

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE
CIRCULAN POR UN PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

**JUAN CARLOS MONROY RINCÓN
MÓNICA ARRUBLA TOVAR**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2013**

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE
CIRCULAN POR UN PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

**JUAN CARLOS MONROY RINCÓN
MÓNICA ARRUBLA TOVAR**

Tesis para optar por el título de Magister en Ingeniería Civil

**ASESOR
Ing. EDGAR EDUARDO MUÑOZ DÍAZ**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2013**

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	16
2. MARCO TEORICO	19
2.1 SISTEMAS DE PESAJE	19
2.1.1 PESAJE ESTÁTICO.....	19
2.1.2 PESAJE DINÁMICO.....	19
2.2 ALGORITMO GENETICO.....	21
2.2.1 ALGORITMO GENETICO EN MATLAB.....	23
2.3 ÚLTIMOS DESARROLLOS Y APLICACIONES DEL SISTEMA BWIM.....	25
2.3.1 EXPERIENCIA EN ESTADOS UNIDOS.....	27
2.3.2 EXPERIENCIA EN ESLOVENIA	28
2.3.3 EXPERIENCIA EN JAPÓN	28
2.3.4 EXPERIENCIA EN COLOMBIA	28
2.3.5 EXPERIENCIA EN MÉXICO.....	30
2.4 ANÁLISIS DE SEÑALES.....	31
2.4.1 FILTROS.....	31
2.4.1.1 FILTROS PASA ALTO.....	32
2.4.1.2 FILTROS PASA BAJO	32
2.4.1.1 FILTROS PASA BANDA	34
2.4.2 TRANSFORMADA DE FOURIER.....	34
2.4.3 ESPECTRO DE POTENCIA.....	35
3. METODOLOGÍA	37

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

3.1	METODOLOGIA PROPUESTA	37
3.2	METODOLOGIA APLICADA	39
3.2.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE.....	39
3.2.2	CARACTERISTICAS GENERALES DEL PUENTE GUAMO	40
3.3	FASE DE CAMPO	42
3.3.1	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN DEL PUENTE	42
3.3.2	ESTUDIO EXPERIMENTAL	50
3.4	FASE DE OFICINA	53
3.4.1	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL DEL TABLERO DEL PUENTE EN SAP.....	53
3.4.2	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL DEL TABLERO DEL PUENTE EN MATLAB	57
4.	PROCESAMIENTO DE DATOS.....	61
4.1	REGISTROS DE ACELERACIÓN Y ESPECTROS ANALIZADOS	63
4.2	CALIBRACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL EN SAP 2000	79
4.3	ALGORITMO GENETICO.....	87
4.3.1	TAMAÑO DE LA POBLACIÓN	87
4.3.2	PARÁMETROS DEL ALGORITMO	87
4.3.3	CRITERIOS DE PARADA.....	88
4.3.4	OPERADORES GENÉTICOS.....	89
4.3.4.1	ALGORITMO RANK.....	89
4.3.4.2	ALGORITMO STOCHASTIC UNIFORM.....	90
4.3.4.3	CROSSOVER FRACTION	90
4.4	RESULTADOS ALGORITMO GENETICO	100

5. ANALISIS DE RESULTADOS	101
5.1 ACELERACIONES Y FRECUENCIAS POR TIPO DE CAMIÓN.....	101
5.2 ACELERACIONES Y FRECUENCIAS ENTRE TIPOS DE CAMIONES.....	105
5.3 FRECUENCIAS MEDIDAS - COMPARACIÓN DE METODOS.....	108
5.4 COMPARACIÓN DE FRECUENCIAS (MEDIDAS Y ESTIMADAS).....	110
5.4.1 PESO SIN VALOR DE IMPACTO.....	110
5.4.2 PESOS CON VALOR DE IMPACTO.....	111
5.5 CARGAS POR EJES OBTENIDAS POR MEDIO DEL ALGORITMO GENÉTICO ...	113
6. CONCLUSIONES.....	122
7. TRABAJOS FUTUROS	124
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Sistema de pesaje en movimiento WIM (weigh in motion)	20
Figura 2-2 Instrumentación sistema CULWAY	26
Figura 2-3 Prototipo a escala del puente Puerto Salgar, con su respectivo sistema de instrumentación	29
Figura 2-4 Instalación de los LVDT que permiten medir deformaciones verticales por el paso del tráfico sobre el puente	30
Figura 3-1 Organigrama para el caso en estudio.	37
Figura 3-2 Localización de la zona.....	40
Figura 3-3 Ubicación del puente Guamo y estación de pesaje en la via	41
Figura 3-4 Puente Guamo vía Bogota-Villavicencio	41
Figura 3-5 Instrumentación puente Guamo	42
Figura 3-6 Materiales utilizados – Sistema de conteo de trafico (a) Cables Piezoelectrónicos, (b) Cinta poket, (c) Loop inductivo, (d) Sikaflex 1a, (e) Computador Portatil, (f) Sistema TRS	43
Figura 3-7 Señalización utilizada	44
Figura 3-8 Demarcación del carril.....	45
Figura 3-9 Corte y limpieza del pavimento	46
Figura 3-10 Instalación del loop y sellado del carril (a) Instalación Loop, (b) Cinta protectora, (c) Aislante de humedad, (d) Sellado de corte	46
Figura 3-11 Instalación de los cables piezoelectricos	47
Figura 3-12 Materiales utilizados – Instrumentación con acelerómetros.....	49
Figura 3-13 Instrumentación utilizada.....	50

Figura 3-14 Porcentaje por categoría de camiones.....	52
Figura 3-15 Sistema implementado.....	53
Figura 3-16 Modelo tridimensional.....	53
Figura 3-17 Sección Viga en I (a) Viga Exterior, (b) Viga Interior	54
Figura 3-18 Sección de la losa.....	55
Figura 3-19 Sección de la Riostra.....	55
Figura 3-20 Condicion de apoyo	56
Figura 3-21 Matriz de rigidez local de cada elemento	58
Figura 3-22 Ensamblaje matriz local de rigidez (a) Ecuación matriz global (b) Matriz de transformación	59
Figura 3-23 Matriz de masa de cada elemento	59
Figura 3-24 Modelo estructural del puente (a) Tablero del puente en Matlab, (b) Tablero del puente en Sap.....	60
Figura 4-1 Registro de aceleraciones del Puente sin carga (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada.....	64
Figura 4-2 Espectros del monitoreo del puente sin carga (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia.....	64
Figura 4-3 Espectrograma puente sin carga.	65
Figura 4-4 Registro de aceleraciones camion C2 -W máx (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada.....	65
Figura 4-5 Espectros del monitoreo del camion C2 - W máx (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia.....	66
Figura 4-6 Espectrograma camión C2 - W máx.....	66

Figura 4-7 Registro de aceleraciones camion C2 - W mín (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada.....	67
Figura 4-8 Espectros del monitoreo del camion C2 - W mín (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia.....	67
Figura 4-9 Espectrograma camión C2 - W mín.....	68
Figura 4-10 Registro de aceleraciones camion C3 - W máx (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada.....	68
Figura 4-11 Espectros del monitoreo del camion C3 - W máx (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia.....	69
Figura 4-12 Espectrograma camión C3 - W máx.....	69
Figura 4-13 Registro de aceleraciones camion C3 - W mín (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada.....	70
Figura 4-14 Espectros del monitoreo del camion C3 - W mín (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia.....	70
Figura 4-15 Espectrograma Camión C3 - W mín.....	71
Figura 4-16 Registro de aceleración camion C3-S2 - W máx (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada.....	71
Figura 4-17 Espectros del monitoreo del camion C3-S2 - W máx (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia.....	72
Figura 4-18 Espectrograma Camión C3-S2 - W máx.....	72
Figura 4-19 Registro de aceleración camion C3-S2 - W mín (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada.....	73
Figura 4-20 Espectros del monitoreo del camion C3-S2 - W mín (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia.....	73
Figura 4-21 Espectrograma Camión C3-S2 - W mín.....	74

Figura 4-22 Registro de aceleración camion C3-S3 - W máx (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada.....	74
Figura 4-23 Espectros del monitoreo del camion C3-S3 - W máx (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia.	75
Figura 4-24 Espectrograma camión C3-S3 - W máx.	75
Figura 4-25 Espectro de Fourier camion C3-S3 - W mín (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada.....	76
Figura 4-26 Espectros del monitoreo del camión C3-S3 - W mín (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia.	76
Figura 4-27 Espectrograma camión C3-S3 - W mín.	77
Figura 4-28 Modos de vibracion del modelo analitico sin tráfico	79
Figura 4-29 Valor de expectativa – algoritmo Rank.	89
Figura 4-30 Reproducción caso 1 –Elite Count.....	90
Figura 4-31 Reproducción caso 2 – Algoritmo Scattered.	91
Figura 4-32 Mutación – algoritmo Adaptive Feasible.	91
Figura 4-33 Gráfica de convergencia camión C3-S3-Mín.	92
Figura 4-34 Gráfica de convergencia camión C3-S3-Máx.....	93
Figura 4-35 Gráfica de convergencia camión C3-S2-Mín.	94
Figura 4-36 Gráfica de convergencia camión C3-S2-Máx.....	95
Figura 4-37 Gráfica de convergencia camión C3-Mín.....	96
Figura 4-38 Gráfica de convergencia camión C3-Máx.	97
Figura 4-39 Gráfica de convergencia camión C2-Mín.....	98
Figura 4-40 Gráfica de convergencia camión C2-Máx.	99

Figura 5-1 Peso vs Aceleración velocidad variable (a) Camión C2, (b) Camión C3, (c) Camión C3-S2, (d) Camión C3-S3.....	103
Figura 5-2 Peso vs Aceleración Velocidad Constante (a) Camión C2, (b) Camión C3, (c) Camión C3-S2, (d) Camión C3-S3.....	104
Figura 5-3 Peso vs Frecuencia Velocidad variable	105
Figura 5-4 Comparación entre tipos de camiones Peso vs Aceleración.....	107
Figura 5-5 Frecuencias medidas para los diferentes tipos de camión (a) Frecuencias pico 1, (b) Frecuencias pico 2.....	107
Figura 5-6 Respuesta del puente con carga dinamica (a) Aceleración, (b) Espectrograma tiempo – frecuencia, (c) Espectro de Fourier, (d) Espectro de potencia.	109
Figura 5-7 Comparación de Frecuencias Medidas y Estimadas (Peso sin impacto).	111
Figura 5-8 Comparación de Frecuencias medidas y estimadas (Peso + Impacto)	113
Figura 5-9 % de Error pesos máximos y mínimos CCDSP.....	114
Figura 5-10 % de Error pesos máximos y mínimos ASSTHO.....	114
Figura 5-11 Incertidumbre de pesos en comparación con las frecuencias	115
Figura 5-12 Comparación de Pesos Legales con Pesos Algoritmo (a) Camión C3S3 máximo, (b) Camión C3-S3 mínimo	119
Figura 5-13 Comparación de Pesos Legales con Pesos Algoritmo (a) Camión C3-S2 máximo, (b) Camión C3-S2 mínimo	120
Figura 5-14 Comparación de Pesos Legales con Pesos Algoritmo (a) Camión C3 máximo, (b) Camión C3 mínimo.....	120
Figura 5-15 Comparación de Pesos Legales con Pesos AlgoritmoC2 (a) Camion C2 máximo, (b) Camión C2 mínimo.....	121

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1 Datos obtenidos con el sistema TRS.....	48
Tabla 4-1 Registros de pesos camión C2.....	61
Tabla 4-2 Registros de pesos camión C3.....	62
Tabla 4-3 Registros de pesos camión C3-S2.....	62
Tabla 4-4 Registros de pesos camión C3-S3.....	63
Tabla 4-5 Frecuencias medidas – Espectro de Fourier y Espectro de Potencia	78
Tabla 4-6 Variación de Módulo de Elasticidad.....	80
Tabla 4-7 Calibración del modelo estructural en Sap 2000.....	80
Tabla 4-8 Distancias entre ejes y pesos por ejes	81
Tabla 4-9 Frecuencias producidas por diferentes camiones en el modelo estructural calibrado	84
Tabla 4-10 Pesos con valor de impacto camión C2	84
Tabla 4-11 Pesos con valor de impacto camión C3	85
Tabla 4-12 Pesos con valor de impacto camión C3-S2.....	85
Tabla 4-13 Pesos con valor de impacto camión C3-S3.....	86
Tabla 4-14 Frecuencia pesos con factor de impacto.....	86
Tabla 4-15 Pesos por eje algoritmo Camión C3-S3 Peso Mínimo.....	92
Tabla 4-16 Pesos por eje algoritmo Camión C3-S3 Peso Máximo.	93
Tabla 4-17 Pesos por eje algoritmo Camión C3-S2 Peso Mínimo.....	94
Tabla 4-18 Pesos por eje algoritmo Camión C3-S2 Peso Máximo.	95
Tabla 4-19 Pesos por eje algoritmo Camión C3 Peso Mínimo.	96

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

Tabla 4-20 Pesos por eje algoritmo Camión C3 Peso Máximo.....	97
Tabla 4-21 Pesos por eje algoritmo Camión C2 Peso Mínimo.	98
Tabla 4-22 Pesos por eje algoritmo Camión C2 Peso Máximo.....	99
Tabla 5-1 Valores representativos por tipo de camión Aceleración – Frecuencia.	102
Tabla 5-2 Valores representativos para todos los tipos de camión Aceleración – Frecuencia	106
Tabla 5-3 Porcentaje de Error entre frecuencias medidas y estimadas (Peso sin impacto)	110
Tabla 5-4 Porcentaje de Error entre frecuencias medidas y estimadas (Peso + Impacto) CCDSP	112
Tabla 5-5 Porcentaje de Error entre frecuencias medidas y estimadas (Peso + Impacto) LRFD	112
Tabla 5-6 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C3S3 Máx.....	115
Tabla 5-7 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C3-S3 Min.	116
Tabla 5-8 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C3-S2 Máx.....	116
Tabla 5-9 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C3S2 Min.....	117
Tabla 5-10 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C3 Máx.	117
Tabla 5-11 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C3 Min.....	118
Tabla 5-12 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C2 Máx.	118
Tabla 5-13 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C2 Min.....	119

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo está orientado a estimar las cargas totales y por eje de los camiones que circulan por un puente instrumentado a través de acelerómetros y un sistema de medición de tráfico, implementando un algoritmo genético identificando nuevos modos de vibración y sus correspondientes frecuencias determinadas experimentalmente.

Los procedimientos que se resumen en este documento se basan en el estudio realizado por el grupo de investigación de estructuras de la Pontificia Universidad Javeriana “Determinación de cargas dinámicas de camiones pesados que transitan en un puente basado en algoritmos genéticos e instrumentación”, cambiando la instrumentación utilizada con LVDTs, usados para obtener los desplazamientos verticales por acelerómetros ubicados sobre la estructura. Tomando medidas de aceleración en el puente a partir de las cuales se obtendrán las frecuencias, y por medio de las frecuencias y un modelo matemático determinar las cargas de los vehículos que transitan sobre el puente.

Para este caso en particular se realizó un estudio sobre un puente simplemente apoyado localizado en una zona de alta fluencia vehicular, donde el tránsito de camiones pesados es común y a pocos metros del puente se encuentra un sistema de pesaje estático.

La instrumentación de este puente se basó en la ubicación de acelerómetros sobre la estructura, seleccionando los camiones pesados que transitan por el puente y analizando la variación de las frecuencias obtenidas con el paso de los vehículos.

En el desarrollo de la estimación de cargas que circulan por un puente se encuentran muchas variables que intervienen en su determinación, así como para la determinación de la frecuencia generada por el paso de los vehículos sobre la estructura.

En la etapa de diseño de cualquier estructura, se estiman unos valores de cargas: muertas, vivas, superpuestas, entre otras; que al final intervienen en el correcto funcionamiento de la misma, pero que en la vida útil de la estructura estas cargas de diseño están sujetas a cambios en su modo de operar, como es el caso de las cargas vivas de carácter dinámico que circulan por un puente. Adicionalmente, el control que se ejerce sobre las diferentes vías del país se encuentra con algunas limitaciones, ya que no siempre es posible obtener el peso de todos los vehículos que circulan por la vía; por cierres temporales que presenta la estación.

Por lo tanto, es necesario encontrar nuevas metodologías para estimar los pesos de los vehículos de una manera rápida, sin intervenciones de tráfico y con una instrumentación viable económicamente.

Para este trabajo se determinaron las cargas dinámicas de los vehículos que circulan por el puente, la influencia que presenta la amplitud del registro de aceleración con la magnitud de la carga, y se identificaron las velocidades a la que pasaron los vehículos por el puente. Finalmente, los pesos obtenidos por medio del algoritmo genético se compararon con los registros medidos en la estación de pesaje estático y con las cargas legales de nuestro país.

OBJETIVOS

Objetivo General

Implementar un algoritmo genético para determinar las cargas dinámicas producidas por camiones pesados que circulan por un puente instrumentado.

Objetivos Específicos

- Desarrollar el modelo analítico computacional de la superestructura del puente seleccionado, para la determinación de las frecuencias verticales.
- Calibrar el modelo analítico computacional concebido de la superestructura del puente seleccionado.
- Calibrar el algoritmo genético desarrollado para el sistema de pesaje en movimiento de las cargas empleando el puente instrumentado y el modelo computacional calibrado.
- Realizar comparaciones analíticas de las cargas dinámicas reales obtenidas mediante este algoritmo genético, con relación a las cargas legales en nuestro País y las cargas medidas en la estación de pesaje.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Los puentes de la Red Vial Nacional de Colombia son estructuras esenciales de la infraestructura vial del país; en general antiguas con deficiencias en mantenimiento durante su vida útil, por lo cual son vulnerables, y que presentan condiciones de deterioro que afectan su operación. Una de las razones del deterioro de estas estructuras es el sobrepeso de los camiones que circulan por las vías troncales y transversales de la Red Vial Nacional, lo que acelera los fenómenos de daños y disminuye apreciablemente su durabilidad.

El aumento de estas cargas ha sido detectado por parte del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) a través de controles realizados en estaciones de pesaje fijas y móviles, encontrándose sobrepesos de los camiones entre el 1% y el 10% en la estaciones fijas y del 4% y el 16% en estaciones móviles, con respecto a las cargas legales del país. Los daños en los puentes causados por este sobrepeso obligan al país a invertir recursos adicionales para su rehabilitación, los cuales se podrían evitar si fuera mejorado el sistema de control de pesos en las vías por parte del Estado y las Concesiones. Una de las líneas de investigación del grupo de “Estructuras” de la Pontificia Universidad Javeriana, realizó la evaluación del puente Puerto Salgar (localizado en la carretera Honda – Río Ermitaño), Colombia, y por medio de su instrumentación, se encontró que los camiones que circulan por este puente presentan en forma aproximada un sobrepeso que varía entre el 10 y el 15% y se comprobó que la carga de diseño C40-95 del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCDSP), no representa en forma suficiente, la carga real de los camiones que transitan por esta estructura.

Los puentes nuevos y existentes de la Red Vial Nacional de Colombia se diseñan y revisan empleando el camión de diseño C40-95 del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCDSP). La carga del camión C40-95 fue determinada por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) y fue ratificada por la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) en el año de 1997 en el estudio: Definición de las cargas de diseño para puentes en Colombia.

Actualmente, el control y estudio de las cargas de los tracto camiones que circulan por la Red Vial Nacional de Colombia se realiza a través de sistemas de pesajes estáticos y en movimiento, que son administrados por parte del INVIAS, el Instituto Nacional de Concesiones (INCO) y las Concesiones. Por lo tanto, teniendo en cuenta que las cargas del código colombiano de puentes son tomadas del código de la ASSTHO (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte); se tiene la necesidad de estudiar si las cargas de diseño son las correctas y que influencia tienen estas en las fallas de las vías nacionales de nuestro país.

En diferentes estudios realizados por el grupo de estructuras, entre los que se encuentra “Causas del colapso de algunos puentes en Colombia”. (Muñoz, 2002). En dicho estudio se mostró que el colapso parcial o total de algunos de los puentes vehiculares de la Red Vial Nacional pudo haber sido ocasionado por la sobrecarga. Por lo anteriormente expuesto, las obras de infraestructura vial, nuevas y existentes, deben tener planes muy claros de mantenimiento que certifiquen su funcionamiento adecuado, estabilidad y vida útil (entre ellos, el control de pesos de los tracto camiones que circulan por las carreteras principales). De acuerdo con lo anterior, es de suma importancia que se complementen los sistemas de control de pesaje convencionales que actualmente funcionan en el país e implementar nuevos sistemas en este sentido, con mayores alcances, mayor cobertura y que tengan un costo relativamente bajo, de tal forma que se consideren económicamente viables consecuentes con el presupuesto asignado por la Nación para esta actividad. Basados en esta necesidad, se propone un sistema de pesaje en movimiento que determine las cargas dinámicas (peso bruto, pesos por eje, tipo de camión, conteo, etc.) debidas a los camiones que circulan por un puente, a través de instrumentación y el desarrollo de un algoritmo genético.

Adicionalmente en uno de los trabajos de grado de la Universidad Javeriana (Pino, 2006), se encontró que es prioritario para el país un estudio que permita determinar la carga viva (específica) para la revisión de puentes existentes, de tal forma que sea parte fundamental de una futura norma Colombiana. De acuerdo con esto se investigó en este trabajo el número, la localización y las características de las estaciones de pesajes existentes de la

Red Vial Nacional, encontrándose que es necesario complementar apreciablemente las existentes e instalar nuevas, de tal forma que se tenga mayor cobertura que permita un control eficiente de los pesos de los tracto camiones en el país.

2. MARCO TEORICO

En el mundo existen dos (2) sistemas de pesaje, estático y en movimiento, los cuales se rigen por las especificaciones internacionales de la norma ASTM E 1318-02 y cuyos fundamentos principales se resumen a continuación.

2.1 SISTEMAS DE PESAJE

2.1.1 PESAJE ESTÁTICO

Se cree que en 1741, se detecta la necesidad de pesar los vehículos pesados que transitan por las vías principales; cuando el Gobierno del Reino Unido incluyó la ley Turnpike, la cual decía que los vehículos debían pagar por el uso de las carreteras según su peso (Quilligan, 2003). El pesaje estático consiste en tomar el peso de un vehículo detenido, ya sea por ejes o su peso total. Hoy en día los principales tipos de pesaje estático que se encuentran en uso son: plataformas fijas y escalas portátiles de ruedas. El de plataforma fija consiste en soportar el peso de un camión por medio de un número de células de carga y un indicador de peso y el de escala portátil de ruedas se ha desarrollado para permitir la medición de cargas de las ruedas, siendo el eje de cada rueda medido individualmente.

2.1.2 PESAJE DINÁMICO

Con respecto al pesaje dinámico hay tres modalidades que se explican a continuación:

a. Pesaje en movimiento WIM (weigh in motion)

Es un proceso que consiste en medir las fuerzas estáticas y dinámicas de los ejes de un vehículo en movimiento (Quilligan, 2003). Es capaz de medir tráfico a una velocidad normal sin necesidad de detener el vehículo, permite almacenamiento de datos del peso de

los vehículos, el volumen de tráfico, su clasificación y velocidad. Por su forma y manera de instalación tiene la ventaja que los conductores no están enterados de la operación de pesaje y no intentan evitarla. Generalmente, se encuentran después de un peaje y cuando detectan un camión sobrecargado, personal encargado se encarga de dirigirlo a una estación fija (estática), de tal forma que se compruebe la sobrecarga y emiten la correspondiente sanción. Este sistema ha servido para supervisar los vehículos sobrecargados que intentan evadir la correspondiente normativa del país y se implementó en el mundo como fruto del crecimiento incontrolable de tráfico en las vías durante las últimas décadas, buscando la protección de las obras de infraestructura vial, especialmente los puentes (Quilligan, 2003) (ver Figura 2-1).

Los sistemas portátiles también están disponibles, pero requieren una larga rampa antes y después de la balanza para evitar oscilaciones inducidas cuando los ejes entran y salen de la rampa (Dolcemascolo & Sjögren, 2008).

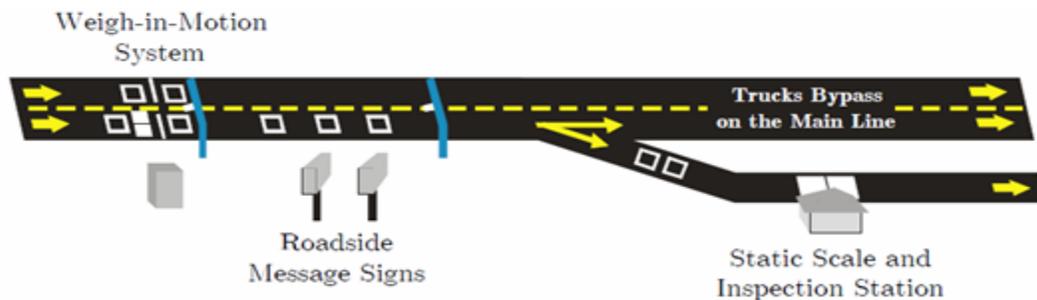


Figura 2-1 Sistema de pesaje en movimiento WIM (weigh in motion)

Fuente: (Quilligan, 2003)

b. Pesaje en movimiento empleando un Puente – BWIM (bridge weigh in motion).

Este método utiliza un puente instrumentado como un sensor de gran tamaño para determinar el peso dinámico por eje y el peso bruto de los camiones pesados que transitan sobre un puente. Esta tecnología consiste en el uso de dispositivos que miden la deformación del puente producida por el paso de los vehículos, detectores de ejes para

recoger información sobre la velocidad del vehículo y la distancia entre ejes, y el equipo de adquisición de datos. La información proporcionada por los sensores de detectores de eje se convierte en peso de los ejes a través de la aplicación de un algoritmo (Quilligan, 2003).

Este sistema proporciona la información sobre factor de impacto, el factor de distribución lateral y los registros de esfuerzos que se utilizan para el análisis adicional del puente. Pueden adecuarse para tener las mismas aplicaciones del sistema WIM, con diferente confiabilidad y precisión, tales como: portátil, instalación rápida, fácil mantenimiento y facilidades económicas.

c. Pesaje en movimiento empleando un Puente – SiWIM

SiWIM es un sistema B-WIM que fue desarrollado en ZAG, Ljubljana, el cual consiste en pavimento libre de sensores de ejes, estos sistemas son cada vez más precisos ya que no están en contacto con los neumáticos, y resultan muy durables (O'Brien, Znidaric, & Ojio, 2008).

Ahora está disponible como un sistema B-WIM comercial, después de usar el algoritmo de Moisés para la obtención de peso de los ejes, SiWIM pasa los resultados a un algoritmo de optimización, que se ha demostrado que aumenta la exactitud de los resultados (Znidaric et al. 1998).

2.2 ALGORITMO GENETICO

Los algoritmos genéticos son métodos que se usan para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acuerdo con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes, postulados por Darwin en 1859.

Por imitación de este proceso, los algoritmos genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende de una adecuada codificación de las mismas (Goldberg 1989).

El algoritmo B-WIM se basa en el hecho de que una carga en movimiento a lo largo de un puente creará deformaciones en proporción al producto del valor de la línea de influencia y la magnitud de la carga del eje (Quilligan, 2003).

Los algoritmos tradicionales usados para el B-WIM tienen algunas limitaciones cuando el sistema estructural no sigue un patrón periódico oscilante entorno a la respuesta estática, tal como lo supuso (Moses, 1979).

Estas fuentes son bastantes inexactas y están relacionadas con la excitación de las fuerzas dinámicas que produce la rueda del camión en contacto con el puente (Ryall, Parke, & Harding, 2000).

Las investigaciones de estos algoritmos se han centrado en el desarrollo de algoritmos en el dominio del tiempo (Dempsey et al. 1998, O'Connor 1987), estos algoritmos tratan de corregir la desviación del valor estático que por el paso del camión podría incidir en la deformación del puente que se mida.

Aportes más recientes (González, 2001), han incluido un enfoque diferente para el cálculo de la línea de influencia en el dominio de la frecuencia, un algoritmo dinámico que tiene en cuenta la dinámica del puente y un algoritmo dinámico de sensor múltiple (MS- B WIM). Pero se observó que el enfoque estático tiene limitaciones debido a la dependencia de las ecuaciones que relacionan la carga aplicada a la deformación medida; por lo tanto las ecuaciones sólo se pueden resolver para un número limitado de ejes.

González y O'Brien sugieren que esta limitación se puede superar generalmente mediante el uso de una gran cantidad de sensores y la aplicación de una técnica de optimización (González 2001), (González y O'Brien, 2002).

2.2.1 ALGORITMO GENETICO EN MATLAB

Matlab es una herramienta computacional sofisticada la cual incluye dentro de su base gran variedad de paquetes de optimización (Moler, 2010), esta herramienta (“Toolbox”) se conoce en el programa como algoritmo genético (ga). El algoritmo genético es una metodología desarrollada para dar solución a problemas donde es necesario realizar procesos de optimización cuyas funciones objetivo tienen muchos mínimos locales o se desconoce la forma de la función objetivo.

Modifica repetidamente una población de soluciones individuales. En cada paso, selecciona individuos aleatoriamente de la población (padres), siguiendo reglas previamente establecidas dentro del algoritmo y los emplea para generar una nueva población (hijos), y así sucesivamente para crear nuevas generaciones de resultados. En cada generación que produce el algoritmo la población va evolucionando hacia una solución óptima. Se puede emplear un algoritmo genético para resolver una variedad de problemas de optimización que no son muy adecuados para los algoritmos clásicos de optimización, incluyendo problemas en los que la función objetivo es discontinua, no diferenciable, estocástico o una no – linealidad alta (Inc, 2007).

