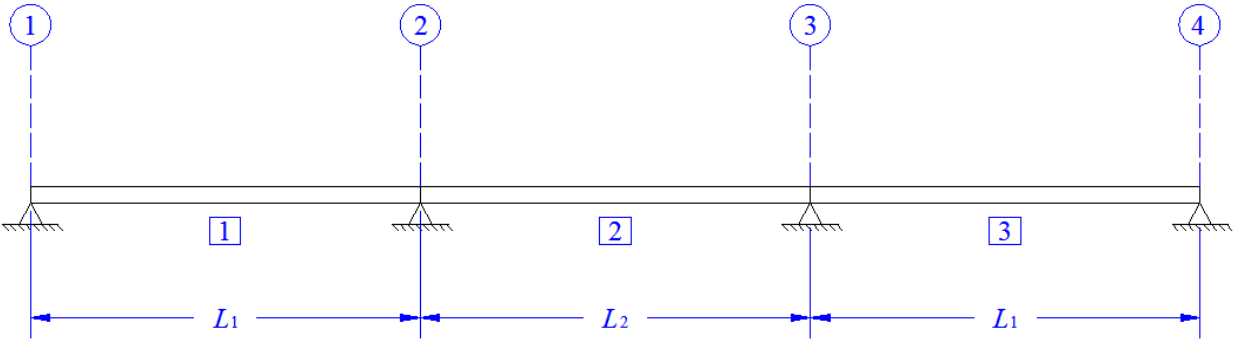


Figura A.10. Modelación de un puente de dos claros como viga simplemente apoyada y continua

A.3.1. Cuando P está en el claro 1.

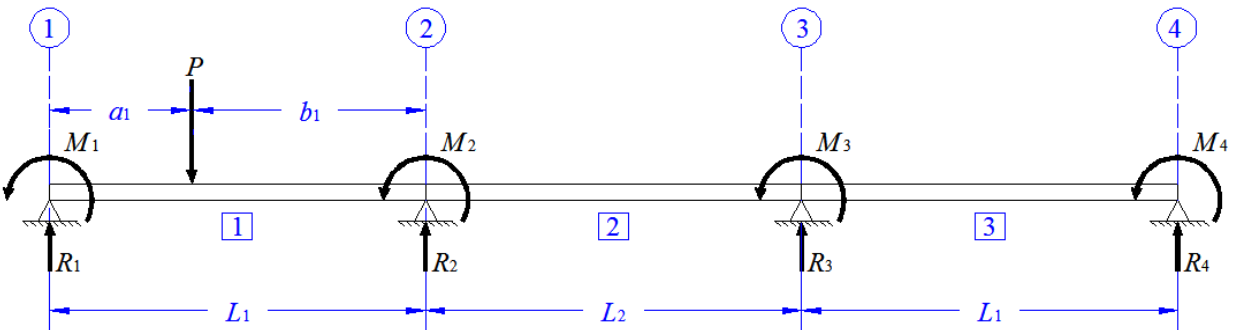


Figura A.11. Carga P en el claro 1.

Aplicando la ecuación de los tres momentos se tiene:

Analizando los claros 1 y 2:

$$M_1 = M_4 = 0$$

$$2M_2(L_1 + L_2) + M_3L_2 = -PL_1^2 \left(\frac{a_1}{L_1} - \frac{a_1^3}{L_1^3} \right) \quad (\text{A.15})$$

Analizando los claros 2 y 3:

$$M_2L_2 + 2M_3(L_2 + L_1) = 0 \quad (\text{A.16})$$

Multiplicando la ecuación (A.16) por $\frac{-2(L_1+L_2)}{L_2}$, sumando esto a la ecuación (A.15) y

despajando M_3 , se tiene:

$$M_3 = P \frac{\left[L_1^2 \left[\left(\frac{a_1}{L_1} \right) - \left(\frac{a_1}{L_1} \right)^3 \right] \right]}{\left[4 \left(\frac{L_1^2}{L_2} \right) + 8L_1 + 3L_2 \right]} \quad (\text{A.17})$$

Sustituyendo la ecuación (A.17) en la ecuación (A.16), y despajando M_2 , se tiene:

$$M_2 = P \frac{\left[-2L_1^2 \left[\left(\frac{a_1}{L_1} \right) - \left(\frac{a_1}{L_1} \right)^3 \right] \right]}{\left[4 \left(\frac{L_1^2}{L_2} \right) + 8L_1 + 3L_2 \right]} \left(\frac{L_1}{L_2} + 1 \right) \quad (\text{A.18})$$

