



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: “ANÁLISIS DE ESFUERZOS MEDIANTE ADQUISICIÓN
DE DATOS EN EL PUNTO MÁS CRÍTICO DEL MARCO DE
UNA BICICLETA TIPO BMX EN MOVIMIENTO”**

AUTOR: BENALCÁZAR CEPEDA, DAVID FERNANDO

DIRECTOR: ING. LEIVA, CRISTIAN

CODIRECTOR: ING. GORDILLO, RODOLFO

SANGOLQUÍ

2015

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICADO

ING. CRISTIAN LEIVA

Director

ING. RODOLFO GORDILLO

Codirector

CERTIFICAN

Que el trabajo “ANÁLISIS DE ESFUERZOS MEDIANTE ADQUISICIÓN DE DATOS EN EL PUNTO MÁS CRÍTICO DEL MARCO DE UNA BICICLETA TIPO BMX EN MOVIMIENTO” realizado por el Sr. David Fernando Benalcázar Cepeda, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Debido a que el presente trabajo beneficia a la industria del diseño y construcción de elementos mecánicos, se recomienda su publicación.

El mencionado trabajo consta de dos documentos empastados y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (PDF).

Autorizan al Sr. David Fernando Benalcázar Cepeda, entregar el mismo al Ing. José Pérez, en su calidad de Director de la Carrera.

Sangolquí, 8 de mayo del 2015



ING. CRISTIAN LEIVA

Director



ING. RODOLFO GORDILLO

Codirector

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, David Fernando Benalcázar Cepeda

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado “ANÁLISIS DE ESFUERZOS MEDIANTE ADQUISICIÓN DE DATOS EN EL PUNTO MÁS CRÍTICO DEL MARCO DE UNA BICICLETA TIPO BMX EN MOVIMIENTO”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme con las citas que constan en las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 8 de mayo del 2015



David Fernando Benalcázar Cepeda

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, David Fernando Benalcázar Cepeda

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “ANÁLISIS DE ESFUERZOS MEDIANTE ADQUISICIÓN DE DATOS EN EL PUNTO MÁS CRÍTICO DEL MARCO DE UNA BICICLETA TIPO BMX EN MOVIMIENTO”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 8 de mayo del 2015



David Fernando Benalcázar Cepeda

DEDICATORIA

A mis padres, por volcar todos sus esfuerzos en sus hijos y nunca permitir que los mismos transiten por caminos equivocados.

A Catalina mi madre, por nunca dejarme solo y soportar mis malos actos.

A Eduardo mi padre, por enseñarme a ver el mundo de una manera objetiva y abierta.

A Esteban mi hermano, por confiar en mí sin necesitar pruebas y ser un hermano ejemplar.

A mi tío Milton, por sus consejos de amigo y padre al mismo tiempo.

Para Alejandra, una gran mujer que dio un mejor rumbo a mi vida y con su amor e inteligencia hizo de mí una mejor persona.

A mi abuelito Angelito en el centenario de su nacimiento y a mi tía "Pauli" mi madrina, estos dos seres eternos en mi mente que desde el cielo me dan fuerzas y motivación.

A tres profesores de mi época del colegio que ya no están en este mundo pero tenían la certeza de que llegue el momento de mi madurez y sea capaz de alcanzar grandes cosas.

A mis mascotas "Cami" y "Lua", por tantos días y largas noches nunca me dejaron solo en este largo camino.

David Fernando Benalcázar Cepeda

AGRADECIMIENTO

A mis padres y hermano por ser parte de esta meta alcanzada y apoyarme en todo momento.

A Alejandra mi novia por ser una gran persona y compañera de carrera, aprendo mucho contigo y sigo aprendiendo.

A los familiares y amigos que verdaderamente expresaron sus buenos deseos hacia mí.

Al Ingeniero Cristian Leiva director de la Tesis por hacer del proyecto un verdadero reto.

Al Ingeniero Rodolfo Gordillo codirector de la Tesis por tener mucha paciencia conmigo.

Al Ingeniero Paúl Ayala por su tiempo a pesar de no ser designado como director de este trabajo.

A mi gran amigo Diego Hidalgo por guiarme con sus conocimientos en varias secciones del trabajo.

A mi colega Luis "Tato" Mayorga, sin tu esfuerzo esa bicicleta nunca hubiera rodado.

A todos los buenos profesores que impulsaron y potenciaron mi gusto por la Ingeniería Mecánica

A tantas personas que en algún momento aportaron algo en mi carrera y en este trabajo.

David Fernando Benalcázar Cepeda

Índice de Contenido

| | |
|--------------------------------------|-------|
| CERTIFICADO..... | ii |
| DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD | iii |
| AUTORIZACIÓN..... | iv |
| DEDICATORIA | v |
| AGRADECIMIENTO | vi |
| RESUMEN..... | xxxii |

CAPÍTULO 1

| | |
|---------------------------------------|----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. ANTECEDENTES..... | 1 |
| 1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA | 2 |
| 1.3. OBJETIVOS..... | 3 |
| 1.3.1. OBJETIVO GENERAL | 3 |
| 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 3 |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA..... | 4 |
| 1.5. ALCANCE | 5 |

CAPÍTULO 2

| | |
|---------------------------------------------------|----------|
| MARCO TEÓRICO | 6 |
| 2.1. BREVE RESEÑA DEL ANÁLISIS DE ESFUERZOS | 6 |
| 2.1.1. FUERZAS | 6 |
| 2.1.2. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE (DCL)..... | 10 |
| 2.1.3. ESFUERZOS | 11 |

| | | |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.3.1. | LÍNEA Y FIBRA NEUTRA..... | 12 |
| 2.1.3.2. | CARGA AXIAL-ESFUERZO NORMAL | 13 |
| 2.1.3.3. | FUERZA Y ESFUERZO CORTANTE | 14 |
| 2.1.3.3.1. | Esfuerzo Cortante Directo..... | 15 |
| 2.1.3.3.2. | ESFUERZO CORTANTE SECCIONAL | 16 |
| 2.1.3.4. | ESFUERZOS GENERADOS POR MOMENTOS | 17 |
| 2.1.3.4.1. | ESFUERZO POR MOMENTO FLECTOR | 18 |
| 2.1.3.4.1.2. | ESFUERZO POR TORSIÓN | 19 |
| 2.1.3.5. | DEFORMACIÓN | 21 |
| 2.1.3.5.1. | DEFORMACIONES UNITARIAS | 21 |
| 2.1.3.5.1.1. | DEFORMACIÓN UNITARIA NORMAL | 21 |
| 2.1.3.5.1.2. | DEFORMACIÓN UNITARIA CORTANTE..... | 23 |
| 2.1.3.6. | RESISTENCIA DE UN MATERIAL | 24 |
| 2.1.3.7. | ESFUERZOS COMBINADOS..... | 26 |
| 2.1.3.7.1. | COMBINACIÓN DE ESFUERZOS NORMALES | 27 |
| 2.1.3.7.2. | ESFUERZOS NORMALES Y CORTANTES COMBINADOS ... | 30 |
| 2.1.3.8. | CÍRCULO DE MOHR..... | 31 |
| 2.1.3.9. | USO DE ROSETAS DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR ESFUERZOS PRINCIPALES | 36 |
| 2.1.3.10. | ESFUERZO DE VON MISES..... | 39 |
| 2.1.3.11. | FACTOR DE SEGURIDAD..... | 41 |
| 2.2. | BREVE RESEÑA SOBRE LAS BICICLETAS TIPO BMX | 43 |
| 2.2.1. | HISTORIA Y ANTECEDENTES..... | 43 |
| 2.2.2. | CARACTERÍSTICAS DE UNA BICICLETA BMX..... | 45 |
| 2.2.3. | EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL PARA LA PRÁCTICA | |

| | | |
|------------|-------------------------------------------------------------------|----|
| | DEL BMX | 50 |
| 2.2.4. | MODALIDADES DEL BMX | 51 |
| 2.3. | BREVE RESEÑA DE LOS PROGRAMAS CAD Y CAE..... | 56 |
| 2.3.1. | DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR (CAD) | 56 |
| 2.3.2. | BENEFICIOS DE CAD | 57 |
| 2.3.3. | INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR (CAE)..... | 58 |
| 2.3.4. | BENEFICIOS DE CAE | 60 |
| 2.4. | BREVE RESEÑA DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS E INSTRUMENTACIÓN..... | 61 |
| 2.4.1. | CARACTERÍSTICA ESTÁTICA | 66 |
| 2.4.2. | CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS..... | 70 |
| 2.4.3. | GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS..... | 71 |
| 2.4.3.1. | PARTES DE UNA GALGA EXTENSIOMÉTRICA Y COMPORTAMIENTO | 73 |
| 2.4.3.2. | SENSIBILIDAD | 76 |
| 2.4.3.3. | TIPOS APLICACIONES Y MATERIALES..... | 76 |
| 2.4.4. | ROSETA DE DEFORMACIONES..... | 77 |
| 2.4.4.1. | TIPOS DE ROSETAS | 79 |
| 2.4.4.1.1. | ROSETA EN T | 80 |
| 2.4.4.1.2. | ROSETA DE DEFORMACIÓN A 45° | 81 |
| 2.4.4.1.3. | ROSETA DE DEFORMACIÓN A 60° | 82 |
| 2.4.4.1.4. | ROSETA DELTA..... | 83 |
| 2.4.5. | ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL DE UNA GALGA EXTENSIOMÉTRICA | 83 |
| 2.4.5.1. | CONFIGURACIONES DEL PUENTE DE WHEATSTONE | 85 |

| | | |
|------------|---------------------------------|----|
| 2.4.5.1.1. | CUARTO DE PUENTE | 85 |
| 2.4.5.1.2. | MEDIO PUENTE..... | 86 |
| 2.4.5.1.3. | PUENTE COMPLETO | 87 |
| 2.4.6. | AMPLIFICADORES DE SEÑAL..... | 90 |
| 2.4.7. | ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 91 |
| 2.4.7.1. | FRECUENCIA DE MUESTRO..... | 92 |
| 2.4.7.2. | DIGITALIZACIÓN DE LA SEÑAL..... | 93 |

CAPÍTULO 3

| | | |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----|
| EJECUCIÓN DEL MODELADO 3D Y ANALISIS DEL MARCO..... | 96 | |
| 3.1. | ESPECIFICACIONES DE LA BICICLETA | 96 |
| 3.2. | OBTENCIÓN DE MEDIDAS Y CARACTERÍSTICAS DEL MARCO..... | 101 |
| 3.2.1. | EQUIPOS DE MEDICIÓN..... | 102 |
| 3.2.2. | MEDICIÓN DE ESPESORES Y DIÁMETROS DE LOS TUBOS..... | 103 |
| 3.2.3. | MEDICIÓN DE LA LONGITUD DE LOS TUBOS..... | 108 |
| 3.2.4. | ALOJAMIENTOS DEL EJE TRASERO DE LA BICICLETA..... | 109 |
| 3.2.5. | DIMENSIONAMIENTO DEL TRINCHE..... | 111 |
| 3.3. | CONSIDERACIONES PARA EL MODELADO | 111 |
| 3.4. | MODELADO DEL MARCO Y TRINCHE | 115 |
| 3.5. | DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS EN CAMPO..... | 118 |
| 3.5.1. | CARACTERÍSTICAS DE LA PISTA..... | 119 |
| 3.5.2. | CICLISTA Y EQUIPO DE PROTECCIÓN..... | 121 |

| | | |
|--------|---------------------------------------------------------|-----|
| 3.5.3. | ACELERÓMETRO Y REGISTRADOR DE DATOS | 124 |
| 3.5.4. | PRUEBAS DE ACELERACIONES..... | 125 |
| 3.6. | ANÁLISIS DE FUERZAS EN EL MARCO..... | 127 |
| 3.6.1. | ANCLAJE DEL CONJUNTO MARCO-TRINCHE..... | 127 |
| 3.6.2. | APLICACIÓN DE LAS FUERZAS | 129 |
| 3.7. | DETERMINACIÓN DE LAS ZONAS CRÍTICAS EN EL MARCO..... | 131 |

CAPÍTULO 4

| | | |
|--------|----------------------------------------------------------------|------------|
| | SELECCIÓN Y DESARROLLO EXPERIMENTAL..... | 136 |
| 4.1. | SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 136 |
| 4.1.1. | DATA LOGGER | 136 |
| 4.1.2. | SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ) | 137 |
| 4.1.3. | SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS WIRELESS | 139 |
| 4.1.4. | CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO | 139 |
| 4.1.5. | SELECCIÓN DEL EQUIPO | 142 |
| 4.2. | SELECCIÓN DE LOS SENSORES Y ACONDICIONADORES DE SEÑAL | 145 |
| 4.2.1. | SENSORES: GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS..... | 145 |
| 4.2.2. | ACONDICIONAMIENTO: TRANSDUCCIÓN DE SEÑAL | 147 |
| 4.2.2. | ACONDICIONAMIENTO: AMPLIFICADORES DE SEÑAL..... | 151 |
| 4.3. | MONTAJE DEL SISTEMA SENSORES-ACONDICIONADORES-TARJETA..... | 164 |
| 4.3.1. | COLOCACIÓN DE SENSORES EN EL MARCO | 164 |

| | | |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.2. | ENSAMBLAJE DE LA TARJETA AL MARCO DE LA BICICLETA | 174 |
| 4.3.3. | UBICACIÓN DE ACONDICIONADORES DE SEÑAL EN LA CAJA PROTECTORA | 178 |
| 4.4. | PRUEBAS PRELIMINARES DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA TRANSDUCTORES-TARJETA-EQUIPO | 180 |
| 4.5. | EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES..... | 185 |
| 4.6. | OBTENCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE RESULTADOS | 190 |

CAPÍTULO 5

| | | |
|--------|------------------------------------------------------------|------------|
| | ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | 195 |
| 5.1. | PROCESAMIENTO DE RESULTADOS | 195 |
| 5.2. | ANÁLISIS DE RESULTADOS GLOBAL | 200 |
| 5.2.1. | PRIMER TRAYECTO | 203 |
| 5.2.2. | SEGUNDO TRAYECTO | 205 |
| 5.2.3. | TERCER TRAYECTO | 207 |
| 5.2.4. | CUARTO TRAYECTO | 209 |
| 5.3. | ANÁLISIS DE ESFUERZOS MÁXIMOS | 210 |
| 5.4. | COMPARACIÓN DE RESULTADOS SIMULADOS Y EXPERIMENTALES | 214 |