El algoritmo emplea tres tipos principales de normas en cada paso para crear la próxima generación de la población actual (Inc, 2007):

- Reglas de selección empleadas para elegir los individuos, los cuales se conocen como “padres”.
- Normas aleatorias de combinación entre los “padres” de la población, con el fin de dar origen a una nueva generación de datos “hijos”.
- Reglas de mutación donde un gen del hijo se extrae y se coloca un nuevo gen.

El algoritmo genético difiere de una optimización clásica (Inc, 2007):

- En una optimización clásica se genera un único punto para cada iteración y la secuencia de puntos se aproxima a una solución óptima; mientras que el algoritmo

genético genera una población de puntos para cada iteración y el mejor punto en la población se aproxima a una solución óptima, no siempre se asegura que el algoritmo encuentre el mínimo global de la función.

- En una optimización clásica se selecciona el siguiente punto de la secuencia mediante un cálculo determinístico, mientras que el algoritmo genético selecciona la siguiente población combinando las características de los individuos reproduciendo o mutando los genes de los padres, de esta forma realiza una búsqueda en varios puntos de la función simultáneamente y determinando probabilísticamente cuales son las características que se deben preservar para las siguientes generaciones.

Dentro del desarrollo del algoritmo genético es importante establecer los siguientes parámetros:

Función Objetivo: La función objetivo a implementar corresponde a la minimización del error cuadrático de la diferencia entre las frecuencias experimentales y el evaluado por el algoritmo, esta función se conoce como *Fitness Function*. Para emplear las funciones globales del Toolbox de Optimización, la función debe aceptar un vector cuya longitud es el número de variables independientes, y debe devolver un escalar.

Número de variables: Es la longitud del vector de entrada de la función objetivo que corresponde al número de variables que quiero evaluar en el problema. Cabe anotar que a medida que el número de variables aumente la complejidad como la dimensionalidad del problema está aumentando.

Opciones: Dentro del código del algoritmo genético se pueden crear las respectivas limitaciones que presente el modelo.

2.3 ÚLTIMOS DESARROLLOS Y APLICACIONES DEL SISTEMA BWIM

El uso de puentes como sistema de pesaje en movimiento (BWIM), fue desarrollado y utilizado en la década de los 70 en los Estados Unidos. Moses en 1979 introdujo un algoritmo genético para determinar la carga móvil sobre un puente instrumentado el cual se basa en una minimización simple de la suma de los cuadrados de las diferencias entre las mediciones en el puente y las deformaciones teóricas correspondientes. El sistema de (BWIN) descrito por Moses fue el primero de su clase y en la actualidad está en uso en los EE.UU. y otros países (Moses 1979).

En los años 80, se desarrolló el sistema B-WIM denominado AXWAY en Australia, el cual se basó en el mismo concepto de la línea de influencia con un componente significativo dinámico. Las líneas de influencia que se utilizan en prácticamente todos los sistemas B-WIM, describen el comportamiento estático del puente bajo una carga móvil (Quilligan, 2003).

En 1986 se desarrolló este sistema con mayor eficacia usando alcantarillas, lo cual se denominó CULWAY (Peter, 1986), este sistema fue concebido y probado por las carreteras principales de Australia occidental. Una de las principales ventajas del uso de alcantarillas es que estas no parecen vibrar cuando el vehículo pasa sobre ellas. Ellas están totalmente restringidas y amortiguadas por el terraplén y el pavimento circundante.

El sistema consta de dos detectores de ejes sobre la superficie de la carretera, uno se ubica a 9,8 m antes de la alcantarilla, y el otro a 0,2 m del centro de la alcantarilla. Cuando el primer eje del vehículo acciona el primer detector de eje, el sistema mide la deformación de referencia en la alcantarilla. Cada vez que se activa el detector de ejes el sistema vuelve a medir la deformación, que es proporcional a la carga por eje. Actualmente, se encuentra más de 200 sistemas en funcionamiento, sus principales características son su robustez, bajo costo y precisión aceptable. En la figura 3.2 se muestra el esquema del sistema CULWAY.

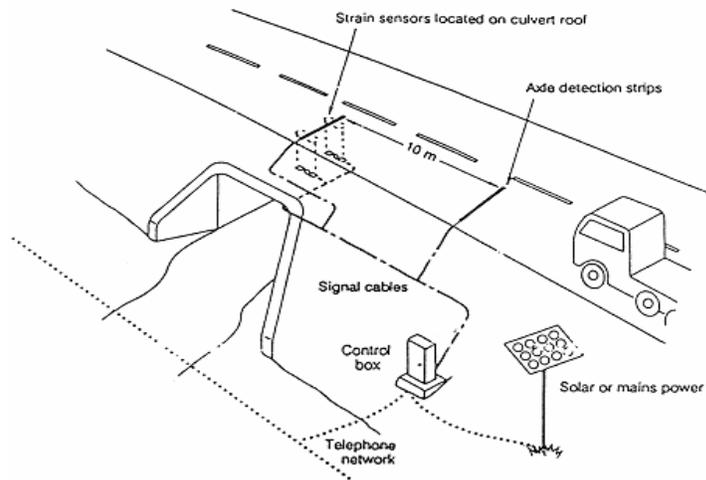


Figura 2-2 Instrumentación sistema CULWAY

Fuente: (Quilligan, 2003)

(Matui y El Hakim, 1989), utilizaron los esfuerzos pico en lugar de la totalidad de los esfuerzos registrados, tiene ventajas de facilidad, sin embargo no utiliza todos los datos y no se tiene la certeza del periodo completo en el que el camión permaneció en el puente.

(Quilligan et al, 2003) desarrollaron algoritmos bidimensionales, los cuales se basan en una extensión de la rutina de optimización previamente introducida, pero con el parámetro adicional de la posición transversal del vehículo incluido. Estos algoritmos fueron desarrollados especialmente para puentes con losas en steel deck, en el cual se lograron buenos resultados, aunque la calibración en el sitio se torna compleja.

(Law et al, 2001, Law y Zhu, 2003) buscaron por medio de la fuerza motriz calcular las fuerzas por eje o ruedas aplicadas al puente, el procesamiento de estos datos puede conducir a una precisión muy buena para el cálculo del peso estático del vehículo. El método de regularización de Tikhonov (Tikhonov y Arsenin, 1977) se emplea para proporcionar suaves soluciones al sistema de la fuerza motriz.

La teoría de la fuerza motriz se ha centrado en modelos unidimensionales para representar la dinámica del puente.

(Zhu y Law, 2001, 2003) realizaron el modelo de un puente en el cual las fuerzas motrices fueron idealizadas como un grupo de dos fuerzas en movimiento que representan dos ejes individuales o un grupo de cuatro fuerzas en movimiento representando cada carga de la rueda.

(González et al, 2008) resolvieron el problema de la fuerza motriz de primer orden mediante la regularización de Tikhonov a un modelo de un puente de placa ortotrópica para lo cual discretizan el puente mediante un modelo de elementos finitos. La solución del problema se basó en una reducción de mínimos cuadrados entre la diferencia de las deformaciones medidas y las obtenidas a través de formulación teórica.

(Rowley, 2008), desarrollo un algoritmo el cual válido mediante un modelo de elementos finitos de un puente en tres dimensiones teniendo en cuenta la interacción que se presenta entre el puente y el vehículo.

A continuación se presentan experiencias adelantadas en algunos países.

2.3.1 EXPERIENCIA EN ESTADOS UNIDOS

En los EE.UU. se han tenido experiencias con el uso del sistema BWIM, una de las más recientes fue las pruebas de campo que se realizaron en un puente ubicado sobre la autopista I-78 en el estado de Alabama, en esas pruebas se usó un algoritmo para la identificación de cargas por eje de vehículos pesados en las carreteras. (Zhao & Uddin, 2010), los resultados obtenidos de la instrumentación del puente resultaron favorables, dejando evidencia que la comparación entre la línea de influencia teórica calculada y la obtenida con el algoritmo propuesto son bastantes similares, concluyendo que esta metodología permite representar el comportamiento real del puente y proporciona un registro de datos confiables para ser usados en el seguimiento de puentes existentes.

2.3.2 EXPERIENCIA EN ESLOVENIA

En Eslovenia se utilizan 6 sistemas SiWIM para cubrir 30 sitios en la red principal de carreteras y 5 localidades en las autopistas. (O'Brien et al., 2008).

(Zndaric et al, 2008), desarrollaron un método directo de medición del factor de amplificación dinámica para todos los eventos de carga en un puente en Eslovenia. Los resultados obtenidos del sistema SiWIM confirmaron la metodología desarrollada por el mismo proyecto (O'Brien et al. 2009). Investigaciones adelantadas por otros autores, los cuales mostraron que los valores del factor de amplificación disminuyen considerablemente con el aumento del peso de los vehículos en el puente.

Como conclusión de estos estudios se obtuvo que el uso de un sistema B-WIM para la medición directa del factor de amplificación dinámica pueda optimizar considerablemente los resultados de la evaluación de un puente.

2.3.3 EXPERIENCIA EN JAPÓN

El primer sistema WIM en Japón fue implementado en la década de 1970 en una autopista. El desarrollo y la instalación del sistema WIM se activó hasta la década de 1990. Hoy en día, la construcción de la red de carreteras está casi terminada, y la sobrecarga de los vehículos comerciales se ha convertido en uno de los temas importantes (O'Brien et al., 2008). Sin embargo no fue hasta la década de los 80 que se dio inicio a la implementación del sistema B-WIM en el Japón.

2.3.4 EXPERIENCIA EN COLOMBIA

El sistema B-WIM no se ha implementado oficialmente en Colombia, ni por INVIAS, INCO, o algunas de las concesiones. Sin embargo, se han realizado diferentes investigaciones iniciales por parte de la Pontificia Universidad Javeriana. Una de ellas fue

el estudio de un prototipo a escala del puente Puerto Salgar, ubicado en la vía Honda Rio Ermitaño; constituyéndose en la primera experiencia nacional en este tema. El estudio consistió en simulaciones numéricas y pruebas a nivel de laboratorio, para las simulaciones se desarrollo un algoritmo genético, además se realizo la instrumentación del modelo como se observa en la Figura 2-3. Los resultados obtenidos fueron la base para la implementación de nuevos proyectos (Acevedo, A. et al., 2006).



Figura 2-3 Prototipo a escala del puente Puerto Salgar, con su respectivo sistema de instrumentación

Fuente:(Edgar Muñoz, Gómez, Núñez, & Florez, 2011)

Otro de los estudios, fue la instrumentación del puente Boquerón ubicado en la vía Bogotá-Villavicencio (E. Muñoz, Gómez, Núñez, & Florez, 2011). Este estudio consistió en la instrumentación del puente a cuatro (4) de las cinco vigas preesforzadas del puente, a las que se les instalo los LVDTs, que permitieron medir los desplazamientos verticales, los cuales están sincronizados con el sistema de medición del tráfico que consistió en la instalación de dos (2) “Loop” inductivos y cuatro (4) piezoeléctricos en cada calzada (E. Muñoz, Et al 2011). La Figura 2-4 muestra la instrumentación realizada en el puente.



Figura 2-4 Instalación de los LVDT que permiten medir deformaciones verticales por el paso del tráfico sobre el puente

Fuente: (Edgar Muñoz et al., 2011)

Por medio del sistema implementado se logró determinar con una buena precisión, el peso total en movimiento de cualquier tipo de camión que transita, por cada carril en función del desplazamiento promedio de las cuatro vigas (E. Muñoz et al., 2011).

2.3.5 EXPERIENCIA EN MÉXICO

En el 2008 la Universidad Autónoma del Estado de México realizó un estudio experimental en dos puentes, los cuales se instrumentaron con el propósito de medir la respuesta en ellos debido a las cargas dinámicas aplicadas. Se colocaron acelerómetros en distintos puntos longitudinalmente (en el centro, en el cuarto y en el tercio de la luz), uno de los puentes se instrumentó con 7 acelerómetros y el otro con 5. Las pruebas se realizaron con vehículos pasando a distintas velocidades y pasando solo un vehículo. El procedimiento para el procesamiento de las señales registradas fue el siguiente:

Se eliminó el ruido de la señal mediante un filtro pasa-banda seleccionando adecuadamente los límites, se integraron las aceleraciones obtenidas para obtener una estimación de las velocidades, posteriormente se integran las velocidades filtradas para obtener una estimación de los desplazamientos.

El estudio concluyo, que la amplificación dinámica de la carga viva en puentes, es un problema complejo que depende de distintas variables, como son: las características dinámicas del puente, las cuales dependen de su geometría, masa y propiedades de los materiales y las características de la carga viva (peso y velocidad), así mismo, se apreció una contribución importante de las condiciones mecánicas de los vehículos (suspensión y amortiguamiento) (Valdés & De la Colina, 2013).

2.4 ANÁLISIS DE SEÑALES

Los conceptos de señales y sistemas aparecen en una variedad muy amplia de campos, las ideas y técnicas asociadas con estos conceptos juegan un papel muy importante en áreas tan diversas de la ciencia y tecnología como comunicaciones, aeronáutica y astronáutica, diseño de circuitos, acústica, sismología, ingeniería biomédica, sistemas de generación y distribución de energía, control de procesos químicos y procesamiento de voz. Las señales son funciones de una o más variables independientes y contienen información acerca de la naturaleza o comportamiento de algún fenómeno.

2.4.1 FILTROS

Un filtro digital es un sistema que dependiendo de las variaciones de las señales de entrada en el tiempo y amplitud, ejecuta un procesamiento matemático sobre la señal; este procedimiento se lleva a cabo generalmente mediante el uso de la Transformada de Fourier; obteniéndose la señal de salida.

Los filtros digitales tienen como entrada y salida una señal analógica o digital. La señal de salida puede cambiar en amplitud, frecuencia o fase dependiendo de las características del filtro digital.

El filtrado digital es parte del procesamiento de la señal digital. Se le da la denominación de digital más por su funcionamiento interno que por su dependencia del tipo de señal a filtrar. Se usa para mitigar o ampliar algunas frecuencias. El procesamiento interno y la entrada del filtro son digitales, por lo que puede ser necesario una conversión analógica-digital o digital-analógica, para el uso de filtros digitales con señales analógicas (Papoulis, 1985).

Existen varios tipos de filtros:

- Filtros pasa alto.
- Filtros pasa bajo.
- Filtros pasa banda.

2.4.1.1 FILTROS PASA ALTO

Un filtro paso alto es un tipo de filtro electrónico cuya respuesta en frecuencia atenúa las componentes de baja frecuencia pero no las de alta, éstas incluso pueden amplificarse en los filtros activos. La alta o baja frecuencia es un término relativo que dependerá del diseño y de la aplicación (Papoulis, 1985).

2.4.1.2 FILTROS PASA BAJO

Un filtro pasa bajo corresponde a un filtro caracterizado por permitir el paso de las frecuencias más bajas y atenuar las frecuencias más altas. El filtro requiere de dos terminales de entrada y dos de salida, también denominada bipuerto, así todas las frecuencias se pueden presentar a la entrada, pero a la salida solo estarán presentes las que permita pasar el filtro.

De la teoría se obtiene que los filtros están caracterizados por las Funciones de Transferencia, así cualquier configuración de elementos activos o pasivos que consigan cierta función de transferencia serán considerados como un filtro.

En particular la función de transferencia de un filtro pasa bajo de primer orden corresponde a:

$$H(s) = k \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_c}} \quad (2-1)$$

Donde la constante k es sólo una ponderación correspondiente a la ganancia del filtro, y la real importancia reside en la forma de la función de transferencia la cual determina el comportamiento del filtro (Papoulis, 1985)

$$\frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_c}} \quad (2-2)$$

En la función de transferencia anterior ω_c corresponde a la frecuencia de corte propia del filtro, aquel valor de frecuencia para el cual la amplitud de la señal de entrada se atenúa (3 dB). De forma análoga al caso de primer orden, los filtros de pasa bajo de mayor orden también se caracterizan por su función de transferencia, por ejemplo la función de transferencia de un filtro paso bajo de segundo orden corresponde a:

$$H(s) = K \frac{\omega_o^2}{s^2 + 2\xi\omega_o s + \omega_o^2} \quad (2-3)$$

Donde ω_o es la frecuencia natural del filtro y ξ es la relación de amortiguamiento de este (Papoulis, 1985).

2.4.1.1 FILTROS PASA BANDA

Un filtro pasa banda es un tipo de filtro electrónico que deja pasar un determinado rango de frecuencias de una señal y atenúa el paso del resto.

2.4.2 TRANSFORMADA DE FOURIER

Cualquier función periódica $f(t)$ con periodo T , que sea continua por tramos e integrable sobre cualquier intervalo, puede representarse mediante la serie de Fourier exponencial compleja:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\omega_0 t} \quad (2-4)$$

La consistencia de la representación de una función periódica en forma de serie de Fourier se basa en que dicha función queda definida mediante la especificación de los coeficientes c de dicha serie. Pues bien, puede demostrarse así mismo que cualquier función $f(t)$ no periódica también puede representarse de un modo análogo de la forma:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2-5)$$

Siendo esta expresión la representación de Fourier de una función no periódica, similar a la serie de Fourier de la función periódica 2-4. $F(\omega)$ recibe el nombre de Integral de Fourier o Transformada de Fourier de la función $f(t)$ y puede expresarse como:

$$F(\omega) = \mathcal{F}[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2-4)$$

En virtud de ello, cualquier función no periódica dada tiene dos modos equivalentes de representación: en el dominio del tiempo $f(t)$ y otro en el dominio de la frecuencia $F(\omega)$. La representación gráfica de $F(\omega)$ en función de la frecuencia angular ω se denomina espectro de Magnitud de la función $f(t)$ y permite describirla en el dominio de la frecuencia, es decir representa la composición de frecuencias de la superposición de diversas funciones simples, de igual forma, que la representación de $f(t)$ frente a z define dicha función en el dominio del tiempo. La ecuación 2-4 permite transformar la función $f(t)$, en el dominio del tiempo, en su equivalente $F(\omega)$, en el dominio de la frecuencia, (Hardy & Rogosinski, 1956).

2.4.3 ESPECTRO DE POTENCIA

El espectro de potencia (PS) se define como la Transformada de Fourier de la función de autocorrelación.

$$PS(f) = \sum_{n=0}^{N-1} r_{xx}(n)e^{-2\pi fT} \quad (2-5)$$

Donde $r_{xx}(n)$, la función de autocorrelación, se define como

$$r_{xx}(n) = \sum_{k=1}^N x(k)x(k+n) \quad (2-6)$$

El PS permite determinar la distribución de la potencia de una señal a lo largo de un intervalo de frecuencias. El Espectro de Potencia puede ser evaluado aplicando la Transformada de Fourier sobre la señal entera; sin embargo, el promedio de espectros se

emplea, particularmente cuando la forma de onda disponible (señal truncada) es sólo una muestra de una señal de mayor longitud, caso bastante común en el análisis de bioseñales. En estas situaciones la evaluación del Espectro de Potencia se convierte en un proceso de estimación que contribuye a mejorar las propiedades estadísticas de los resultados.

Cuando el Espectro de Potencia se calcula vía Transformada de Fourier y posteriormente se promedia, se conoce como *periodograma*, (Echeverry, Guarnizo Lemus, & Orozco G., 2007)

3. METODOLOGÍA

3.1 METODOLOGIA PROPUESTA

A continuación se presenta cada una de las etapas que se propusieron para la ejecución de este proyecto de investigación, con su correspondiente descripción.

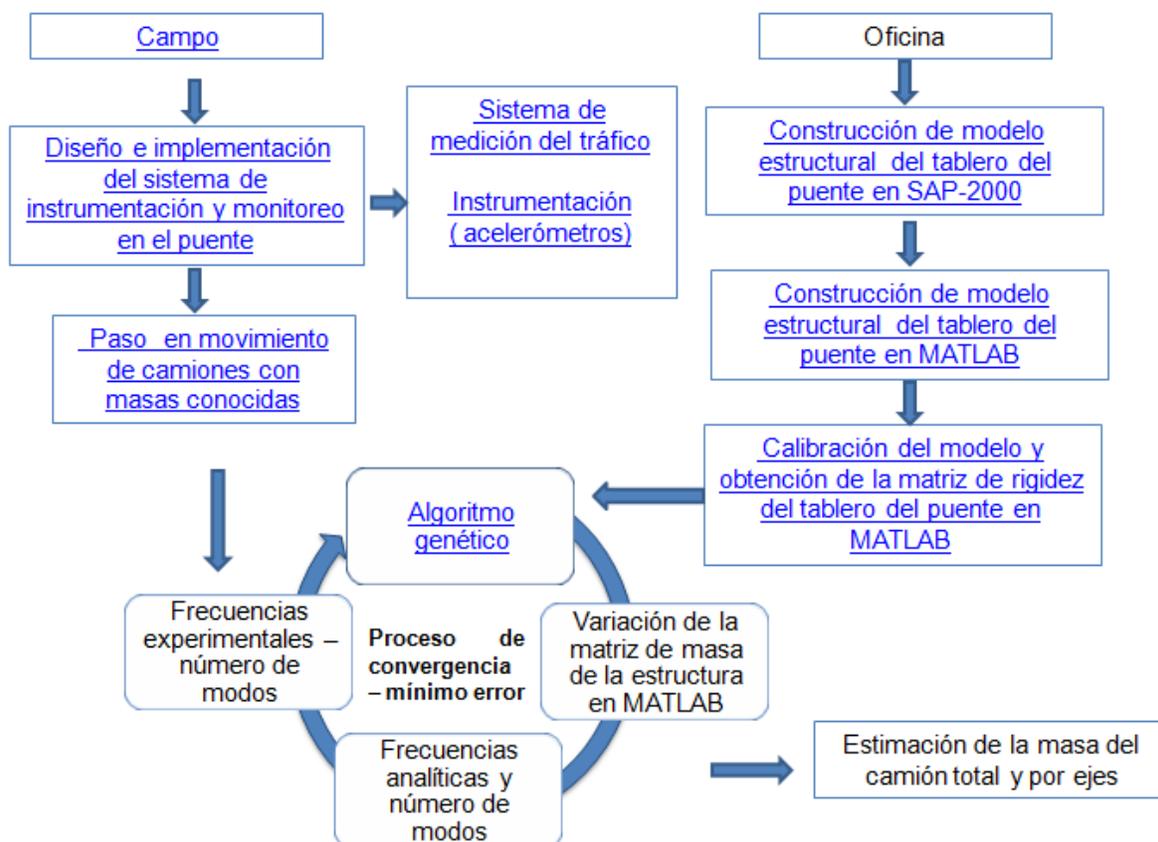


Figura 3-1 Organigrama para el caso en estudio.

a. Recopilación de información existente

Consiste en recopilar y evaluar la información técnica existente del puente seleccionado (Puente Guamo vía Bogotá - Villavicencio), por intermedio del Instituto Nacional de Vías y las empresas consultoras relacionadas. Incluye planos de diseño, construcción o rehabilitación, información histórica y actual del tráfico, estudios anteriores de rehabilitación, y el levantamiento geométrico detallado de la superestructura.

b. Instalación e Instrumentación del sistema electrónico

La instrumentación del puente consiste en dos tipos de instalación: Sistema de tráfico y acelerómetros, el sistema de tráfico consiste en la instalación de los cables piezoeléctricos los cuales permitirán suministrar los datos de velocidad y distancia entre ejes de los camiones que circulan por dicho puente. los acelerómetros se ubican en un costado a lo largo del carril a intervenir con la respectiva tarjeta de adquisición y computador, para la toma de registros de aceleración que sirven para la estimación de las frecuencias verticales del tablero del puente.

c. Desarrollo del modelo estructural

Para esta etapa se empleará el programa estructural SAP 2000 o similar, con el cual se construirá el modelo de la superestructura del puente tipo parrilla o elementos finitos.

d. Desarrollo y calibración del modelo estructural

Para la calibración del modelo estructural del puente seleccionado se realizan pruebas con camiones (C2, C3, C-2 S-2, C-3 S-3) circulando sobre el puente instrumentado a distintas velocidades, a los cuales se les conoce su peso y geometría.

e. Desarrollo y validación del algoritmo genético

Consiste en implementar un algoritmo genético para la determinación de las cargas dinámicas que circulan sobre el puente seleccionado, considerándolo inicialmente como un problema inverso, basados en los siguientes parámetros con los cuales se realiza su validación: Concurrencia entre las frecuencias verticales medidas con respecto a las obtenidas analíticamente del modelo estructural calibrado. De esta forma se estima el peso del camión que produce las frecuencias verticales medidas.

f. Comparaciones de las cargas obtenidas respecto a las cargas de Diseño C-40-95

De acuerdo con las cargas que obtendremos como resultado del desarrollo del algoritmo genético, se compararan dichas cargas, con las establecidas en el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes, y de esta forma determinar la confiabilidad de estimar la carga viva que circula sobre el puente.

3.2 METODOLOGIA APLICADA

A continuación se presenta cada una de las etapas que se realizaron para la ejecución de este proyecto de investigación, el cual incluyó dos fases esenciales, fase de campo y fase de oficina las cuales se realizaron paralelamente durante el desarrollo del proyecto.

3.2.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE

Consistió en recopilar y evaluar toda la información técnica existente del puente Guamo vía Bogotá - Villavicencio, dicho puente fue seleccionado por cumplir con los requisitos necesarios para implementar el sistema de pesaje en movimiento; ser una estructura de una sola luz, localizado en vía principal y donde no exista curva horizontal. El cual fue aprobado por la concesión COVIANDES.

3.2.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PUENTE GUAMO

3.2.2.1 UBICACIÓN

Se encuentra situado en el oriente del Departamento de Cundinamarca municipio de Cáqueza, sobre la cordillera oriental de Colombia; limita con los municipios de Fosca, Une, Chipaque, Ubaque y Quetame. Se localiza en la abscisa K22+990 (Bilpor (2005), INVIAS (2005) y COVIANDES (2005)) en la vía Bogotá – Villavicencio. Ver Figura 3-2.



Localización de Cáqueza en
Colombia.



Localización de Cáqueza en
Cundinamarca

Figura 3-2 Localización de la zona

Fuente: www.caqueza.cundinamarca.gov.co

Este puente pertenece a la Concesión de COVIANDES S.A y fue seleccionado para nuestra investigación debido a que a pocos metros está ubicada la Estación de pesaje Alto de la cruz (PR 22+400), además, de cumplir con ser una estructura de una sola luz, sin curva horizontal. La Figura 3-3 muestra un esquema con la ubicación del puente.

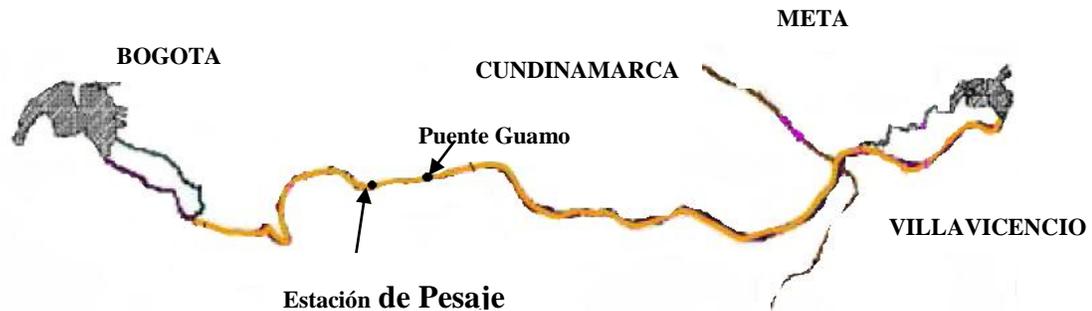


Figura 3-3 Ubicación del puente Guamo y estación de pesaje en la vía

3.2.2.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Es un puente tipo viga, de una sola luz con una longitud entre ejes de 29.5m, y un ancho de 13m con bermas en ambos sentidos y andén de 0.75m, dos carriles uno de subida y uno de bajada. Consta de 4 vigas pos tensadas en I con una altura de 1.60m, pavimento en asfalto y barandas metálicas, con una losa de 0.20m de espesor según los planos suministrados por la concesión (Anexo 1); sin embargo, se observó con la visita en campo una mejora a la losa con “Stell Deck”, esta información no fue posible obtenerla en detalle. La Figura 3.4 muestra una foto del puente.



Figura 3-4 Puente Guamo vía Bogotá-Villavicencio

3.3 FASE DE CAMPO

A continuación se detallan las actividades adelantadas en las visitas realizadas al puente.

3.3.1 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN DEL PUENTE

La Instrumentación del Puente Guamo, comprende dos partes, sistema de conteo de tráfico y la instrumentación con acelerómetros, como se muestra en la Figura 3-5.

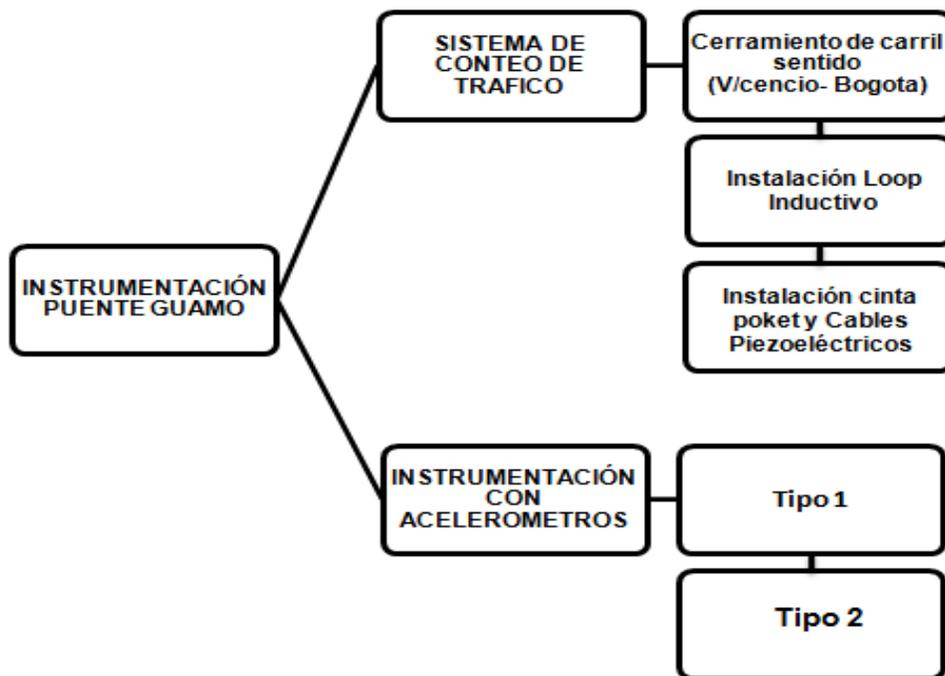


Figura 3-5 Instrumentación puente Guamo

3.3.1.1 INSTRUMENTACIÓN SISTEMA DE CONTEO DE TRÁFICO

La Pontificia Universidad Javeriana adquirió el sistema TRS, fabricado por la empresa Colombiana CONTELEC, especialistas en la adecuación de sistemas de pesajes estáticos y en movimiento, el cual permite tener conocimiento en tiempo real de la velocidad, el

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBLO INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

número de ejes y la distancia entre ejes de los diferentes tipos de vehículos que circulan por el carril instrumentado.