Usando los momentos M_2 y M_3 , se obtienen las reacciones:

$$R_1 = \frac{M_2}{L_1} + \frac{Pb_1}{L_1} = \frac{Pb_1 + M_2}{L_1} \quad (\text{A.19})$$

$$R_{21} = -\left(\frac{M_2}{L_1} \right) + \frac{Pa_1}{L_1}$$

$$R_{22} = \frac{-M_2 + M_3}{L_2}$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} = -\left(\frac{M_2}{L_1} \right) + \frac{Pa_1}{L_1} + \frac{-M_2 + M_3}{L_2} = \frac{Pa_1 - M_2}{L_1} + \frac{M_3 - M_2}{L_2} \quad (\text{A.20})$$

$$R_{31} = -\left(\frac{-M_2 + M_3}{L_2} \right)$$

$$R_{32} = -\frac{M_3}{L_1}$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} = -\left(\frac{-M_2 + M_3}{L_2} \right) - \frac{M_3}{L_1} = \frac{M_2 - M_3}{L_2} - \frac{M_3}{L_1} \quad (\text{A.21})$$

$$R_4 = \frac{M_3}{L_1} \quad (\text{A.22})$$

A.3.2. Cuando P está en el claro 2.

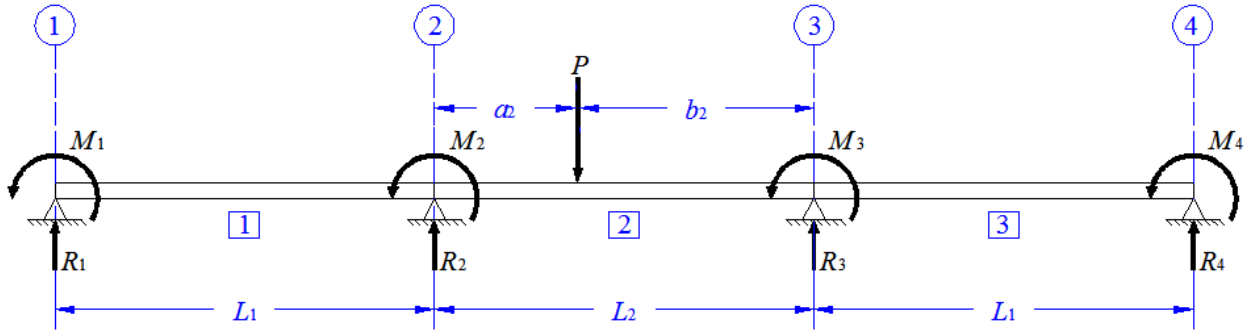


Figura A.12. Carga P en el claro 2.

Aplicando la ecuación de los tres momentos se tiene:

Analizando los claros 1 y 2:

$$M_1 = M_4 = 0$$

$$2M_2(L_1 + L_2) + M_3L_2 = -PL_2^2 \left(\frac{b_2}{L_2} - \frac{b_2^3}{L_2^3} \right) \quad (\text{A.23})$$

Analizando los claros 2 y 3:

$$M_2L_2 + 2M_3(L_2 + L_1) = -PL_2^2 \left(\frac{a_2}{L_2} - \frac{a_2^3}{L_2^3} \right) \quad (\text{A.24})$$

Multiplicando la ecuación (A.24) por $\frac{-2(L_1 + L_2)}{L_2}$, sumando esto a la ecuación (A.23) y

despajando M_3 , se tiene:

$$M_3 = P \left[L_2^2 \frac{\left(\left[\left(\frac{b_2}{L_2} \right) - \left(\frac{b_2}{L_2} \right)^3 \right] - \left[\frac{2(L_1 + L_2)}{L_2} \right] \left[\left(\frac{a_2}{L_2} \right) - \left(\frac{a_2}{L_2} \right)^3 \right] \right)}{4 \left(\frac{L_1^2}{L_2} \right) + 8L_1 + 3L_2} \right] \quad (\text{A.25})$$

Sustituyendo la ecuación (A.25) en la ecuación (A.24), y despojando M_2 , se tiene:

$$M_2 = P \left[\frac{-L_2^2}{2(L_1 + L_2)} \left[\left(\frac{b_2}{L_2} \right) - \left(\frac{b_2}{L_2} \right)^3 \right] + L_2 \left(\frac{\left[\left(\frac{b_2}{L_2} \right) - \left(\frac{b_2}{L_2} \right)^3 \right] - \left[\frac{2(L_1 + L_2)}{L_2} \right] \left[\left(\frac{a_2}{L_2} \right) - \left(\frac{a_2}{L_2} \right)^3 \right]}{4 \left(\frac{L_1^2}{L_2} \right) + 8L_1 + 3L_2} \right) \right] \quad (\text{A.26})$$

Usando los momentos M_2 y M_3 , se obtienen las reacciones:

$$R_1 = \frac{M_2}{L_1} \quad (\text{A.27})$$

$$R_{21} = -\left(\frac{M_2}{L_1} \right)$$

$$R_{22} = \frac{-M_2 + M_3}{L_2} + \frac{Pb_2}{L_2}$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} = -\left(\frac{M_2}{L_1} \right) + \frac{-M_2 + M_3}{L_2} + \frac{Pb_2}{L_2} = -\frac{M_2}{L_1} + \frac{M_3 - M_2 + Pb_2}{L_2} \quad (\text{A.28})$$

$$R_{31} = -\left(\frac{-M_2 + M_3}{L_2} \right) + \frac{Pa_2}{L_2}$$

$$R_{32} = -\frac{M_3}{L_1}$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} = -\left(\frac{-M_2 + M_3}{L_2} \right) + \frac{Pa_2}{L_2} - \frac{M_3}{L_1} = \frac{M_2 - M_3 + Pa_2}{L_2} - \frac{M_3}{L_1} \quad (\text{A.29})$$

$$R_4 = \frac{M_3}{L_1} \quad (\text{A.30})$$

A.3.3. Cuando P está en el claro 3.