CAPÍTULO 6

| | | |
|------|---------------------------------|------------|
| | ANÁLISIS DE COSTOS | 216 |
| 6.1. | COSTOS DIRECTOS | 216 |
| 6.2. | COSTOS INDIRECTOS | 218 |

| | | |
|------|------------------|-----|
| 6.3. | COSTO TOTAL..... | 220 |
|------|------------------|-----|

CAPÍTULO 7

| | | |
|--|--------------------------------------------|------------|
| | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 221 |
|--|--------------------------------------------|------------|

| | | |
|------|--------------------|-----|
| 7.1. | CONCLUSIONES | 221 |
|------|--------------------|-----|

| | | |
|------|-----------------------|-----|
| 7.2. | RECOMENDACIONES | 222 |
|------|-----------------------|-----|

| | | |
|--|--------------------------|------------|
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 223 |
|--|--------------------------|------------|

| | | |
|--|--------------------|------------|
| | ANEXOS..... | 227 |
|--|--------------------|------------|

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|--------------|----------------------------|----|
| Tabla No. 1: | Unidades de Esfuerzo | 12 |
|--------------|----------------------------|----|

| | | |
|--------------|---------------------------------------------------|----|
| Tabla No. 2: | Esfuerzos Cortantes Máximos debido a flexión..... | 17 |
|--------------|---------------------------------------------------|----|

| | | |
|--------------|-----------------------------------|----|
| Tabla No. 3: | Partes de una Bicicleta BMX | 46 |
|--------------|-----------------------------------|----|

| | | |
|--------------|------------------------------|----|
| Tabla No. 4: | Dimensiones del Cuadro | 47 |
|--------------|------------------------------|----|

| | | |
|--------------|-------------------------------|----|
| Tabla No. 5: | Equipo de Seguridad BMX | 51 |
|--------------|-------------------------------|----|

| | | |
|--------------|-------------------------------|----|
| Tabla No. 6: | Coeficientes de Poisson | 73 |
|--------------|-------------------------------|----|

| | | |
|--------------|--------------------------|----|
| Tabla No. 7: | Partes de una Galga..... | 74 |
|--------------|--------------------------|----|

| | | |
|--------------|--------------------------------------|----|
| Tabla No. 8: | Elementos Montaje de una Galga | 75 |
|--------------|--------------------------------------|----|

| | | |
|--------------|---------------------------------------|----|
| Tabla No. 9: | Comparación Materiales de Galga | 77 |
|--------------|---------------------------------------|----|

| | | |
|---------------|--------------------------------------------|----|
| Tabla No. 10: | Configuraciones Puente de Wheatstone | 88 |
|---------------|--------------------------------------------|----|

| | | |
|---------------|----------------------------------------|----|
| Tabla No. 11: | Partes Bicicleta Primaxi Advanced..... | 97 |
|---------------|----------------------------------------|----|

| | | |
|---------------|----------------------------------------------|----|
| Tabla No. 12: | Composición Química del Acero AISI 4130..... | 98 |
|---------------|----------------------------------------------|----|

| | | |
|---------------|-----------------------------------------------|----|
| Tabla No. 13: | Propiedades Físicas del Acero AISI 4130 | 98 |
|---------------|-----------------------------------------------|----|

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla No. 14: Propiedades Mecánicas del Acero AISI 4130 | 99 |
| Tabla No. 15: Instrumentos de Medición | 102 |
| Tabla No. 16: Espesores Tubos..... | 106 |
| Tabla No. 17: Diámetros Externos Tubos | 106 |
| Tabla No. 18: Datos promedio de espesores y diámetros externos Tubos | 112 |
| Tabla No. 19: Espesores y Diámetros de Modelado CAD | 113 |
| Tabla No. 20: Coordenadas de los Tubos | 114 |
| Tabla No. 21: Puntos Tubos | 114 |
| Tabla No. 22: Datos Informativos del Ciclista BMX..... | 122 |
| Tabla No. 23: Datos Registrador..... | 125 |
| Tabla No. 24: Escenarios de Simulación | 129 |
| Tabla No. 25: Ubicación de las Fuerzas en cada Escenario..... | 130 |
| Tabla No. 26: Esfuerzo de Von Mises en Cada Escenario | 131 |
| Tabla No. 27: Zonas Críticas Escenario 1 | 132 |
| Tabla No. 28: Zonas Críticas Escenario 2 | 133 |
| Tabla No. 29: Zonas Críticas Escenario 3 | 134 |
| Tabla No. 30: Jerarquía de Criterios | 141 |
| Tabla No. 31: Combinex Matrix Criterios | 141 |
| Tabla No. 32: Matriz de Decisión Equipo Adquisición de Datos | 144 |
| Tabla No. 33: Características de los Sensores | 146 |
| Tabla No. 34: Prueba-Medición de Voltaje de los Puentes Invertida | 156 |
| Tabla No. 35: Prueba-Medición de Voltaje de los Puentes Normal | 157 |
| Tabla No. 36: Rangos de Voltaje para Amplificación | 158 |
| Tabla No. 37: Distribución de Obstáculos por Trayecto | 202 |
| Tabla No. 38: Análisis Primer Trayecto..... | 203 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla No. 39: Análisis Segundo Trayecto | 205 |
| Tabla No. 40: Análisis Tercer Trayecto | 207 |
| Tabla No. 41: Análisis Cuarto Trayecto | 209 |
| Tabla No. 42: Valores Esfuerzo Máximo 1 por Zonas..... | 212 |
| Tabla No. 43: Valores Esfuerzo Máximo 2 por Zonas..... | 213 |
| Tabla No. 44: Valores Esfuerzo Máximo 3 por Zonas..... | 214 |
| Tabla No. 45: Valores Máximos Simulados | 214 |
| Tabla No. 46: Comparación Esfuerzos Simulación y Experimentales | 215 |
| Tabla No. 47: Tabla Componentes Mecánicos Directos | 216 |
| Tabla No. 48: Tabla Componentes Electrónicos Directos..... | 217 |
| Tabla No. 49: Insumos Mecánicos Indirectos | 218 |
| Tabla No. 50: Insumos Electrónicos Indirectos | 219 |
| Tabla No. 51: Servicios Indirectos | 220 |
| Tabla No. 52: Costo Total del Proyecto | 220 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Figura No. 1: Ejemplo de un contacto entre cuerpos | 6 |
| Figura No. 2: Primera Ley de Newton | 7 |
| Figura No. 3: Segunda Ley de Newton | 8 |
| Figura No. 4: Tercera Ley de Newton | 8 |
| Figura No. 5: DCL según el objeto y sus características | 10 |
| Figura No. 6: Fuerza aplicada a un elemento de área constante..... | 12 |
| Figura No. 7: Fibra Neutra | 13 |

| | | |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura No. 8: | Eje Axial de un Cilindro | 14 |
| Figura No. 9: | Fuerza Axial aplicada al Área Transversal de un Cilindro .. | 14 |
| Figura No. 10: | Fuerza Cortante aplicada al Área Transversal de un Cilindro..... | 15 |
| Figura No. 11: | Esfuerzo Cortante Directo | 15 |
| Figura No. 12: | Viga sometida a Fuerza Cortante..... | 16 |
| Figura No. 13: | Sección ejemplo para determinar el Esfuerzo Cortante seccional | 16 |
| Figura No. 14: | Viga deformada por una Carga Transversal | 18 |
| Figura No. 15: | Sección sometida a momento flector positivo y negativo. .. | 18 |
| Figura No. 16: | Área Transversal de un Elemento sometido a Flexión | 19 |
| Figura No. 17: | a) Eje en reposo b) Eje en movimiento | 20 |
| Figura No. 18: | Diagrama de Esfuerzo Torsor | 20 |
| Figura No. 19: | Elemento Deformado | 21 |
| Figura No. 20: | Deformación Normal | 22 |
| Figura No. 21: | Deformación Unitaria Cortante debido a un Esfuerzo Tangencial | 23 |
| Figura No. 22: | Ensayo de Tracción de un Acero diagrama Esfuerzo-Deformación | 24 |
| Figura No. 23: | Eje sometido a Esfuerzos Combinados..... | 27 |
| Figura No. 24: | Elemento diferencial con esfuerzos combinados | 27 |
| Figura No. 25: | Elemento sometido a Esfuerzo Normal (-) | 28 |
| Figura No. 26: | Elemento sometido a Esfuerzo por Momento Flector..... | 28 |
| Figura No. 27: | Distribución de Esfuerzo Normal | 28 |
| Figura No. 28: | Esfuerzo Normal por Flexión distribuido..... | 29 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura No. 29: Flecha sometida a Torsión y Flexión..... | 30 |
| Figura No. 30: Torsión y Flexión Combinadas | 30 |
| Figura No. 31: Elemento sometido a esfuerzo inercial..... | 32 |
| Figura No. 32: Círculo de Mohr Concluido | 34 |
| Figura No. 33: Forma General de los Resultados del Círculo de Mohr..... | 35 |
| Figura No. 34: Tipos de Roseta de Medición de Esfuerzos. | 36 |
| Figura No. 35: Circulo de Mohr con datos Experimentales de Rosetas..... | 38 |
| Figura No. 36: Factores de Seguridad (N) | 42 |
| Figura No. 37: Motocicleta de MotoCross..... | 43 |
| Figura No. 38: Bicicleta BMX | 43 |
| Figura No. 39: Pista de MotoCross | 44 |
| Figura No. 40: Pista olímpica de BMX de los JJOO Londres 2012..... | 45 |
| Figura No. 41: Partes de una BMX | 45 |
| Figura No. 42: Geometría del marco de una BMX..... | 47 |
| Figura No. 43: Accidente de BMX ocurrido en los JJOO Londres 2012 | 50 |
| Figura No. 44: Pista de BMX Race | 52 |
| Figura No. 45: Secuencia de un salto en rampa de tierra..... | 53 |
| Figura No. 46: Truco de equilibrio sobre los pegs traseros..... | 53 |
| Figura No. 47: Salto sobre rampa de madera | 54 |
| Figura No. 48: Truco en el aire sobre un medio tubo de madera..... | 54 |
| Figura No. 49: Desplazamiento en la llanta trasera sobre el pasamanos.. | 55 |
| Figura No. 50: Equilibrio sobre un obstáculo | 55 |
| Figura No. 51: Taza con café modelada en 3D..... | 56 |
| Figura No. 52: Prototipado de un asiento | 57 |
| Figura No. 53: Análisis de un sistema de engranajes | 58 |