Materiales

En la instrumentación se utilizaron dos (2) cables piezo eléctricos, ocho (8) metros de cinta poket, 30 metros de cable Loop, dos (2) frascos de sellante Loop sikaflex 1a, y el equipo de conteo de tráfico el cual consiste en una fuente de voltaje regulada de 12V 3 Amp, (2) dos tarjetas interface para detección del Loop, una (1) tarjeta interface para detección de 4 sensores Piezoeléctricos, una (1) tarjeta interface digital con puerto de comunicaciones, una (1) caja de conexiones con borneras, conectores y protección AC y una (1) UPS de 750 VA regulada, adicionalmente viene con un software de captura y administración de información. (Ver figura 3-6).



(a) Cables Piezoeléctricos



(b) Cinta poket



(c) Loop inductivo



(d) Sikaflex 1a



(e) Computador Portátil



(f) Sistema TRS

Figura 3-6 Materiales utilizados – Sistema de conteo de trafico (a) Cables Piezoeléctricos, (b) Cinta poket, (c) Loop inductivo, (d) Sikaflex 1a, (e) Computador Portatil, (f) Sistema TRS

Procedimiento de la Instalación del Sistema de Conteo de Tráfico

La empresa CONTELEC, fue la encargada de realizar los cortes del pavimento e instalar (1) un loop inductivo y (2) dos cables piezoeléctricos tal como se describe a continuación.

a. Cerramiento del carril a intervenir (Sentido Bogotá – Villavicencio)

La Concesión COVIANDES S.A, fue la encargada de suministrar lo requerido para el cierre del carril, dispuso la señalización, el personal capacitado y la iluminación.

Para evitar traumatismos en la vía, teniendo en cuenta que es una carretera principal, el cierre del carril se realizó en la noche durante 6 horas. Iniciando el cerramiento a partir de las (10 pm) diez de la noche del día 22 de febrero de 2012, hasta las (4 am) cuatro de la mañana del día 23 de febrero de 2012, tiempo en el cual se llevó a cabo el procedimiento, (ver Figura 3-7)



Figura 3-7 Señalización utilizada

b. Corte del pavimento - carril a intervenir (Sentido Bogotá – Villavicencio)

Inicialmente se realizó la demarcación de la vía con tiza, dibujando un polígono con (8) ocho lados, cuyas dimensiones fueron 2.10x2.10m, se realiza en forma de polígono para que el loop inductivo tenga más agarre y no se desprenda fácilmente.

Para que la demarcación sea muy precisa se sitúa en cada una de las líneas del polígono un alambre y con pintura se repasa, luego se retira dicho alambre quedando perfectamente marcado el paso que debe seguir la cortadora, (ver Figura 3-8)



Figura 3-8 Demarcación del carril

La cortadora sigue la marcación y debe ir a una profundidad de 5cm, esta profundidad se verifico con un clavo, la medida debe ser muy precisa.

Finalmente se realiza la limpieza del carril, aplicando abundante agua hasta que deje de salir el polvillo y se seca, es importante que la superficie quede muy seca, como se muestra en la Figura 3-9.



Figura 3-9 Corte y limpieza del pavimento

c. Instalación Loop Inductivo

El Loop se introduce en la abertura pasándolo varias veces, finalmente se instala un aislante de humedad y se realiza el sellado con sikaflex 1a (ver Figura 3-10)



(a) Instalación Loop



(b) Cinta protectora



(c) Aislante de humedad



(d) Sellado del corte

Figura 3-10 Instalación del loop y sellado del carril (a) Instalación Loop, (b) Cinta protectora, (c) Aislante de humedad, (d) Sellado de corte

d. Instalación de la cinta poket y de los cables piezoeléctricos

La cinta poket se adhiere al pavimento, es como una bolsa, la cual protege los cables piezoeléctricos. La cinta poket debe quedar separada a 3.5m la una de la otra esto con el fin de garantizar que cuando el vehículo entre al carril el sistema TRS, sea capaz de registrarlo, (ver Figura 3-11).



Figura 3-11 Instalación de los cables piezoeléctricos

e. Calibración del sistema de conteo de tráfico

Una vez configurado el software se realizaron pruebas con un vehículo de (2) dos ejes (un automóvil), consistió en pasar con el vehículo por los sensores a una serie de velocidades (20km/h – 25km/h – 30km/h – 35km/h).

Así mismo, se tomaron las medidas entre ejes y la total del vehículo para después compararlo con lo que suministraba el sistema, en la Tabla 3-1 se presentan los datos obtenidos.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

Número de Medidas	Medidas Registradas por el sistema	Medidas tomadas
1	Velocidad (km/h) : 22	20
	Separación entre ejes (m) : 2.53	2.58
	Longitud Total (m) : 5.39	5.86
2	Velocidad (km/h) : 27	25
	Separación entre ejes (m) : 2.53	2.58
	Longitud Total (m) : 5.42	5.86
3	Velocidad (km/h) : 32	30
	Separación entre ejes (m) : 2.56	2.58
	Longitud Total (m) : 6.04	5.86
4	Velocidad (km/h) : 34	35
	Separación entre ejes (m) : 2.57	2.58
	Longitud Total (m) : 6.01	5.86

Tabla 3-1 Datos obtenidos con el sistema TRS

3.3.1.2 INSTRUMENTACIÓN CON ACELERÓMETROS

La Pontificia Universidad Javeriana, fue la encargada de prestar los acelerómetros para la instrumentación del puente. Los materiales que se utilizaron se describen a continuación.

Materiales

Se utilizaron acelerómetros tipo Wilcoxon 731A de balance de fuerzas uniaxial, los cuales registran movimientos en un rango de frecuencias de 0 a 200Hz y aceleraciones de hasta 64g. Tarjeta de memoria, y un portátil. (Ver figura 3-12)

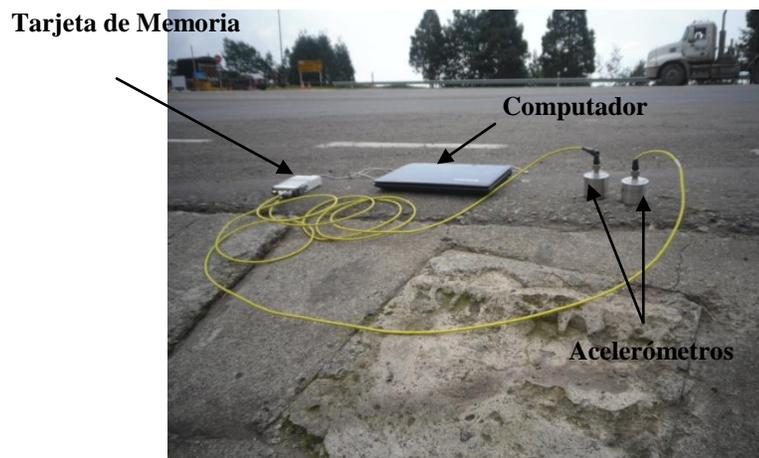


Figura 3-12 Materiales utilizados – Instrumentación con acelerómetros

Procedimiento de la instrumentación con acelerómetros

Con el propósito de medir la respuesta del puente ante las cargas dinámicas aplicadas, se colocaron acelerómetros en sentido longitudinal. Se ubicaron en el centro y en el tercio de la luz. Los puntos de registro correspondieron a un sólo carril en este caso sentido Villavicencio Bogotá.

La instrumentación utilizada incluye tres acelerómetros en el centro y en el tercio de la luz, como se muestra en la Figura 3-13, se instrumentó de esta manera para obtener el comportamiento del puente a lo largo del carril con el paso del vehículo. El intervalo de muestreo dependía del momento que por el puente pasara un solo vehículo por el carril instrumentado.

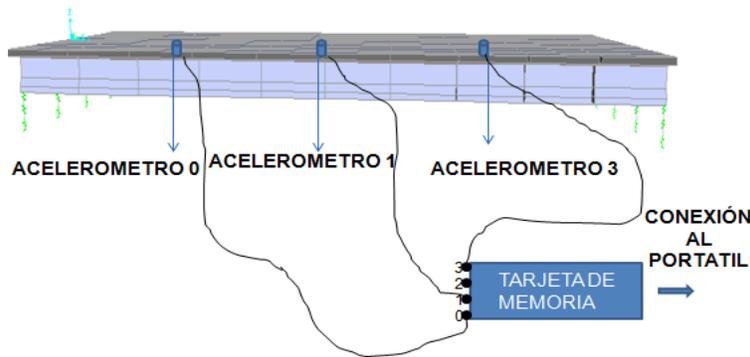


Figura 3-13 Instrumentación utilizada

3.3.2 ESTUDIO EXPERIMENTAL

3.3.2.1 CONDICIONES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Debido a limitaciones económicas solo se instrumentó un carril, el sentido Villavicencio – Bogotá, esta selección dependió de un análisis preliminar que se realizó en el puente, en el cual se determinó que este sentido ofrecía más camiones cargados que el otro, además, nos favorecía que la báscula estuviera después del puente para tomar exclusivamente el registro del peso del camión al cual se le había obtenido la señal.

Para el buen funcionamiento del sistema de conteo de tráfico, se presentan las siguientes limitaciones:

- Pisar los dos sensores piezoeléctricos con todos sus ejes y también deben ser bien identificados por el sensor Loop. Con el simple hecho de que un eje no pise uno de los sensores la clasificación será fallida.
- El sistema se basa en los tiempos entre pisadas de los ejes a los sensores piezoeléctricos, con base en estos tiempos se hace todos los cálculos para dar la

información y es por eso que se requiere que los tiempos sean uniformes y no varíe la velocidad, es decir la aceleración de los vehículos sea lo más cercana a cero.

- Se pueden presentar errores en la clasificación del vehículo, cuando estos cruzan con velocidades superiores a los 45 Km/h.
- La separación entre vehículos para que el sistema identifique por aparte cada vehículo debe ser como mínimo de 3m caso contrario el sistema entenderá como un sólo vehículo el paso de 2 o más.

3.3.2.2 MONITOREO DEL PUENTE

El puente se monitoreó en tiempo real y se obtuvo un registro del efecto del paso de los camiones en el puente como se muestra a continuación.

a. Medición del Tráfico

Para el estudio se registraron 7737 vehículos que circularon por la vía del sentido Villavicencio-Bogotá. Este monitoreo se realizó por (5) cinco días, entre las fechas del veintitrés de febrero (23-02-2013) al veintisiete de febrero (27-02-2013), y durante el día, de siete de la mañana (7 am) a siete de la noche (7 pm). El registro de camiones que se ajustaron a las limitaciones de la prueba fue de 131 camiones, los cuales se dividen en (4) cuatro tipos de camiones C2, C3, C3-S2, C3-S3, y el porcentaje de cada uno de los tipos de camiones se muestra en la Figura 3-14. Con el sistema de conteo de tráfico instalado, además de obtener el tipo de camión se obtuvo la velocidad y distancia entre ejes de los camiones, (ver Anexo 2).

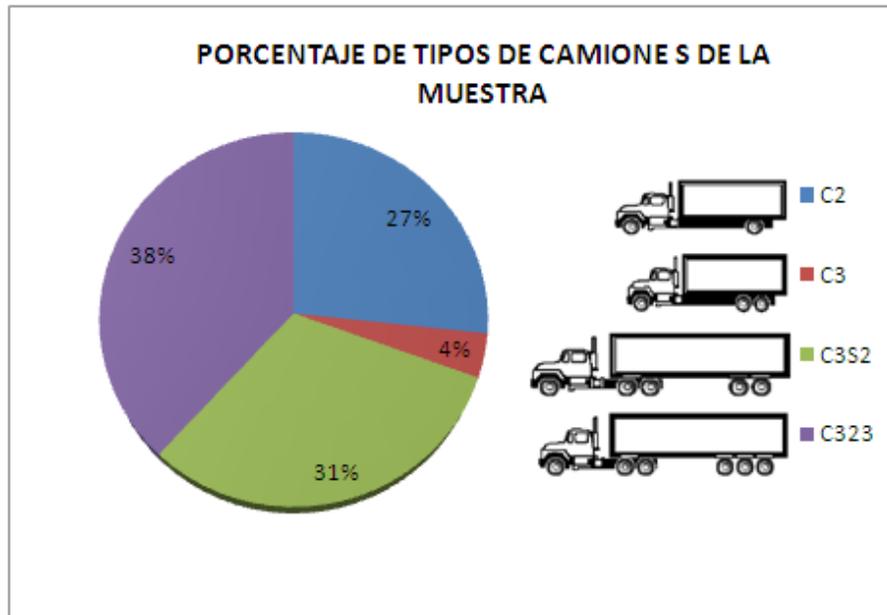


Figura 3-14 Porcentaje por categoría de camiones

b. Registro de Señales

Los registros de aceleración obtenidos muestran dos columnas una correspondiente al tiempo y la otra correspondiente a los registros de aceleración en (g); este registro aparece para cada uno de los acelerómetros instalados (A0 –A1 – A2 – A3). El sistema implementado nos arroja datos de aceleraciones y datos característicos del vehículo que transita por el puente, como se muestra en la Figura 3-15.

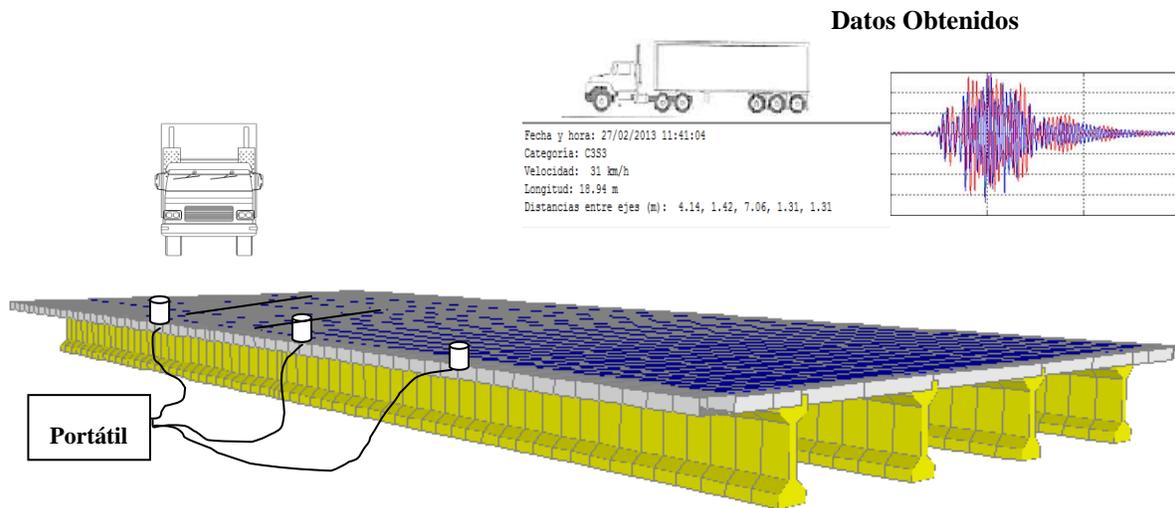


Figura 3-15 Sistema implementado

3.4 FASE DE OFICINA

3.4.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL DEL TABLERO DEL PUENTE EN SAP

Basados en los planos de diseño del puente, se elaboró el modelo estructural del tablero tipo “parrilla” que está compuesto por elementos finitos discretos tipo frame en el programa SAP-2000 (ver Figura 3-16).

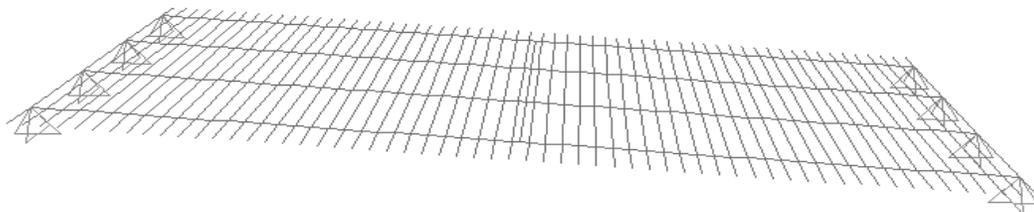


Figura 3-16 Modelo tridimensional

3.4.1.1 SECCIONES

Las secciones fueron tomadas de los planos de diseño y de información de los ingenieros de la concesión.

a. Viga en I y andén

Se establece la sección de la viga en I en sección compuesta, una sección que incluye andén a la viga exterior y a la viga interior la sección con la losa, como se muestra en la Figura 3-17.

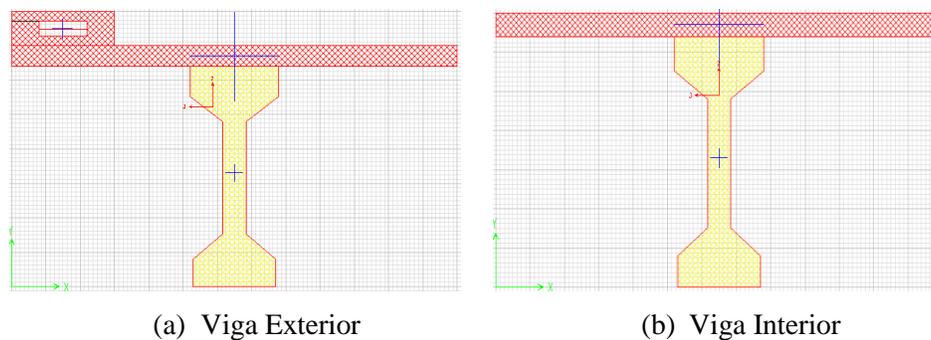


Figura 3-17 Sección Viga en I (a) Viga Exterior, (b) Viga Interior

b. Losa

En la visita realizada al puente se evidenció que la losa no coincidía con los planos que fueron suministrados por la concesión, ya que se había realizado una adecuación al puente. Se reemplazó la losa de 0.20m por una losa con “Stell Deck” de espesor 0.15m, estas medidas fueron verificadas en campo. Se estableció la sección de losa, como frame de 0.50m y un espesor de 0.15m debido a que fue discretizada cada 0.50m (ver Figura 3-18).

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBLO INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

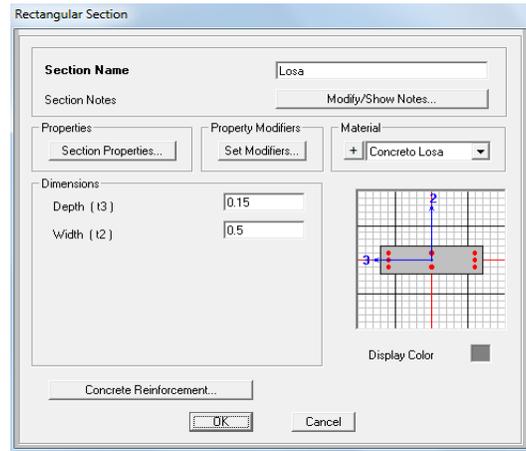


Figura 3-18 Sección de la losa

c. Riostra

La riostra empleada se baso en los lineamientos que se indicaban en los planos de diseño, cuyas medidas son de 4.40m de altura por un ancho de 0.25m. (ver Figura 3-19)

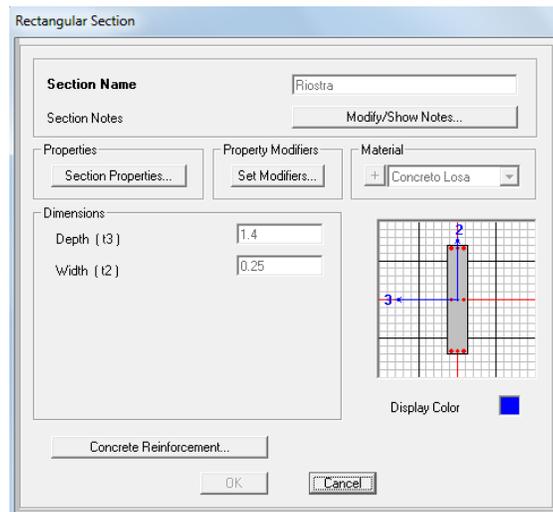


Figura 3-19 Sección de la Riostra

3.4.1.2 CONDICIONES DE APOYO

De acuerdo con las condiciones del tablero del puente se estableció apoyo de segundo orden (simplemente apoyado), para cada extremo de las vigas como se muestra en la Figura 3-20.

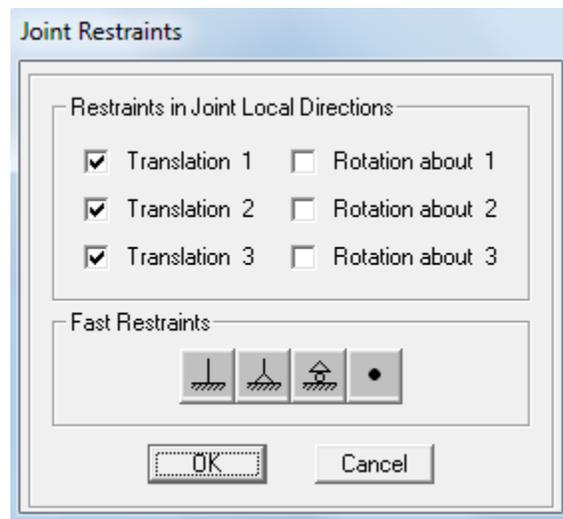


Figura 3-20 Condicion de apoyo

3.4.1.3 ANÁLISIS DE CARGAS

Las cargas establecidas para el modelo de la losa del puente se asignaron como masas de la siguiente forma:

a. Cargas Muertas

En el análisis de la estructura se tuvo en cuenta como carga muerta, el peso propio de la estructura, (viga, losa, andén, carpeta asfáltica y la baranda) las cuales se consideraron así:

Carpeta asfáltica:

El espesor de la carpeta asfáltica se obtuvo de las medidas que se realizaron en campo e= 0.04m, y se cargó a las vigas por área aferente así:

Vigas Exteriores		Vigas Interiores	
$\gamma_{pavimento}$: $22.5 \frac{kN}{m^3}$	$\gamma_{pavimento}$: $22.5 \frac{kN}{m^3}$
$e_{pavimento}$: 0.04m	$e_{pavimento}$: 0.04m
$\gamma_{pavimento} * e_{pavimento}$: $0.9 \frac{kN}{m^2}$	$\gamma_{pavimento} * e_{pavimento}$: $0.9 \frac{kN}{m^2}$
<i>Longitud aferente</i>	: 2.50m	<i>Longitud aferente</i>	: 3.25m
<i>Peso del Pavimento</i>	: $2.25 \frac{kN}{m}$	<i>Peso del Pavimento</i>	: $2.93 \frac{kN}{m}$

Estas cargas se asignaron como carga distribuida en los elementos tipo “frame” del modelo en Sap-2000.

Baranda:

Se estableció un peso de $0.25 \frac{kN}{m}$, y se asignó a las vigas como carga distribuida en frame.

3.4.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL DEL TABLERO DEL PUENTE EN MATLAB

Para la elaboración del modelo estructural en Matlab es importante desarrollar una metodología que permita extraer de un modelo previo realizado en SAP 2000 la siguiente información (ver Anexo 3).

$$[K_{global}] = [T]^T [K_{local}] [T] \quad [T_0] = \begin{bmatrix} \cos \phi_{XX} & \cos \phi_{YX} & \cos \phi_{ZX} \\ \cos \phi_{XY} & \cos \phi_{YY} & \cos \phi_{ZY} \\ \cos \phi_{XZ} & \cos \phi_{YZ} & \cos \phi_{ZZ} \end{bmatrix}$$

(a) Ecuación matriz global (b) Matriz de transformación

Figura 3-22 Ensamblaje matriz local de rigidez (a) Ecuación matriz global (b) Matriz de transformación

d. Obtención de la matriz de masa en Matlab

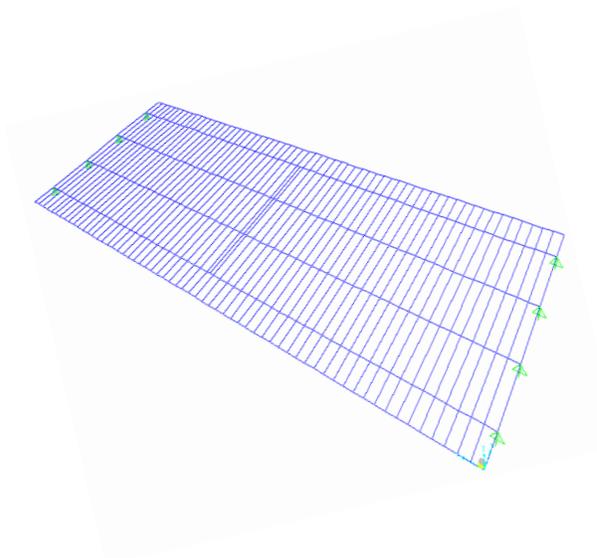
Una vez definidos los parámetros geométricos del modelo del tablero del puente se calcula la matriz de masa (ver Figura 3-23)

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \\ p_8 \\ p_9 \\ p_{10} \\ p_{11} \\ p_{12} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} 140 & & & & & & & & & & & \\ & 0 & 156 & & & & & & & & & \\ & 0 & 0 & 156 & & & & & & & & \\ & 0 & 0 & 0 & \frac{140I_0}{A} & & & & & & & \\ & 0 & 0 & -22L & 0 & 4L^2 & & & & & & \\ & 0 & 22L & 0 & 0 & 0 & 4L^2 & & & & & \\ & 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 140 & & & & \\ & 0 & 54 & 0 & 0 & 0 & 13L & 0 & 156 & & & \\ & 0 & 0 & 54 & 0 & -13L & 0 & 0 & 0 & 156 & & \\ & 0 & 0 & 0 & \frac{70I_0}{A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{140I_0}{A} & \\ & 0 & 0 & 13L & 0 & -3L^2 & 0 & 0 & 0 & 22L & 0 & 4L^3 \\ & 0 & -13L & 0 & 0 & 0 & -3L^2 & 0 & -22L & 0 & 0 & 4L^2 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \delta_6 \\ \delta_7 \\ \delta_8 \\ \delta_9 \\ \delta_{10} \\ \delta_{11} \\ \delta_{12} \end{bmatrix}$$

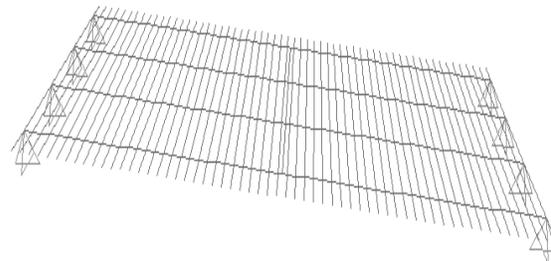
Simétrica

Figura 3-23 Matriz de masa de cada elemento

Basados en los datos anteriores se procede a realizar el diagrama de la estructura del puente en Matlab la cual se muestra a continuación Figura 3-24.



(a) Tablero del puente en Matlab



(b) Tablero del puente en Sap

Figura 3-24 Modelo estructural del puente (a) Tablero del puente en Matlab, (b) Tablero del puente en Sap

4. PROCESAMIENTO DE DATOS

Los pesos de los camiones registrados se obtuvieron de la báscula ubicada a 300 metros del puente. La báscula nos arroja para los camiones tipo C2 y C3 dos pesos y para los camiones tipo C3-S2 y C3-S3 tres pesos, estos pesos se distribuyeron por eje para cada camión (ver Anexo 4). En las Tablas 4-1 a 4-4 se muestran los valores de los pesos por eje para los camiones analizados que registraron en la báscula el mayor y menor peso según tipo de camión.