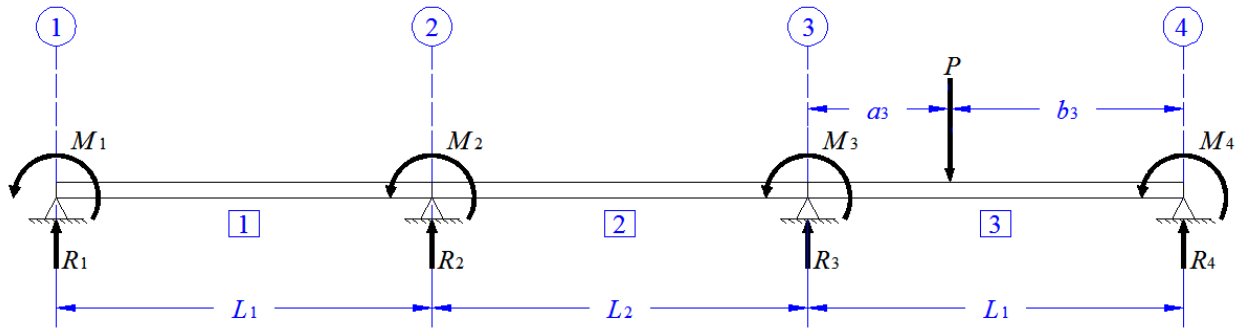


Figura A.13. Carga P en el claro 3.

Aplicando la ecuación de los tres momentos se tiene:

Analizando los claros 1 y 2:

$$\begin{aligned} M_1 &= M_4 = 0 \\ 2M_2(L_1 + L_2) + M_3L_2 &= 0 \end{aligned} \tag{A.31}$$

Analizando los claros 2 y 3:

$$M_2L_2 + 2M_3(L_2 + L_1) = -PL_1^2 \left(\frac{b_3}{L_1} - \frac{b_3^3}{L_1^3} \right) \tag{A.32}$$

Multiplicando la ecuación (A.31) por $\frac{-2(L_1 + L_2)}{L_2}$, sumando esto a la ecuación (A.32) y

despajando M_2 , se tiene:

$$M_2 = P \frac{\left[L_1^2 \left[\left(\frac{b_3}{L_1} \right) - \left(\frac{b_3^3}{L_1^3} \right) \right] \right]}{\left[4 \left(\frac{L_1^2}{L_2} \right) + 8L_1 + 3L_2 \right]} \tag{A.33}$$

Sustituyendo la ecuación (A.33) en la ecuación (A.31), y desajando M_3 , se tiene:

$$M_3 = P \left[\frac{-2L_1^2 \left[\left(\frac{b_3}{L_1} \right) - \left(\frac{b_3}{L_1} \right)^3 \right]}{4 \left(\frac{L_1^2}{L_2} \right) + 8L_1 + 3L_2} \right] \left(\frac{L_1}{L_2} + 1 \right) \quad (\text{A.34})$$

Usando los momentos M_2 y M_3 , se obtienen las reacciones:

$$R_1 = \frac{M_2}{L_1} \quad (\text{A.35})$$

$$R_{21} = - \left(\frac{M_2}{L_1} \right)$$

$$R_{22} = \frac{-M_2 + M_3}{L_2}$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} = - \left(\frac{M_2}{L_1} \right) + \frac{-M_2 + M_3}{L_2} = - \frac{M_2}{L_1} + \frac{M_3 - M_2}{L_2} \quad (\text{A.36})$$

$$R_{31} = - \left(\frac{-M_2 + M_3}{L_2} \right)$$

$$R_{32} = - \frac{M_3}{L_1} + \frac{Pb_3}{L_1}$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} = - \left(\frac{-M_2 + M_3}{L_2} \right) - \frac{M_3}{L_1} + \frac{Pb_3}{L_1} = \frac{M_2 - M_3}{L_2} + \frac{Pb_3 - M_3}{L_1} \quad (\text{A.37})$$

$$R_4 = \frac{M_3}{L_1} + \frac{Pa_3}{L_1} \quad (\text{A.38})$$

A.4. Ecuaciones para las líneas de Influencia del puente de tres claros.

A.4.1. Cuando el Punto de Referencia (PR) de la sección se encuentra en el claro 1.