| | | |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura No. 54: | Optimización de una pieza | 59 |
| Figura No. 55: | Oído humano detectando un sonido | 61 |
| Figura No. 56: | Interruptor..... | 61 |
| Figura No. 57: | Tipos de Señales..... | 62 |
| Figura No. 58: | Modelo de sistema de un instrumento..... | 63 |
| Figura No. 59: | Aumento de Temperatura detectado por un Termómetro .. | 63 |
| Figura No. 60: | Modelo del sistema Motor AC | 64 |
| Figura No. 61: | Transductor de Temperatura..... | 64 |
| Figura No. 62: | Fenómenos de Transducción de Señal..... | 65 |
| Figura No. 63: | Característica Estática de un Sensor de Peso a base de un Resorte..... | 66 |
| Figura No. 64: | Rango de Entrada y Salida | 67 |
| Figura No. 65: | Sensor Lineal | 67 |
| Figura No. 66: | Sensor No Lineal..... | 68 |
| Figura No. 67: | Sensibilidad en sensores | 68 |
| Figura No. 68: | Efecto Modificante..... | 69 |
| Figura No. 69: | Efecto Interfrente..... | 69 |
| Figura No. 70: | Sensor con Histéresis | 69 |
| Figura No. 71: | Variables Mecánicas | 71 |
| Figura No. 72: | Probeta de un material | 71 |
| Figura No. 73: | Galga Extensiométrica | 73 |
| Figura No. 74: | Montaje de una Galga | 74 |
| Figura No. 75: | Diferentes tipos de Galgas | 76 |
| Figura No. 76: | Galgas Axiales y Biaxiales | 78 |
| Figura No. 77: | Arreglo de tres galgas (Roseta)..... | 78 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura No. 78: Arreglo Genérico de una Roseta | 79 |
| Figura No. 79: Ecuaciones de las deformaciones unitarias | 80 |
| Figura No. 80: Roseta en forma de T..... | 81 |
| Figura No. 81: Roseta a 45° | 81 |
| Figura No. 82: Roseta de Deformación a 60° | 82 |
| Figura No. 83: Roseta Delta..... | 83 |
| Figura No. 84: Pasos para acondicionar una Galga | 83 |
| Figura No. 85: Puente de Wheatstone..... | 84 |
| Figura No. 86: Configuración Cuarto de Puente a) Dos Hilos b) Tres Hilos | 86 |
| Figura No. 87: Medio Puente con dos galgas Activas..... | 86 |
| Figura No. 88: Medio Puente con galga activa (active) y pasiva (dummy) | 87 |
| Figura No. 89: Viga en Cantilever con cuatro galgas extensiométricas | 87 |
| Figura No. 90: Puente Completo dos galgas activas (A1 A2) y dos pasivas (D1 D2) | 88 |
| Figura No. 91: Amplificador de Señal | 90 |
| Figura No. 92: Esquema de un sistema Análogo-Digital..... | 91 |
| Figura No. 93: Muestreo de una señal..... | 92 |
| Figura No. 94: Conversión Analógico-Digital | 93 |
| Figura No. 95: Digitalización con resolución de 4 bits..... | 94 |
| Figura No. 96: Bicicleta BMX Advanced | 96 |
| Figura No. 97: Marco Bicicleta BMX Advanced | 101 |
| Figura No. 98: Zonas de Medición de Espesores | 103 |
| Figura No. 99: Zona de Tubos e | 103 |
| Figura No. 100: Equipo de Medición de Espesores Ultrasonido..... | 104 |
| Figura No. 101: Medición de espesores del tubo A | 104 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura No. 102: Medición de espesores en los alojamientos | 105 |
| Figura No. 103: Medición Diámetro Top Tube Tubo b | 105 |
| Figura No. 104: Vista Detallada tubo A | 107 |
| Figura No. 105: Cambio de Sección Tubo B | 108 |
| Figura No. 106: Vista Frontal Longitudes | 108 |
| Figura No. 107: Dimensionamiento Parte Trasera | 109 |
| Figura No. 108: Alojamiento | 110 |
| Figura No. 109: Croquis Alojamiento Eje Trasero | 110 |
| Figura No. 110: Trinche de una Bicicleta BMX | 111 |
| Figura No. 111: Unión de Puntos | 115 |
| Figura No. 112: Vista Frontal del Marco | 116 |
| Figura No. 113: Isometría del Marco | 116 |
| Figura No. 114: Isometría Trinche | 117 |
| Figura No. 115: Isometría Ensamble Marco-Trinche | 117 |
| Figura No. 116: Imagen Satelital de las Pistas en el parque La Carolina .. | 118 |
| Figura No. 117: Vista desde la Largada | 119 |
| Figura No. 118: Vista panorámica de la Pista | 120 |
| Figura No. 119: Etapa final de la Pista | 120 |
| Figura No. 120: Fin del Trazado Race | 121 |
| Figura No. 121: Ciclista equipado con EPP | 123 |
| Figura No. 122: Pedal con Sistema de Anclaje para Calzado | 123 |
| Figura No. 123: Puntos de Anclaje del Sistema | 128 |
| Figura No. 124: Soportes del Marco | 128 |
| Figura No. 125: Soportes del Trinche | 128 |
| Figura No. 126: Resistencias del Material | 129 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura No. 127: Data Logger | 136 |
| Figura No. 128: Sistema de Adquisición de Datos DAQ | 138 |
| Figura No. 129: Dispositivo Tarjeta DAQ | 138 |
| Figura No. 130: Termocupla con sistema de adaptador inalámbrico | 139 |
| Figura No. 131: Data Logger Omega | 142 |
| Figura No. 132: Tarjeta MyRio de National Instruments | 143 |
| Figura No. 133: Tarjeta myDAQ de National Instruments | 143 |
| Figura No. 134: Strain Gauge HBM RY11 6/120 | 147 |
| Figura No. 135: Cuarto de Puente I | 148 |
| Figura No. 136: Diseño del Puente de Wheatstone | 150 |
| Figura No. 137: Puente de Wheatstone para dos galgas | 150 |
| Figura No. 138: Amplificador Operacional | 153 |
| Figura No. 139: Amplificador de Instrumentación | 154 |
| Figura No. 140: Diagrama Electrónico Amplificador INA111 | 160 |
| Figura No. 141: Combinación de Resistencias para aumento de 3413 veces..... | 161 |
| Figura No. 142: Combinación de Resistencias para aumento de 1708 veces..... | 161 |
| Figura No. 143: Fuente Bipolar y Tierra proporcionada por la tarjeta myRio..... | 162 |
| Figura No. 144: Circuito Puente-Amplificador3414 | 163 |
| Figura No. 145: Circuito Puente-Amplificador1708 | 163 |
| Figura No. 146: Zona Crítica 1 | 165 |
| Figura No. 147: Zona Crítica 2..... | 165 |
| Figura No. 148: Zona Crítica 3..... | 165 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura No. 149: Lijas de Agua 100, 200, 400 y 600 | 166 |
| Figura No. 150: Pulido Zona Crítica 1 | 166 |
| Figura No. 151: Zonas Críticas Pulidas | 167 |
| Figura No. 152: Limpieza con Thinner | 167 |
| Figura No. 153: Desengrasamiento de la Superficie..... | 168 |
| Figura No. 154: Insumos y Herramientas para colocar las galgas..... | 169 |
| Figura No. 155: Sujeción de la Roseta en una Cinta | 169 |
| Figura No. 156: Fijación del Sensor | 170 |
| Figura No. 157: Fijación Temporal para el secado del adhesivo | 170 |
| Figura No. 158: Roseta Fijada al tubo | 171 |
| Figura No. 159: Inserción de los terminales..... | 171 |
| Figura No. 160: Remoción de Aislante del Cable | 172 |
| Figura No. 161: Fusión de los Alambres sueltos del Cable | 172 |
| Figura No. 162: Unión del Cable al terminal de la galga..... | 173 |
| Figura No. 163: Conexión de Cables a Terminales en una Roseta | 173 |
| Figura No. 164: Aislamiento de la Roseta mediante silicona | 174 |
| Figura No. 165: Isometría Caja Protectora tarjeta myRio | 174 |
| Figura No. 166: Ranuras (Vistas Laterales)..... | 175 |
| Figura No. 167: Compuerta de ingreso puertos MXP (Vista Frontal)..... | 175 |
| Figura No. 168: Tapa Caja de Protección..... | 176 |
| Figura No. 169: Circuitos MXP..... | 176 |
| Figura No. 170: Ensamblaje Bicicleta-Caja Protectora | 177 |
| Figura No. 171: Ubicación de la Caja | 177 |
| Figura No. 172: Sistema de Distribución de Energía | 178 |
| Figura No. 173: Ubicación Circuitos Puente-Amplificador y Regulador | |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Voltaje | 179 |
| Figura No. 174: Conexiones Completas Regulador-Circuitos..... | 180 |
| Figura No. 175: Medición de Resistencia en los sensores | 180 |
| Figura No. 176: Voltaje Alimentación Circuito 1..... | 181 |
| Figura No. 177: Voltaje Alimentación Circuito 2..... | 181 |
| Figura No. 178: Voltaje Alimentación Circuito 3..... | 181 |
| Figura No. 179: Panel del Control Programa Adquisición de Datos en Labview | 182 |
| Figura No. 180: Compilación del Programa sin pulso de Captura de Datos..... | 183 |
| Figura No. 181: Pulso Captura de Datos Zona Crítica 1 | 184 |
| Figura No. 182 Pulso Captura de Datos Zona Crítica 2..... | 184 |
| Figura No. 183: Pulso Captura de Datos Zona Crítica 3..... | 185 |
| Figura No. 184: Conexión Batería a Tarjeta | 186 |
| Figura No. 185: Conexión Sensores-Acondicionadores de Señal | 187 |
| Figura No. 186: Conexiones Completadas para una Roseta..... | 187 |
| Figura No. 187: Conexión Data Logger-PC | 188 |
| Figura No. 188: Compilación del Programa dese el ordenador | 188 |
| Figura No. 189: Transferencia de Datos desde Memoria USB al Ordenador | 189 |
| Figura No. 190: Datos Nulos previo a la captura | 191 |
| Figura No. 191: Datos Iniciales de la Captura de Datos | 191 |
| Figura No. 192: Eliminación de Filas con datos nulos | 192 |
| Figura No. 193: Depuración de Datos..... | 192 |
| Figura No. 194: Formato correcto de almacenamiento .xls | 193 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura No. 195: Carpeta de datos Zona Crítica 1 | 193 |
| Figura No. 196: Carpeta de datos Zona Crítica 2 | 193 |
| Figura No. 197: Carpeta de datos Zona Crítica 3 | 194 |
| Figura No. 198: Carpetas Independientes por Rosetas | 196 |
| Figura No. 199: Función xlsread de Matlab | 197 |
| Figura No. 200: Ubicación Carpeta Zona Crítica 1 | 197 |
| Figura No. 201: Ubicación Carpeta Zona Crítica 2 | 197 |
| Figura No. 202: Ubicación Carpeta Zona Crítica 2 | 198 |
| Figura No. 203: Input vectores ZC1 | 198 |
| Figura No. 204: Compilación del Programa para ZC1 | 198 |
| Figura No. 205: Rampa Meseta | 200 |
| Figura No. 206: Rampa de Salto Doble | 201 |
| Figura No. 207: Dunas | 201 |
| Figura No. 208: Giros Elevados Inclinaados | 202 |
| Figura No. 209: Primer Trayecto | 203 |
| Figura No. 210: Secuencia de Imágenes Caída Esfuerzo Máximo 1 | 211 |
| Figura No. 211: Secuencia de Imágenes Caída Esfuerzo Máximo 2 | 212 |
| Figura No. 212: Secuencia de Imágenes Caída Esfuerzo Máximo 3 | 213 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|---------------------------------------------|---|
| Ecuación No. 1: Ecuación de la Fuerza | 7 |
| Ecuación No. 2: Sumatoria de Fuerzas | 9 |
| Ecuación No. 3: Sumatoria de Momentos | 9 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ecuación No. 4: Definición de Esfuerzo | 11 |
| Ecuación No. 5: Esfuerzo Normal | 14 |
| Ecuación No. 6: Esfuerzo Cortante Directo..... | 15 |
| Ecuación No. 7: Esfuerzo Cortante Seccional | 16 |
| Ecuación No. 8: Valor de Q:..... | 17 |
| Ecuación No. 9: Esfuerzo Normal por Momento Flector | 19 |
| Ecuación No. 10: Esfuerzo Cortante por Torsión..... | 20 |
| Ecuación No. 11: Deformación Unitaria Normal (I) | 22 |
| Ecuación No. 12: Deformación Unitaria Normal (II) | 22 |
| Ecuación No. 13: Deformación Unitaria Angular..... | 23 |
| Ecuación No. 14: Deformación Unitaria en un Eje sometido a Torsión..... | 24 |
| Ecuación No. 15: Módulo de Rigidez del Acero | 25 |
| Ecuación No. 16: Esfuerzo Normal aplicando Ley de Hooke..... | 26 |
| Ecuación No. 17: Esfuerzo Tangencial aplicando Ley de Hooke..... | 26 |
| Ecuación No. 18: Resistencia al Esfuerzo Cortante..... | 26 |
| Ecuación No. 19: Combinación de Esfuerzos Normales por Carga Axial y Momento Flector..... | 29 |
| Ecuación No. 20: Teoría de Falla por Cortante Máximo | 31 |
| Ecuación No. 21: Esfuerzo Promedio Círculo de Mohr..... | 32 |
| Ecuación No. 22: Cateto “a” del Círculo de Mohr..... | 33 |
| Ecuación No. 23: Cateto “b” del Círculo de Mohr..... | 33 |
| Ecuación No. 24: Radio del Círculo de Mohr | 33 |
| Ecuación No. 25: Esfuerzo Principal I del Círculo de Mohr..... | 34 |
| Ecuación No. 26: Esfuerzo Principal II del Círculo de Mohr..... | 34 |
| Ecuación No. 27: Esfuerzo Cortante Máximo del Círculo de Mohr | 35 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Ecuación No. 28: Orientación del Elemento sometido a un Esfuerzo | |
| Principal I | 35 |
| Ecuación No. 29: Orientación del Elemento sometido al Esfuerzo | |
| Cortante Máximo | 35 |
| Ecuación No. 30: Deformación Angular Unitaria Máxima | 37 |
| Ecuación No. 31: Esfuerzo Normal Máximo en la Roseta | 37 |
| Ecuación No. 32: Esfuerzo Normal Mínimo en la Roseta | 38 |
| Ecuación No. 33: Esfuerzo Cortante Máximo en la Roseta | 38 |
| Ecuación No. 34: Esfuerzo Cortante Máximo Real en el Elemento | 39 |
| Ecuación No. 35: Volumen Unitario | 40 |
| Ecuación No. 36: Energía de Distorsión | 40 |
| Ecuación No. 37: Esfuerzo de Von Mises (Esfuerzos Principales) | 40 |
| Ecuación No. 38: Esfuerzo de Von Mises | 41 |
| Ecuación No. 39: Factor de Seguridad | 41 |
| Ecuación No. 40: Impedancia | 70 |
| Ecuación No. 41: Resistencia Eléctrica de un Material | 71 |
| Ecuación No. 42: Ley de Hooke | 72 |
| Ecuación No. 43: Ley de Hooke en la Zona Elástica | 72 |
| Ecuación No. 44: Coeficiente de Poisson | 72 |
| Ecuación No. 45: Deformaciones Direccionales Roseta 45° | 82 |
| Ecuación No. 46: Deformaciones Direccionales Roseta 60° | 82 |
| Ecuación No. 47: Equilibrio del Puente de Wheatstone | 84 |
| Ecuación No. 48: Resistencia Incógnita del Puente de Wheatstone | 85 |
| Ecuación No. 49: Voltaje de Salida del Puente | 85 |
| Ecuación No. 50: Frecuencia de Muestreo | 92 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| Ecuación No. 51: Número de elementos binarios | 93 |
| Ecuación No. 52: Ecuación Cuarto de Puente I | 148 |
| Ecuación No. 53: Relación entre Voltajes de Salida y Excitación | 149 |
| Ecuación No. 54: Ganancia del Amplificador de Instrumentación..... | 154 |
| Ecuación No. 55: Ganancia con resistencias iguales | 154 |
| Ecuación No. 56: Salida de Voltaje (Amplificado) | 155 |
| Ecuación No. 57: Valor de Resistencia de Ganancia Amplificador INA111 | 160 |
| Ecuación No. 58: Ley de Hooke Esfuerzos en Estado Plano | 195 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| ANEXO 1: Pruebas de Aceleraciones en Pista Race | 227 |
| ANEXO 2: Especificaciones de la Tarjeta de Adquisición de Datos | 228 |
| ANEXO 3: Especificaciones del Sensor..... | 229 |
| ANEXO 4: Programa de Adquisición Pruebas de Voltaje | 230 |
| ANEXO 5: Cartas de Medición de Voltaje en Pista..... | 231 |
| ANEXO 6: Especificaciones del Amplificador | 232 |
| ANEXO 7: Programa de Adquisición de Datos Pruebas Finales | 233 |
| ANEXO 8: Programa de Cálculo del Círculo de Mohr y Von Mises | 234 |
| ANEXO 9: Gráficos Esfuerzos Normales, Cortante y Von Mises ZC1 | 235 |
| ANEXO 10: Gráficos Esfuerzos Normales, Cortante y Von Mises ZC2 | 236 |
| ANEXO 11: Gráficos Esfuerzos Normales, Cortante y Von Mises ZC3 | 237 |

Simbología

F: Fuerza (Normal o Tangencial, según la aplicación)

m: masa

a: aceleración

S: Esfuerzo

A : Área (Transversal o Paralela, según la Fuerza)

σ : Esfuerzo Normal

P : Carga Axial

τ : Esfuerzo Cortante (Directo)

V : Fuerza Cortante

As : Área de la sección sombreada

\bar{y} : Distancia del CG de la sección al CG de la sección sombreada

σ_b : Esfuerzo por Momento Flector

M : Momento Flector

c : Distancia de la Línea Neutra al punto de cálculo (ver figura)

I : Segunda Inercia de la sección transversal

τ_T : Esfuerzo Cortante por Torsión

T : Momento torsor máximo

ρ : Distancia del centro del eje hasta el punto de cálculo deseado (ver figura)

J : Momento polar de inercia

ε : Deformación Unitaria Normal

L : Longitud Final (Carga Aplicada)

L_0 : Longitud Inicial (Sin Carga)

δ : Deformación lineal total

L : Longitud del Elemento

A : Área Transversal (debe ser constante en todo el elemento)

E : Módulo de Elasticidad (material isotrópico y homogéneo)

γ : Deformación Unitaria por Cortante (radianes)

L_e : Longitud del Eje

J : Momento Polar de Inercia de un Eje

E : Módulo de Elasticidad (210000 N/mm²)

G : Módulo de Rigidez del Material

μ : Coeficiente de Poisson

$\frac{dt}{t}$: Variación del área

$\frac{dl}{l}$: Variación de la longitud

σ_{prom} : Esfuerzo Normal Promedio, trigonométricamente en el círculo es conocido como a (abscisa)

σ_x : Esfuerzo Normal en X

σ_y : Esfuerzo Normal en Y

R : Radio del Círculo de Mohr

a : Abscisa para el cálculo del Radio del Círculo

b : Ordenada para el cálculo del Radio del Círculo

σ_1 : Esfuerzo Principal 1

σ_2 : Esfuerzo Principal 2

O : Valor de la abscisa del centro del Círculo

R : Valor del Radio del Círculo

2ϕ : Ángulo de orientación del elemento sometido al σ_1

$2\phi'$: Ángulo de orientación del elemento sometido a τ_{max}

$\tau_{maxreal}$: Esfuerzo Cortante Real en el Elemento

σ_{max} : Esfuerzo Normal Máximo en el Plano

$\sigma_{minreal}$: Esfuerzo Normal mínimo perpendicular al plano del elemento inicial

v : Volumen Unitario

E_{dist} : Energía de Distorsión

$\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$ = Esfuerzos Principales

σ_{VM} : Esfuerzo de Von Mises

$\sigma_x \sigma_y \sigma_z$ = Esfuerzos Normales

$\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}$: Esfuerzos Cortantes

R : Resistencia del Material (conducción eléctrica)

ρ : Resistividad del material

l : Longitud del material

k : Constante Elástica de un material

x : Deformación del material debido a una Fuerza

θ_a, θ_b y θ_c : ángulos entre galgas de una roseta

$\varepsilon_a, \varepsilon_b$ y ε_c : Deformaciones unitarias de las galgas de la roseta

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ y γ_{xy} : Deformaciones unitarias de las galgas de la roseta

ΔV : Voltaje de Salida del Puente

V_A Voltaje de Alimentación del Circuito

$R_1 R_2 R_3$: Resistencias Conocidas

R_x : Galga Extensiométrica

V_{ex} : Voltaje de Excitación del Puente

V_{sg} : Voltaje de Salida del Puente con carga aplicada

V_{int} : Voltaje del Salida del Puente sin carga aplicada

V_r : Cociente entre voltajes de Salida y Alimentación

GF : Factor de Galga

R_l : Resistencia aportada por la longitud del cable de las galgas

R_g : Resistencia Nominal de la Galga

f_m : Frecuencia de muestreo

muestras : Datos obtenidos (Muestras "S")

t : tiempo (s)

n : número de bits de la tarjeta (n:3,4,5.....)

G_D : Ganancia del Amplificador de Instrumentación (m en la ecuación)

V_{out} : Voltaje de Salida del Amplificador Operacional

m : Ganancia de Amplificación (en la ecuación)

V_{in} : Voltaje de Salida del Puente de Wheatstone

V_o : Voltaje Inicial Amplificado

R_g : Resistencia generadora de Ganancia de Amplificación

RESUMEN

El diseño de bicicletas se enfoca comúnmente en la elaboración de componentes resistentes, livianos y baratos. En el diseño del marco se trabaja con una carga máxima que engloba todas las exigencias de un trayecto. En la realidad no se puede determinar si las cargas de diseño se aplican como se supone en la teoría. Implementar un sistema piloto que permita captar los esfuerzos producidos por un trayecto que se presentan en el marco de la bicicleta, puede ser de gran ayuda para comprobar el diseño del mismo o rediseñar un nuevo cuadro que cubra las expectativas de funcionamiento. Las cargas se determinaron realizando ensayos en una pista con un Acelerómetro encapsulado a una tarjeta de adquisición de datos autónoma. Se eligieron tres escenarios que contemplan las mayores fuerzas producidas en campo y se realizaron simulaciones con EFA para determinar las zonas que soportan la mayor cantidad de esfuerzos. En las zonas de mayor riesgo se instalaron sensores, los mismos que necesitaron de un acondicionamiento de señal para ser leídos y almacenados al registrador de datos. Los datos más notables obtenidos en los ensayos se compararon con los valores más altos arrojados por la simulación de cargas. Los errores que separan estas magnitudes son aceptables, comprobando el trabajo de simulación con el experimental. Esta investigación puede ser un método útil para el monitoreo de elementos y partes mecánicas críticos, ahora se puede comprobar y saber que sucede realmente con una pieza. Adicionalmente se puede construir bicicletas de alto rendimiento específicamente para un conductor y pista en especial.