C2					
VEHÍCULO	DATOS BÁSCULA			PESOS POR EJE (Ton)	
	Peso Total (Kg)	P1 (Kg)	P2 (Kg)	Eje 1	Eje 2
6	3470	1230	2240	0.62	1.12
12	17400	4230	13170	2.12	6.59

Tabla 4-1 Registros de pesos camión C2

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

C3						
VEHÍCULO	DATOS BÁSCULA			PESOS POR EJE (Ton)		
	Peso Total (Kg)	P1 (Kg)	P2 (Kg)	Eje 1	Eje 2	Eje 3
2	28310	6160	22150	3.08	5.54	5.54
5	14650	4860	9790	2.43	2.45	2.45

Tabla 4-2 Registros de pesos camión C3

C3-S2									
VEHÍCULO	DATOS BÁSCULA				PESO POR EJE (Ton)				
	Peso Total (Kg)	P1 (Kg)	P2 (Kg)	P3(Kg)	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5
28	18190	6150	5950	6090	3.08	1.49	1.49	1.52	1.52
29	48570	5160	22440	20970	2.58	5.61	5.61	5.24	5.24

Tabla 4-3 Registros de pesos camión C3-S2

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

C3-S3										
VEHÍCULO	DATOS BÁSCULA				PESO POR EJE (Ton)					
	Peso Total (Kg)	P1 (Kg)	P2 (Kg)	P3 (Kg)	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6
32	17620	3770	8040	5810						
					1.89	2.01	2.01	0.97	0.97	0.97
33	52830	4940	21080	26810	2.47	5.27	5.27	4.47	4.47	4.47

Tabla 4-4 Registros de pesos camión C3-S3

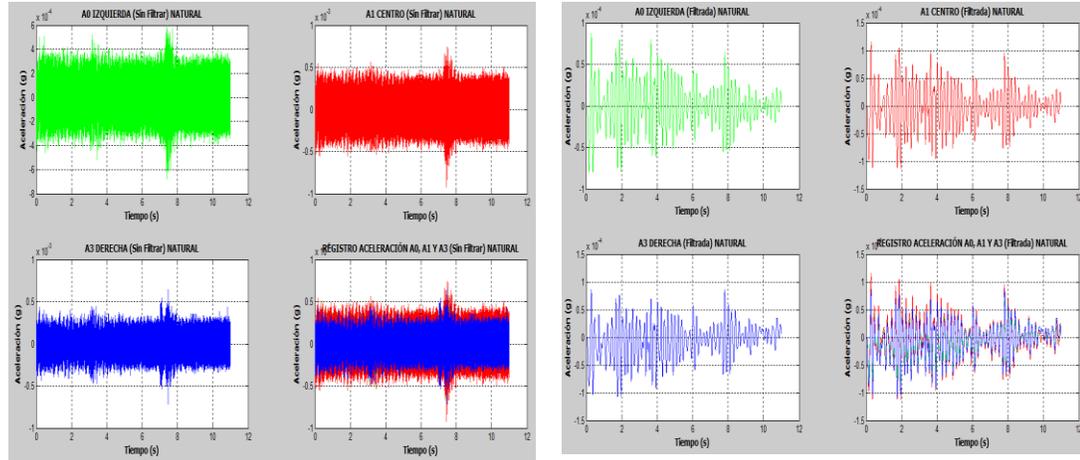
4.1 REGISTROS DE ACELERACIÓN Y ESPECTROS ANALIZADOS

De los datos de aceleración, obtenidos por medio de la instrumentación del puente, se efectuaron las gráficas de aceleración de cada uno de los datos registrados, respuesta del puente sin tráfico y respuesta del puente con tráfico; realizando un filtro de las señales obtenidas para eliminar el ruido y demás factores que intervienen en la señal original. El filtro escogido fue el de Butterworth (pasa bajos ver Capítulo 2.9) el cual nos brinda confiabilidad para la obtención final de la señal. (ver Anexo No. 5).

Posteriormente se graficaron los espectros por medio de series de Fourier, espectros de Potencia y Espectrograma (ver Figura 4-1 a 4-27), con el fin de obtener un estimativo de la frecuencia por medio de el Espectro de Fourier y el Espectro de potencia. Este análisis se realizó para la respuesta del puente sin carga (frecuencia natural) y para los camiones que registraron en la báscula el mayor y menor peso por tipo de camión. (ver Tablas 4-1 a 4-4).

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

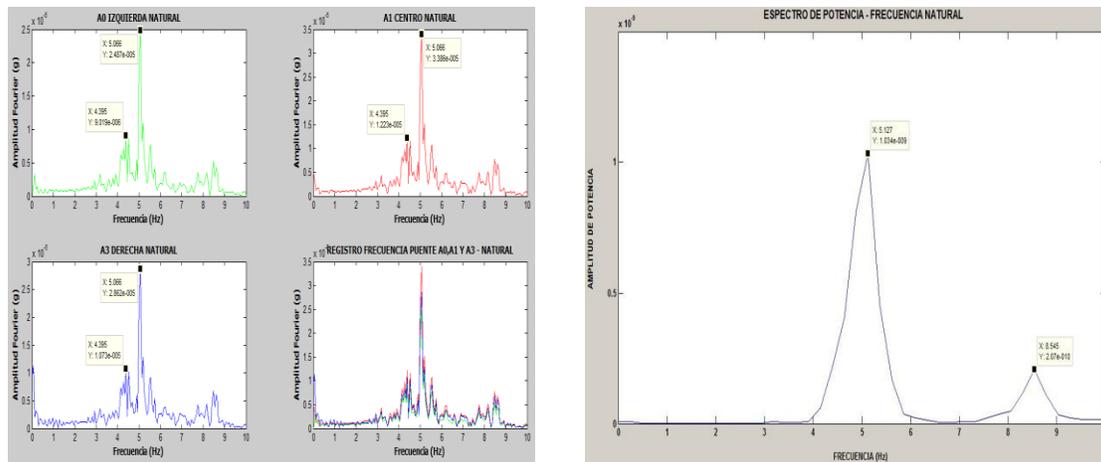
a. Frecuencia natural sin tráfico



(a) Señal sin filtrar

(b) Señal filtrada

Figura 4-1 Registro de aceleraciones del Puente sin carga (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada



(a) Espectro de Fourier

(b) Espectro de Potencia

Figura 4-2 Espectros del monitoreo del puente sin carga (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

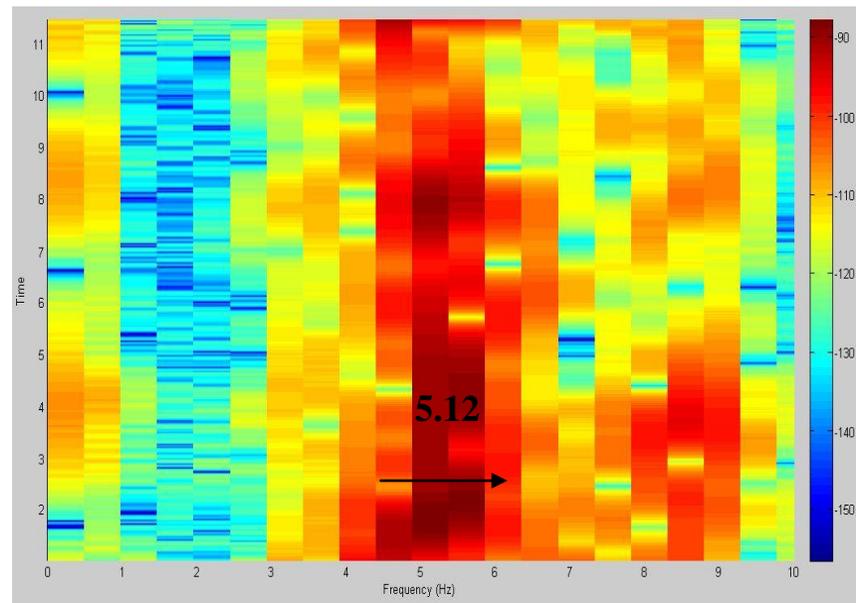


Figura 4-3 Espectrograma puente sin carga.

b. Frecuencias producidas por el camión Tipo C2 - W máx.

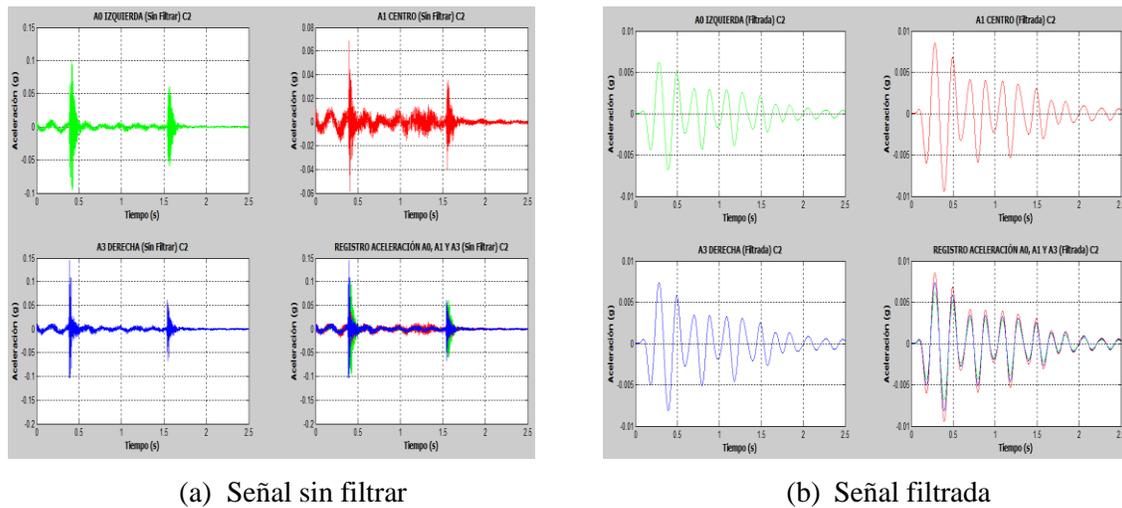


Figura 4-4 Registro de aceleraciones camion C2 -W máx (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

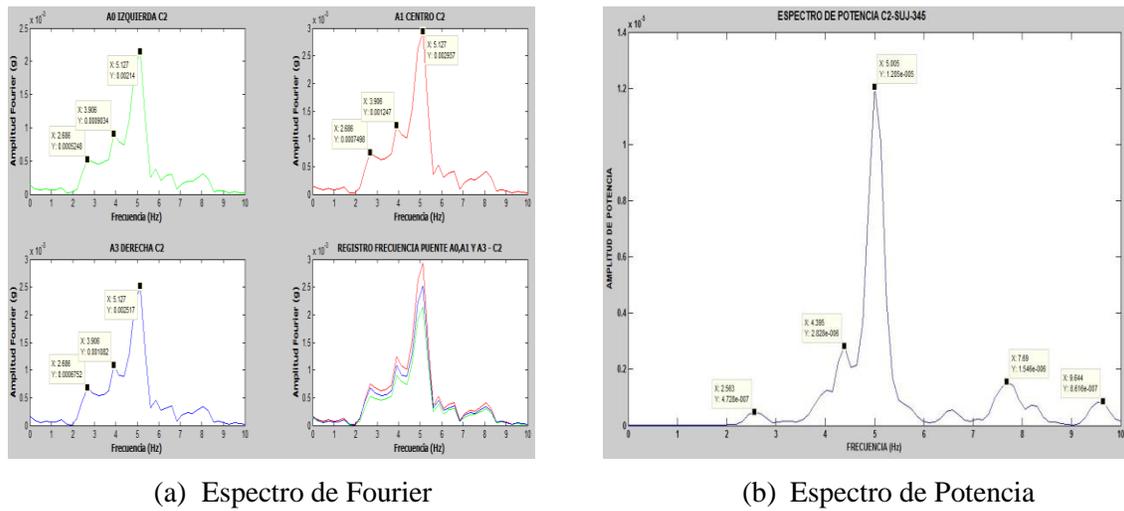


Figura 4-5 Espectros del monitoreo del camion C2 - W máx (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia

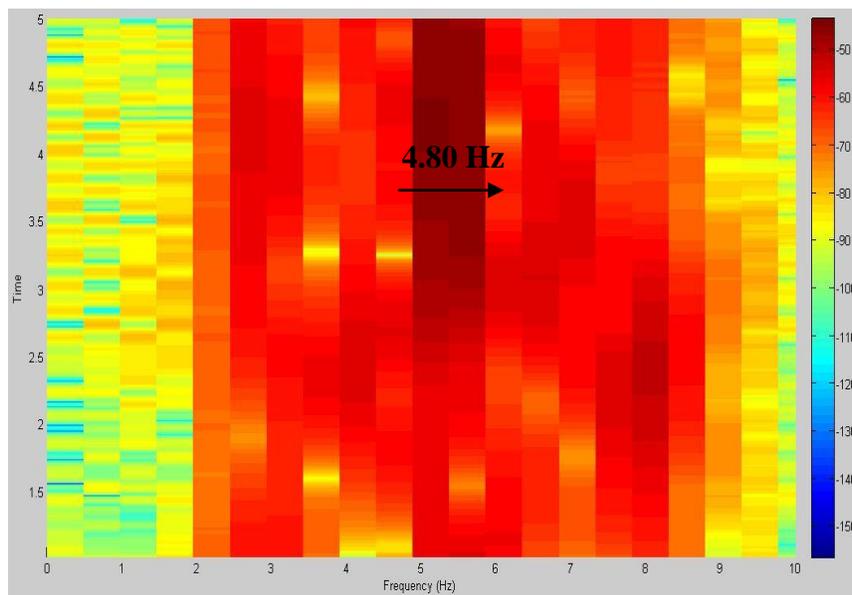


Figura 4-6 Espectrograma camión C2 - W máx.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

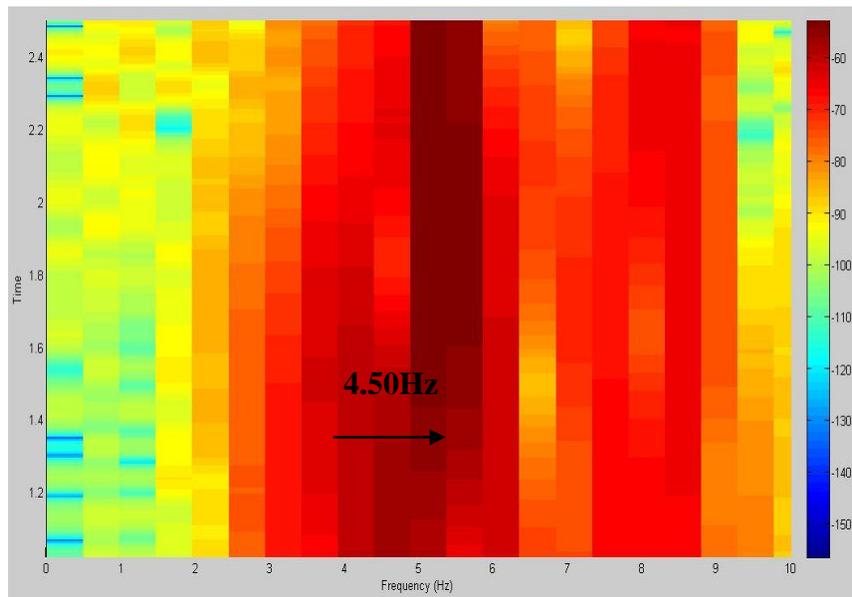


Figura 4-9 Espectrograma camión C2 - W mín.

d. Frecuencias producidas por el camión Tipo C3 – Wmáx.

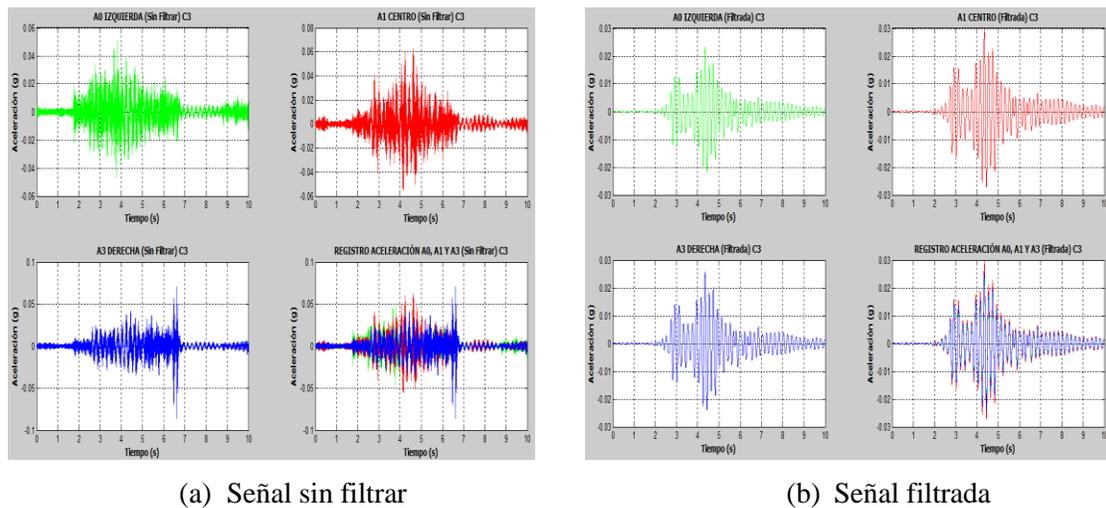


Figura 4-10 Registro de aceleraciones camion C3 - W máx (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

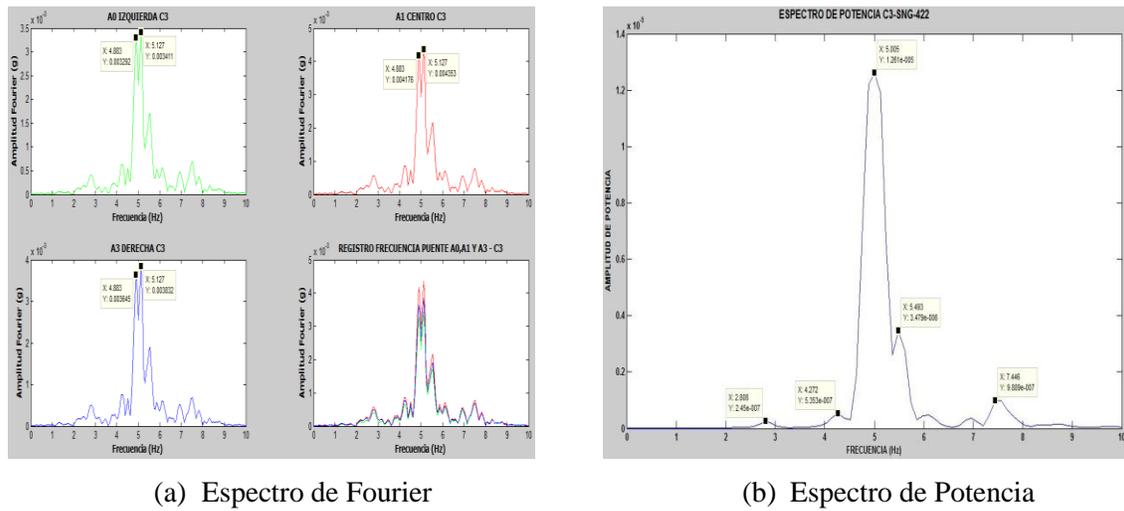


Figura 4-11 Espectros del monitoreo del camion C3 - W máx (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia

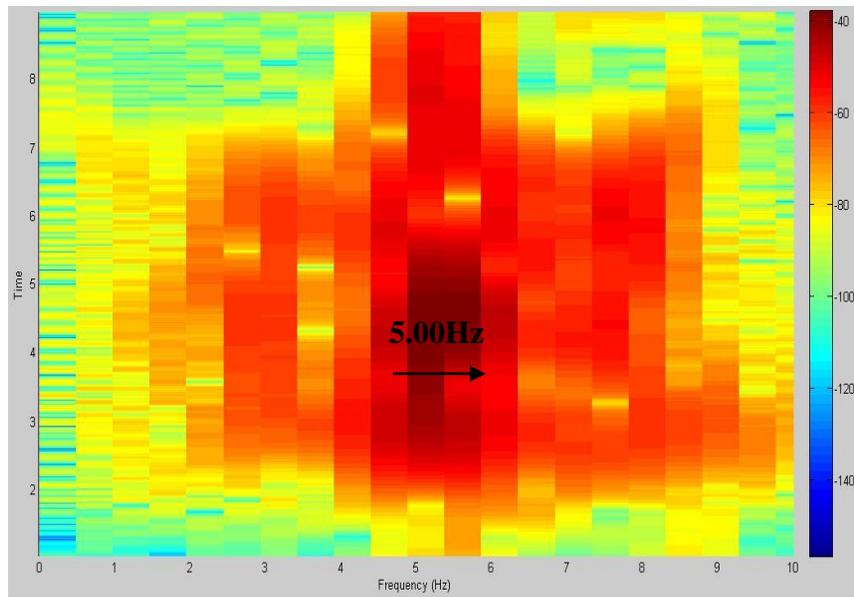


Figura 4-12 Espectrograma camión C3 - W máx.

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUNTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

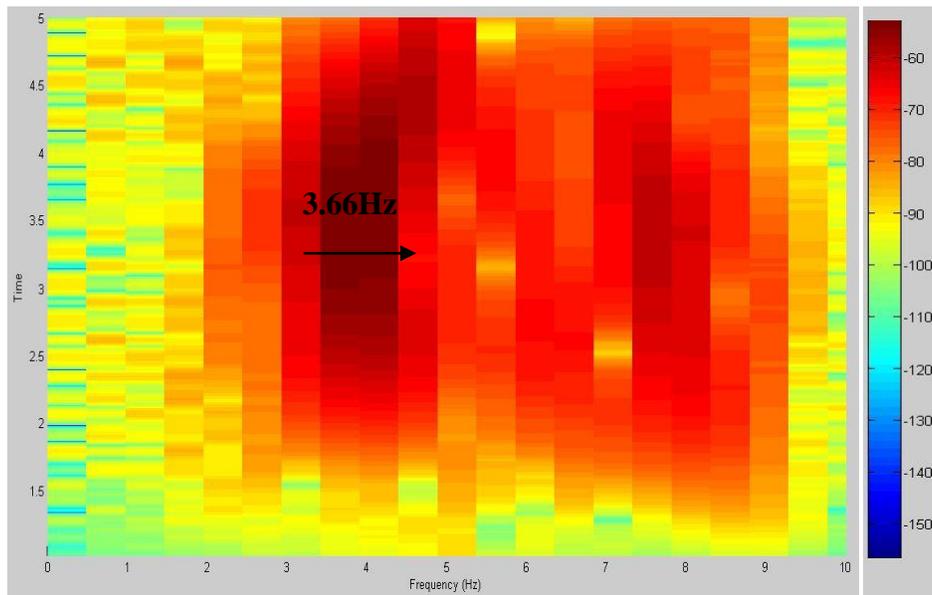


Figura 4-15 Espectrograma Camión C3 - W mín.

f. Frecuencias producidas por el camión Tipo C3-S2 – Wmáx.

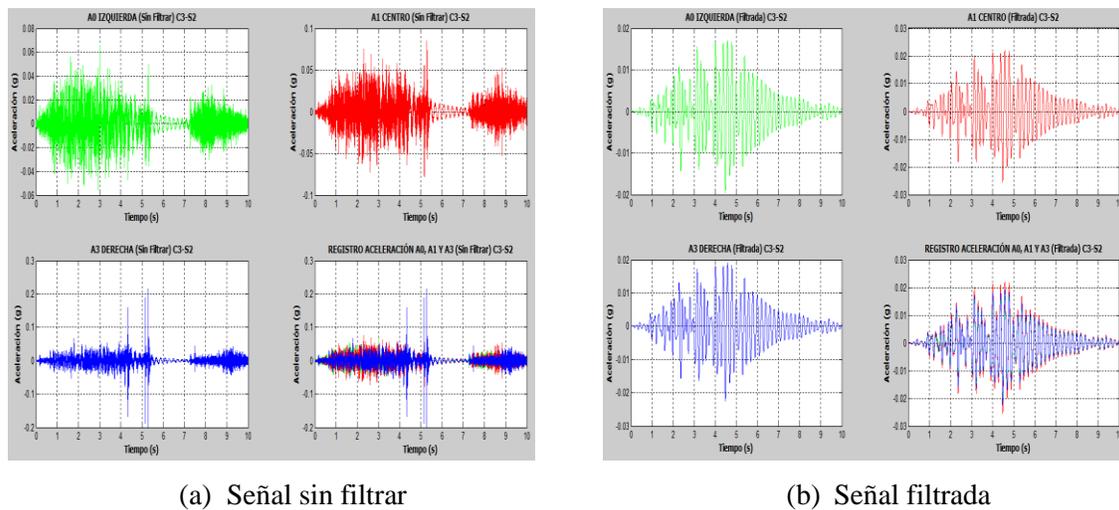


Figura 4-16 Registro de aceleración camión C3-S2 - W máx (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

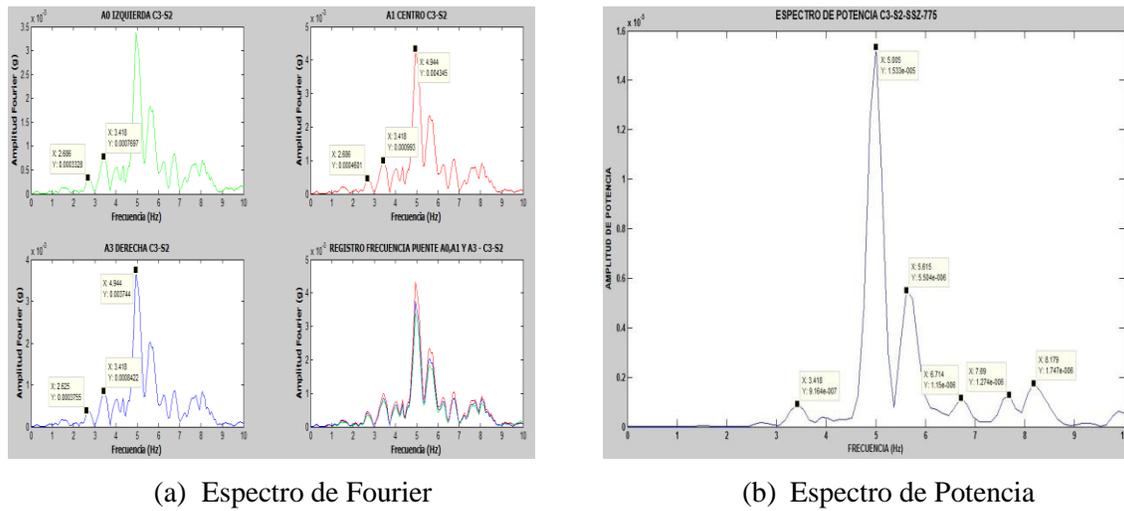


Figura 4-17 Espectros del monitoreo del camion C3-S2 - W máx (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia.

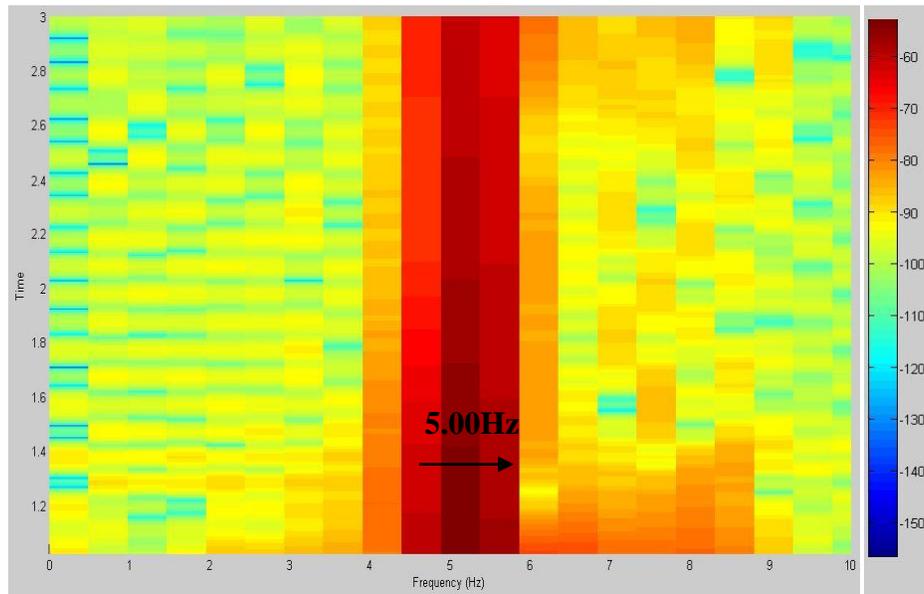


Figura 4-18 Espectrograma Camión C3-S2 - W máx.

g. Frecuencias producidas por el camión Tipo C3-S2 – W_{máx}

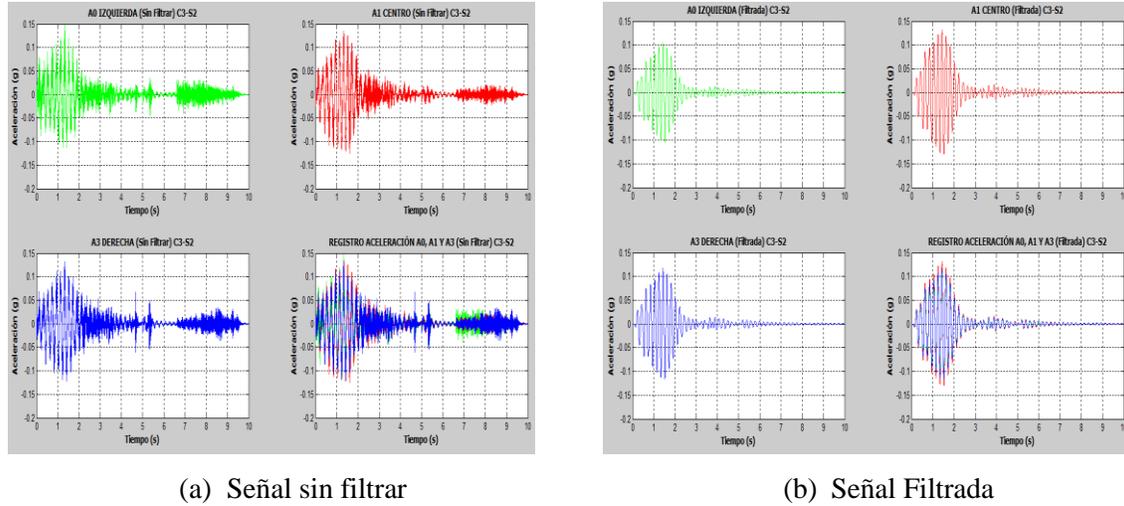


Figura 4-19 Registro de aceleración camion C3-S2 - W mín (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada

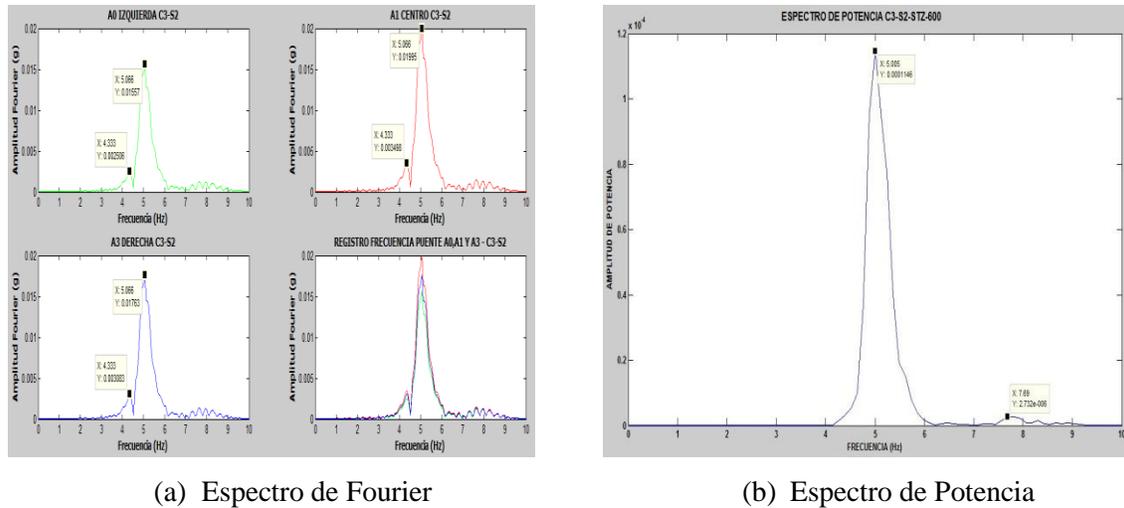


Figura 4-20 Espectros del monitoreo del camion C3-S2 - W mín (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia.