Si PR y P están en el claro 1, y P está antes de PR (Figura A.14):

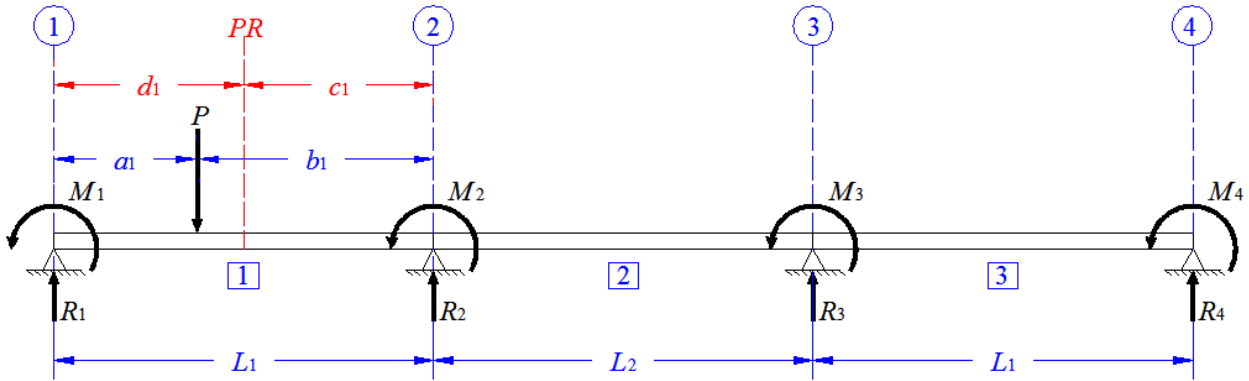


Figura A.14. PR y P en el claro 1, con P antes de PR.

La variación de la línea de influencia de momentos (\$L_i\$) en este caso es:

$$L_i = -R_1(d_1) + P(b_1 - c_1) \quad (A.39)$$

Donde \$R_1\$ es obtenida a partir de la ecuación (A.19).

Si PR y P están en el claro 1, y P está después de PR (Figura A.15):

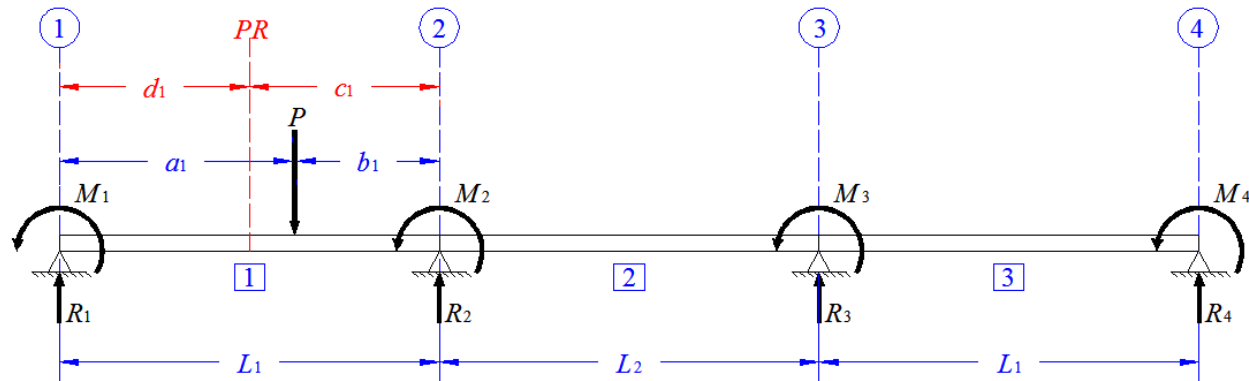


Figura A.15. PR y P en el claro 1, con P después de PR.

La variación de la línea de influencia de momentos (\$L_i\$) en este caso es:

$$L_i = -R_1(d_1) \quad (A.40)$$

Donde \$R_1\$ es obtenida a partir de la ecuación (A.19).

Si PR está en el claro 1, y P está en el claro 2 (Figura A.16):

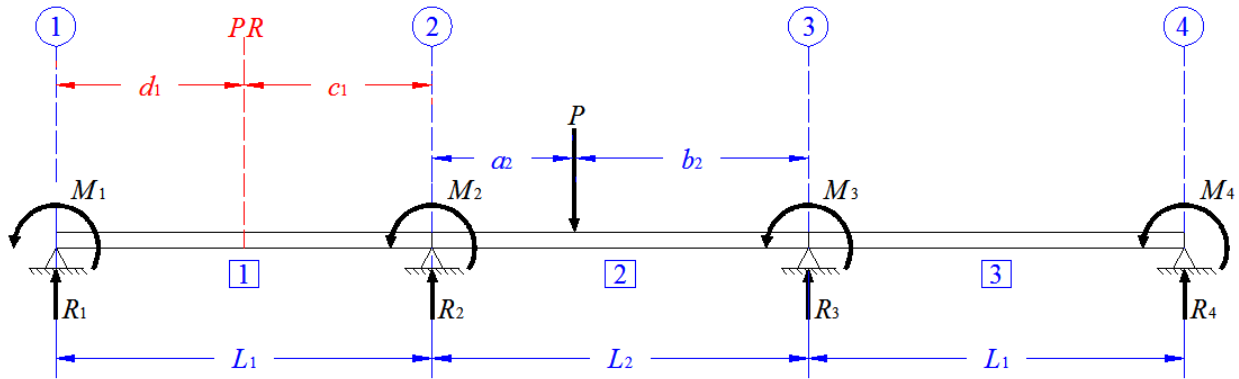


Figura A.16. P en el claro 2 y PR en el claro 1.