PALABRAS CLAVE: BMX (“BIKE MOTO CROSS”), ACELERÓMETRO, EFA (ELEMENTOS FINITOS APLICADOS), ROSETA, REGISTRADOR DE DATOS, ESFUERZOS.

SUMMARY

The bicycle designs commonly focus to elaborate resistant, light and cheap bicycle parts. The load of the frame design includes the maximum requirements of a BMX roadtrip. It's very difficult to establish if the design loads appear in a real test. The idea to implement a system that acquires the stresses endured by the bicycle's frame, produced in a BMX trip can help to approve the current frame's design or improve the frame. The goal is to approve the driver's and the track requirements. The real loads have been determined by using an accelerometer included in a data logger. It was chosen three stages that supposed to contain the maximum loads produced in the track and used to determine the most stressful zones FEM. In that zones were installed sensors that require signal conditioning, so the data logger can read and process the signals. The highest values that sense the strain gauges were compared to the most appreciable data determined by the accelerometer. The differences between the real and theoretical values were very small, so the design and the bicycle's test matches. This research can completely change the way that how to design mechanical parts, now the stresses produced in a working piece can be measured and check the element behavior. In addition a bicycle can be designed specially to approve the driver's and track requirements.

KEYWORDS: BMX (BIKE MOTO CROSS), ACCELEROMETER, FEM (FINITE ELEMENT METHOD), STRAIN GAUGE, DATA LOGGER, STRESS.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

En el mundo del diseño siempre se parte de la teoría para determinar la geometría, el mejor material, uniones y configuraciones para un elemento o un conjunto de los mismos. Las teorías de falla a la Fatiga son importantes para analizar las partes más vulnerables y con las características de las mismas. Determinar el factor de seguridad o la cantidad necesaria de recursos para superar un factor de seguridad predeterminado para cargas variables.

Las empresas basan su trabajo en el diseño de bicicletas y otros objetos similares a este analizan los modelos de tal manera que sean lo más livianos posibles, con una máxima resistencia, fáciles de construir y con un bajo costo de fabricación. La ingeniería básica y conceptual se encarga de obtener los datos claves para realizar el mejor diseño, el cual se apega a las conveniencias de la compañía y especificaciones del cliente. Se debe tomar muy en cuenta la influencia que tiene la ingeniería ergonómica en una bicicleta, es indispensable que un modelo sea cómodo y seguro para la salud del operario de la misma. En Málaga (Lopez-Martinez, 2005) como proyecto de fin de carrera realizó el diseño del marco de una bicicleta montañera teniendo como parámetros el material, la geometría y las cargas a las cuales estaría sometido.

En diseño se utilizan varias herramientas más allá de los cálculos para determinar los esfuerzos y factores de seguridad en varios puntos del elemento. De esta manera se puede tener una visión más clara del lugar donde se generan las fallas. Todo lo que se habla en este párrafo depende exclusivamente de los tipos de cargas a las cuales será sometida la bicicleta o lo que se desee diseñar.

Diversos programas pueden ofrecer análisis con elementos finitos para determinar los esfuerzos y factores de seguridad. El diseñador confía

plenamente en sus cálculos y sus criterios. Los resultados del programa simplemente entregan una pauta al diseñador para corregir o confirmar las consideraciones de diseño. En el momento que el diseñador cree que se llegó al límite de iteraciones, converge el resultado y concluye el trabajo de diseño. El proyecto está listo para el siguiente paso en la cadena de elaboración de productos. Con un análisis de las cargas que realmente soporta una bicicleta BMX se puede mejorar su diseño.

Las bicicletas tipo BMX¹ tienen la particularidad de ser pequeñas, presentar marcos rígidos sin amortiguamientos y son usadas para realizar trucos en tierra y aire.

Debido al uso y operación que tienen este tipo de bicicletas, es indispensable determinar los esfuerzos a los que se someten y cuanto puede soportar el vehículo. Un ejemplo de una bicicleta BMX es el paso de la misma por obstáculos, lo cual conlleva a la deformación del marco debido a esfuerzos aplicados al mismo que son transmitidos por elementos como los pedales y los manubrios del volante.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El diseño de un elemento o sistema siempre tiene como primer objetivo la necesidad. Las primeras fases en ingeniería son el diseño en función de los requerimientos, insumos y tecnología disponible. Para el caso particular de una bicicleta, el diseño de sus cuadros se avala mediante un análisis en un programa de simulación. Los resultados se validan cuando se obtenga un equilibrio entre el Factor de Seguridad, Costos y Calidad. Pero se tiene que

¹ BMX siglas en idioma Inglés de "Bike Moto Cross", es una modalidad de ciclismo acrobático originario del estado de California en el suroeste de los EEUU

analizar factores y escenarios que en la práctica afecten la teoría y desfalquen todo el proceso de diseño:

- Similitud de Esfuerzos Prácticos y Teóricos
- Geometría de la Bicicleta que puede generar otro tipo de Esfuerzos
- Resistencia del material en condiciones reales

La propuesta de realizar una medición de esfuerzos añade un costo extra a la manufactura de las bicicletas. Las ventajas son mucho mayores que sus contrapartes, saber realmente que esfuerzos soporta la bicicleta aclara el panorama de la resistencia y calidad del marco para corregir o aprobar un diseño. Estos valiosos datos aportan para una mejora en cualquier parte del proceso de construcción de una bicicleta y se tiene la certeza de que realmente pasa en la práctica con una bicicleta en movimiento.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar los Esfuerzos producidos en el punto más crítico del marco de una bicicleta tipo BMX

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener los valores de la deformación unitaria y esfuerzo del punto más sensible del marco.

- Establecer una ruta específica dentro del terreno más apto con el fin de ejecutar las pruebas.
- Realizar el montaje de los equipos de instrumentación y adquisición de datos en la bicicleta. Probar la confiabilidad del sistema.
- Diseñar el sistema de instrumentación y adquisición de datos según las exigencias de los escenarios propuestos y restricciones de la bicicleta.
- Mediante un programa CAD² modelar en 3D el marco de la bicicleta a ser experimentada y a través de un programa de Elementos Finitos determinar el punto más crítico del marco.

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El diseño de elementos y partes de máquinas debe ser complementado con ensayos en aplicaciones reales para comprobar que el diseño realizado alcance las expectativas del diseñador, constructor y sobre todo satisfacer al cliente o usuario. Experimentar una bicicleta con cargas reales y tener la capacidad para cuantificar su valor es muy importante para los análisis que abren nuevas posibilidades en materia de materiales más resistentes y soluciones geométricas que permitan una mejor distribución de los esfuerzos.

Este proyecto tiene como finalidad un estudio del comportamiento de vehículo en pista, por las siguientes razones:

- Aprovechamiento de los datos obtenidos
- Análisis en los escenarios más comunes de operación

² CAD siglas en Inglés de “Diseño Asistido por Computador”

- Fiabilidad del marco a las cargas expuestas
- Determinación de elemento tipo de deformación

1.5. ALCANCE

Este proyecto tiene como alcance el analizar los esfuerzos producidos en el punto más crítico del marco de una bicicleta tipo BMX debido a la operación de la misma en un terreno irregular. El número zonas críticas determinadas mediante una simulación con fuerzas en diferentes escenarios de caída no puede exceder un máximo de tres zonas. Con los datos capturados y su post procesado, se estima realizar una comparación con los datos de esfuerzos obtenidos en la simulación y los datos experimentales.

El vehículo BMX va a realizar sus pruebas en una pista con variaciones de altura y obstáculos, en el escenario de:

- Pistas destinadas a bicicletas BMX (Race)
- Obstáculos destinados para la modalidad Race.

La localización de los sensores en el marco tiene utilidad para la bicicleta considerada para el estudio. El acondicionamiento de señal es exclusivo para los sensores de este proyecto, pero el sistema de captura y almacenamiento de datos puede adecuarse en cualquier tipo de vehículo.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. BREVE RESEÑA DEL ANÁLISIS DE ESFUERZOS

2.1.1. FUERZAS

Todos los sistemas en el mundo físico están sometidos a diferentes tipos de fuerzas sean seres inertes y vivos. Una roca que está bajo una persona e incluso esa misma persona aplastada por una avalancha de arena. Sea cual sea el origen de la fuerza se presenta en todo tipo de objeto.

Para aclarar el primer párrafo se define lo que es una fuerza, es la interacción física entre dos objetos. Es decir contacto entre ellos, el cual se manifiesta de diferentes maneras como el caso de contactos instantáneos (impacto), contactos más duraderos cuando un cuerpo descansa sobre otro, etc.

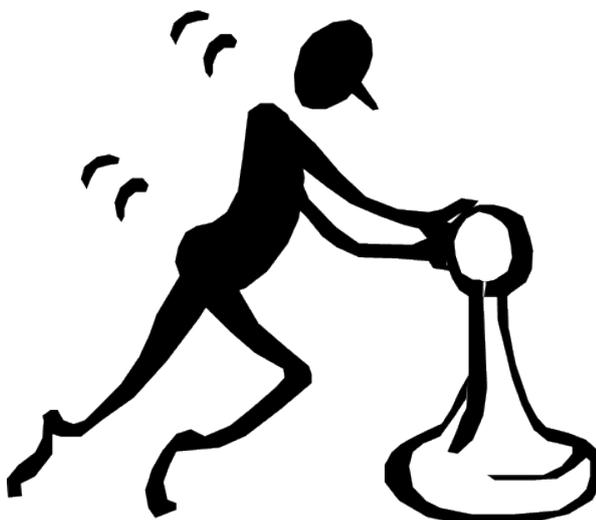


Figura 1. Ejemplo de un contacto entre cuerpos

Fuente: (Quia, 2015)

Sir Isaac Newton en su publicación “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” en el año de 1687 expone al mundo tres leyes del movimiento:

- **Primera ley de Newton o ley de la inercia**

“Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas impresas sobre el.”

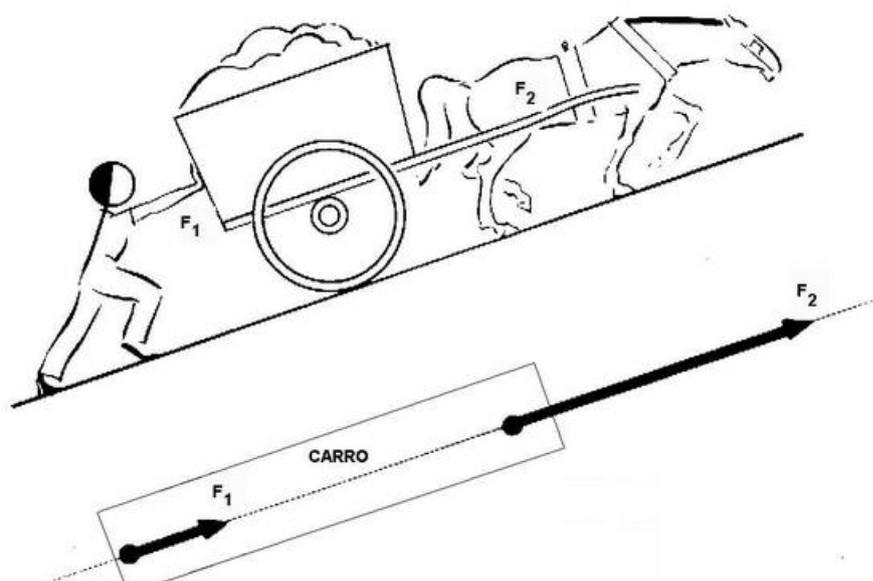


Figura 2. Primera Ley de Newton

Fuente: (Quia, 2)

En esta imagen se observa claramente la primera ley de Newton, si el sujeto y el caballo no ejercen fuerza sobre la carreta esta simplemente no se mueve.

- **Segunda Ley de Newton o de la Fuerza**

“El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime.”

Ecuación No. 1: Ecuación de la Fuerza

$$F = m * a \quad (1)$$



Figura 3. Segunda Ley de Newton

Fuente: (Quia, 2015)

Una escena tan simple que generó todo un pensamiento e inspiración para Sir Isaac Newton. Un objeto (en este caso una manzana) al estar en reposo solo tiene como fuerza su propio peso, pero si se agrega una aceleración en cualquier dirección adquiere una fuerza proporcional a la aceleración provocada.

- **Tercera Ley de Newton o principio de Acción-Reacción**

“Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria: quiere decir que las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en sentido opuesto.”

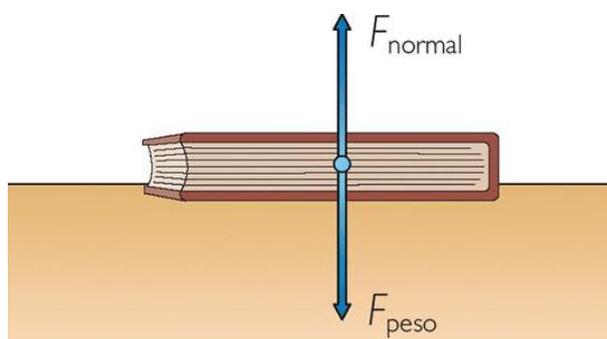


Figura 4. Tercera Ley de Newton

Fuente: (Quia, 2015)

El libro está en reposo, pero se encuentra sobre una superficie y este ejerce la fuerza de su peso sobre ella. Mientras que la superficie reacciona ante ese estímulo y devuelve la misma cantidad de fuerza pero en sentido contrario al peso del libro.

Estas tres leyes permiten tener una mejor depuración sobre lo que representa la fuerza en la Física.

En los párrafos iniciales se muestra que una fuerza representa una interacción de cuerpos y no se puede obviar el significado de equilibrio. El equilibrio representa la igualdad de dos factores de la misma de magnitud y esto lleva la afirmación de que tienen que ser opuestos en sentidos. De otro modo si no tienen la capacidad de anularse mutuamente no se llega a tener un equilibrio.

Un sistema en proceso de análisis se supone que no está en movimiento o si su velocidad es constante, el sistema tiene una aceleración cero. Por esta condición el sistema está en equilibrio, la fase de equilibrio estático se usa también para implicar que el sistema está en reposo. Las fuerzas y momentos tienen que estar completamente balanceados para tener un cuerpo en reposo.

Ecuación No. 2: Sumatoria de Fuerzas

$$\sum F = 0 \quad (2)$$

Ecuación No. 3: Sumatoria de Momentos

$$\sum M = 0 \quad (3)$$

Estas ecuaciones afirman que la sumatoria de fuerzas y momentos sobre un sistema o cuerpo es cero cuando está en reposo o todas las fuerzas que actúan sobre el se anulan.

El análisis de cuerpos o sistemas complicados se puede simplificar con el uso de una herramienta muy útil.

2.1.2. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE (DCL)

Un diagrama de cuerpo libre tiene como finalidad determinar todas las fuerzas y todos momentos que actúan sobre un cuerpo, lo que se produce es un aislamiento del cuerpo y mostrar condiciones como la geometría del objeto, ubicación referente a una superficie y contacto con otros objetos. Este es completamente aplicable a ejes en dos o tres dimensiones. Se puede manipular a conveniencia los ejes según el objeto, pero respetando que estos sean perpendiculares entre sí.