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBLO INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

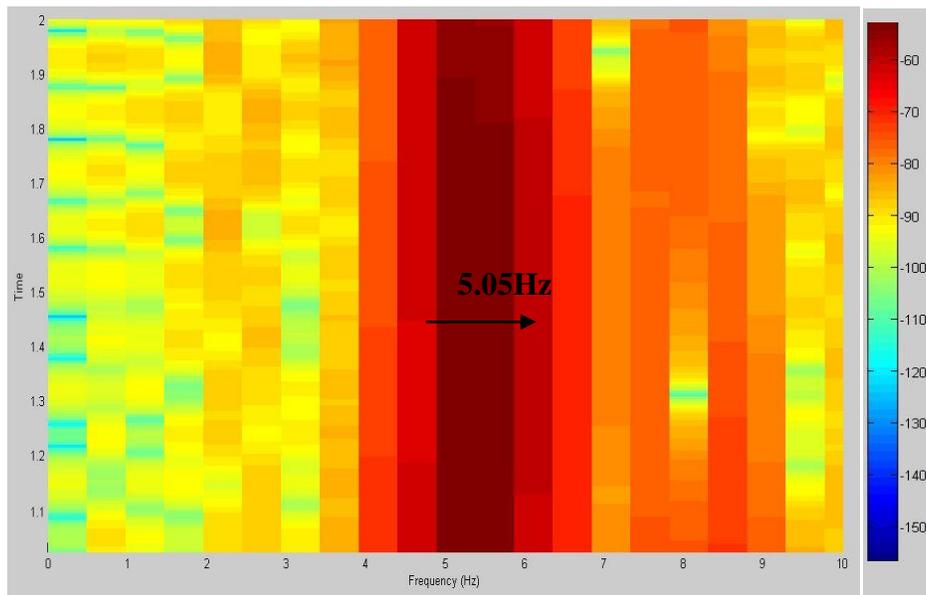
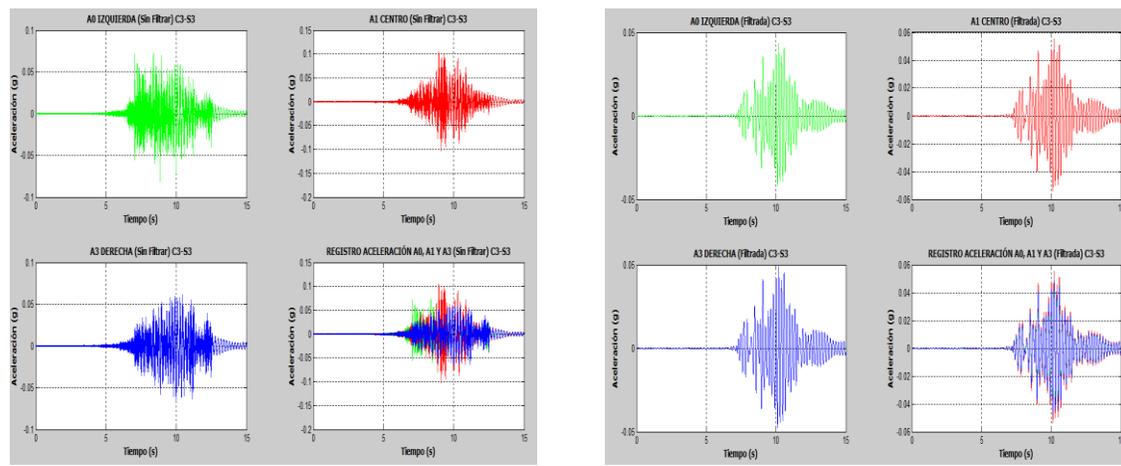


Figura 4-21 Espectrograma Camión C3-S2 - W mín.

h. Frecuencias producidas por el camión Tipo C3-S3 – Wmáx.

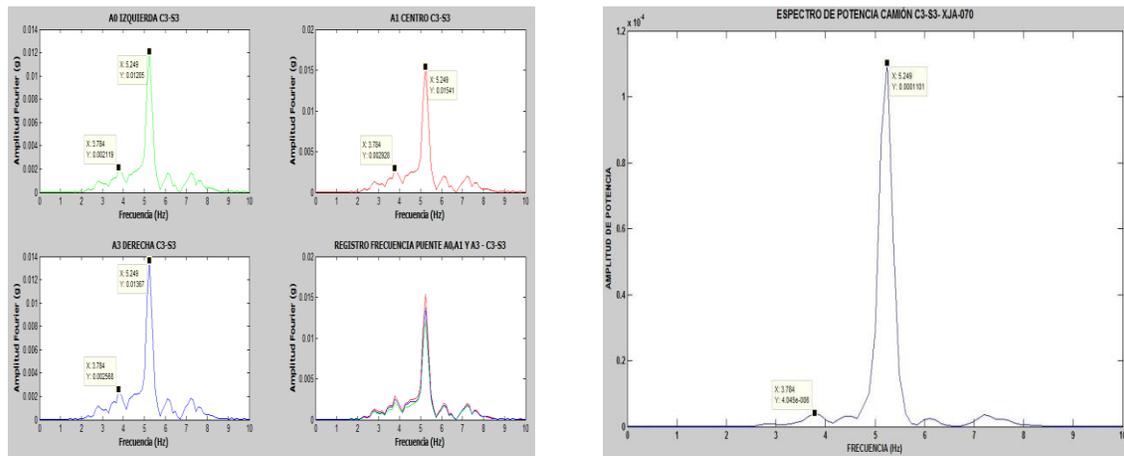


(a) Señal sin filtrar

(b) Señal filtrada

Figura 4-22 Registro de aceleración camión C3-S3 - W máx (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBLO INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS



(a) Espectro de Fourier

(b) Espectro de Potencia

Figura 4-23 Espectros del monitoreo del camion C3-S3 - W máx (a) Espectro de Fourier, (b) Espectro de Potencia.

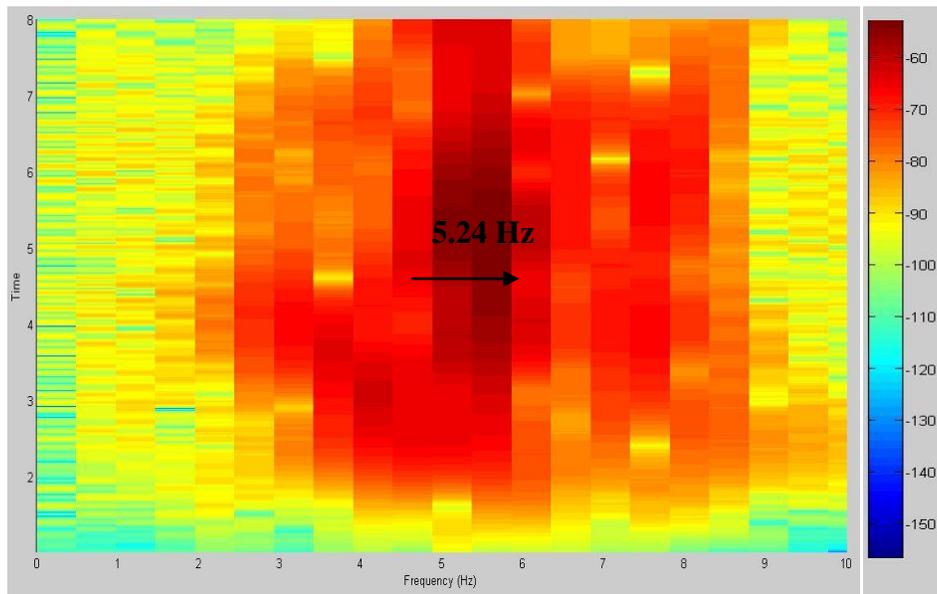


Figura 4-24 Espectrograma camión C3-S3 - W máx.

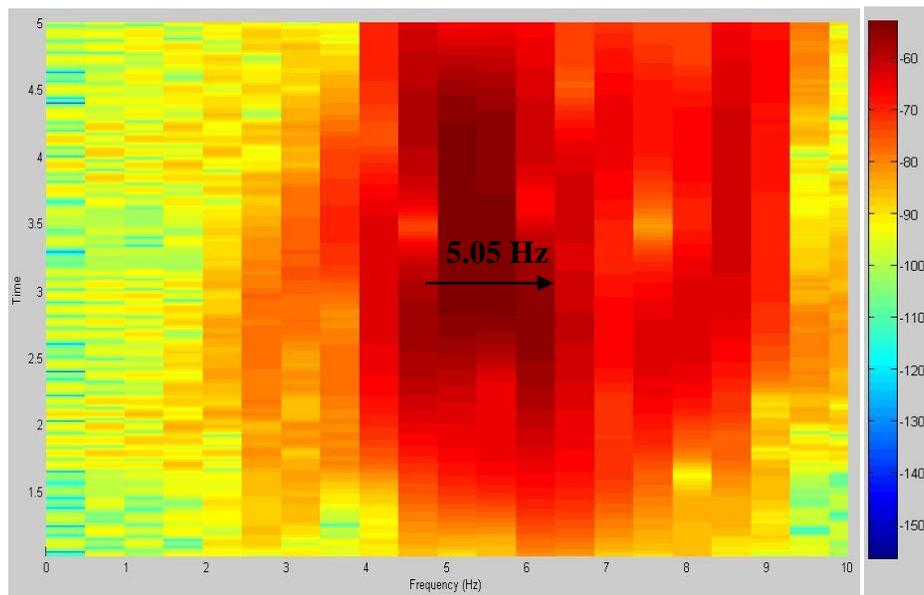


Figura 4-27 Espectrograma camión C3-S3 - W mín.

La Tabla 4-5 se muestra los valores de frecuencia obtenidos de los picos que se consideraron frecuencias predominantes según las figuras anteriores, mediante Espectro de Fourier y de Potencia.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

CATEGORIA	FRECUENCIAS			
	ESPECTRO DE FOURIER		ESPECTRO DE POTENCIA	
	Picos Representativos		Picos Representativos	
TABLERO DEL PUENTE SIN CARGA	5.06		5.12	
 C2- MAX (12)	4.76	5.12	4.39	5.00
 C2- MIN SKV (6)	3.90	4.88	4.51	5.00
 C3 - MAX (2)	4.88	5.12	4.27	5.00
 C3- MIN (5)	3.66	4.39	3.66	4.39
 C3-S2- MAX (29)	4.39	4.88	3.41	5.00
 C3-S2- MIN (28)	4.88	5.00	5.00	5.00
 C3-S3- MAX (33)	3.78	5.24	3.78	5.24
 C3-S3- MIN (32)	4.39	5.00	4.39	5.00

Tabla 4-5 Frecuencias medidas – Espectro de Fourier y Espectro de Potencia

4.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL EN SAP 2000

Una vez obtenidos los valores de frecuencia experimentales del tablero del puente, y utilizando el modelo tridimensional se obtuvieron los valores de frecuencia analíticos; este modelo fue calibrado para disminuir el error entre las frecuencias experimentales y las analíticas. El procedimiento de calibración del modelo consistió en modificar el módulo de elasticidad del concreto del tablero del puente del cual se tiene alta incertidumbre, debido a que no se realizó ningún tipo de prueba para obtener la resistencia de los concretos, ya que esta actividad no estaba incluida dentro del alcance del proyecto. Se realizó un proceso iterativo o de convergencia a través del algoritmo genético hasta alcanzar resultados con un margen de error aceptable (ver Tablas 4 -6 y 4-7).

En la Figura 4-28 se presentan las principales formas de vibración observadas en el modelo matemático sin incluir tráfico, los cuales coinciden con los valores de los picos presentados en la Figura 4-2 y la Tabla 4-5.

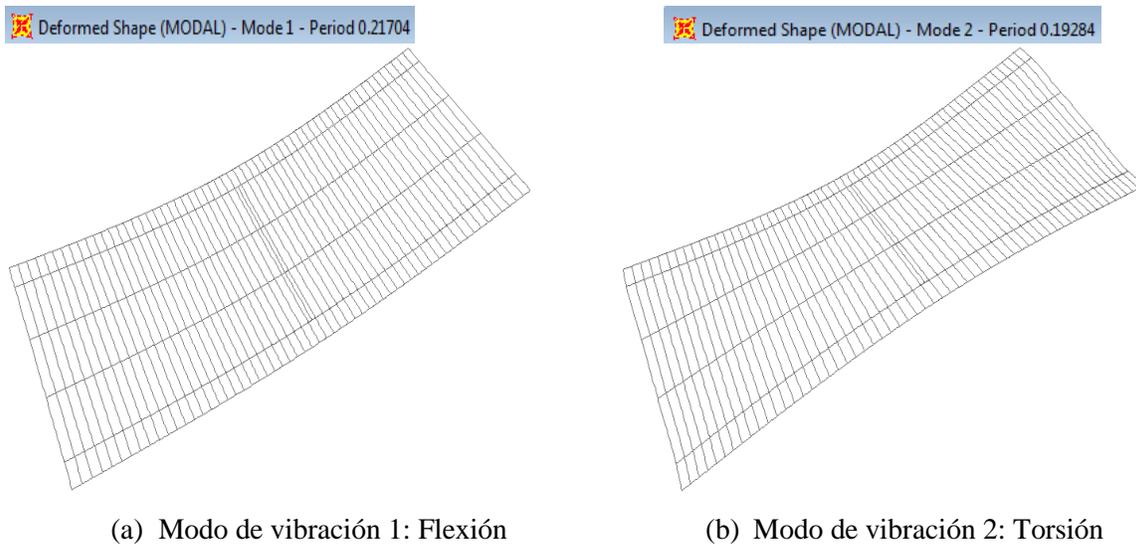


Figura 4-28 Modos de vibración del modelo analítico sin tráfico .

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

No. de Iteraciones	Módulo de Elasticidad Losa (KN/m ²)	Módulo de Elasticidad Viga (KN/m ²)	Frecuencia (Hz)		Frecuencia Experimental FFT(Hz)		Frecuencia Experimental Espectro de Potencia (Hz)
			Modo 1	Modo 2	Picos representativos		Picos representativos
1	230727.11	252748.88	3.17	3.66	4.39	5.06	5.12
2	283971.83	311075.55	3.52	4.06	4.39	5.06	5.12
3	325384.39	356440.74	3.76	4.35	4.39	5.06	5.12
4	38454518	42124815	4.09	4.76	4.39	5.06	5.12
5	51845926	51845926	4.60	5.185	4.39	5.06	5.12

Tabla 4-6 Variación de Módulo de Elasticidad

No. de Iteraciones	Módulo de Elasticidad Losa (KN/m ²)	Módulo de Elasticidad Viga (KN/m ²)	% Error FFT		% Error Espectro de Potencia
			Modo 1	Modo 2	
1	23072711	25274888	27.79%	27.67%	28.52%
2	28397183	31107555	19.82%	19.76%	20.70%
3	32538439	35644074	14.35%	14.03%	15.04%
4	38454518	42124815	6.83%	5.93%	7.03%
5	51845926	51845926	4.78%	2.47%	10.16%

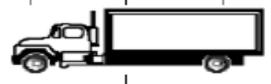
Tabla 4-7 Calibración del modelo estructural en Sap 2000

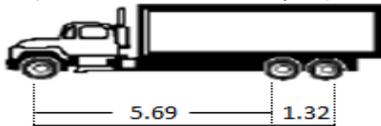
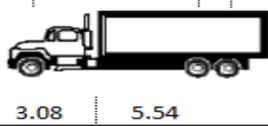
La Tabla 4-7 muestra que el modulo de elasticidad que se indica en la fila 5, es el que nos da el menor error entre las frecuencias medidas y las estimadas, se compararon las

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

frecuencias para los dos primeros modos obtenidos en el modelo analítico y las medidas en campo mediante Espectro de Fourier y el Espectro de Potencia.

Después de tener calibrado el modelo matemático, se procedió a simular los pesos que producen los camiones que circulan por el puente en estudio, estos pesos fueron suministrados por la báscula cercana al puente (ver Anexo 4). En la Tabla 4-8 se muestran los pesos y distancias entre ejes utilizados para cada uno de los camiones analizados (máximos y mínimos).

Numero	DISTANCIA ENTRE EJES (m)		PESOS ESTATICOS POR EJE (Ton)	
	Eje 1	Eje 2	Eje 1	Eje 2
6				
12	5.37		2.12	6.59

Numero	DISTANCIA ENTRE EJES (m)			PESOS ESTATICOS POR EJE (Ton)		
	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 1	Eje 2	Eje 3
2						
5	5.37 1.35			2.43	2.45	2.45

Numero	DISTANCIA ENTRE EJES (m)					PESOS ESTATICOS POR EJE (Ton)				
	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5
28										
29	4.32 1.4 7.21 1.3					2.58	5.61	5.61	5.24	5.24

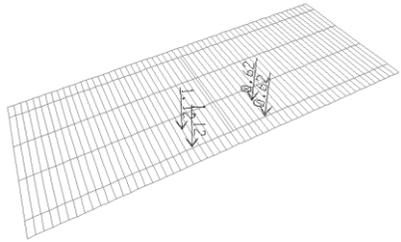
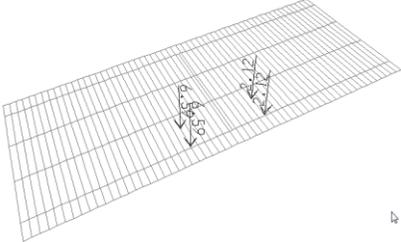
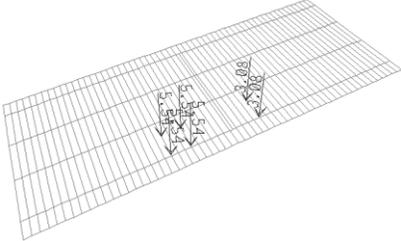
Numero	DISTANCIA ENTRE EJES (m)						PESOS ESTATICOS POR EJES (Ton)					
	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6
32												
33	4.14 1.39 7.7 1.30 1.30						2.47	5.27	5.27	4.47	4.47	4.47

Tabla 4-8 Distancias entre ejes y pesos por ejes

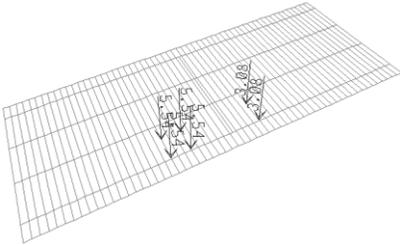
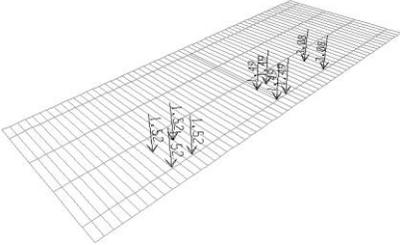
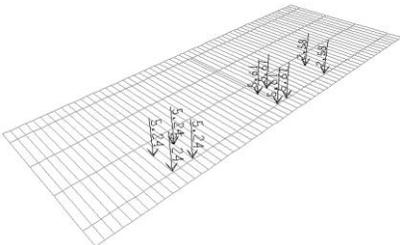
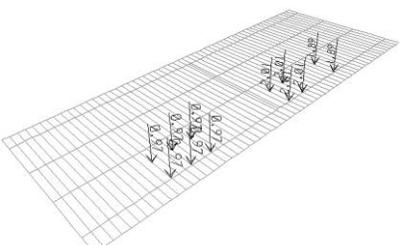
**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

Se modeló cada uno de los camiones analizados (máximos y mínimos), ubicando el camión en el carril instrumentado en campo, situando las cargas de cada llanta en diferentes posiciones. Obteniendo que cuando el camión se ubica en el centro del tablero del puente las frecuencias estimadas son aproximadas a las medidas.

En la Tabla 4-9 se muestran las frecuencias estimadas mediante el modelo matemático en Sap 2000, después de simular el peso del vehículo.

CAMIÓN / MODELACIÓN	FRECUENCIA (Hz) DATOS DE SAP	
	Modo 1 - Flexión	Modo 2 - Torsión
<p align="center">(12) - C2</p> 	4.33	4.99
<p align="center">(6) - C2</p> 	4.56	5.13
<p align="center">(2) - C3</p> 	4.17	4.95

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

CAMIÓN / MODELACIÓN	FRECUENCIA (Hz) DATOS DE SAP	
	Modo 1 - Flexión	Modo 2 - Torsión
<p align="center">(5) - C3</p> 	4.398	5.019
<p align="center">(29) - C3S2</p> 	4.00	4.92
<p align="center">(28) - C3S2</p> 	4.399	5.02
<p align="center">(33) - C3S3</p> 	3.98	4.92

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

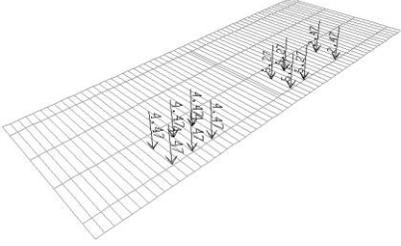
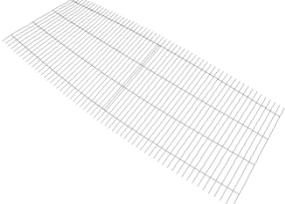
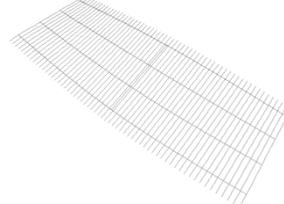
CAMIÓN / MODELACIÓN	FRECUENCIA (Hz) DATOS DE SAP	
	Modo 1 - Flexión	Modo 2 - Torsión
(32) - C3S3 	4.40 	5.02 

Tabla 4-9 Frecuencias producidas por diferentes camiones en el modelo estructural calibrado

El impacto que produce un camión sobre el puente depende de muchos factores tales como: velocidad del camión, amortiguamiento del camión, rugosidad del pavimento, estado de la junta de dilatación, estado del terraplén de acceso, geometría del puente, etc. Para esta investigación se estimó en forma aproximada dicho impacto, ya que no se incluyó en esta tesis su evaluación detallada. Consistió en utilizar el impacto de la normas CCDSP (Instituto Nacional de Vías, 1995) y ASSTHO LRFD (Officials, 2005), pero con valores proporcionalmente a la velocidad de diseño 60 Km/h. Para el CCDSP el impacto depende de la luz del puente y para ASSTHO LRFD es del 33%. A las cargas estáticas mostradas en las Tablas 4-1 a 4-4, se les aplicó dicho factor ver Tablas 4-10 a 4-13.

C2							
VEHÍCULO	VELOCIDAD (Km/h)	PESOS POR EJE (Ton)		CCDSP (Ton)		ASSTHO (Ton)	
		Eje 1	Eje 2	Eje 1	Eje 2	Eje 1	Eje 2
6	28	0,62	1,12	0,73	1,23	0,77	1,27
12	16	2,12	6,59	2,18	6,65	2,21	6,68

Tabla 4-10 Pesos con valor de impacto camión C2

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

C3										
VEHÍCULO	VELOCIDAD (Km/h)	PESOS POR EJE (Ton)			CCDSP (Ton)			ASSTHO (Ton)		
		Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 1	Eje 2	Eje 3
2	28	3,08	5,54	5,54	3,19	5,65	5,65	3,23	5,69	5,69
5	42	2,43	2,45	2,45	2,59	2,61	2,61	2,66	2,68	2,68

Tabla 4-11 Pesos con valor de impacto camión C3

C3-S2											
VEHÍCULO	VELOCIDAD (Km/h)	PESO POR EJE (Ton)					CCDSP (Ton)				
		Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5
28	27	3,08	1,49	1,49	1,52	1,52	3,18	1,59	1,59	1,62	1,62
29	31	2,58	5,61	5,61	5,24	5,24	2,70	5,73	5,73	5,36	5,36

C3-S2						
VEHÍCULO	VELOCIDAD (Km/h)	ASSTHO (Ton)				
		Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5
28	27	3,23	1,64	1,64	1,67	1,67
29	31	2,75	5,78	5,78	5,41	5,41

Tabla 4-12 Pesos con valor de impacto camión C3-S2

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

C3-S3													
VEHÍCULO	VELOCIDAD (Km/h)	PESO POR EJE (Ton)						CCDSP (Ton)					
		Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6
32	41	1,89	2,01	2,01	0,97	0,97	0,97	2,05	2,17	2,17	1,13	1,13	1,13
33	28	2,47	5,27	5,27	4,47	4,47	4,47	2,58	5,38	5,38	4,58	4,58	4,58

C3-S3							
VEHÍCULO	VELOCIDAD (Km/h)	ASSTHO (Ton)					
		Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6
32	41	2,05	2,17	2,17	1,13	1,13	1,13
33	28	2,58	5,38	5,38	4,58	4,58	4,58

Tabla 4-13 Pesos con valor de impacto camión C3-S3

A continuación se muestran los valores de frecuencia obtenidos mediante el modelo matemático realizado en Sap 2000, con los valores de impacto según el CCDSP y el ASSTHO LRFD. (Ver Tabla 4-14)

CAMIÓN	FRECUENCIA (Hz) IMPACTO CCDSP		FRECUENCIA (Hz) IMPACTO LRFD	
	Modo 1	Modo 2	Modo 1	Modo 2
(6) - C2	4.57	5.14	4.57	5.14
(12)- C2	4.32	5.00	4.31	5.00
(2) - C3	4.11	4.95	4.09	4.95
(5)- C3	4.36	5.01	4.34	5.01
(28)- C3S2	4.40	5.03	4.39	5.02
(29) - C3S2	3.92	4.93	3.89	4.92
(32) - C3S3	4.38	5.02	4.36	5.01
(33) - C3S3	3.89	4.92	3.86	4.92

Tabla 4-14 Frecuencia pesos con factor de impacto

4.3 ALGORITMO GENETICO

El algoritmo genético se definió mediante el Toolbox del programa matemático Matlab siguiendo los siguientes pasos (Ver Anexo 7):

- Se definió la función objetivo a minimizar (@MatrizGen2). La función objetivo a implementar corresponde a la minimización del error cuadrático de la diferencia entre los modos experimentales (frecuencias esperadas) y el evaluado por el algoritmo (frecuencias obtenidas).

```
[phi,frec]=eig(k,ma);  
Val=sqrt(diag(frec));  
Wval = Val(1:12)  
error = sum((wesp(1:12) - Val(1:12)).^2)
```

Donde *ma* es la matriz de masas, *k* es la matriz de rigidez de la estructura y *wesp* son los valores de frecuencias medidos en campo (frecuencias esperadas).

4.3.1 TAMAÑO DE LA POBLACIÓN

En este caso la población es de 100 individuos, por lo tanto, para cada generación se evalúa esta cantidad.

4.3.2 PARÁMETROS DEL ALGORITMO

Dentro del algoritmo genético se establecieron los siguientes parámetros:

- a. Población Inicial: 100
- b. Numero de variables: Depende del tipo de camión, camión C2 son 4 variables, C3 son 6 variables, C3-S2 con 10 variables y C3-S3 son 12 variables.

- c. Restricciones: están relacionadas con los valores de masas que se obtuvieron como resultado de la estación de pesaje estático, por lo tanto, para cada tipo de camión existe un valor máximo y un valor mínimo de peso por eje.
- d. Número de individuos mínimo de la generación de padres hacia la nueva generación dos (2) (“Elite Count” – lo cual me está indicando cuantos individuos pasan a la siguiente generación).
- e. “Feasible Population”: Significa que genera una población inicial aleatoriamente teniendo en cuenta las restricciones en cuanto a los límites y a las restricciones lineales.

4.3.3 CRITERIOS DE PARADA

Dentro del Toolbox de algoritmo genético de Matlab existen varios criterios de parada, para nuestro caso en particular se emplearon los siguientes:

- a. “Generations”: Este criterio indica cuantas generaciones (hijos) el usuario establece como valor máximo para que el algoritmo pare el proceso, en este caso se estableció como máximo un valor de 50 generaciones.
- b. “Time Limit”: En este caso se estableció un valor de 1000 segundos por corrida.
- c. “Tolerance”: En este criterio se establece el porcentaje de error mínimo o igual para que el proceso frene, en este caso el valor de tolerancia que estableció el usuario es ≤ 3 .
- d. “Stall Generations”: Dentro de cada corrida que se está realizando para cada generación también se establece un valor máximo de corridas internas, en este caso se estableció un valor de 10.
- e. “Stall Time Limit”: Igualmente que en el caso anterior, para cada corrida interna se establece un límite de tiempo, en este caso se estableció un valor de 100 segundos.