La variación de la línea de influencia de momentos (Li) en este caso es:

$$Li = -R_1(d_1) \tag{A.41}$$

Donde R_1 es obtenida a partir de la ecuación (A.27).

Si PR está en el claro 1, y P está en el claro 3 (Figura A.17):

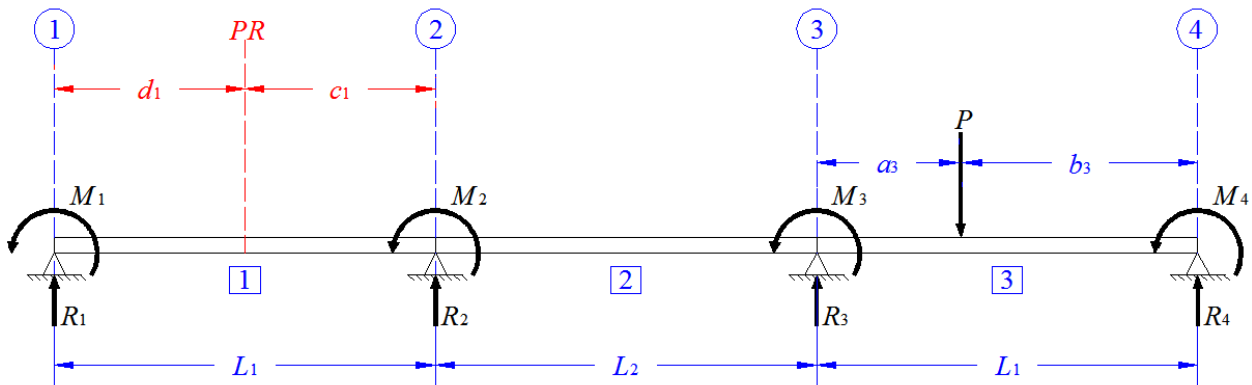


Figura A.17. P en el claro 3 y PR en el claro 1.

La variación de la línea de influencia de momentos (Li) en este caso es:

$$Li = -R_1(d_1) \tag{A.42}$$

Donde R_1 es obtenida a partir de la ecuación (A.35).

A.4.2. Cuando el Punto de Referencia (PR) de la sección se encuentra en el claro 2.

Si PR está en el claro 2, y P está en el claro 1 (Figura A.18):

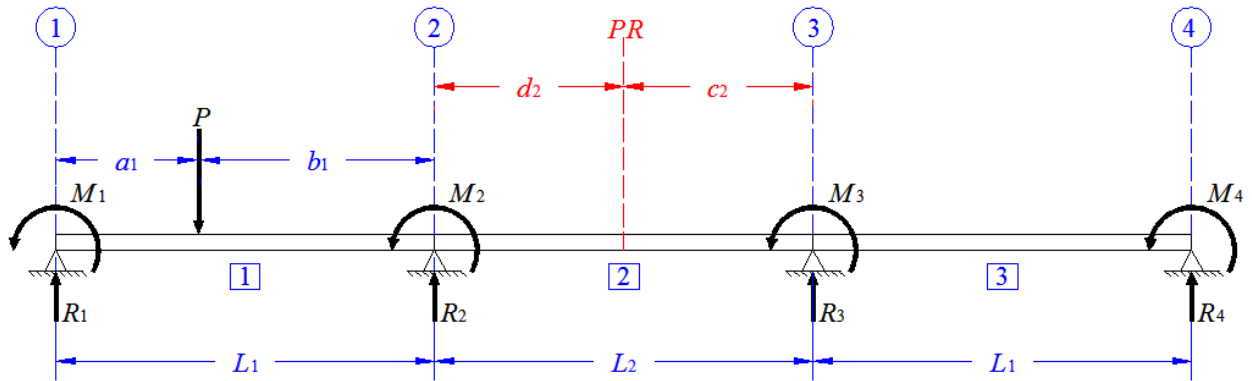


Figura A.18. PR en el claro 2 y P en el claro 1.

La variación de la línea de influencia de momentos (Li) en este caso es:

$$Li = -R_1(L_1 + d_2) - R_2(d_2) + P(b_1 + d_2) \quad (A.43)$$

Donde R_1 es obtenida a partir de la ecuación (A.19) y R_2 a partir de la ecuación (A.20).