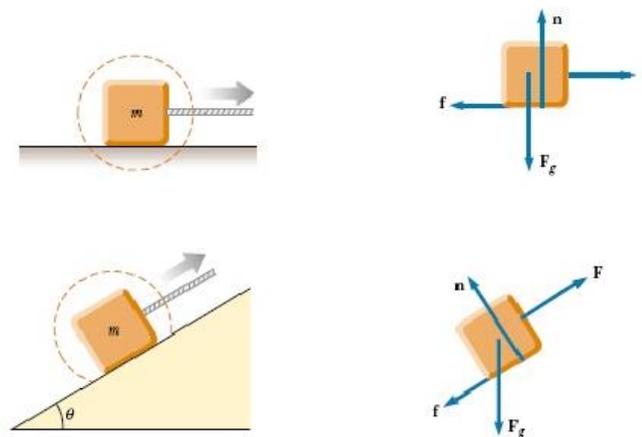


Figura 5. DCL según el objeto y sus características

Fuente (Xarxatic, 2012)

En la figura anterior se divide la flexibilidad de los DCL para ilustrar las fuerzas y momentos sobre un cuerpo. El uso de los DCL para analizar las fuerzas tiene los siguientes propósitos:

- El diagrama establece las direcciones de los ejes de referencia; proporciona un lugar para registrar las dimensiones del subsistema y las

magnitudes y direcciones de las fuerzas conocidas, además ayuda a conocer las direcciones de las fuerzas desconocidas.

- El diagrama simplifica el análisis porque proporciona un lugar para almacenar una idea, mientras se procede con la siguiente.
- El diagrama es un medio para comunicar a otras personas las ideas de forma clara y sin ambigüedades.
- Un diagrama bien realizado clarifica las ideas confusas y hace relucir todas las facetas del problema.
- Al mostrar todas las fuerzas y momentos, permite entender el fenómeno físico de mejor manera.

2.1.3. ESFUERZOS

Un eslabón el cual es resuelto Estática o Hiperestáticamente y se obtengan todos sus momentos y fuerzas, se puede analizar a que tipos de esfuerzos está sometido. Las fuerzas y momentos son el primer paso para determinar la capacidad de un sistema u objeto de resistir a una carga determinada. Para determinar el valor que un elemento soporta se necesita establecer las propiedades geométricas como longitud, espesor, área transversal y también el material del cual está fabricado. De acuerdo con estos parámetros se analizan los esfuerzos presentes.

La fórmula de Esfuerzo es similar a la de la Presión:

Ecuación No. 4: Definición de Esfuerzo

$$S = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Tabla 1

Unidades de Esfuerzo

| Sistema | Unidad |
|---------------|----------------------------------|
| Internacional | $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$ |
| Inglés | $\text{Lbf/pulg}^2 = \text{psi}$ |

Fuente: (Gieck, 1981)

Matemáticamente el esfuerzo se presenta como una fuerza aplicada sobre un área, la dirección de la fuerza determina si el esfuerzo es de Tracción o Compresión.



Figura 6. Fuerza aplicada a un elemento de área constante

Fuente (Xarxatic, 2012)

Existen diferentes tipos de esfuerzos generados según como se aplique la fuerza en un área y como un momento afecte a un elemento sea cual sea su área transversal.

2.1.3.1. LÍNEA Y FIBRA NEUTRA

Las secciones de los diferentes elementos se caracterizan por tener una línea neutra, la cual no se deforma a causa de fuerzas o momentos. Se encuentra a lo largo del punto donde esté ubicado su centro de gravedad. Los

puntos ubicados al extremo de la línea neutra son los que mayor deformación y esfuerzo sufren, pueden ser positivos o negativos.

La fibra neutra es todo aquel plano transversal de la sección de un elemento que mantiene su dimensión, no su forma.

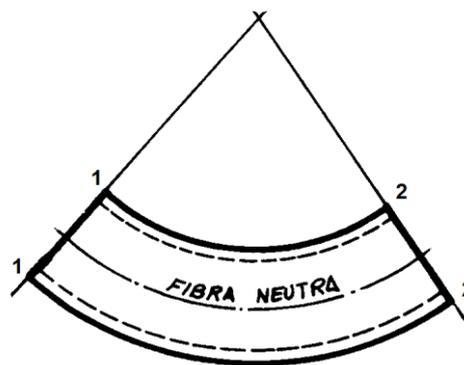


Figura 7. Fibra Neutra

Fuente (Xarxatic, 2012)

En este ejemplo se observa claramente las zonas afectadas por compresión y tracción. Mientras que la fibra neutra no experimenta cambios más allá de seguir con la trayectoria del elemento.

2.1.3.2. CARGA AXIAL-ESFUERZO NORMAL

El eje axial de un elemento es aquel que se encuentra en dirección de la longitud mayor de su geometría y exactamente en el centro de gravedad de la sección transversal.

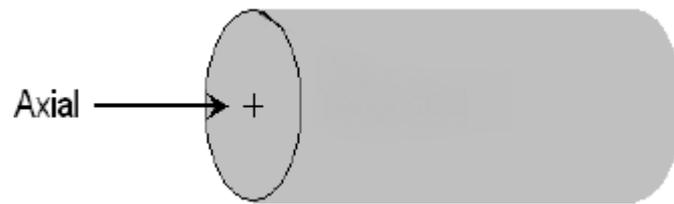


Figura 8. Eje Axial de un Cilindro

Fuente (Xarxatic, 2012)

La carga axial se aplica en la línea del eje Axial en dirección perpendicular al área transversal del objeto.



Figura 9. Fuerza Axial aplicada al Área Transversal de un Cilindro

Fuente (Xarxatic, 2012)

Por tanto el Esfuerzo Normal se define como:

Ecuación No. 5: Esfuerzo Normal

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (5)$$

La dirección de la Carga Axial revela si es una fuerza de tracción o compresión

2.1.3.3. FUERZA Y ESFUERZO CORTANTE

Una fuerza cortante a diferencia de una Axial no es perpendicular al plano que se aplica, su dirección es paralela. Por tanto el esfuerzo que esta genera no es de tipo normal. De acuerdo con esto se debe considerar el siguiente gráfico:

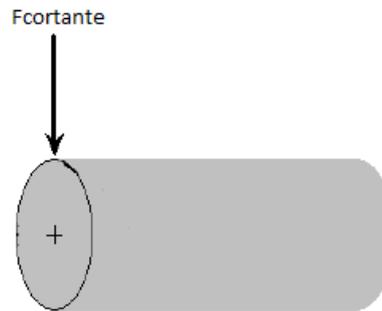


Figura 10. Fuerza Cortante aplicada al Área Transversal

Fuente (Xarxatic, 2012)

El esfuerzo cortante se puede presentar de dos maneras:

2.1.3.3.1. Esfuerzo Cortante Directo

Cuando un elemento se encuentra bajo una fuerza cortante y los apoyos están muy cercanos a esta fuerza, ejemplo el pasador de una armadura o un perno que sujeta dos placas. La condición para que sea este tipo de esfuerzo es que no exista flexión en el elemento.

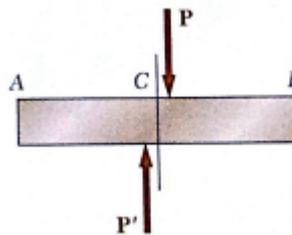


Figura 11. Esfuerzo Cortante Directo

Fuente: (Beer, 2006)

La fórmula para calcular este esfuerzo es:

Ecuación No. 6: Esfuerzo Cortante Directo

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (6)$$

2.1.3.3.2. ESFUERZO CORTANTE SECCIONAL

Este esfuerzo tiene una naturaleza diferente al anterior, se presenta en vigas. La fuerza cortante que actúa sobre la sección transversal de la viga genera distintos esfuerzos. Estos dependen en los puntos donde sea necesarios determinar.

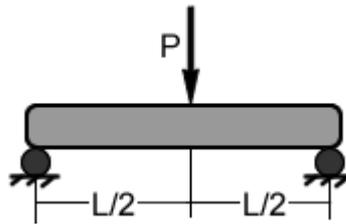


Figura 12. Viga sometida a Fuerza Cortante

Fuente (Xarxatic, 2012)

La fórmula para calcular este esfuerzo es:

Ecuación No. 7: Esfuerzo Cortante Seccional

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b} \quad (7)$$

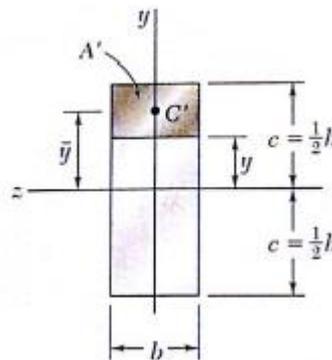


Figura 13. Sección ejemplo para determinar el Esfuerzo Cortante seccional

Fuente: (Beer, 2006)

El valor de Q se determina de la siguiente manera:

Ecuación No. 8: Valor de Q:

$$Q = A \cdot \bar{y} \quad (8)$$

El mayor valor del Esfuerzo Cortante Seccional se encuentra en la Línea Neutra y cero en los extremos. Existen fórmulas desarrolladas para ciertos perfiles del valor máximo de este esfuerzo.

Tabla 2

Esfuerzos Cortantes Máximos debido a flexión

| Sección | $T_{\text{máx}}$ |
|----------------|-----------------------------|
| Rectangular | $\frac{3V}{2A}$ |
| Perfil I | $\frac{V}{A_{\text{alma}}}$ |
| Circular | $\frac{4V}{3A}$ |
| Circular Hueca | $\frac{2V}{A}$ |

Fuente: (Budynas-Nisbett, 2008)

2.1.3.4. ESFUERZOS GENERADOS POR MOMENTOS

Hay esfuerzos cortantes y normales que en la mayoría de casos se presentan en vigas y ejes.

2.1.3.4.1. ESFUERZO POR MOMENTO FLECTOR

En las vigas las cargas transversales a las mismas generan momentos y a su vez deflexiones. Este momento como su nombre lo indica deforma a la viga y su mayor deformación se presenta en el punto de mayor momento sin importar el signo. El esfuerzo que se produce es de tipo normal.

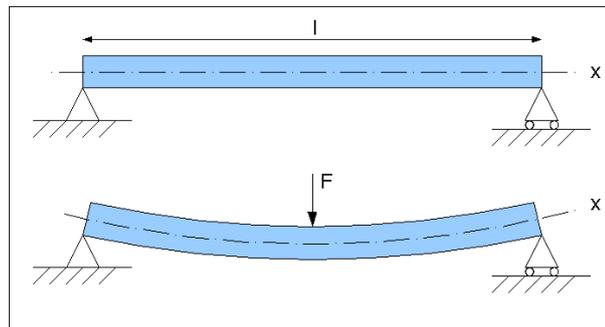


Figura 14. Viga deformada por una Carga Transversal

Fuente: (Xarxatic, 2012)

Para saber el mayor valor del momento en esta viga se tiene que recurrir a los diagramas de momento flector. Según los apoyos y tipo de carga se obtienen diferentes diagramas. En textos de Resistencia de Materiales y Diseño de Elementos se encuentran tabulados ejemplos de los tipos más comunes de vigas.

El Esfuerzo por momento flector afecta completamente a la sección transversal, en la figura se puede observar el comportamiento de las fibras:

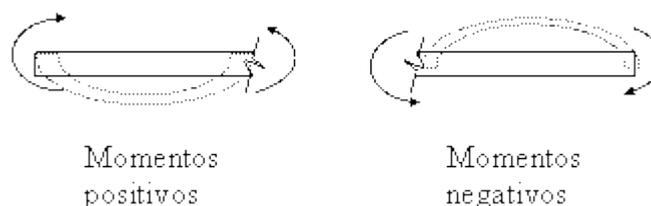


Figura 15. Sección sometida a momento flector positivo y negativo.

Fuente: (Physicsatmhs, 2010)

Como muestra la figura, existen fibras expuestas a tracción y compresión. Esto depende de la dirección del momento.

El esfuerzo se calcula con la siguiente fórmula:

Ecuación No. 9: Esfuerzo Normal por Momento Flector

$$\sigma_b = \frac{M \cdot c}{I} \quad (9)$$

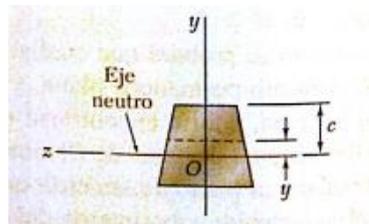


Figura 16. Área Transversal de un Elemento sometido a Flexión

Fuente: (Beer, 2006)

El esfuerzo es máximo en los extremos, en perfiles simétricos se presentan los mismos valores, en perfiles asimétricos depende de la fibra que tenga la mayor distancia c desde la línea neutra. En la línea neutra se presentan valores de esfuerzo.

2.1.3.4.1.2. ESFUERZO POR TORSIÓN

Los ejes o tubos son los elementos que transmiten potencia, viajan a velocidad angular y están sometidos a torsión. La torsión genera una deformación angular en las fibras del eje, que produce en el mismo un Esfuerzo de tipo cortante.

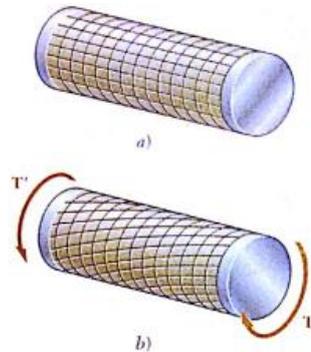


Figura 17. a) Eje en reposo b) Eje en movimiento

Fuente: (Beer, 2006)

El momento torsor aumenta proporcionalmente al incrementar el brazo de palanca, el mayor valor de torque aparece en las fibras externas del eje. Se calcula el esfuerzo de la siguiente manera:

Ecuación No. 10: Esfuerzo Cortante por Torsión

$$\tau_T = \frac{T \cdot \rho}{J} \quad (10)$$

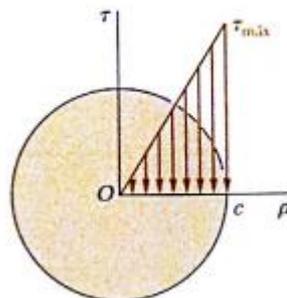


Figura 18. Diagrama de Esfuerzo Torsor

Fuente: (Beer, 2006)

El valor de ρ hace que el esfuerzo varíe desde cero en el centro del eje hasta su valor máximo en el radio externo del mismo.

Para recipientes a presión y tanques que contienen fluidos existen de igual manera fórmulas y consideraciones para determinar los esfuerzos. En nuestro caso se analiza una estructura, no es necesario navegar en los esfuerzos que se producen en elementos herméticos o atmosféricos sometidos a presión interna.

2.1.3.5. DEFORMACIÓN

Cuando se aplica carga a un cuerpo, este tiende a cambiar de forma y tamaño. Según las dimensiones del elemento y el valor de la fuerza las deformaciones pueden ser imperceptibles. La deformación se puede dar por fuerzas y cambios de temperatura. Para los dos casos anteriores los eslabones se expanden o contraen, dependiendo de la dirección de las fuerzas y el aumento o disminución de la temperatura.



Figura 19. Elemento Deformado

Fuente: (Physicsatmhs, 2010)

2.1.3.5.1. DEFORMACIONES UNITARIAS

Una deformación unitaria es aquella que relaciona la deformación que experimenta un cuerpo para la longitud inicial del mismo. Existen dos tipos de deformaciones unitarias:

2.1.3.5.1.1. DEFORMACIÓN UNITARIA NORMAL

Es la expansión o contracción de un segmento de línea por unidad de longitud. Esta deformación es provocada por fuerzas axiales positivas o negativas.

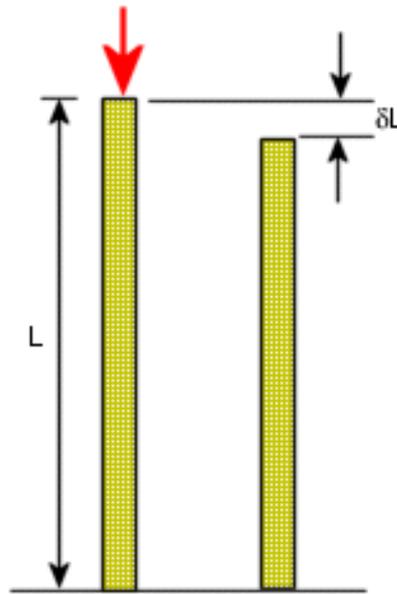


Figura 20. Deformación Normal

Fuente: (Physicsatmhs, 2010)

La fórmula para calcular esta deformación unitaria es:

Ecuación No. 11: Deformación Unitaria Normal (I)

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (11)$$

La deformación unitaria es adimensional, por ser una operación de división entre dimensiones de la misma naturaleza. Es conveniente colocar las unidades en las cuales se miden de las deformaciones unitarias. Puede ser en mm/mm o pulg/pulg.