4.3.4 OPERADORES GENÉTICOS

4.3.4.1 ALGORITMO RANK

Por medio de este algoritmo se da un orden ascendente a los datos de la población (del valor de mayor expectativa al de menor, ver Figura 4-29), donde se evalúa la función objetivo para cada uno de los padres de la población dándole un valor de expectativa a este valor en comparación con la población total, una de las ventajas de este algoritmo es que tiene en cuenta toda la población, mientras que existen otros algoritmos que de la población total solo toman una parte y/o eliminan la otra parte según el valor de expectativa que tengan, pero al no tomar toda la información de la población no se garantiza que dentro de los valores que no se tuvieron en cuenta se encuentre un mínimo local y/o global (Inc, 2010).

$$Exp = nParents \times \frac{1/\sqrt{Score}}{Sum(Score)} \quad (4-1)$$

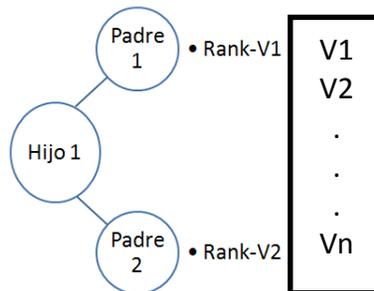


Figura 4-29 Valor de expectativa – algoritmo Rank.

Nota: No necesariamente el hijo de la nueva generación es producto de los mejores individuos del algoritmo de rank, este algoritmo unicamente organiza los individuos y el algoritmo de selección es el que escoge los padres, teniendo en cuenta los individuos de mejor rank (expectativa) los cuales tienen más probabilidad de ser elegidos como padres de la siguiente generación.

4.3.4.2 ALGORITMO STOCHASTIC UNIFORM

Con base en el orden que se generó anteriormente por medio del algoritmo Rank, se procede a realizar un proceso de selección para saber cuáles van hacer los padres para la siguiente generación, en este paso se le asigna una probabilidad a cada individuo de acuerdo a su desempeño dentro de toda la población, en ese orden de ideas los individuos que se encuentren en las primeras posiciones según el orden del algoritmo de Rank tendrán mayores probabilidades de ser escogidos como los padres de los individuos de la siguiente generación, de esta forma se asegura que la siguiente generación tenga un desempeño mejor que la anterior.

4.3.4.3 CROSSOVER FRACTION

Una vez se han seleccionado los padres de la población que van a dar origen a la nueva generación, existen tres maneras de que se realice el proceso de reproducción, donde (ver Figura 4-30 a 4-32):

- a. En el primer caso la nueva generación tomará las características y/o genes del padre para reproducirlas en el hijo.



Figura 4-30 Reproducción caso 1 –Elite Count

- b. En el segundo caso de la pareja de padres se tomará una parte de uno y otra parte del otro para la nueva generación.

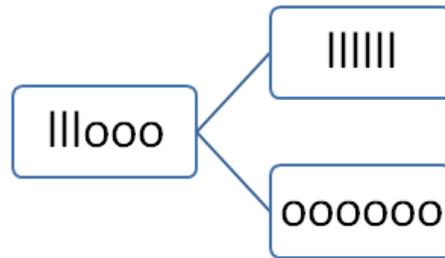


Figura 4-31 Reproducción caso 2 – Algoritmo Scattered.

- c. En el tercer caso se realiza un proceso de mutación, donde un gen del hijo se extrae y se coloca un nuevo gen.



Figura 4-32 Mutación – algoritmo Adaptive Feasible.

Este proceso de reproducción se realiza por medio del algoritmo Scattered, adicionalmente dentro de esta herramienta se define un porcentaje para la reproducción del 80% y un porcentaje para la mutación del 20%; estos valores de porcentajes son como resultados de previos análisis que se han realizado a diferentes poblaciones donde se establecieron estos valores como recomendables.

Para el proceso de mutación se emplea el algoritmo Adaptive Feasible, donde los parámetros del algoritmo son:

- d. Dirección: para realizar el proceso de mutación el algoritmo indica que dirección pueden tomar los valores, números superiores o números inferiores al valor actual.
- e. Paso: Este es un valor en porcentaje que establece que tan lejos van a estar los valores que se van a tomar, para este caso indica un porcentaje del $\pm 20\%$.

En las Tablas 4.15 a 4-22 se muestra los resultados de peso que nos arroja el algoritmo para cada tipo de camión, se tomaron los máximos y mínimos de los pesos.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

a. Camión C3-S3:

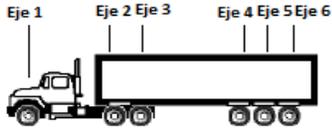
C3-S3 (32) MIN					
					
Velocidad:		41		Km/h	
Eje	Pesos Báscula (Ton)	Peso Algoritmo (Ton)		% Error CCDSP	% Error ASSTHO
		CCDSP	ASSTHO		
P1	3.78	3.39	3.11	10.37%	17.63%
P2	4.02	3.39	3.11	15.72%	22.55%
P3	4.02	3.39	3.11	15.72%	22.55%
P4	1.94	3.39	3.11	74.65%	60.49%
P5	1.94	3.39	3.11	74.65%	60.49%
P6	1.94	3.19	2.93	64.22%	50.91%
Σ	17.64	20.13	18.50	14.10%	4.85%

Tabla 4-15 Pesos por eje algoritmo Camión C3-S3 Peso Mínimo.

En la Tabla 4-15 se encontraron errores en la determinación del peso total del orden del 14.10% empleando el impacto de acuerdo al CCDSP y del 4.85% de acuerdo a la ASSTHO LRFD. Los errores por eje oscilan entre el 10.37 al 74.65% de acuerdo al CCDSP y del 17.63 al 60.49% de acuerdo a ASSTHO LRFD.

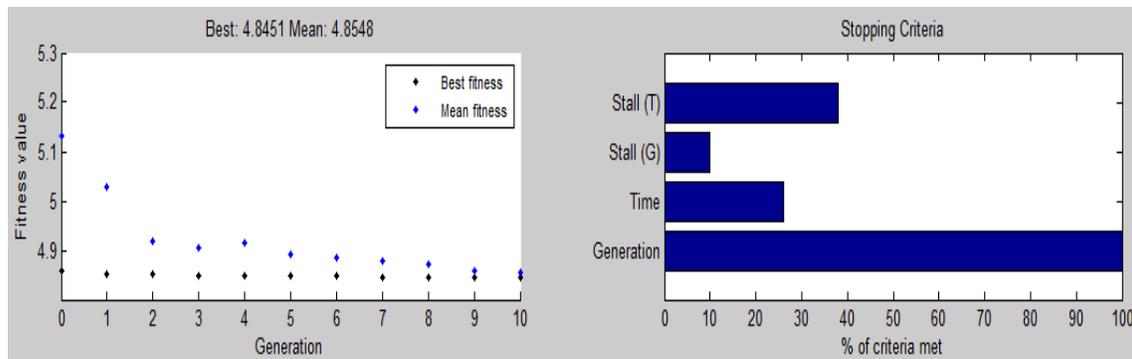


Figura 4-33 Gráfica de convergencia camión C3-S3-Mín.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

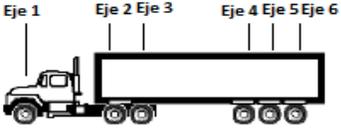
C3-S3 (33) MAX					
					
Velocidad:		28 Km/h			
Eje	Pesos Báscula (Ton)	Peso Algoritmo (Ton)		% Error	
		CCDSP	ASSTHO	CCDSP	ASSTHO
P1	4.94	3.39	3.11	31.41%	36.97%
P2	10.54	3.97	3.65	62.29%	65.35%
P3	10.54	4.48	4.11	57.54%	60.98%
P4	8.94	7.81	7.18	12.59%	19.68%
P5	8.94	7.30	6.71	18.29%	24.92%
P6	8.94	3.99	3.66	55.42%	59.03%
Σ	52.84	30.94	28.43	41.44%	46.19%

Tabla 4-16 Pesos por eje algoritmo Camión C3-S3 Peso Máximo.

En la Tabla 4-17 se encontraron errores en la determinación del peso total del orden del 41.44% empleando el impacto de acuerdo al CCDSP y del 46.19% de acuerdo a la ASSTHO LRFD. Los errores por eje oscilan entre el 12.59 al 62.29% de acuerdo al CCDSP y del 19.68 al 65.35% de acuerdo a ASSTHO LRFD.

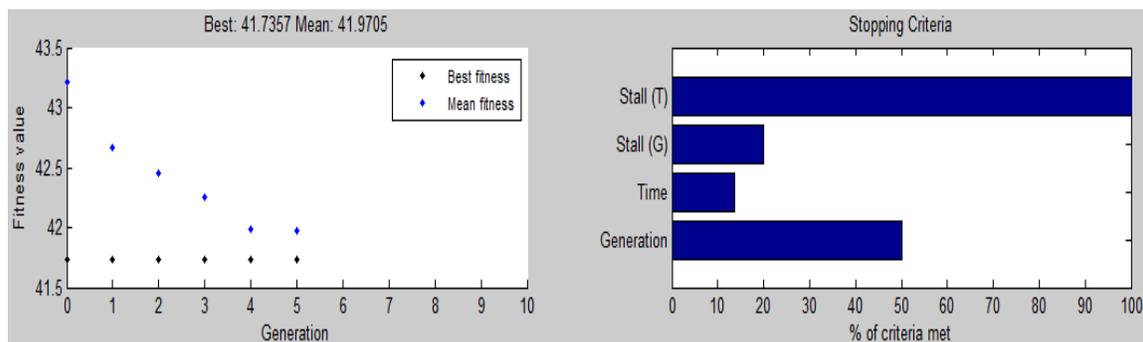


Figura 4-34 Gráfica de convergencia camión C3-S3-Máx.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

b. Camión C3-S2:

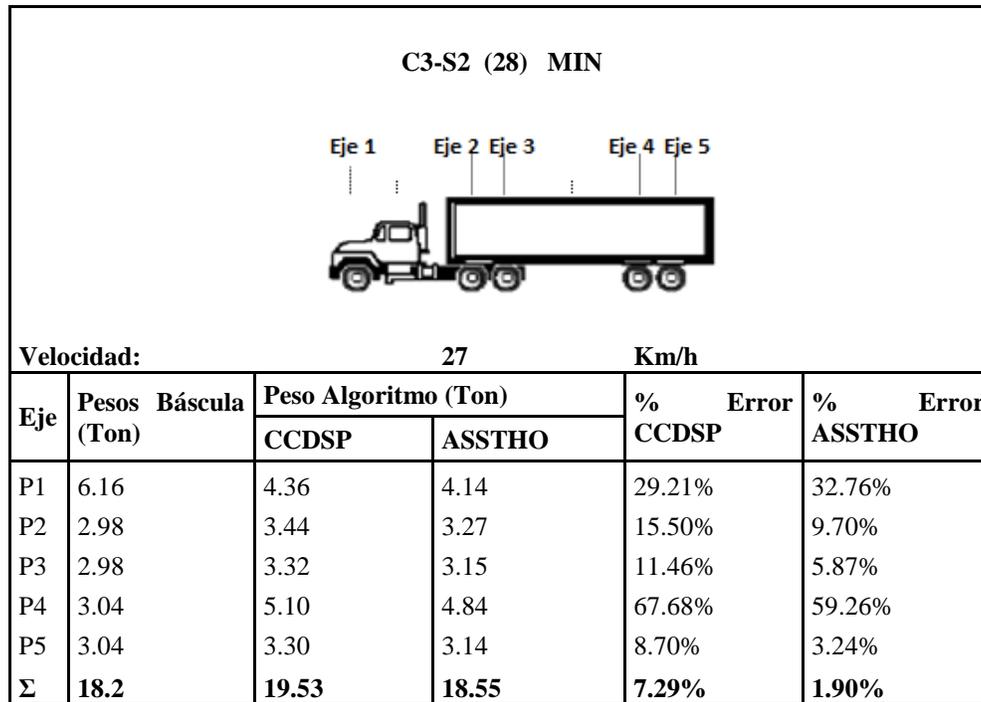


Tabla 4-17 Pesos por eje algoritmo Camión C3-S2 Peso Mínimo.

En la Tabla 4-19 se encontraron errores en la determinación del peso total del orden del 7.29% empleando el impacto de acuerdo al CCDSP y del 1.90% de acuerdo a la ASSTHO LRFD. Los errores por eje oscilan entre el 8.70 al 67.68% de acuerdo al CCDSP y del 3.24 al 59.26% de acuerdo a ASSTHO LRFD.

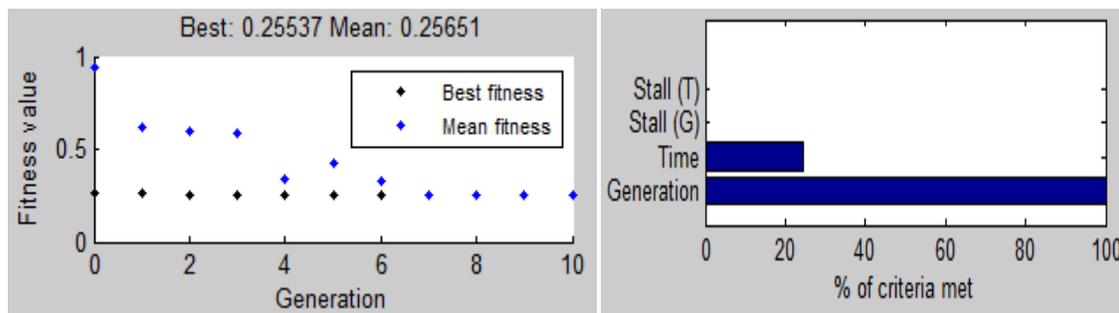


Figura 4-35 Gráfica de convergencia camión C3-S2-Mín.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

C3-S2 (29) MAX						
		Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5
						
Velocidad:		31		Km/h		
Eje	Pesos Báscula (Ton)	Peso Algoritmo (Ton)		% Error	% Error	
		CCDSP	ASSTHO	CCDSP	ASSTHO	
P1	5.16	3.62	3.41	29.76%	33.88%	
P2	11.22	7.86	7.40	29.93%	34.04%	
P3	11.22	7.70	7.25	31.39%	35.41%	
P4	10.48	8.87	8.35	15.40%	20.36%	
P5	10.48	9.73	9.16	7.14%	12.58%	
Σ	48.56	37.78	35.57	22.20%	26.76%	

Tabla 4-18 Pesos por eje algoritmo Camión C3-S2 Peso Máximo.

En la Tabla 4-20 se encontraron errores en la determinación del peso total del orden del 22.20% empleando el impacto de acuerdo al CCDSP y del 26.76% de acuerdo a la ASSTHO LRFD. Los errores por eje oscilan entre el 7.14 al 31.39% de acuerdo al CCDSP y del 12.58 al 35.41% de acuerdo a ASSTHO LRFD.

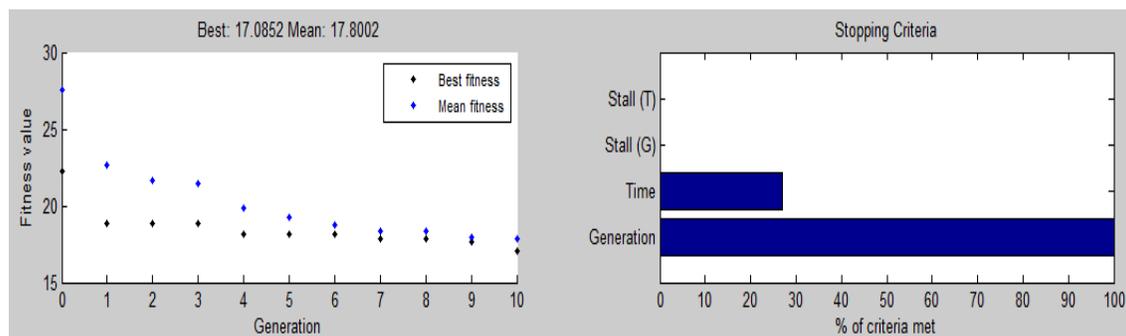


Figura 4-36 Gráfica de convergencia camión C3-S2-Máx.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

c. Camión C3:

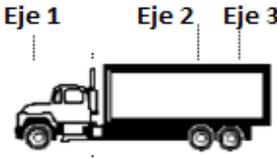
C3 (2) MIN					
					
Velocidad:		42 Km/h			
Eje	Pesos Báscula (Ton)	Peso Algoritmo (Ton)		% Error CCDSP	% Error ASSTHO
		CCDSP	ASSTHO		
P1	4.86	4.98	4.92	2.38%	1.22%
P2	4.9	8.23	8.14	67.96%	66.06%
P3	4.9	7.50	7.42	53.14%	51.40%
Σ	14.66	20.71	20.47	41.26%	39.66%

Tabla 4-19 Pesos por eje algoritmo Camión C3 Peso Mínimo.

En la Tabla 4-22 se encontraron errores en la determinación del peso total del orden del 41.26% empleando el impacto de acuerdo al CCDSP y del 39.66% de acuerdo a la ASSTHO LRFD. Los errores por eje oscilan entre el 2.38 al 67.96% de acuerdo al CCDSP y del 1.22 al 66.06% de acuerdo a ASSTHO LRFD.

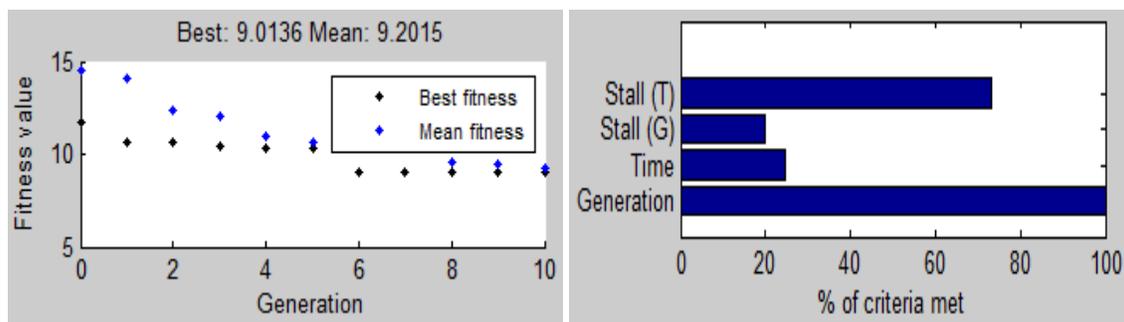


Figura 4-37 Gráfica de convergencia camión C3-Mín.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

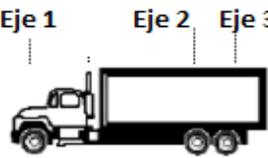
C3 (5) MAX					
					
Velocidad:		28 Km/h			
Eje	Pesos Báscula (Ton)	Peso Algoritmo (Ton)		% Error	
		CCDSP	ASSTHO	CCDSP	ASSTHO
P1	6.16	4.80	4.46	22.12%	27.63%
P2	11.08	6.22	5.78	43.87%	47.84%
P3	11.08	9.36	8.69	15.57%	21.54%
Σ	28.32	20.37	18.93	28.06%	33.15%

Tabla 4-20 Pesos por eje algoritmo Camión C3 Peso Máximo.

En la Tabla 4-24 se encontraron errores en la determinación del peso total del orden del 28.06% empleando el impacto de acuerdo al CCDSP y del 33.15% de acuerdo a la ASSTHO LRFD. Los errores por eje oscilan entre el 15.57 al 43.87% de acuerdo al CCDSP y del 21.54 al 47.84% de acuerdo a ASSTHO LRFD.

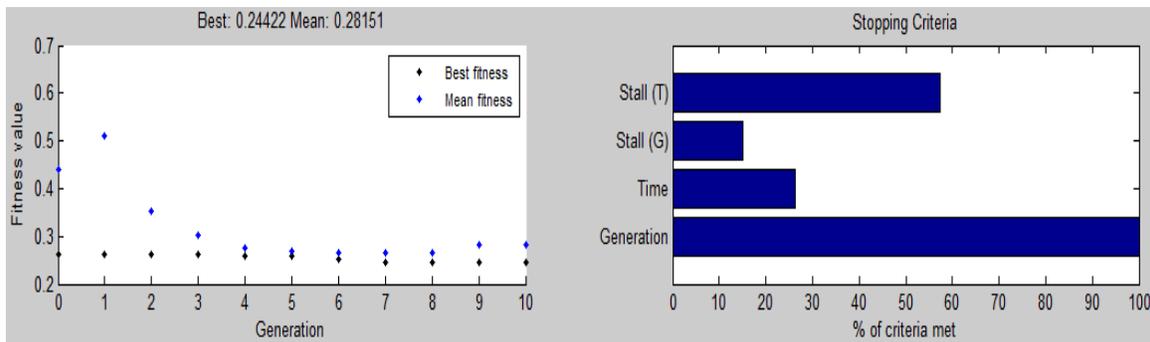


Figura 4-38 Gráfica de convergencia camión C3-Máx.

c. Camión C2:

C2 (6) MIN					
		Eje 1			Eje 2
					
Velocidad:		28		Km/h	
Eje	Pesos Báscula (Ton)	Peso Algoritmo (Ton)		% Error	% Error
		CCDSP	ASSTHO	CCDSP	ASSTHO
P1	1.24	1.17	1.09	5.59%	12.27%
P2	2.24	2.62	2.43	16.88%	8.61%
Σ	3.48	3.79	3.52	8.87%	1.17%

Tabla 4-21 Pesos por eje algoritmo Camión C2 Peso Mínimo.

En la Tabla 4-26 se encontraron errores en la determinación del peso total del orden del 8.87% empleando el impacto de acuerdo al CCDSP y del 1.17% de acuerdo a la ASSTHO LRFD. Los errores por eje oscilan entre el 5.59 al 16.88% de acuerdo al CCDSP y del 8.61 al 12.27% de acuerdo a ASSTHO LRFD.

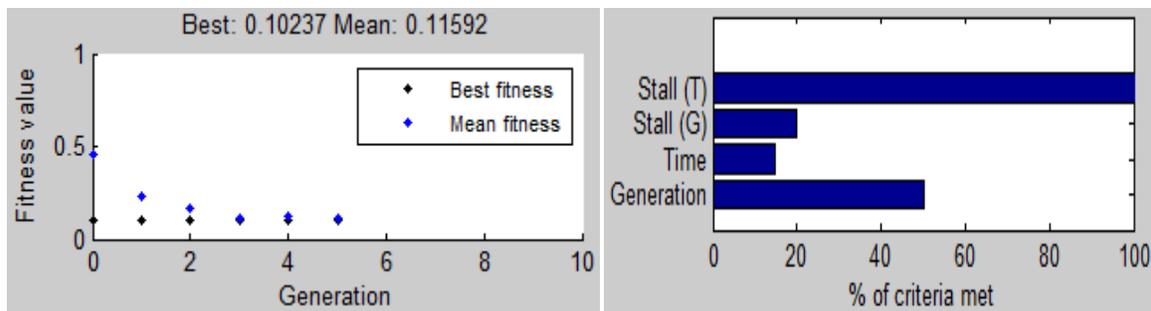


Figura 4-39 Gráfica de convergencia camión C2-Mín.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

C2 (12) MAX					
					
Velocidad: 16 Km/h					
Eje	Pesos Báscula (Ton)	Peso Algoritmo (Ton)		% Error	% Error
		CCDSP	ASSTHO	CCDSP	ASSTHO
P1	4.24	3.19	2.82	24.76%	33.51%
P2	13.18	11.90	10.52	9.71%	20.21%
Σ	17.42	15.09	13.34	13.37%	23.45%

Tabla 4-22 Pesos por eje algoritmo Camión C2 Peso Máximo.

En la Tabla 4-28 se encontraron errores en la determinación del peso total del orden del 13.37% empleando el impacto de acuerdo al CCDSP y del 23.45% de acuerdo a la ASSTHO LRFD. Los errores por eje oscilan entre el 9.71 al 24.76% de acuerdo al CCDSP y del 20.21 al 33.51% de acuerdo a ASSTHO LRFD.

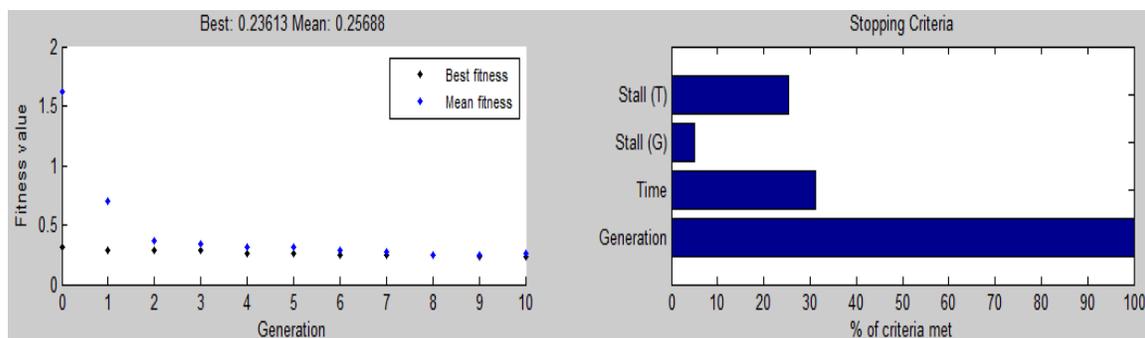


Figura 4-40 Gráfica de convergencia camión C2-Máx.

En las Figuras 4.33 a 4.40 se observan las gráficas de convergencia del algoritmo para cada uno de los camiones, en general, el algoritmo converge encontrando el valor óptimo.

4.4 RESULTADOS ALGORITMO GENETICO

Durante el proceso de convergencia se observa que para los camiones C2 y C3 el algoritmo converge más rápido en comparación que los camiones C3S2 y C3S3 (ver Figuras 4.33 a 4.40), esto se debe a que las variables que manejan los camiones C2 y C3 son 4 y 6 respectivamente, mientras que para los camiones C3S2 y C3S3 son 10 y 12 respectivamente; por lo tanto, entre mayor es el número de variables mayor es el proceso para que el algoritmo converja. Adicionalmente, es importante realizar un análisis de sensibilidad e incertidumbre de los resultados que se obtienen por medio del algoritmo, con el fin de garantizar que los resultados son los más óptimos.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 ACELERACIONES Y FRECUENCIAS POR TIPO DE CAMIÓN

La Tabla 5-1 presenta los valores más representativos de los datos obtenidos en campo para los tipos de camiones analizados. Según los datos encontrados en dicha tabla, al comparar las aceleraciones máximas y mínimas que generan los camiones al pasar por el puente, se observa que a mayor peso mayor aceleración, sin embargo, en la Figura 5-1 no se evidencia claramente esta tendencia debido a que se graficaron todos los camiones sin tener en cuenta la velocidad a la que pasaron, y dicho parámetro afecta el valor de aceleración que genera el camión al puente, como se muestra en la Figura 5-2.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

 CAMIÓN C2	PESO BASCULA (Ton)	VELOCIDAD (Km/h)	ACELERACIÓN (g)	FRECUENCIA (Hz) PICO 1	FRECUENCIA (Hz) PICO 2
PROMEDIO	11.5	29	0.0091	4.56	5.03
MAXIMO	17.4	49	0.0163	4.94	5.24
MINIMO	3.38	16	0.0049	4.27	4.86
MODA	-	28	0.0052	4.51	5.00
 CAMIÓN C3	PESO BASCULA (Ton)	VELOCIDAD (Km/h)	ACELERACIÓN (g)	FRECUENCIA (Hz) PICO 1	FRECUENCIA (Hz) PICO 2
PROMEDIO	25	30	0.0212	4.56	5.1
MAXIMO	28	42	0.0297	4.91	5.13
MINIMO	15	23	0.0123	3.66	5.00
MODA	-	28	-	-	5.13
 CAMIÓN C3-S2	PESO BASCULA (Ton)	VELOCIDAD (Km/h)	ACELERACIÓN (g)	FRECUENCIA (Hz) PICO 1	FRECUENCIA (Hz) PICO 2
PROMEDIO	46	26	0.0271	4.57	5.04
MAXIMO	49	38	0.1003	5.06	5.61
MINIMO	18	18	0.0086	3.60	3.84
MODA	48	29	0.023	4.51	5.00
 CAMIÓN C3-S3	PESO BASCULA (Ton)	VELOCIDAD (Km/h)	ACELERACIÓN (g)	FRECUENCIA (Hz) PICO 1	FRECUENCIA (Hz) PICO 2
PROMEDIO	49	25	0.0309	4.69	5.03
MAXIMO	53	41	0.0912	5.12	5.43
MINIMO	18	13	0.0026	4.34	4.76
MODA	51	24	-	4.70	5.00

Tabla 5-1 Valores representativos por tipo de camión Aceleración – Frecuencia.