Si PR y P están en el claro 2, y P está antes de PR (Figura A.19):

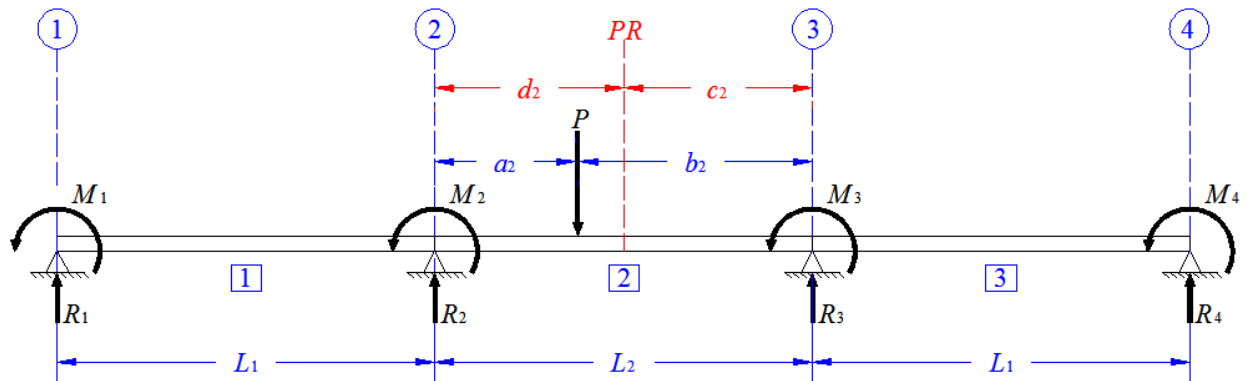


Figura A.19. PR y P en el claro 2, con P antes de PR.

La variación de la línea de influencia de momentos (Li) en este caso es:

$$Li = -R_1(L_1 + d_2) - R_2(d_2) + P(b_2 - c_2) \quad (A.44)$$

Donde R_1 es obtenida a partir de la ecuación (A.27) y R_2 a partir de la ecuación (A.28).

Si PR y P están en el claro 2, y P está después de PR (Figura A.20):

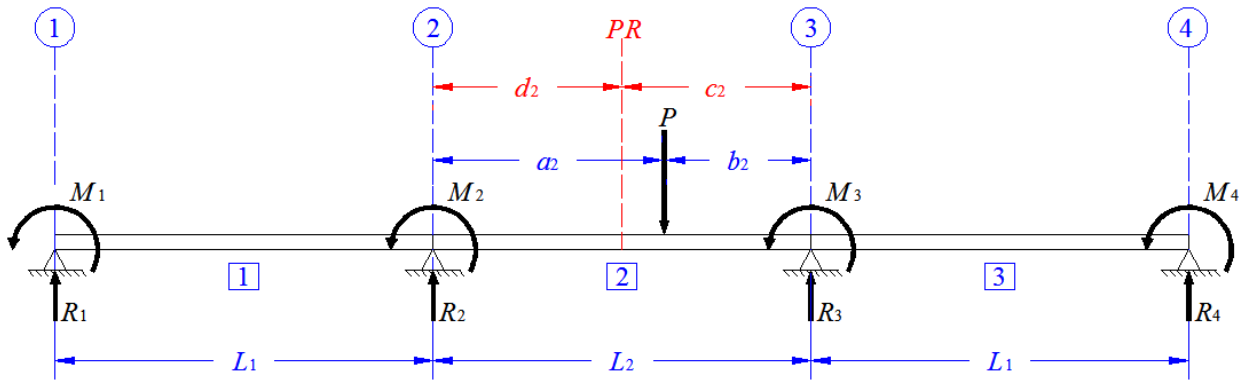


Figura A.20. PR y P en el claro 2, con P después de PR.

La variación de la línea de influencia de momentos (Li) en este caso es:

$$Li = -R_1(L_1 + d_2) - R_2(d_2) \quad (A.45)$$

Donde R_1 es obtenida a partir de la ecuación (A.27) y R_2 a partir de la ecuación (A.28).

Si PR está en el claro 2, y P está en el claro 3 (Figura A.21):

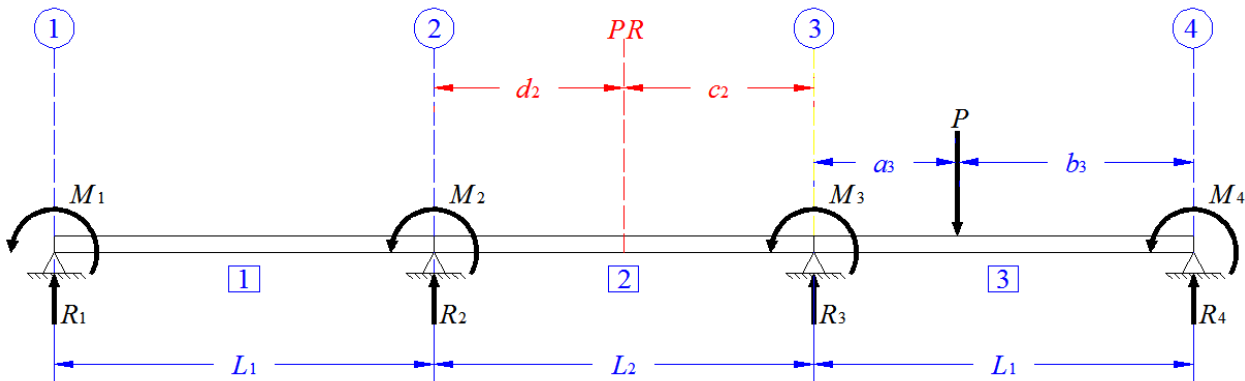


Figura A.21. P en el claro 3 y PR en el claro 2.