Una manera de calcular la deformación es:

Ecuación No. 12: Deformación Unitaria Normal (II)

$$\delta = \frac{F \cdot L}{A \cdot E} \quad (12)$$

2.1.3.5.1.2. DEFORMACIÓN UNITARIA CORTANTE

Es el cambio de ángulo que ocurre entre dos segmentos de línea inicialmente perpendiculares entre sí. Ocurre cuando una fuerza tangencial se aplica al área de un elemento. El signo de esta deformación depende de los ejes de referencia que se impongan.

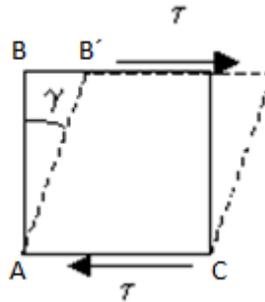


Figura 21. Deformación Unitaria Cortante debido a un Esfuerzo Tangencial

Fuente: (Physicsatmhs, 2010)

El ángulo original \widehat{BAC} que forma 90° es en el instante que el elemento no se somete a ninguna fuerza tangencial. El nuevo ángulo $\widehat{B'AC}$ provocado por la fuerza evidentemente deja de ser perpendicular al eje de referencia.

La fórmula para determinar esta deformación es:

Ecuación No. 13: Deformación Unitaria Angular

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \tan\left(\frac{\overline{B'B}}{\overline{BA}}\right) \quad (13)$$

$\overline{B'B}$: Cateto opuesto al ángulo γ

\overline{BA} : Cateto adyacente al ángulo γ

Una forma de calcular esta deformación para ejes sometidos a torsión es:

Ecuación No. 14: Deformación Unitaria en un Eje sometido a Torsión

$$\gamma_T = \frac{T \cdot L_e}{J \cdot G} \quad (14)$$

2.1.3.6. RESISTENCIA DE UN MATERIAL

En ingeniería y diseño existen muchos tipos de materiales, metálicos, polímeros, cerámicos, etc. Cada material tiene sus propias características y aplicaciones. La resistencia se refiere a cuanta fuerza soporta un elemento por cada unidad de área, en otras palabras es equivalente en unidades al esfuerzo. En estructuras en la mayoría de ocasiones se utilizan metales y para el caso especial de este proyecto se cuenta con una bicicleta construida de Acero. El acero es una aleación entre el Hierro y Carbono con una concentración máxima de 2% de Carbono. El acero es un material Dúctil, Maleable, Tenaz y Resistente. Para determinar la resistencia de un Acero se aplica el concepto de Esfuerzo Normal, con una Carga Axial de Tracción. Este ensayo está normado para asegurar condiciones favorables al experimento. La probeta cumple con ciertas consideraciones geométricas que dicta una norma y el equipo en donde se efectuará la prueba tiene que tener certificaciones de normas técnicas. Este ensayo de tracción permite calcular diversas propiedades mecánicas de un acero determinado.

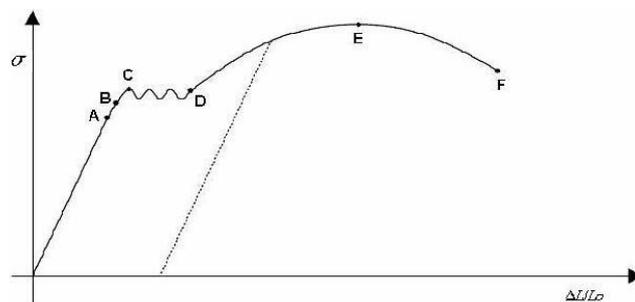


Figura 22. Ensayo de Tracción de un Acero diagrama Esfuerzo-Deformación

Fuente: (Physicsatmhs, 2010)

El comportamiento del gráfico en su primera etapa se observa una tendencia lineal, esto se produce porque el esfuerzo y la deformación aumentan proporcionalmente. Es un claro ejemplo de la Ley de Hooke y la pendiente de esta línea es conocida como el Módulo de Elasticidad. Para los aceros su valor está aproximadamente en los 210000 N/mm². De la misma manera se presenta un módulo de rigidez que está relacionado con las deformaciones angulares. Está descrito por la siguiente fórmula:

Ecuación No. 15: Módulo de Rigidez del Acero

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{210000}{2(1 + 0.3)} = 78947 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (15)$$

Algunos valores de G en libras indican que es de 80000 N/mm².

En la figura No. 22 tenemos el comportamiento de un acero al ensayo de tracción. Los puntos claves del gráfico son B y E. El punto B se refiere al valor del Límite Elástico, hasta donde el material puede deformarse elásticamente y volver a sus medidas iniciales conforme se reduzca la carga a cero. Pasado el punto B el material entra en fluctuaciones de esfuerzos pero aumentando la deformación hasta que se deforma plásticamente y experimenta mayores esfuerzos progresivamente. El punto E se refiere al mayor valor que representa el Esfuerzo Último a la tracción, este es el mayor valor de resistencia del material y un esfuerzo mayor a este provoca la falla del mismo.

En resumen los valores de interés son:

- Límite Elástico
- Esfuerzo Último

Estos se pueden encontrar en catálogos de materiales y en normas. Para el análisis de esfuerzos es importante conocer estos valores, porque indica cuanto soporta el material y su comportamiento.

Los esfuerzos en la zona elástica y en función de la ley de Hooke se dan de la siguiente manera:

Ecuación No. 16: Esfuerzo Normal aplicando Ley de Hooke

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (16)$$

Ecuación No. 17: Esfuerzo Tangencial aplicando Ley de Hooke

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (17)$$

Las ecuaciones (16) y (17) son aplicables exclusivamente para un estado uniaxial de esfuerzos. La resistencia que se obtiene con el ensayo de tracción es de tipo axial, es decir que para esfuerzos cortantes se tiene otro valor. Este se obtiene de la siguiente manera:

Ecuación No. 18: Resistencia al Esfuerzo Cortante

$$\text{Resistencia Cortante} = \text{Resistencia} * 0.58 \quad (18)$$

2.1.3.7. ESFUERZOS COMBINADOS

El esfuerzo combinado trata los casos en que dos o más tipos de esfuerzos actúan en un punto al mismo tiempo. Los esfuerzos pueden ser de tipo normales o cortantes.

Cuando un elemento es ensayado a diferentes esfuerzos, se debe calcular el esfuerzo producido por cada componente. Se evalúa el punto en donde es más crítica la combinación de esfuerzos.

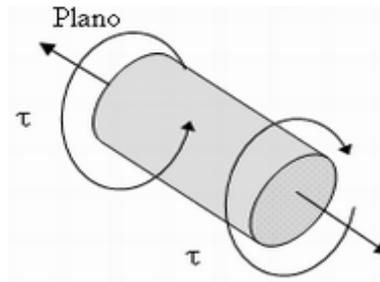


Figura 23. Eje sometido a Esfuerzos Combinados

Fuente: (Physicsatmhs, 2010)

En el ejemplo anterior se puede divisar un eje sometido a un Torque y una Carga Axial, lo que provoca un Esfuerzo Cortante y Esfuerzo Normal respectivamente. El esfuerzo cortante se aplica a lo largo del plano transversal mientras que el Esfuerzo normal es perpendicular al área. La combinación de esfuerzos, en la siguiente imagen se puede observar como afectan los esfuerzos combinados máximos al elemento diferencial del punto más crítico.

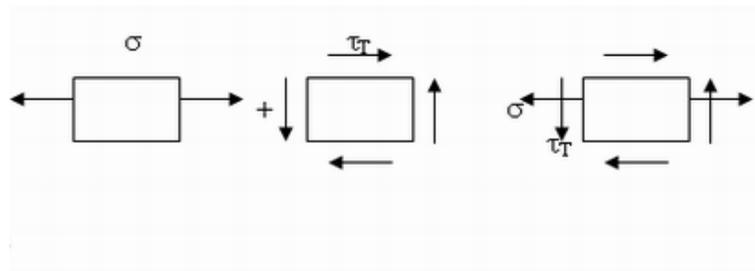


Figura 24. Elemento diferencial con esfuerzos combinados

Fuente: (Physicsatmhs, 2010)

2.1.3.7.1. COMBINACIÓN DE ESFUERZOS NORMALES

En un elemento pueden salir a flote fuerzas axiales y transversales, la primera que genera un esfuerzo normal de tracción o compresión y la otra un esfuerzo por momento flector. El momento flector actúa aplicando esfuerzos de tracción y compresión sobre las fibras de un área transversal. Mientras que la fuerza axial somete a un esfuerzo normal distribuido en toda el área.

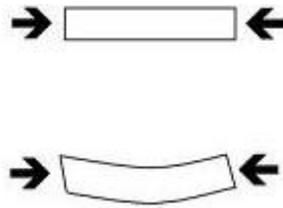


Figura 25. Elemento sometido a Esfuerzo Normal (-)

Fuente: (Physicsatmhs, 2010)

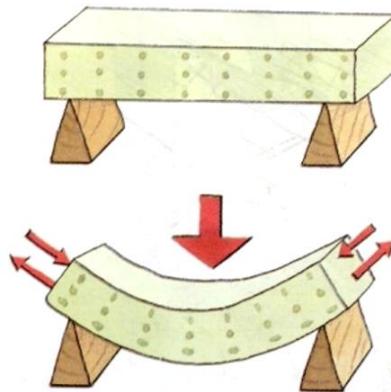


Figura 26. Elemento sometido a Esfuerzo por Momento Flector

Fuente: (Beer, 2006)

El esfuerzo normal por carga tiene una distribución en el área de la siguiente manera:

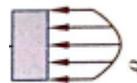


Figura 27. Distribución de Esfuerzo Normal

Fuente: (Beer, 2006)

El esfuerzo por momento flector se presenta de otra manera al anterior:

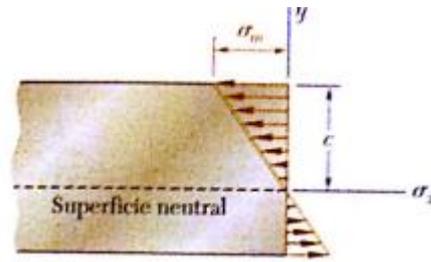


Figura 28. Esfuerzo Normal por Flexión distribuido

Fuente: (Beer, 2006)

Una fórmula para determinar los esfuerzos combinados entre estos dos esfuerzos es:

Ecuación No. 19: Combinación de Esfuerzos Normales por Carga Axial y Momento Flector

$$\sigma_{comb} = \pm\sigma_{carga\ axial} \pm \sigma_{flector} \quad (19)$$

Para el esfuerzo de carga axial el signo depende si es carga de tracción o compresión entonces para el caso actual de ejemplo queda definido de la siguiente forma:

$$\sigma_{comb} = -\sigma_{axial} \pm \sigma_{flector}$$

Ahora bien, si se tiene un esfuerzo de carga axial negativo, se debe que sumar el esfuerzo flector de las fibras a compresión. De esa manera se asegura que los esfuerzos combinados en ese punto crítico sean máximos.

$$\sigma_{comb} = -\sigma_{axial} - \sigma_{flector}$$

2.1.3.7.2. ESFUERZOS NORMALES Y CORTANTES COMBINADOS

Esta combinación es utilizada en aplicaciones en ejes que transmiten potencia. El torque aplicado para mover el eje produce un esfuerzo cortante, mientras que el contacto entre engranajes o las bandas que mantienen tensionados a las poleas provocan una flexión en el eje. Se provoca un esfuerzo normal por momento flector.

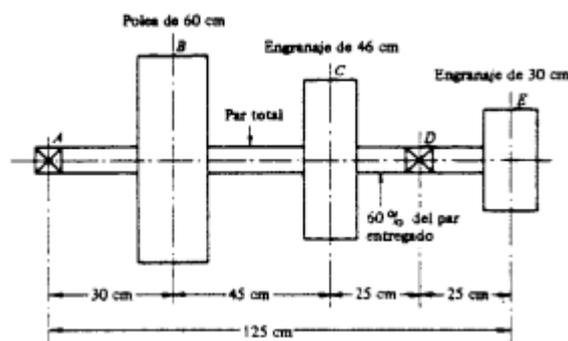


Figura 29. Flecha sometida a Torsión y Flexión

Fuente: (Deushtman, 1987)

El elemento diferencial de este caso de combinación de esfuerzos normales y cortantes es:

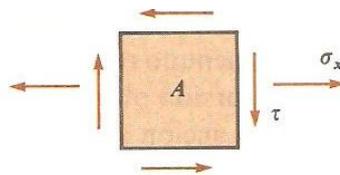


Figura 30. Torsión y Flexión Combinadas

Fuente: (Beer, 2006)

Cuando ocurre un esfuerzo de Tracción o Compresión por Flexión en el mismo punto se produce un esfuerzo cortante (Torsión), estos dos esfuerzos se combinan para producir un esfuerzo cortante mayor. Esta mezcla es llamada Teoría de Falla por Esfuerzo Cortante Máximo:

Ecuación No. 20: Teoría de Falla por Cortante Máximo

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (20)$$

2.1.3.8. CÍRCULO DE MOHR

Es un método gráfico que presenta el estado de esfuerzos en un elemento. Esta herramienta permite entender de mejor manera el caso general de esfuerzos en un punto. Fue presentado por primera vez por Otto Mohr en el año de 1895, permite tener un cálculo veloz y exacto de:

- Los Esfuerzos Principales, Máximo y Mínimo.
- Esfuerzo Cortante Máximo.
- Los ángulos de orientación del elemento sometido al esfuerzo principal y del elemento sometido al esfuerzo cortante máximo.
- El esfuerzo normal que existe junto con el esfuerzo cortante máximo que actúa en el elemento sometido al esfuerzo cortante máximo.
- La condición de esfuerzo a cualquier orientación angular del elemento sometido a esfuerzo.

Para iniciar con el proceso de trazado del Círculo de Mohr, se debe contar el elemento diferencial sometido a esfuerzos inerciales.

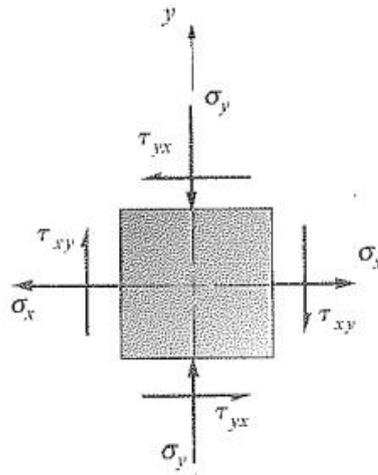


Figura 31. Elemento sometido a esfuerzo inercial

Fuente: (Mott, 2009)

En este elemento el Esfuerzo Normal en X es positivo, en Y es negativo, el Esfuerzo Cortante en las caras XY sentido de las manecillas del reloj y las caras YX contrario a las manecillas del reloj.

El plano del Círculo de Mohr está compuesto por los siguientes ejes:

- Abscisas: Esfuerzos Normales σ_x y σ_y . Recta numérica para valores positivos y negativos de cualquiera de los esfuerzos normales mencionados.
- Ordenadas: Esfuerzos Cortantes con valores positivos para τ_{xy} y negativos para τ_{yx} .

Los esfuerzos normales X e Y se utilizan para determinar el centro del Círculo en el eje X, mediante la siguiente fórmula:

Ecuación No. 21: Esfuerzo Promedio Círculo de Mohr

$$\sigma_{prom} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} = a \quad (21)$$

σ_{prom} : Esfuerzo Normal Promedio, trigonómicamente en el círculo es conocido como a (abscisa)

El esfuerzo promedio tiene las funciones de ser el centro O del círculo y su valor una componente en X para determinar el ángulo. Después de obtener el centro, necesitamos ubicar en el plano los siguientes puntos:

- Punto 1 (σ_x, τ_{xy})
- Punto 2 (σ_y, τ_{yx})

El valor de τ_{xy} pertenece a la ordenada que en la trigonometría del Círculo se denomina b y completa los catetos para calcular el Radio del Círculo (Hipotenusa). Además se tienen los datos para calcular el ángulo.