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBLO INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

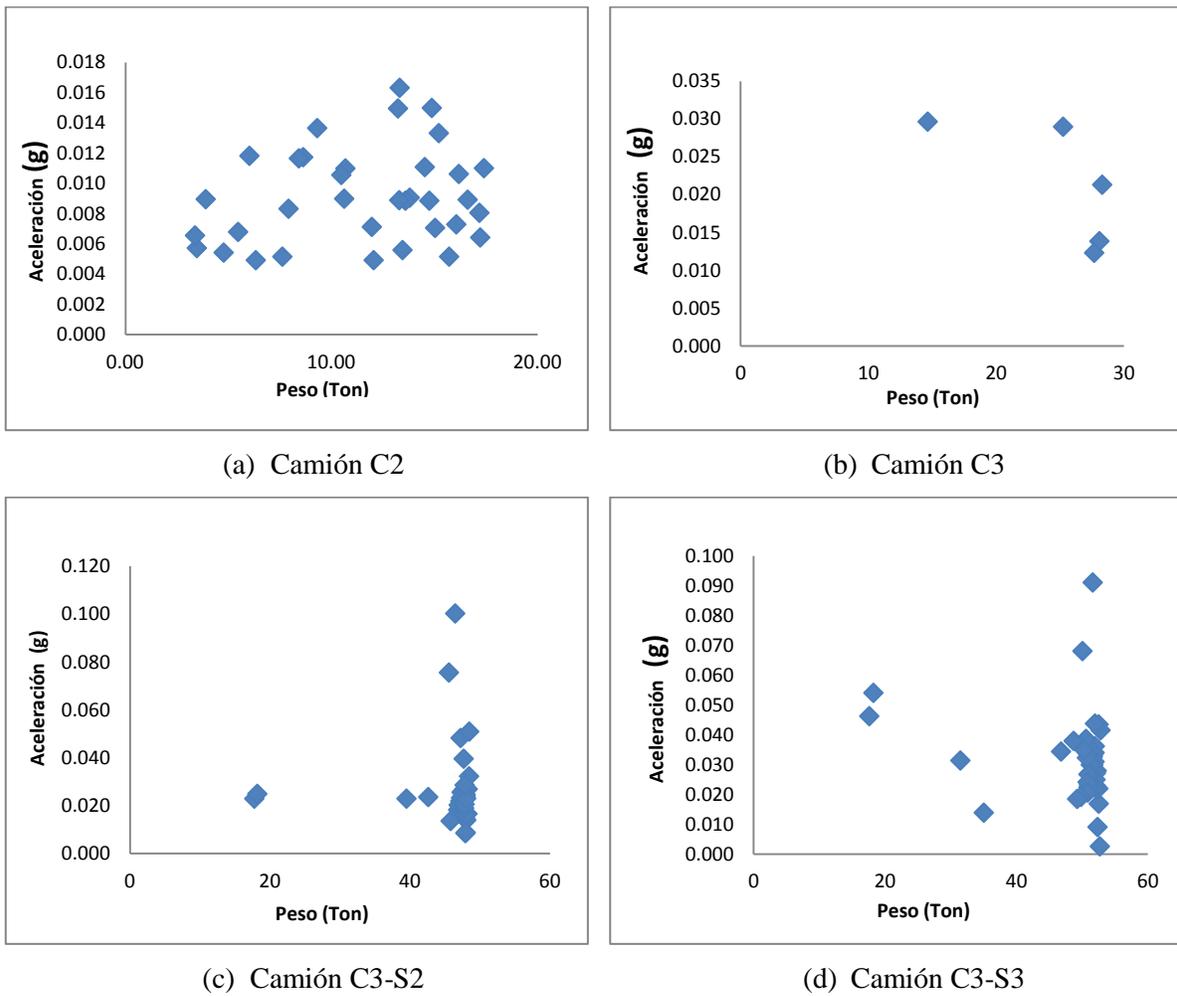


Figura 5-1 Peso vs Aceleración velocidad variable (a) Camión C2, (b) Camión C3, (c) Camión C3-S2, (d) Camión C3-S3

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBLO INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

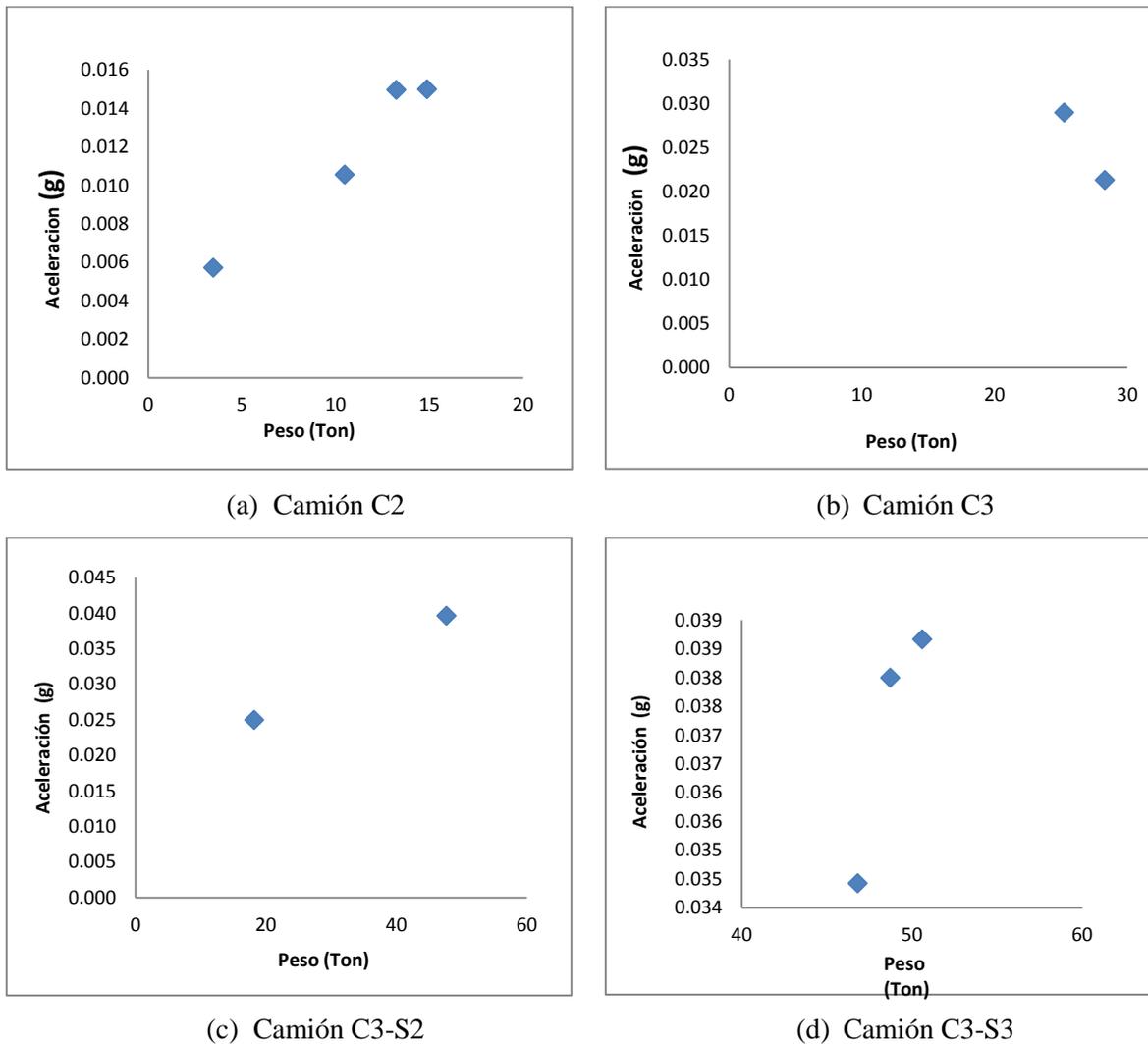


Figura 5-2 Peso vs Aceleración Velocidad Constante (a) Camión C2, (b) Camión C3, (c) Camión C3-S2, (d) Camión C3-S3

En la Figura 5-3 se muestra el registro de las frecuencias medidas contra el peso, donde se observa que los valores de frecuencia no varían notablemente con el aumento del peso.

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBLO INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

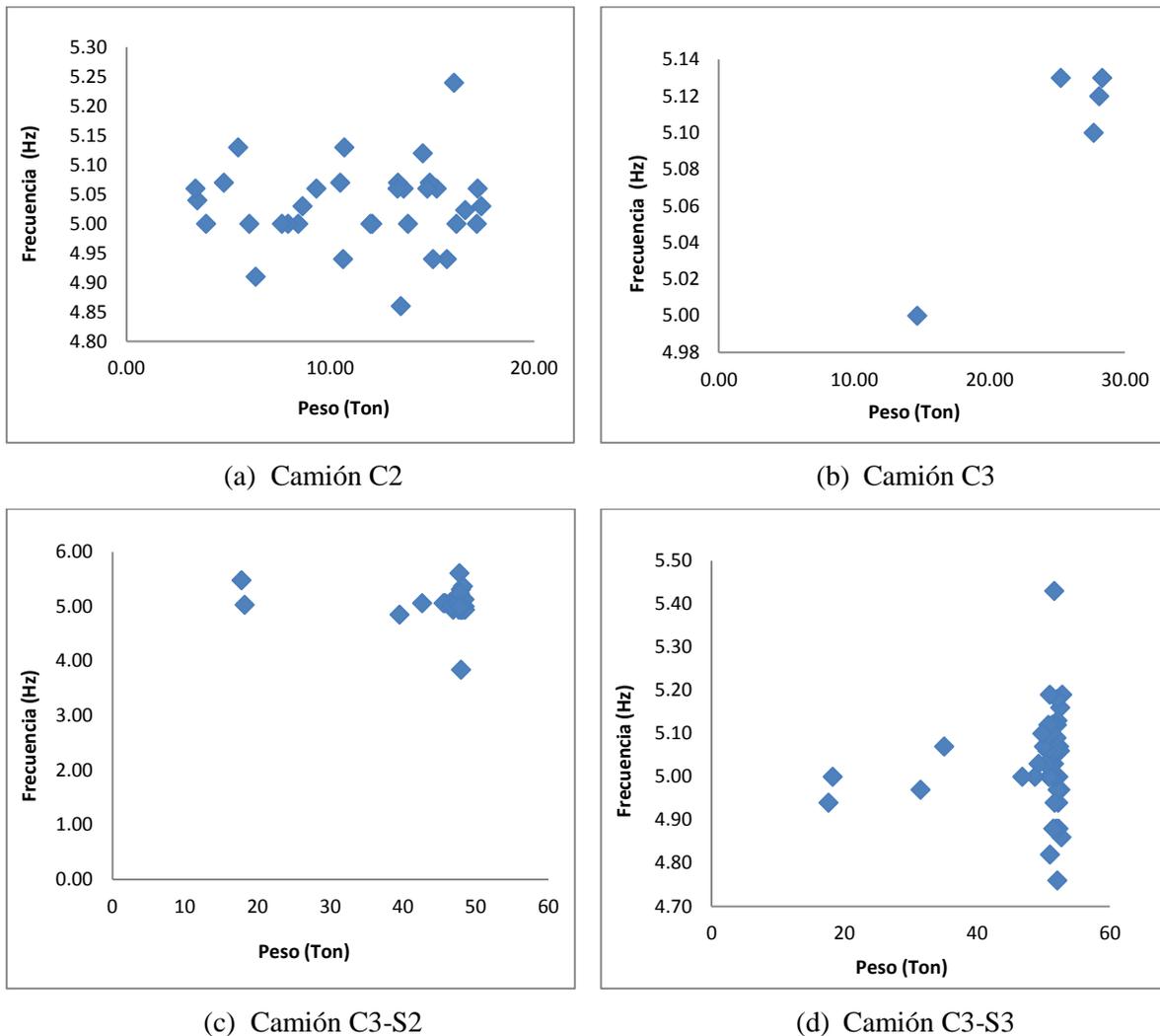


Figura 5-3 Peso vs Frecuencia Velocidad variable

5.2 ACELERACIONES Y FRECUENCIAS ENTRE TIPOS DE CAMIONES

Del registro de pesos obtenidos por la bascula se obtiene que cuando la categoría del camión es mayor (mayor numero de ejes), el peso aumenta. Por lo tanto la aceleración aumenta como se muestra en la Figura 5-4.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

En la Tabla 5-2 se observa numéricamente lo dicho anteriormente, el camión C3-S2 registra una aceleración promedio de 0.0271, muy cercano al valor promedio de aceleración que se registra para los camiones C3-S3. En la Figura 5-4 se observa que el peso de los camiones tipos C3-S2 y C3-S3 son muy cercanos luego los valores de aceleración se mantienen en el mismo rango para los tipos de camión. Adicionalmente se observa que hay valores de aceleración que comparte los tres tipos de camión, esto se debe a la velocidad con la que pasa el camión por el puente a mayor velocidad con la que pasa el camión, mayor es el registro de aceleración que le genera al tablero del puente.

También se puede observar en la Tabla 5-2 que a mayor registro de aceleración mayor frecuencia.

TIPO DE CAMIÓN	C2	C3	C3-S2	C3-S3
ACELERACIÓN (g)	0.0091	0.0212	0.0271	0.309
FRECUENCIA (Hz) PICO 1	4.56	4.56	4.57	4.69
FRECUENCIA (Hz) PICO 2	5.03	5.03	5.04	5.10

Tabla 5-2 Valores representativos para todos los tipos de camión Aceleración – Frecuencia

La Figura 5-5 muestra los valores obtenidos de frecuencia por el Espectro de Fourier, para cada tipo de camión. La Figura 5-5 (a) representa los valores del primer pico (primer modo de vibración), en la que se observa que dichos valores varían en unos rangos, más amplios que los mostrados en la Figura 5-5 (b) que representa el segundo pico (segundo modo de vibración), en la que se observa una tendencia lineal en un valor de frecuencia de 5Hz.

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBLO INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

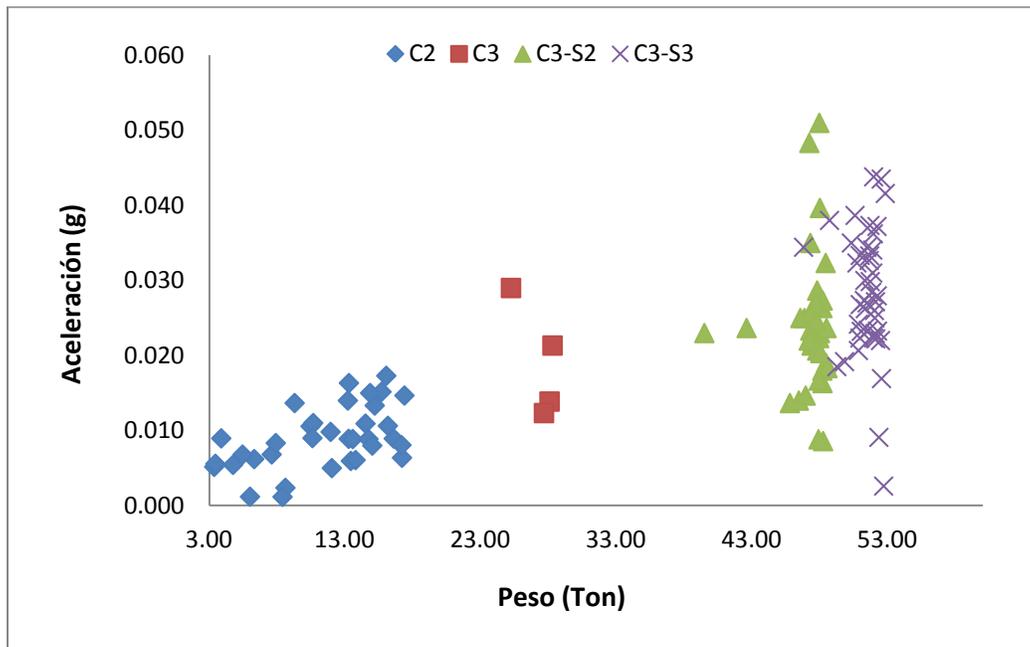
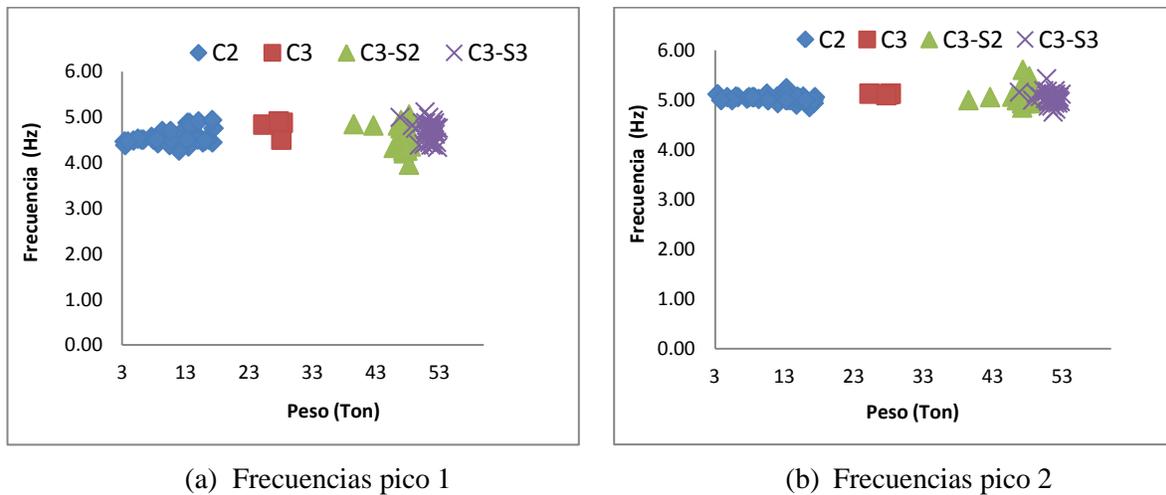


Figura 5-4 Comparación entre tipos de camiones Peso vs Aceleración



(a) Frecuencias pico 1

(b) Frecuencias pico 2

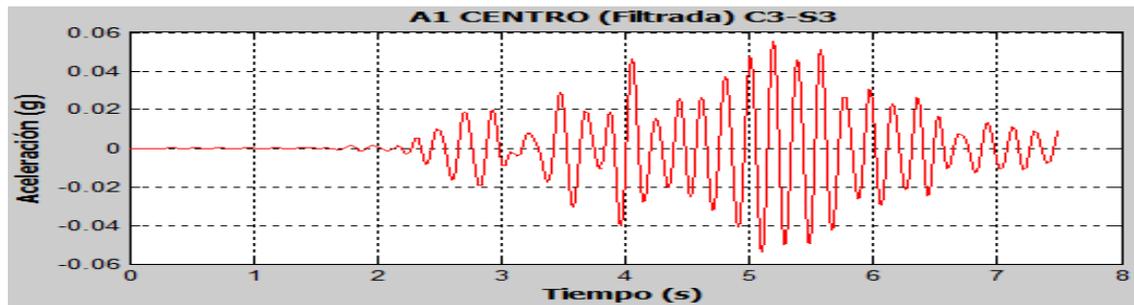
Figura 5-5 Frecuencias medidas para los diferentes tipos de camión (a) Frecuencias pico 1, (b) Frecuencias pico 2

5.3 FRECUENCIAS MEDIDAS - COMPARACIÓN DE METODOS

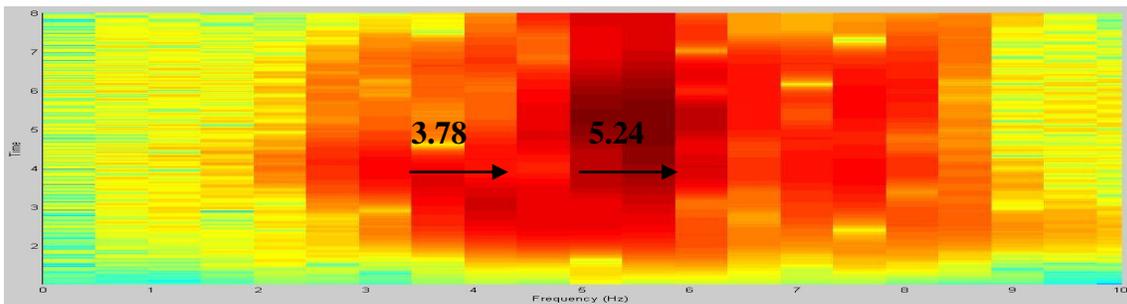
De cada tipo de camión se escogió el registro de peso de la báscula máximo y mínimo como se muestra en las Tablas 4-1 a 4-4, y el puente en su estado natural sin carga. Se obtuvo la frecuencia medida en campo por dos metodologías Espectro de Fourier y Espectro de Potencia.

La Figura 5-6(a) muestra la respuesta de aceleración medida en el centro de la luz del puente con los acelerómetros ubicados como se mencionó en la Figura 3-13. Los dos picos mostrados en las Figuras 5-6 (c) y (d), evidencian la participación importante de frecuencias de 3.78Hz y 5.24Hz. El espectrograma muestra la importancia de las frecuencias mediante la intensidad de colores. Se observa que la frecuencia de 3.78Hz tiene participación durante los momentos iniciales en que el camión pasa por el puente, y la frecuencia de 5.24 se presenta durante el paso del camión en el puente. Es necesario realizar una investigación adicional para asociar cada una de las frecuencias importantes (picos del Espectro) a los diferentes modos de vibración de la estructura.

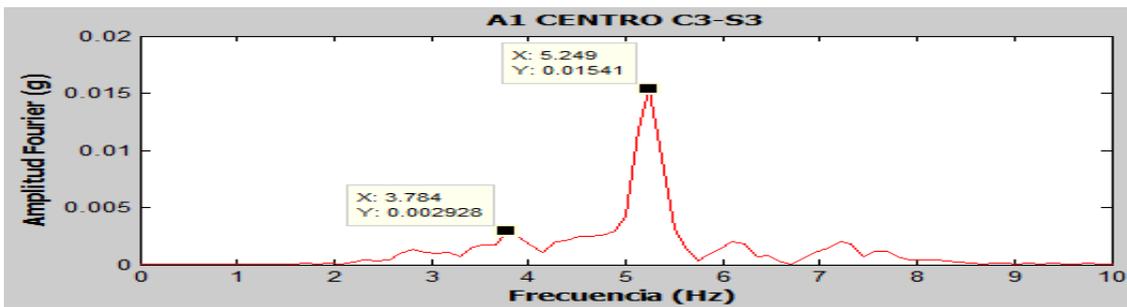
ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBLO INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS



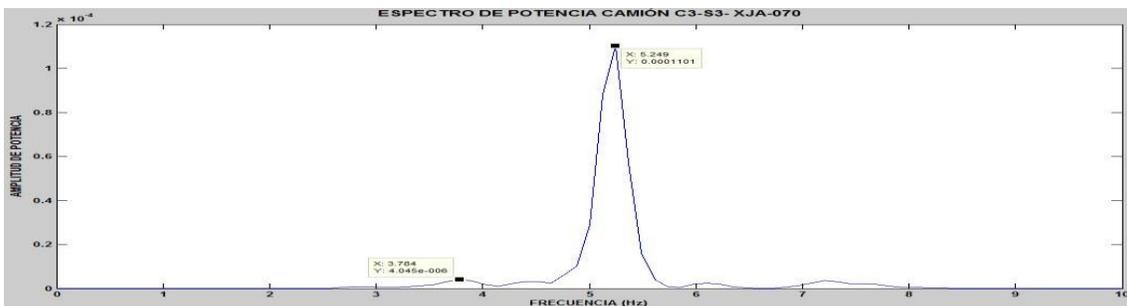
(a) Aceleración



(b) Espectrograma Tiempo-Frecuencia



(c) Espectro de Fourier



(d) Espectro de Potencia

Figura 5-6 Respuesta del puente con carga dinámica (a) Aceleración, (b) Espectrograma tiempo – frecuencia, (c) Espectro de Fourier, (d) Espectro de potencia.

5.4 COMPARACIÓN DE FRECUENCIAS (MEDIDAS Y ESTIMADAS)

5.4.1 PESO SIN VALOR DE IMPACTO

Se realizó la medición de la frecuencia del puente sin someterlo a carga, y con cargas dinámicas producidas por los camiones, mediante monitoreo y estimación de la frecuencia utilizando un modelo analítico (ver Tabla 5-3). La Figura 5-7 muestra la relación entre frecuencia medida en campo y la frecuencia estimada. Se observa que las frecuencias medidas en campo son mayores que las estimadas mediante el modelo analítico realizado en Sap 2000.

En la Tabla 5-3 se presenta el porcentaje de error entre las frecuencias medidas y las estimadas (modelo estructural), llegando a unos valores de error admisible.

NUMERO - TIPO DE CAMION	PESO (Ton)	Frecuencias Medidas Modo 1		Frecuencias Estimadas – Modelo Estructural Modo 1	% Error FFT	% Error Espectro de Potencia
		Espectro de Fourier	Espectro de Potencia			
Puente sin carga	327	5.06	5.12	4.6	9.09%	10.15%
(33)- C3-S3	52.83	3.78	3.78	3.98	5.29%	5.29%
(29) - C3-S2	48.57	4.39	3.41	4	8.88%	17.30%
(2) - C3	28.31	4.88	4.27	4.17	14.55%	2.34%
STZ600 - C3-S2	18.19	4.88	5	4.39	10.04%	12.20%
(32) - C3-S3	17.62	4.39	4.39	4.4	0.23%	0.23%
(12)- C2	17.4	4.76	4.39	4.33	9.03%	1.37%
(28) - C3	14.65	3.66	3.66	4.39	19.95%	19.95%
(5) - C2	3.47	4.51	4.51	4.56	1.11%	1.11%

Tabla 5-3 Porcentaje de Error entre frecuencias medidas y estimadas (Peso sin impacto)

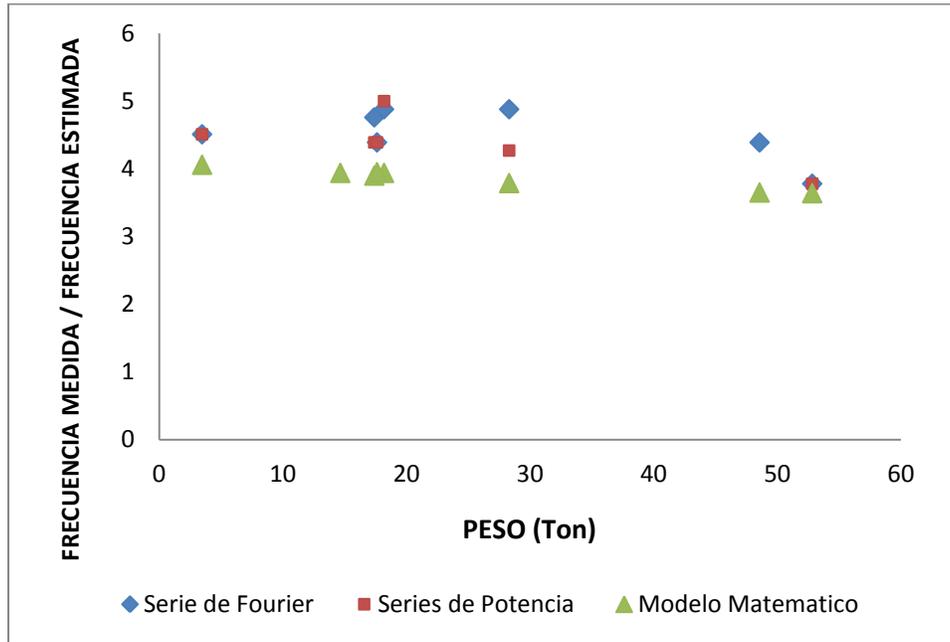


Figura 5-7 Comparación de Frecuencias Medidas y Estimadas (Peso sin impacto).

5.4.2 PESOS CON VALOR DE IMPACTO

Las Tablas 5-4 y 5-5 dejan ver el porcentaje de error presentado entre las frecuencias medidas y las estimadas (modelo estructural), cuando a los pesos se les incluye el impacto recomendado por el código CCDSP y la ASSTHO LRFD. En la Figura 5-8 se muestra que al incrementar los pesos por el factor de impacto se acercan más los valores de frecuencia estimados a los medidos, pero no se presenta una diferencia significativa entre las frecuencias con pesos afectados por impacto del CCDSP y la ASSTHO.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

CON IMPACTO APROXIMADO BASADO EN CCDSP							
NUMERO - TIPO DE CAMION	VELOCIDAD (Km/h)	PESO (Ton)	Frecuencias Medidas		Frecuencias Estimadas Modelo Estructural	% Error FFT	% Error Espectro de Potencia
			Espectro de Fourier	Espectro de Potencia			
(12) - C2	16	17.4	4.76	4.39	4.33	9.09%	1.43%
(5) - C2	28	3.47	4.51	4.51	4.58	1.52%	1.52%
(2) - C3	28	28.31	4.88	4.27	4.11	15.77%	3.74%
(28) - C3	42	14.65	3.66	3.66	4.37	19.33%	19.33%
(29) - C3-S2	31	48.57	4.39	3.41	3.93	10.58%	15.12%
STZ600 - C3-S2	27	18.19	4.88	5	4.41	9.69%	11.86%
(33) - C3-S3	28	52.83	3.78	3.78	3.89	2.95%	2.95%
(32) - C3-S3	41	17.62	4.39	4.39	4.38	0.13%	0.13%

Tabla 5-4 Porcentaje de Error entre frecuencias medidas y estimadas (Peso + Impacto) CCDSP

CON IMPACTO APROXIMADO BASADO EN ASSTHO LRFD							
NUMERO - TIPO DE CAMION	VELOCIDAD (Km/h)	PESO (Ton)	Frecuencias Medidas		Frecuencias Estimadas Modelo Estructural	% Error FFT	% Error Series de Fourier
			Espectro de Fourier	Espectro de Potencia			
(12) - C2	16	17.4	4.76	4.39	4.33	9.09%	1.43%
(5) - C2	28	3.47	4.51	4.51	4.58	1.52%	1.52%
(2) - C3	28	28.31	4.88	4.27	4.11	15.77%	3.74%
(28) - C3	42	14.65	3.66	3.66	4.37	19.33%	19.33%
(29) - C3-S2	31	48.57	4.39	3.41	3.93	10.58%	15.12%
STZ600 - C3-S2	27	18.19	4.88	5.00	4.41	9.69%	11.86%
(33) - C3-S3	28	52.83	3.78	3.78	3.89	2.95%	2.95%
(32) - C3-S3	41	17.62	4.39	4.39	4.38	0.13%	0.13%

Tabla 5-5 Porcentaje de Error entre frecuencias medidas y estimadas (Peso + Impacto) LRFD

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

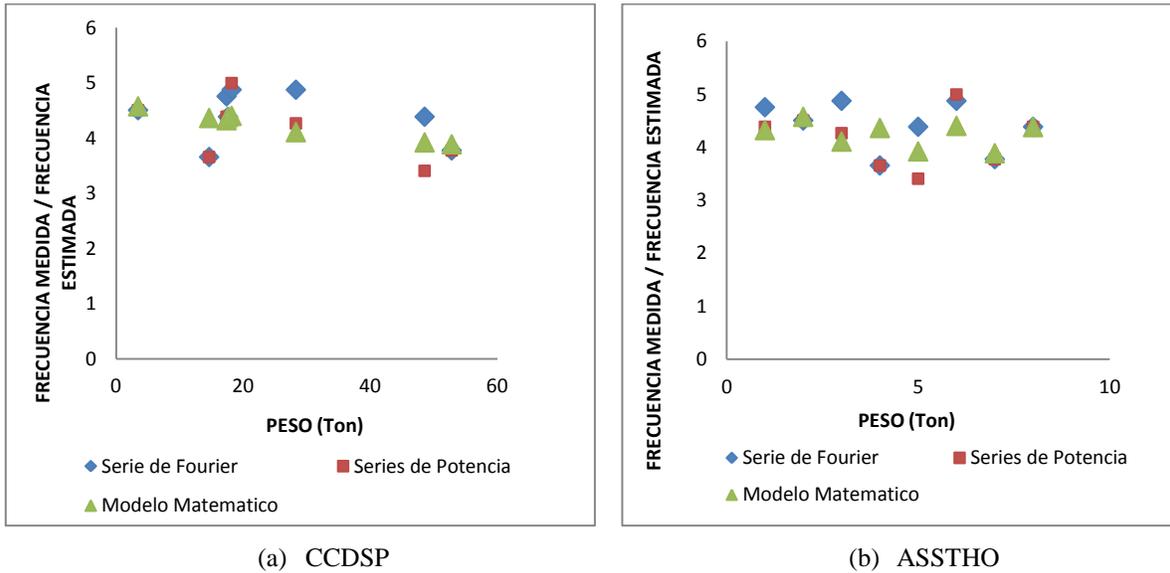


Figura 5-8 Comparación de Frecuencias medidas y estimadas (Peso + Impacto)

5.5 CARGAS POR EJES OBTENIDAS POR MEDIO DEL ALGORITMO GENÉTICO

En las Tablas 4-15 a 4-22 se muestra el porcentaje de error obtenido mediante la estimación de cargas por eje, con impacto aproximado según los códigos de diseño CCDSP y ASSTHO LRFD, en comparación a las cargas suministradas por la concesión (Báscula). Los errores son mayores para los pesos mínimos de cada camión cuando específicamente se afectan empleando el impacto de la ASSTHO.