La variación de la línea de influencia de momentos (Li) en este caso es:

$$Li = -R_1(L_1 + d_2) - R_2(d_2) \quad (A.46)$$

Donde R_1 es obtenida a partir de la ecuación (A.35) y R_2 a partir de la ecuación (A.36).

A.4.3. Cuando el Punto de Referencia (PR) de la sección se encuentra en el claro 3.

Si PR está en el claro 3, y P está en el claro 1 (Figura A.22):

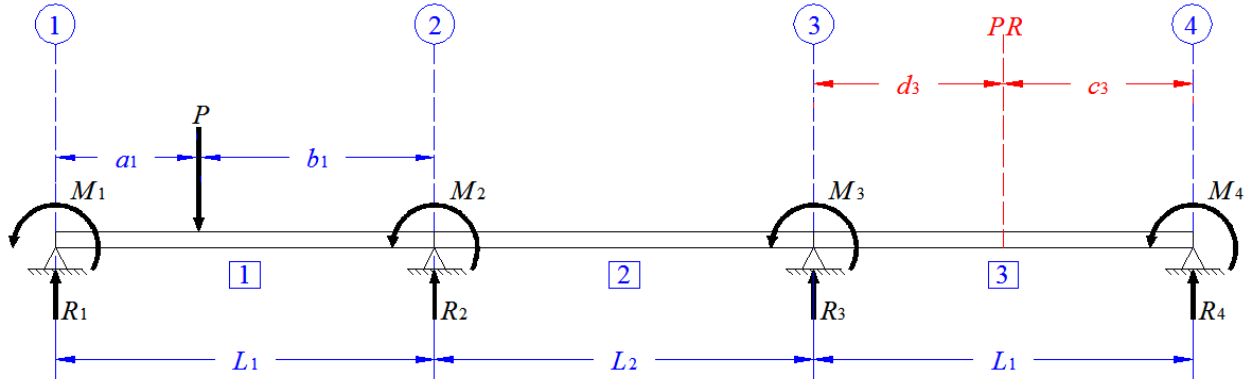


Figura A.22. PR en el claro 3 y P en el claro 1.

La variación de la línea de influencia de momentos (\$Li\$) en este caso es:

$$Li = -R_1(L_1 + L_2 + d_3) - R_2(L_2 + d_3) - R_3(d_3) + P(b_1 + L_2 + d_3) \quad (A.47)$$

Donde \$R_1\$ es obtenida de la ecuación (A.19), \$R_2\$ de la ecuación (A.20) y \$R_3\$ de la ecuación (A.21).

Si PR está en el claro 3, y P está en el claro 2 (Figura A.23):

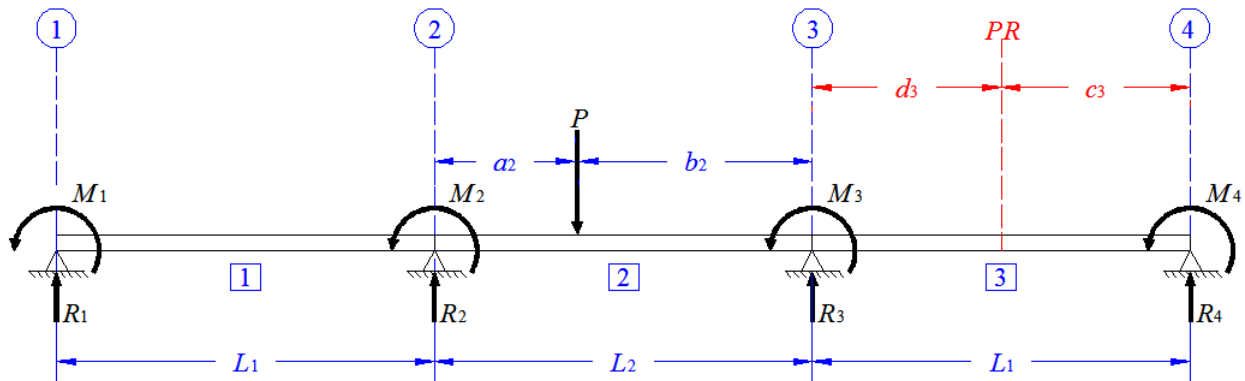


Figura A.23. PR en el claro 3 y P en el claro 2.