Ecuación No. 22: Cateto “a” del Círculo de Mohr

$$a = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \quad (22)$$

Ecuación No. 23: Cateto “b” del Círculo de Mohr

$$b = \tau_{xy} \quad (23)$$

Ecuación No. 24: Radio del Círculo de Mohr

$$R = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (24)$$

a : Abscisa para el cálculo del Radio del Círculo

b : Ordenada para el cálculo del Radio del Círculo

Se unen los puntos 1 y 2 con una línea recta que obligatoriamente debe pasar por el centro O del Círculo. Con centro en O y utilizando la longitud desde O hasta el Punto 1 se traza el Círculo de Mohr.

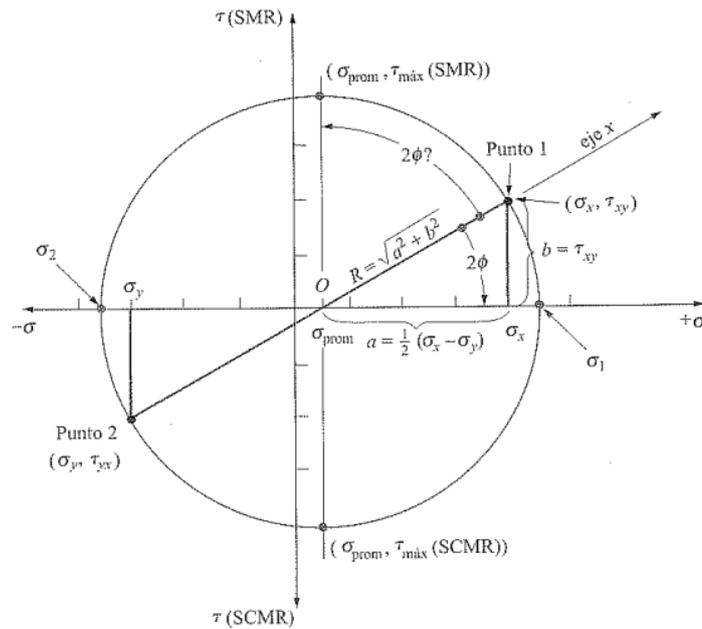


Figura 32. Círculo de Mohr Concluido

Fuente: (Mott, 2009)

Los esfuerzos principales se obtienen de la siguiente manera:

Ecuación No. 25: Esfuerzo Principal I del Círculo de Mohr

$$\sigma_1 = O + R \tag{25}$$

Ecuación No. 26: Esfuerzo Principal II del Círculo de Mohr

$$\sigma_2 = O - R \tag{26}$$

Puede aparecer un tercer esfuerzo principal σ_3 , pero siempre debe cumplirse lo siguiente:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

El esfuerzo cortante máximo tendrá el valor del Radio:

Ecuación No. 27: Esfuerzo Cortante Máximo del Círculo de Mohr

$$\tau_{m\acute{a}x} = R \quad (27)$$

La orientación del elemento sometido a esfuerzo principal se determina calculando el ángulo que forma el eje x con el eje σ_+ , este ángulo se calcula con:

Ecuación No. 28: Orientación del Elemento sometido a un Esfuerzo Principal

$$2\phi = \tan^{-1}\left(\frac{a}{b}\right) \quad (28)$$

La orientación del elemento sometido al esfuerzo cortante máximo se determina con el ángulo del eje x al eje τ_{max} :

Ecuación No. 29: Orientación del Elemento sometido al Esfuerzo Cortante Máximo

$$2\phi' = 90^\circ - 2\phi \quad (29)$$

Finalmente se obtiene al elemento sometido a los esfuerzos principales y al cortante máximo con su esfuerzo normal promedio:

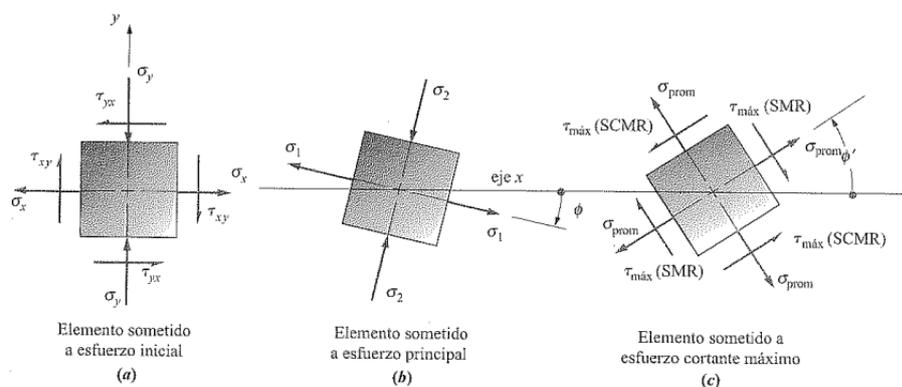


Figura 33. Forma General de los Resultados del Círculo de Mohr

Fuente: (Mott, 2009)

En resumen el círculo de Mohr se traza en un sistema de ejes perpendiculares, muy similar al plano XY que se maneja en la vida diaria. El eje perpendicular (Y) están ocupados por los esfuerzos cortantes y el eje horizontal (X) se completa con los esfuerzos normales, una convención típica de signos es la siguiente:

- Esfuerzos Normales Positivos (Tracción) se dirigen a la derecha.
- Esfuerzos Normales Negativos (Compresión) actúan para la izquierda.
- Los Esfuerzos Cortantes que crean un giro al elemento en sentido de las manecillas del reloj hacia arriba.
- Esfuerzos Cortantes que generan un movimiento contrario a las manecillas del reloj se mueven para abajo.

2.1.3.9. USO DE ROSETAS DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR ESFUERZOS PRINCIPALES

Experimentalmente se puede determinar los esfuerzos en un elemento, las Rosetas de Medición son arreglos de pequeños sensores llamados Galgas Extensiométricas que miden las deformaciones unitarias (adimensionales) y mediante cálculos similares a la Ley de Hooke se pueden obtener Esfuerzos Normales y Tangenciales. Sobre las Rosetas y las Galgas se resaltaré y profundizaré más adelante en el tema de instrumentación y acondicionamiento de Señales.

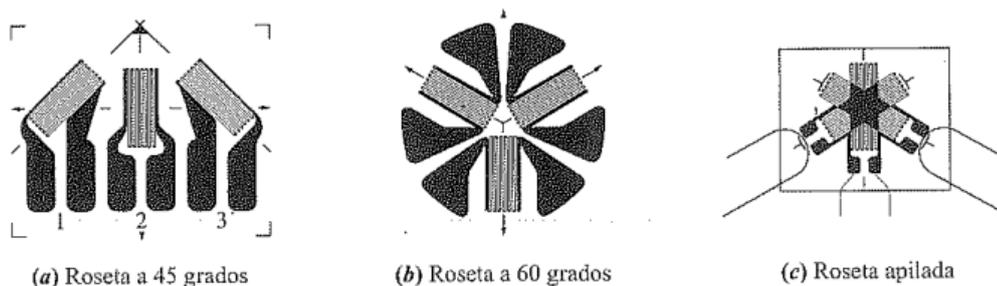


Figura 34. Tipos de Roseta de Medición de Esfuerzos.

Fuente: (Mott, 2009)

Para captar datos sumamente reales se debe alinear con mucha precisión estos elementos. Al entregarnos cada elemento una deformación unitaria se cuenta con tres datos de deformación que se manipulan según su geometría para obtener tres valores principales que son:

- ϵ_{max}
- ϵ_{min}
- β

Valores que además determinan la deformación angular unitaria máxima:

Ecuación No. 30: Deformación Angular Unitaria Máxima

$$\gamma_{max} = |\epsilon_{max} - \epsilon_{min}| \quad (30)$$

La deformación angular unitaria está dada en radianes.

Estos tres valores se conjugan para determinar los esfuerzos principales y el esfuerzo cortante máximo. Se auxilian de constante del material como:

- Coeficiente de Poisson
- Módulo de Elasticidad
- Módulo de Rigidez

La ley de Hooke presentada para determinar los esfuerzos normales y cortantes con las deformaciones máximas, mínimas, ángulo β y constante del material son:

Ecuación No. 31: Esfuerzo Normal Máximo en la Roseta

$$\sigma_{max} = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_{max} + \nu \epsilon_{min}) \quad (31)$$

Ecuación No. 32: Esfuerzo Normal Mínimo en la Roseta

$$\sigma_{min} = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_{min} + \nu \epsilon_{max}) \quad (32)$$

Ecuación No. 33: Esfuerzo Cortante Máximo en la Roseta

$$\tau_{max} = G \gamma_{max} \quad (33)$$

Los valores de esfuerzo normal máximo y mínimo equivalen al σ_1 y σ_2 respectivamente, el esfuerzo cortante máximo corresponde al mismo τ_{max} . Así con estos valores experimentales se construye el círculo de Mohr y se aplican las mismas fórmulas expuestas anteriormente para determinar los esfuerzos principales pero directamente los reales. En el siguiente círculo se muestra como se acomodan los esfuerzos para obtener los resultados finales:

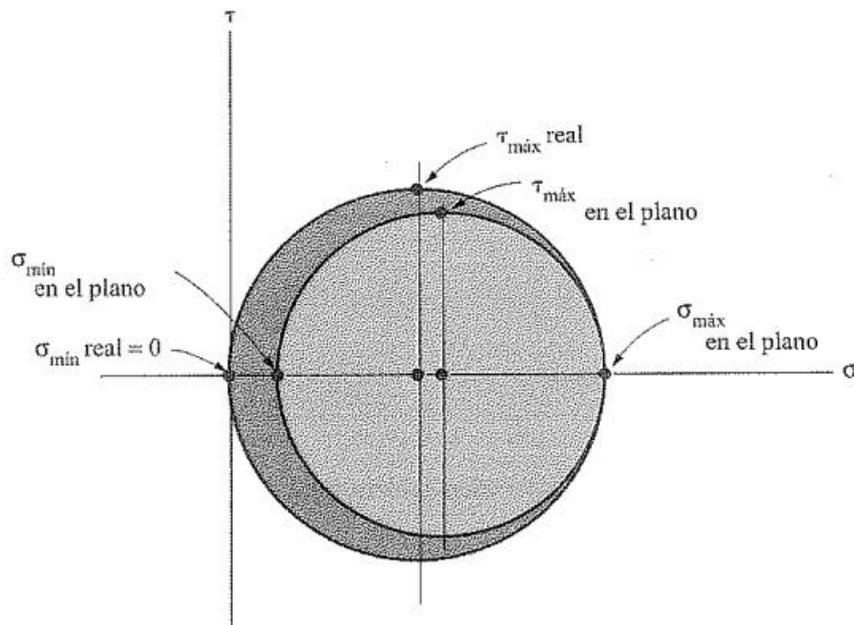


Figura 35. Círculo de Mohr con datos Experimentales de Rosetas

Fuente: (Mott, 2009)

El esfuerzo normal mínimo real refleja un valor de Cero, por lo que el cálculo del esfuerzo máximo cortante real (Radio Círculo Grande) queda definido como:

Ecuación No. 34: Esfuerzo Cortante Máximo Real en el Elemento

$$\tau_{\max real} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min real}}{2} \quad (34)$$

Estos datos serán verdaderos siempre y cuando los sensores y las medidas sean los más apegadas a la realidad y no existan factores que interfieran en los datos experimentales.

2.1.3.10. ESFUERZO DE VON MISES

La teoría de falla de energía máxima de distorsión se presenta en materiales dúctiles que son capaces de absorber una cierta cantidad de energía antes de sufrir una falla o de romper. Esta teoría está basada en los estudios realizados por Von Mises a una esfera maciza, idealmente homogénea, isotrópica e Hidrostáticamente comprimida. De esa forma se realizó el estudio de los esfuerzos que actuaban sobre el elemento y posteriormente a plantear las ecuaciones.

El criterio de Von Mises establece que la falla ocurrirá en la parte compleja cuando la energía de distorsión por volumen unitario exceda una prueba de tensión simple en la falla.

La falla ocurre si la energía de distorsión por volumen unitario excede la correspondencia a una prueba de tensión unitaria en la falla. Los esfuerzos principales se componen de esfuerzos que producen cambio de volumen y cambio de distorsión.

Ecuación No. 35: Volumen Unitario

$$v = v_{volumen} + v_{distorsión} \quad (35)$$

El esfuerzo de Von Mises es una magnitud física proporcional a la Energía de Distorsión, en la cual actúan los esfuerzos principales que se presentan en las tres direcciones del elemento sometido a esfuerzos.

Ecuación No. 36: Energía de Distorsión

$$E_{dist} = \frac{1}{6G} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad (36)$$

Entonces el Esfuerzo de Von Mises queda definido como:

Ecuación No. 37: Esfuerzo de Von Mises (Esfuerzos Principales)

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (37)$$

El Esfuerzo de Von Mises y el criterio de Fallo elástico fueron presentados por Richard Edler Von Mises en el año de 1913, proponiendo que un material dúctil sufría un fallo elástico en el momento que la energía de distorsión exceda un determinado valor.

Si en un elemento se posee los esfuerzos normales y los esfuerzos cortantes, direccionados con los tres ejes de coordenadas y en sus respectivas caras se puede aplicar la siguiente fórmula:

Ecuación No. 38: Esfuerzo de Von Mises

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}{2} + 3[\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2]} \quad (38)$$

$\sigma_x \sigma_y \sigma_z$ = Esfuerzos Normales

$\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}$: Esfuerzos Cortantes

Se puede observar que todos los esfuerzos presentes en un elemento se combinan con este criterio y se puede operar directamente el Esfuerzo de Von Mises porque sus dimensiones son las mismas que los esfuerzos participantes en su cálculo. En diseño se utiliza mucho esta teoría para determinar si un sistema tiene la capacidad de soportar las necesidades de servicio.

2.1.3.11. FACTOR DE SEGURIDAD

Es la resistencia de un elemento o sistema a soportar y transmitir cargas aplicadas sin fallar y manteniendo un margen superior a la del material por las incertidumbres que pueden existir por calidad del material, construcción, montaje y sobrecargas. Está definido de la siguiente forma:

Ecuación No. 39: Factor de Seguridad

$$FS = \frac{\text{Resistencia del Material}}{\text{Esfuerzos Aplicados}} \quad (39)$$

Se establece tres relaciones:

- $FS < 1$

Los esfuerzos aplicados son mayores a la resistencia del material y por lo tanto sobrepasa la zona de deformación elástica. Este sobreesfuerzo provoca una deformación plástica y una falla del material.

- $FS = 1$

La resistencia del material y los esfuerzos aplicados tienen el mismo valor, el elemento está en el límite elástico.

- $FS > 1$

La resistencia supera a los esfuerzos aplicados y se mantiene bajo el límite elástico en la zona de deformación lineal. Aquí se asegura que el elemento no falle.

Se recomienda trabajar con un FS mayor a uno, para asegurar que el elemento no falle con la carga nominal de trabajo. Según la aplicación existen diferentes valores de FS:

| CLASE DE CARGA | ACERO, METALES DÚCTILES | | HIERRO FUNDIDO, METALES QUEBRADIZOS | MADERA DE CONS- TRUCCIÓN |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------|
| | <i>Basado en la resistencia máxima</i> | <i>Basado en la resistencia de fluencia</i> | <i>Basado en la resistencia máxima</i> | |
| Carga permanente, $N =$ | 3-4 | 1,5-2 | 5-6 | 7 |
| Repetida, una dirección, gradual (choque suave) *, $N =$ | 6 | 3 | 7-8 | 10 |
| Repetida, invertida, gradual (choque suave) *, $N =$ | 8 | 4 | 10-12 | 15 |
| Choque *, $N =$ | 10-15 | 5-7 | 15-20 | 20 |

Figura 36. Factores de Seguridad (N)

Fuente: (Faires, 2003)

2.2. BREVE RESEÑA SOBRE LAS BICICLETAS TIPO BMX

2.2.1. HISTORIA Y ANTECEDENTES

Las bicicletas BMX por sus siglas en inglés significan “Bike Motocross”, son un vehículo pequeño que emula ser una motocicleta tipo “MotoCross”. Este deporte originalmente utiliza motocicletas de anchos menores a las normales, con aros y neumáticos de gran diámetro y una amortiguación especial para realizar grandes saltos y acrobacias en pistas de tierra con montículos y rampas.