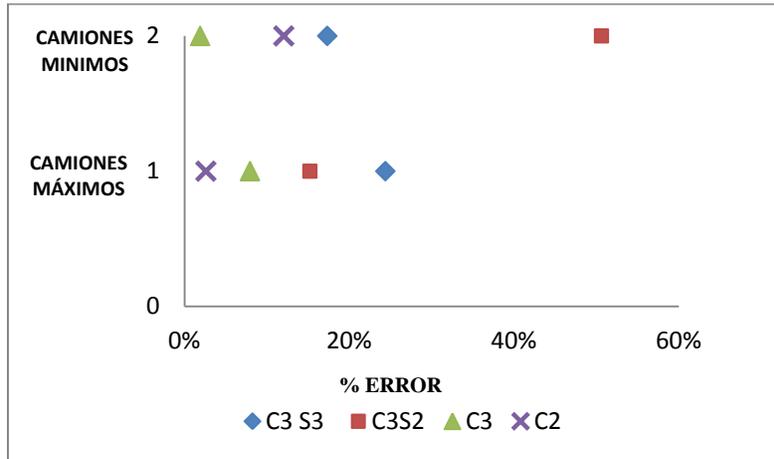


Figura 5-9 % de Error pesos máximos y mínimos CCDSP

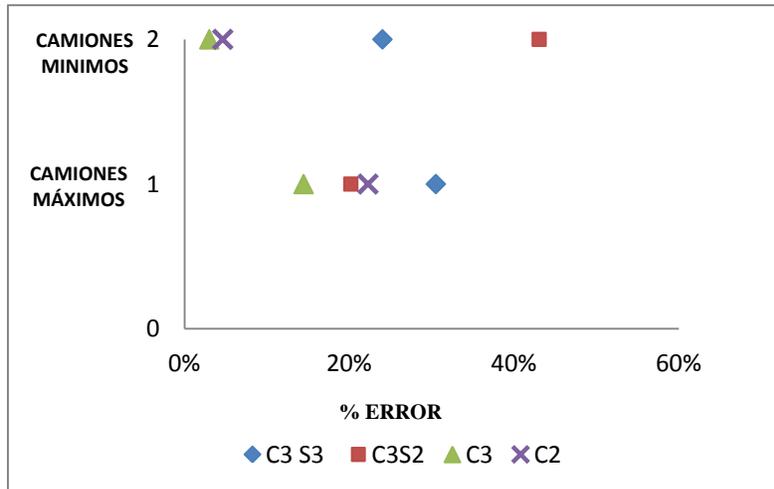


Figura 5-10 % de Error pesos máximos y mínimos ASSTHO

En la Figura 5-11 se muestra que las frecuencias del puente producidas por las cargas dinámicas se acercan al valor de la frecuencia del puente sin carga; pero con el aumento del peso de los vehículos se alejan de la frecuencia natural. Por lo tanto, entre más liviano es el peso del camión la diferencia entre frecuencias disminuye afectando la estimación de pesos por medio del algoritmo genético.

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBLO INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

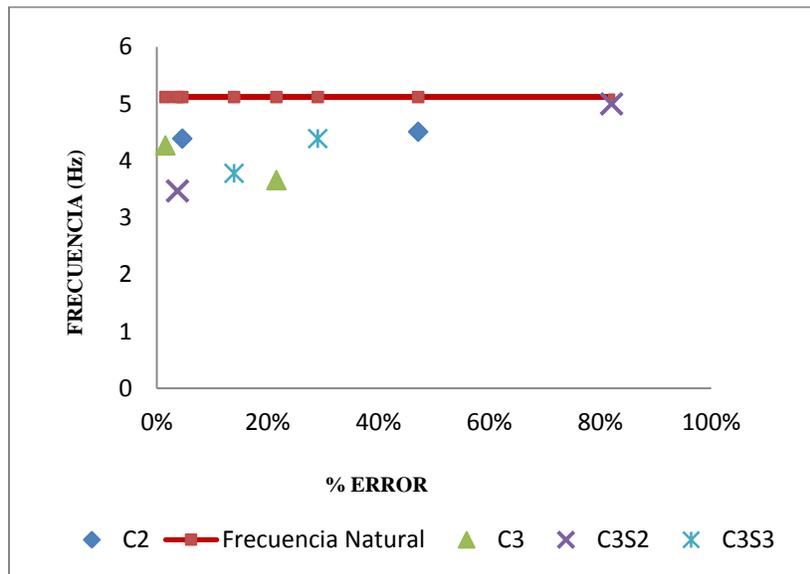


Figura 5-11 Incertidumbre de pesos en comparación con las frecuencias

En las Tablas 5-6 a 5-13 se muestra la comparación entre las cargas legales (*Fuente: Res. 4100 de 2004 modificada Res. 1782 de 2009 – Ministerio de Transporte*) y las cargas obtenidas mediante el algoritmo genético.

 CAMIÓN C3-S3			
EJE (P)	Cargas Legales	Peso Algoritmo CCDSP	Peso Algoritmo ASSTHO
1	6.00	4.10	3.76
2	11.00	6.05	5.56
3	11.00	8.66	7.96
4	8.00	7.08	6.51
5	8.00	7.11	6.54
6	8.00	6.94	6.38
Σ	52.00	39.95	36.71

Tabla 5-6 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C3S3 Máx.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

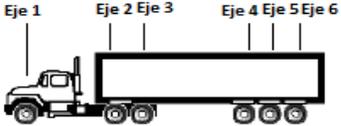
			
CAMIÓN C3-S3			
EJE (P)	Cargas Legales	Peso Algoritmo CCDSP	Peso Algoritmo ASSTHO
1	6.00	3.03	2.79
2	11.00	3.37	3.10
3	11.00	3.37	3.10
4	8.00	1.60	1.47
5	8.00	1.60	1.47
6	8.00	1.60	1.47
Σ	52.00	14.58	13.40

Tabla 5-7 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C3-S3 Min.

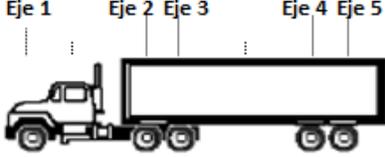
			
CAMIÓN C3-S2			
EJE (P)	Cargas Legales	Peso Algoritmo CCDSP	Peso Algoritmo ASSTHO
1	6.00	4.88	4.59
2	10.50	9.05	8.52
3	10.50	8.92	8.40
4	10.50	9.16	8.62
5	10.50	9.15	8.61
Σ	48.00	41.16	38.75

Tabla 5-8 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C3-S2 Máx.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

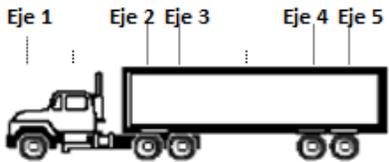
 CAMIÓN C3-S2			
EJE (P)	Cargas Legales	Peso Algoritmo CCDSP	Peso Algoritmo ASSTHO
1	6.00	3.28	3.12
2	10.50	6.85	6.51
3	10.50	5.92	5.62
4	10.50	5.63	5.35
5	10.50	5.74	5.45
Σ	48.00	27.41	26.04

Tabla 5-9 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C3S2 Min.

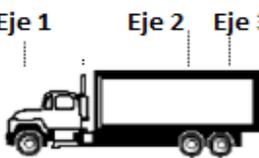
 CAMIÓN C3			
EJE (P)	Cargas Legales	Peso Algoritmo CCDSP	Peso Algoritmo ASSTHO
1	6.00	6.28	5.84
2	11.00	9.89	9.19
3	11.00	9.89	9.19
Σ	28.00	26.07	24.22

Tabla 5-10 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C3 Máx.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

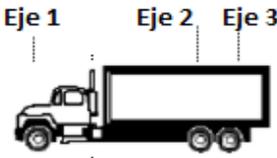
 CAMIÓN C3			
EJE (P)	Cargas Legales	Peso Algoritmo CCDSP	Peso Algoritmo ASSTHO
1	6.00	4.28	4.23
2	11.00	5.05	4.99
3	11.00	5.05	4.99
Σ	28.00	14.38	14.22

Tabla 5-11 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C3 Min.

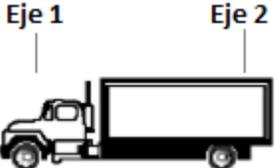
 CAMIÓN C2			
EJE (P)	Cargas Legales	Peso Algoritmo CCDSP	Peso Algoritmo ASSTHO
1	6.00	5.73	5.06
2	11.00	9.59	8.48
Σ	17.00	15.32	13.54

Tabla 5-12 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C2 Máx.

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

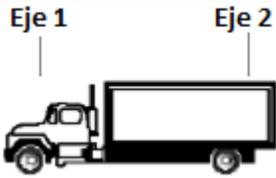
			
CAMIÓN C2			
EJE (P)	Cargas Legales	Peso Algoritmo CCDSP	Peso Algoritmo ASSTHO
1	6.00	1.79	1.66
2	11.00	1.79	1.66
Σ	17.00	3.57	3.32

Tabla 5-13 Comparación Pesos legales – Pesos algoritmo C2 Min.

En las Tablas 5-6 a 5-13 se observa para cada tipo de camión los resultados obtenidos por medio del algoritmo genético cuando se utiliza el impacto con el CCDSP el valor se acerca más al valor de carga legal, mientras que el valor de eje calculado con ASSTHO LRFD difiere mas, pero en general las dos metodologías dan menores que las cargas legales.

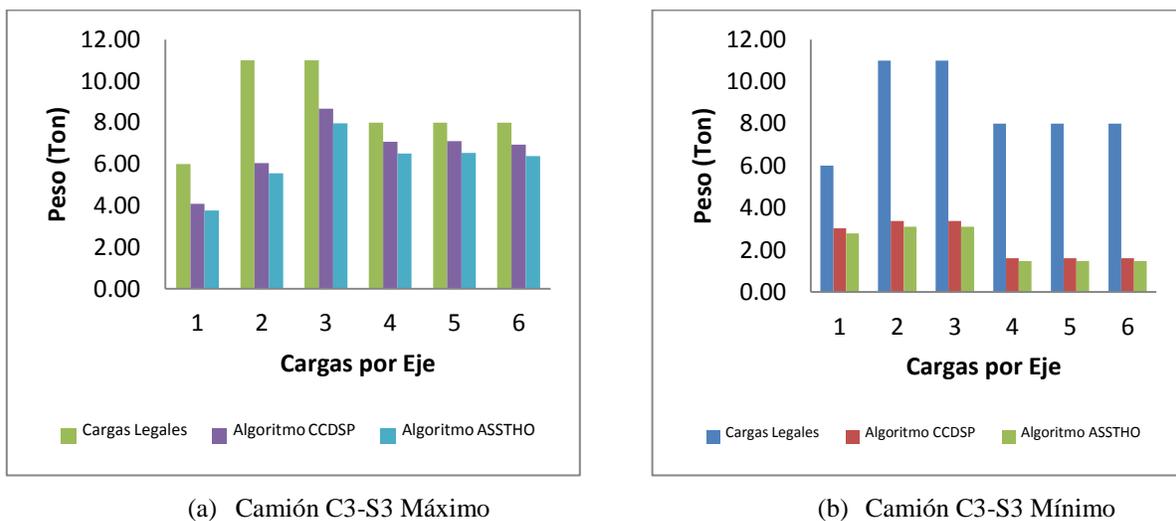


Figura 5-12 Comparación de Pesos Legales con Pesos Algoritmo (a) Camión C3S3 máximo, (b) Camión C3-S3 mínimo

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN PUEBLO INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS

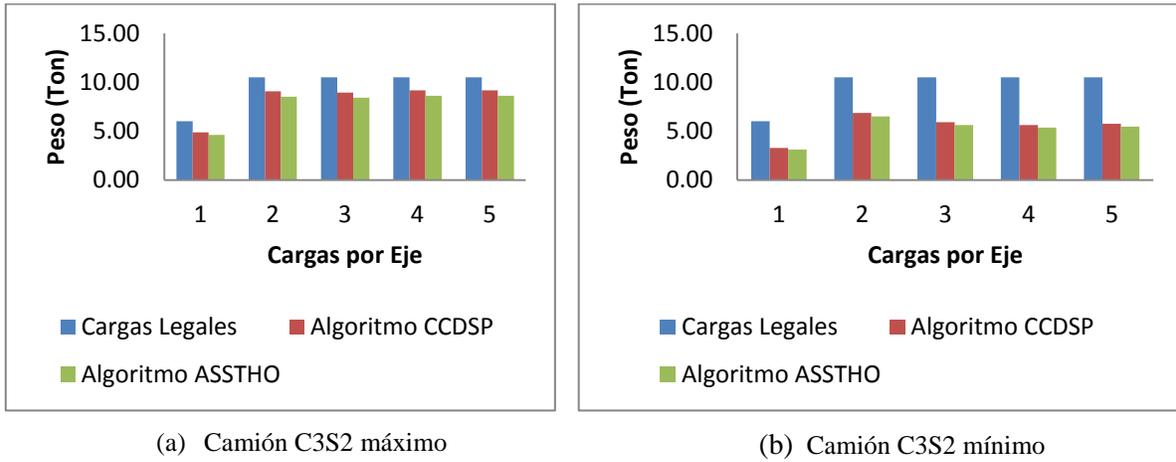


Figura 5-13 Comparación de Pesos Legales con Pesos Algoritmo (a) Camión C3-S2 máximo, (b) Camión C3-S2 mínimo

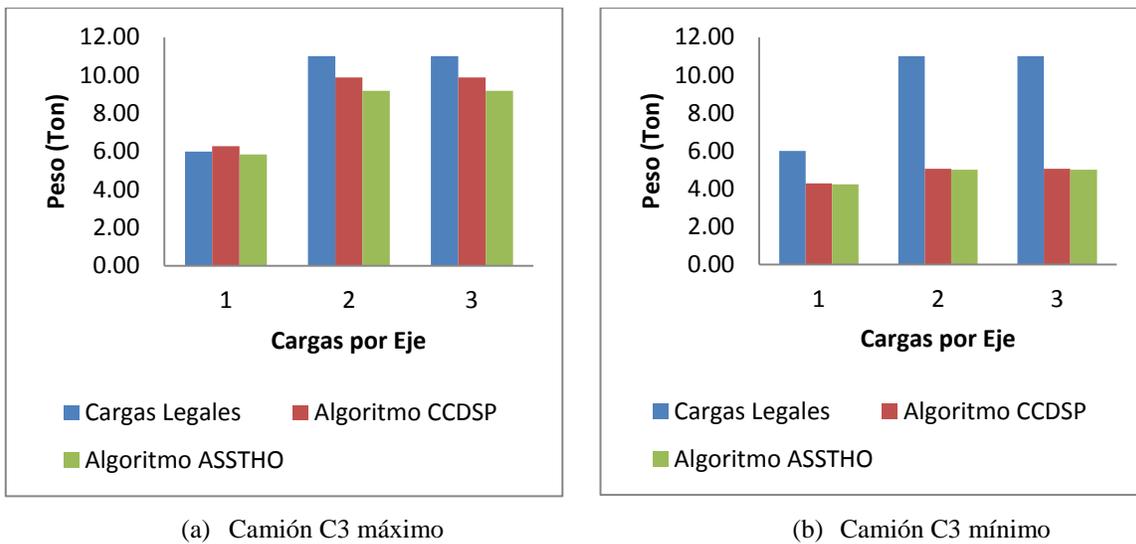


Figura 5-14 Comparación de Pesos Legales con Pesos Algoritmo (a) Camión C3 máximo, (b) Camión C3 mínimo

**ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE CIRCULAN POR UN
PUENTE INSTRUMENTADO CON ACELERÓMETROS**

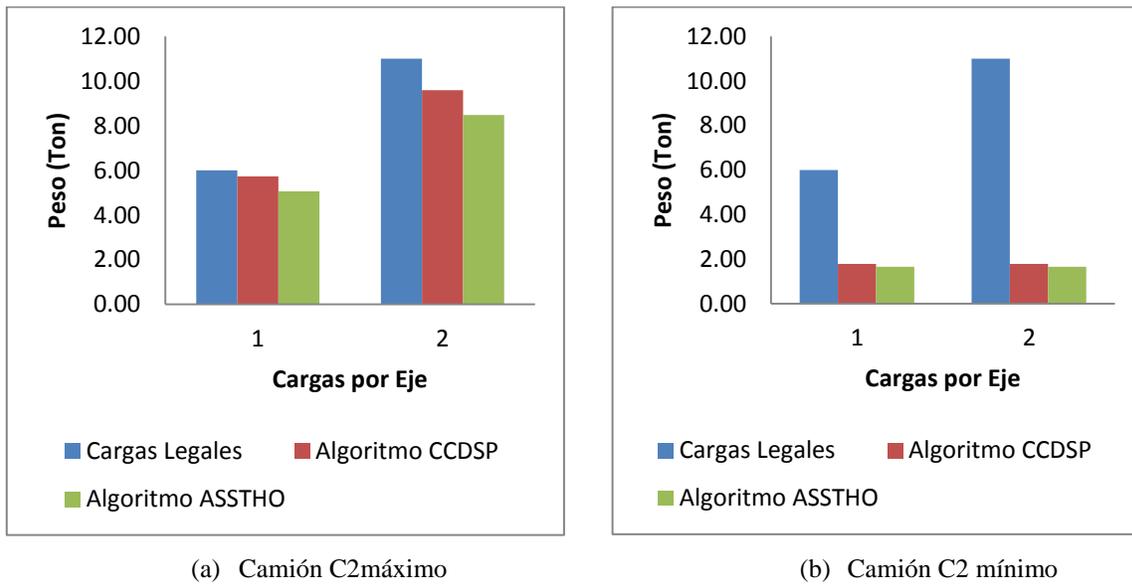


Figura 5-15 Comparación de Pesos Legales con Pesos AlgoritmoC2 (a) Camion C2 máximo, (b) Camión C2 mínimo

6. CONCLUSIONES

Se elaboró el modelo estructural de la superestructura del puente Guamo en el programa MATLAB, tipo parrilla o entramado compuesto por elementos finitos discretos tipo “frame”, logrando un nivel de calibración basado en dos (2) frecuencias predominantes de vibración sin cargas producida por el tráfico obtenidas experimentalmente a través de la transformada de Fourier y el Espectro de potencia con un porcentaje de error que varía entre 5% y el 10% respectivamente. Dicha calibración se basó en la variación del módulo de elasticidad de las vigas y la losa, del cual no se tenía información experimental porque no hacia parte del alcance de la tesis.

Se implementó un algoritmo genético en el programa MATLAB, apoyado en diferentes funciones predeterminadas de dicho programa, que permite estimar las cargas dinámicas producidas por los camiones pesados que circulan por el puente instrumentado, basados en la matriz de rigidez calibrada de la superestructura del puente y en la variación de la matriz de masa. La función objetivo de dicho algoritmo se basó en la identificación de los nuevos modos de vibración y sus correspondientes frecuencias determinadas experimentalmente, que se generan cada vez que circulan por un puente en un solo carril diferentes camiones pesados.

Se encontró que el cálculo de los pesos totales estimados por medio del algoritmo genético desarrollado en la presente tesis incluyendo el impacto del CCDSP, presentan un error para los vehículos C3-S3 (14% – 40%) y C3-S2 (7% al 23%), y para los vehículos C3 (28%-40%) y C2 entre el (8% al 14%). Esto se debió a que se tiene menos incertidumbre dentro del algoritmo genético para los camiones con menos cantidad de ejes que los camiones con mayor cantidad de ejes, adicionalmente, es necesario realizar más pruebas para los diferentes vehículos C3S3, C3S2, C3 Y C2.

Igualmente se determinó que hay mayores errores en la estimación de los pesos por eje que en la determinación del peso total, lo cual se debe a la incertidumbre que genera los diferentes aspectos en esta investigación, tales como: la precisión del valor de impacto y las variables relacionadas para su determinación (velocidad, amortiguamiento del camión, etc), considerar la masa como una carga puntual y no distribuida que depende de la presión de las llantas, entre otras.

Finalmente, estos resultados representan un primer aporte relevante para este tema de investigación, cumpliendo con el objetivo principal de este trabajo de tesis y constituyéndose en una prueba piloto, a través de la cual se pueden apoyar nuevos trabajos en esta área profundizando en diferentes aspectos, especialmente los relacionados con la determinación del impacto, la identificación modal, nuevos sistemas de monitoreo, entre otros.

Se realizaron comparaciones analíticas de las cargas dinámicas reales obtenidas mediante este algoritmo genético y las cargas legales en nuestro País, encontrándose que las cargas estimadas en esta investigación durante solamente una semana no superan los límites establecidos oficialmente. Sin embargo para tener más mayor seguridad de estos resultados es necesario en un próximo trabajo hacer más monitoreo y solucionar los diferentes aspectos mencionados anteriormente.

7. TRABAJOS FUTUROS

Realizar un estudio detallado del impacto, teniendo en cuenta variables como: rugosidad del pavimento, amortiguamiento de cada vehículo, velocidad y comportamiento dinámico del camión, etc.

Instrumentar los camiones para evaluar su comportamiento dinámico, para modelos estructurales más completos.

Realizar un análisis profundo para la identificación modal del tablero del puente, adicionalmente, las cargas ejercidas por los vehículos en realidad no son puntuales sino que se encuentran distribuidas en un área (huella de la llanta).

Instrumentar el puente para identificar no solamente la distancia entre ejes de los camiones y su velocidad, sino también su ubicación en sentido transversal.

Optimizar el algoritmo incluyendo nuevos escenarios de la ubicación de las cargas en el espacio, entre otros.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acevedo A.M y Martínez L.A (2006), "Diseño de algoritmos para la determinación indirecta de las cargas dinámicas de los carros que actúan sobre un prototipo instrumentado del puente puerto Salgar", Trabajo de grado, Director: Edgar Muñoz, Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Ingeniería Civil.

Cunagin, W., Mickler, W.A. and Wright, C., (1997). 'Evasion of Weight-Enforcement Stations by Trucks'. *Transportation Research Record*, 1570, 181-190.

D.E. Goldberg, "Computer-aided Gas Pipeline Operation Using Genetic Algorithm and Rule Learning" , Doctoral Disertation, University of Michigan, Disertation Abstracts International, Vol. 44, no.10, (1983).

D.E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., (1989).

Dolcemascolo, V., & Sjögren, L. (n.d.). Bridge weigh in motion. In B. Jacob & E. O'Brien (Eds.), *International Conference on Heavy Vehicles HVP* Paris 2008 (pp. 323–331).

Echeverry, J. D., Guarnizo Lemus, C., & Orozco G., Á. Á. (2007). Análisis de la densidad espectral de potencia en registros mer. *Scientia et Technica*, 3(35).

Gonzalez, A. and Obrien, E.J. (2001), 'The Development of a Dynamic Bridge Weigh-in-Motion Algorithm', pre-proceedings of 2nd European Conference on

Weigh-in-Motion of Road Vehicles, Eds. E.J. OBrien & B. Jacob, Lisbon, European Commission, Luxembourg, pp. 445-452.

Gonzalez, A., Rowley, C. and OBrien, E.J. (2008), 'A general solution to the identification of moving vehicle forces on a bridge', International Journal for Numerical Methods in Engineering, in press.

Hardy, G. H., & Rogosinski, W. (1956). *Fourier series*. University Press.

Instituto Nacional de Vías (1995). Código colombiano de diseño sísmico de puentes. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica

Inc, M. (2007). *MATLAB: Optimization Toolbox 3 : User's Guide*. The MathWorks.

Law, S.S., Zhu, X.Q. (2000), 'Study on different beam models on moving force identification', Journal of sound and vibration, 234(4), pp. 661-679.

Leming S.K. and Stalford, H.L. (2003), Bridge Weigh-In-Motion System using superposition of Dynamic Truck/Static Bridge Interaction, in Proceedings of the American Control Conference, Denver, Colorado.

Matui S., El-Hakim A. (1989), Estimation of Axle Loads of Vehicle by Crack Opening of RC Slab, Journal of Structural Engineering, JSCE, pp.407-418, 1989 (in Japanese)

Moler, C. B. (2010). *Numerical Computing with MATLAB*. SIAM.

Moses, F., (1979), 'Weigh-in-Motion System using Instrumented Bridges'. ASCE Transportation Engineering Journal, 105, TE3, 233-249.

Muñoz E.E. (2001), "Estudio de las causas del colapso de algunos puentes de Colombia". Revista Ingeniería y Universidad, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Muñoz E. (2011), "Algoritmo Genético para la determinación de cargas dinámicas de camiones pesados que circulan en un puente instrumentado.". Pontificia Universidad Javeriana, Trabajo de Investigación.

Officials, A. A. of S. H. and T. (2005). *AASHTO LRFD bridge design specifications: customary U.S. Units*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

O'Brien, E.J., Gonzalez, A, Zindaric, A. and McNulty, P., 2002. 'Testing of a Bridge Weigh-in-Motion System in Cold Environmental Conditions' Proceedings of the 3rd Conference on Weigh-in-Motion, Orlando, Florida, 13-15 May.

Papoulis, A. (1985). *Sistemas digitales y analógicos, transformadas de Fourier, estimación espectral*. Marcombo.

Peters, R.J., (1986). 'CULWAY – an Unmanned and Undetectable Highway Speed Vehicle Weighing System'. Proceedings 13th Australian Road Research Board Conference, Adelaide, Australia. Victoria: ARRB, 13(6), 70-83.

Pino L. A. (2006), "Propuesta para la elaboración de norma para la evaluación de superestructura de puentes de carretera existentes en Colombia", Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Ingeniería Civil.

Quilligan, M., Karoumi, R. and OBrien, E.J. (2003), 'Development and Testing of a 2-Dimensional Multi-Vehicle Bridge-WIM Algorithm', 3rd International Conference on Weigh-in-Motion (ICWIM3), Eds. B. McCall & E. OBrien, Orlando, pp. 199-208.

Rowley, C., Gonzalez, A., OBrien, E.J., Znidaric, A. (2008), 'Comparison of Conventional and Regularized Bridge Weigh-in-Motion Algorithms', 5th International Conference on Weigh-in-Motion (ICWIM5), Eds. B. Jacob, E.J. OBrien, A. OConnor, M. Bouteldja, LCPC Publications, Paris.

Ryall, M. J., Parke, G. A. R., & Harding, J. E. (2000). *Bridge Management 4: Inspection, Maintenance, Assessment and Repair*. Thomas Telford.

Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Y. (1977), *Solutions of ill-posed problems*. New York: John Wiley.

Valdés, J., & De la Colina, J. (2013). Análisis de la Amplificación Dinámica de la Carga Viva en Puentes con Base en Pruebas Experimentales. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 21(1).

Zhu, X.Q., Law, S.S. (2001), 'Identification of moving loads on an orthotropic plate', *Journal of vibration and acoustics*, 123, pp.238-244.

Zhu, X.Q., Law, S.S. (2003), 'Time domain identification of moving loads on bridge deck', *Journal of vibration and acoustics*, 125, pp. 187-198.

Znidaric, A., Lavric, I., Kalin, J. (2008), Measurements of bridge dynamics with a bridge weigh-in-motion system', 5th International Conference on Weigh-in-Motion (ICWIM5), Eds. B. Jacob, E.J. OBrien, A. OConnor, M. Bouteldja, ISTE/Hermes, London.