La variación de la línea de influencia de momentos (\$Li\$) en este caso es:

$$Li = -R_1(L_1 + L_2 + d_3) - R_2(L_2 + d_3) - R_3(d_3) + P(b_2 + d_3) \quad (A.48)$$

Donde \$R_1\$ es obtenida de la ecuación (A.27), \$R_2\$ de la ecuación (A.28) y \$R_3\$ de la ecuación (A.29).

Si PR y P están en el claro 3, y P está antes de PR (Figura A.24):

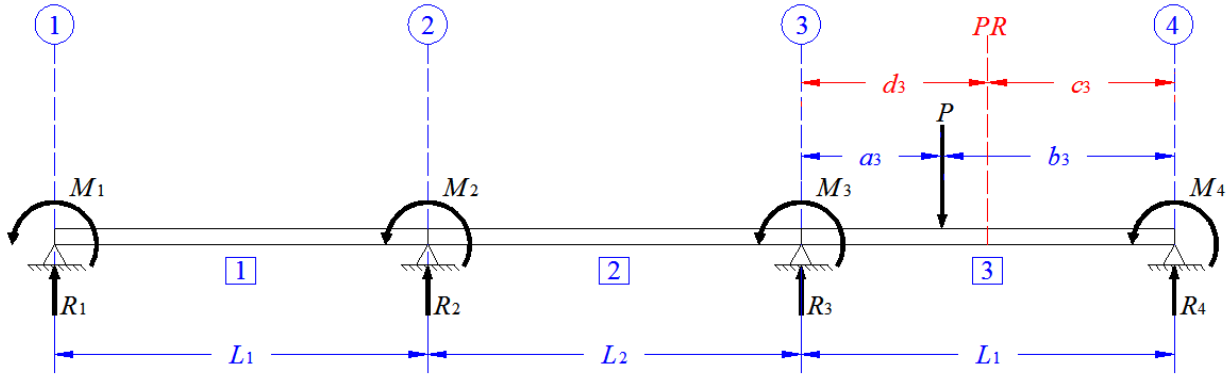


Figura A.24. PR y P en el claro 3, con P antes de PR.

La variación de la línea de influencia de momentos (Li) en este caso es:

$$Li = -R_1(L_1 + L_2 + d_3) - R_2(L_2 + d_3) - R_3(d_3) + P(d_3 - a_3) \quad (\text{A.49})$$

Donde \$R_1\$ es obtenida de la ecuación (A.35), \$R_2\$ de la ecuación (A.36) y \$R_3\$ de la ecuación (A.37).

Si PR y P están en el claro 3, y P está después de PR (Figura A.25):

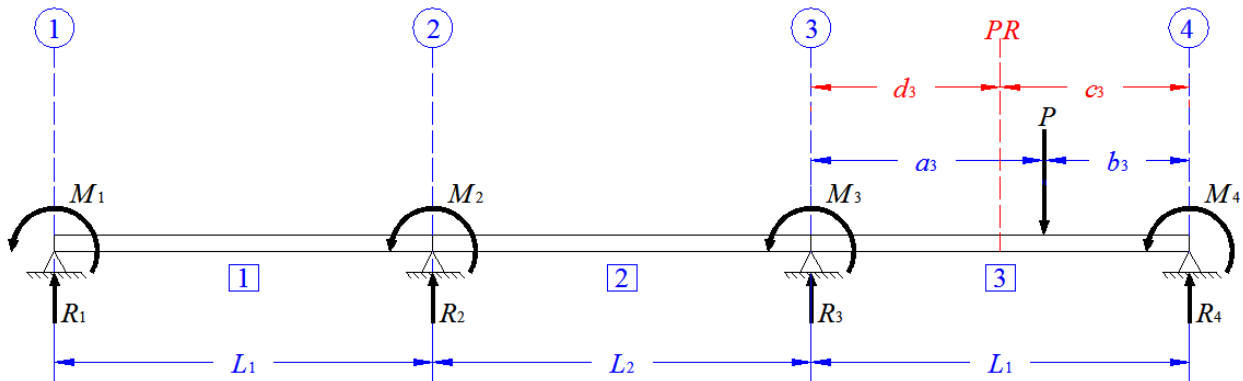


Figura A.25. PR y P en el claro 3, con P después de PR.

La variación de la línea de influencia de momentos (Li) en este caso es:

$$Li = -R_1(L_1 + L_2 + d_3) - R_2(L_2 + d_3) - R_3(d_3) \quad (\text{A.50})$$

Donde \$R_1\$ es obtenida de la ecuación (A.35), \$R_2\$ de la ecuación (A.36) y \$R_3\$ de la ecuación (A.37).

ANEXO B

Por su magnitud, este anexo se encuentra grabado dentro del CD adjunto, el cual contiene los siguientes conceptos:

B.1. Instalador del Programa DIP.

B.2. Algoritmos desarrollados*.

B.3. Manual de usuario del Programa DIP.

*Los algoritmos pueden ser visualizados en el bloc de notas o con el programa *Microsoft Visual Studio* (versión de 2008 en adelante).