Figura 37. Motocicleta de MotoCross

Fuente: (IBMXFF, 2011)

En la década del año 1970 en el Estado de California dentro de los Estados Unidos los jóvenes especialmente trataban de realizar los mismos trucos pero con una bicicleta dentro de las pistas para motos.



Figura 38. Bicicleta BMX

Fuente: (IBMXFF, 2011)

En sus inicios este deporte se desarrolló en los EEUU, en la década de los setentas precisamente en el año 1974 se fundó la National Bicycle League (NBL) entidad encargada de promover a nivel local y regional esta disciplina. Algunos historiadores remontan los orígenes del BMX a finales del siglo XIX en Francia, derivados de ejercicios militares de la época. Se denominaban “ciclocross” y las personas lo realizaban en campos con obstáculos y condiciones de terrenos desfavorables.



Figura 39. Pista de MotoCross

Fuente: (IBMXFF, 2011)

En el año de 1977 la Asociación Americana de Bicicletas (siglas ABA en inglés) realizó diversas actividades para organizar de mejor manera la rama de BMX y gracias a su acogida tenga un crecimiento notable este deporte. En el siguiente año (1978) se introdujo este tipo de ciclismo en Europa y tres años más tarde (1981) se creó la Federación Internacional de BMX. En el primer aniversario de la creación de la Federación se celebró el primer Campeonato Mundial. Desde el comienzo del año 1993 el BMX ha sido integrado dentro de la Unión Ciclista Internacional (UCI).

En las olimpiadas realizadas en la ciudad China de Pekín en el año 2008 fue la primera vez que un deporte de este tipo fue incluido como disciplina olímpica para hombres y mujeres. De igual manera fue practicado el BMX en las pasadas olimpiadas de Londres 2012.



Figura 40. Pista olímpica de BMX de los JJOO Londres 2012

Fuente: (IBMXFF, 2011)

2.2.2. CARACTERÍSTICAS DE UNA BICICLETA BMX

Las rigurosidades del deporte BMX conllevan a tener un tamaño pequeño de bicicleta para tener gran maniobrabilidad, ruedas grandes de hasta 20 pulgadas de diámetro debido a los obstáculos y un material muy resistente que soporte las caídas y trucos. El manubrio es amplio para facilitar la conducción y no posee los cambios de velocidad como las bicicletas montaÑeras. Partes de una BMX:



Figura 41. Partes de una BMX

Fuente: (IBMXFF, 2011)

Tabla 3

Partes de una Bicicleta BMX

| Numeral | Parte |
|---------|-----------|
| 1 | Puños |
| 2 | Manillar |
| 3 | Potencia |
| 4 | Cuadro |
| 5 | Horquilla |
| 6 | Cubierta |
| 7 | Aro |
| 8 | Pegs |
| 9 | Buje |
| 10 | Radios |
| 11 | Biela |
| 12 | Pedal |
| 13 | Plato |
| 14 | Cadena |
| 15 | Piñón |
| 16 | Sillín |
| 17 | Tija |

Fuente: (Primaxi, 2014)

Una parte fundamental en la bicicleta es su cuadro, su forma y material dependen del terreno y las acrobacias que se vayan a realizar. Los cuadros se miden en función del tubo horizontal superior, en inglés se denomina “Top Tube” (TT). Todos sus elementos son soldados y juntos forman el bastidor de la bicicleta.

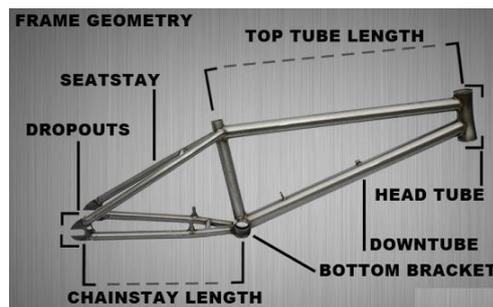


Figura 42. Geometría del marco de una BMX

Fuente: (IBMXFF, 2011)

A continuación se muestra una tabla con las diferentes medidas del Top Tube en función de la altura de la persona. Hay que aclarar que estas dimensiones son normadas y no dependen de los gustos de los ciclistas.

Tabla 4

Dimensiones del Cuadro

| Estatura (cm) | Top Tube (pulg) |
|------------------|-----------------|
| Hasta 160 | 20,25 |
| De 160 hasta 168 | 20 - 20,25 |
| De 168 hasta 173 | 20,25 - 20,50 |
| De 173 hasta 178 | 20,5 - 20,75 |
| De 178 hasta 185 | 20,75 - 21 |

Más de 185

20,75 - 21,125

Fuente: (IBMXFF, 2011)

Los materiales del cual se fabrican los cuadros de una BMX son:

- **Aluminio 6061**

Es una aleación de aluminio endurecido que contiene como principales elementos aluminio, magnesio y silicio. Originalmente denominado "aleación 61S" fue desarrollada en 1935. Tiene buenas propiedades mecánicas y para su uso en soldaduras. Es una de las aleaciones de aluminio más comunes para uso general. Se emplea comúnmente en formas pre templadas como el 6061-O y las templadas como el 6061-T6 y 6061-T651.

Es usado en todo el mundo para los moldes de inyección y soplado, construcción de estructuras de aeronaves, como las alas y el fuselaje de aviones comerciales y de uso militar; en refacciones industriales, en la construcción de yates, incluidos pequeñas embarcaciones, en piezas de automóviles, en la manufactura de latas de aluminio para el empaquetado de comida y bebidas. Es fácil de maquinar y resistente a la corrosión.

- **Fibra de Carbono**

La fibra de carbono es una fibra sintética constituida por finos filamentos de 5–10 μm de diámetro y compuesto principalmente por carbono. Cada filamento de carbono es la unión de muchas miles de fibras de carbono. Se trata de una fibra sintética porque se fabrica a partir del poliacrilonitrilo. Tiene propiedades mecánicas similares al acero y es tan ligera como la madera o el plástico. Por su dureza tiene mayor resistencia al impacto que el acero.

Las propiedades principales de este material compuesto son:

- Muy elevada resistencia mecánica, con un módulo de elasticidad elevado.
- Baja densidad, en comparación con otros elementos como por ejemplo el acero.
- Elevado precio de producción.
- Resistencia a agentes externos.
- Gran capacidad de aislamiento térmico.
- Resistencia a las variaciones de temperatura, conservando su forma, sólo si se utiliza matriz termoestable.

Hay que resaltar que el precio de este material es muy costoso debido a la complejidad en la fabricación y maquinabilidad del mismo.

- **Acero al Carbono y Aleados**

Los aceros son utilizados en muchísimas aplicaciones a nivel mundial. Son muy buenos debido a su resistencia, maquinabilidad, soldabilidad y disponibilidad en el mercado. Un problema que presenta es su alta densidad.

Los aceros al carbono son menos resistentes que los aleados, a estos dos tipos de acero se les realizan tratamientos térmicos para que sus propiedades queden afectadas en menor grado debido al proceso de soldadura.

- **Titanio**

El titanio es un metal muy importante que fue descubierto en 1791. El estado del titanio en su forma natural es sólido. El titanio es un elemento químico de aspecto plateado y pertenece al grupo de los metales de transición. Las propiedades del titanio son su elevada dureza, el tener puntos de ebullición y fusión elevados y ser buenos conductores de la electricidad y el calor. Los usos del titanio son:

- Las aleaciones de titanio se utilizan en los aviones y también en helicópteros, blindaje, buques de guerra, naves espaciales y misiles. Las aleaciones de titanio no se desgastan fácilmente, son fuertes y resistentes a la corrosión por lo que son perfectos para su uso en las aplicaciones anteriores.
- Los intercambiadores de calor en las plantas de desalinización (que convierten el agua de mar en agua potable) están hechos de titanio, ya que es resistente a la corrosión en agua de mar.
- Muchas armas de fuego (pistolas) están hechas de titanio, ya que es un material fuerte y ligero.

2.2.3. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL PARA LA PRÁCTICA DEL BMX

El riesgo que enfrenta un ciclista de BMX al realizar trucos en diversos sitios, saltos en rampas y manejar por pistas con obstáculos debe ser minimizado con el uso de elementos de protección.



Figura 43. Accidente de BMX ocurrido en los JJOO Londres 2012

Fuente: (IBMXFF, 2011)

Para tener elementos confiables es una buena opción que los equipos sean certificados por entidades especializadas en Seguridad Personal y Accidentes.

Tabla 5

Equipo de Seguridad BMX

| Elemento | Protección |
|---------------------|------------------|
| Casco y Gafas | Cabeza y Ojos |
| Guantes | Manos |
| Pantalón Largo | Piernas y Cadera |
| Camisa Manga Larga | Pecho y Brazos |
| Zapatos de Ciclismo | Pies |

Fuente: (IBMXFF, 2011)

2.2.4. MODALIDADES DEL BMX

Estas bicicletas tratan de emular las actividades que realiza el MotoCross. Existen tipos de modalidades que se dedican a los trucos en calles, parques o pistas.

- **Race**

Esta competencia es una carrera que se realiza en pistas similares a las de MotoCross, la diferencia es el material de la que está compuesta. Para motos se utiliza una tierra húmeda, mientras que para las BMX se usa una arena arcillosa compacta para evitar incrustaciones y no perder tracción. Se utilizan llantas con diámetros de 20 pulgadas llamadas normal y otras de 24 pulgadas con el título de cruiser.



Figura 44. Pista de BMX Race

Fuente: (IBMXFF, 2011)

La longitud de la pista puede variar entre los 350 y 500 metros, al igual que en atletismo son ocho los competidores. Los cuatro primeros en lograr tres giros al circuito clasifican a una nueva ronda. En los Juegos Olímpicos solo se permite utilizar llantas tipo normal.

- **Free Style:**

Como su nombre lo indica en inglés es un estilo libre, pero existen seis tipos de modalidades:

Dirt Jump: Consiste en realizar saltos (jump) acrobáticos utilizando rampas de tierra (dirt), las alturas de las rampas pueden fluctuar entre los 2 y 3 metros. La rampa que recibe el salto es denominada recibidor y tiene que tener 20 centímetros más de altura que la rampa impulsora del salto. Es decir si la primera rampa tiene un altura de 2 metros la segunda deberá ser de 2,2 metros. La distancia entre rampas puede ser desde 2 metros pero no superar los 3.



Figura 45. Secuencia de un salto en rampa de tierra

Fuente: (IBMXFF, 2011)

Flatland: Esta competencia consiste en realizar trucos (tricks) en superficies pavimentadas sin la necesidad de obstáculos como rampas, tubos de pasamanos, etc. El punto clave es no tocar el suelo con los pies, el ciclista tiene que hacer cualquier truco q sea posible utilizando los pegs, el manubrio y los pedales. Quizás sea una de las más difíciles del BMX por la complejidad que conlleva. Los neumáticos tienen que estar inflados a una presión de casi 8 atmósferas para evitar que estos se deformen considerablemente y generen pérdidas de equilibrio.



Figura 46. Truco de equilibrio sobre los pegs traseros

Fuente: (IBMXFF, 2011)

Park: Se realizan acrobacias en rampas y obstáculos de cemento o madera. En planicies se pueden montar elementos que pueden colaborar con la realización de trucos. Las rampas son utilizadas para que los ciclistas muestren su creatividad realizando giros y vueltas respecto sus bicicletas.



Figura 47. Salto sobre rampa de madera

Fuente: (IBMXFF, 2011)

Vert: Para esta modalidad es necesario contar con una rampa vertical, que permita realizar saltos verticales, trucos en el aire y caer en la misma rampa. Las rampas verticales son denominadas “half pipe” o medio tubo el cual cumple con todos los requerimientos. Los medios tubos pueden ser de madera, piscinas vacías o de hormigón.



Figura 48. Truco en el aire sobre un medio tubo de madera

Fuente: (IBMXFF, 2011)

Street: En español tiene el significado de calle, aquí los ciclistas utilizan todo objeto en las calles o parques que ayuden a realizar trucos y acrobacias. Los pasamanos, bordillos, jardineras, bancas, etc. Es importante el equilibrio que puedan alcanzar para realizar giros y saltos de manera correcta. Los pegs ayudan mucho para deslizarse sobre superficies metálicas o para equilibrar por un momento la bicicleta.



Figura 49. Desplazamiento en la llanta trasera

Fuente: (IBMXFF, 2011)

Street-Flatland: Una nueva disciplina que combina los trucos callejeros del Street con la agilidad y destreza de realizar maromas sin tocar el suelo.



Figura 50. Equilibrio sobre un obstáculo

Fuente: (IBMXFF, 2011)

2.3. BREVE RESEÑA DE LOS PROGRAMAS CAD Y CAE

En ingeniería son varias las herramientas que facilitan los análisis y diseños. De igual forma aportan para descubrir fenómenos e investigar sobre distintos tipos de soluciones. Existen programas que ayudan a modelar objetos, simular su manufactura y analizar su comportamiento frente a diversos esfuerzos.

Para el presente proyecto la bicicleta es modelada en tres dimensiones y posteriormente se efectúa un análisis con las condiciones necesarias para determinar los puntos en donde los esfuerzos y deformaciones son los máximos.

2.3.1. DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR (CAD)

Computer-aided design (CAD) es el uso de programas computacionales para crear representaciones gráficas de objetos físicos ya sea en segunda o tercera dimensión (2D o 3D). El software CAD puede ser especializado para usos y aplicaciones específicas. CAD es ampliamente utilizado para la animación computacional y efectos especiales en películas, publicidad y productos de diferentes industrias, donde el software realiza cálculos para determinar una forma y tamaño óptimo para una variedad de productos y aplicaciones de diseño industrial.

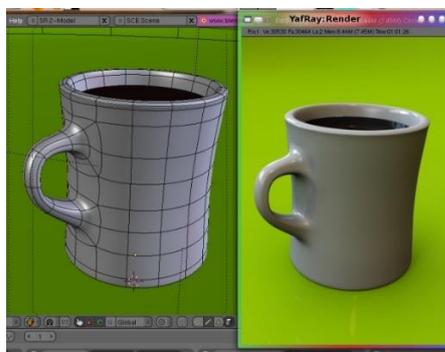


Figura 51. Taza con café modelada en 3D

Fuente: (Mathplane, 2009)

En diseño industrial y de productos, CAD es utilizado principalmente para la creación de modelos de superficie o sólidos en 3D, o bien, dibujos de componentes físicos basados en vectores en 2D. Sin embargo, CAD también se utiliza en los procesos de ingeniería desde el diseño conceptual y hasta el layout de productos, a través de fuerza y análisis dinámico de ensamblajes hasta la definición de métodos de manufactura. Esto le permite al ingeniero analizar interactiva y automáticamente las variantes de diseño, para encontrar el diseño óptimo para manufactura mientras se minimiza el uso de prototipos físicos.



Figura 52. Prototipado de un asiento

Fuente: (Mathplane, 2009)

2.3.2. BENEFICIOS DE CAD

Los beneficios del CAD incluyen menores costos de desarrollo de productos, aumento de la productividad, mejora en la calidad del producto y un menor tiempo de lanzamiento al Mercado.

- Mejor visualización del producto final, los sub-ensambles parciales y los componentes en un sistema CAD agilizan el proceso de diseño.

- Ofrece gran exactitud de forma que se reducen los errores.
- Brinda una documentación más sencilla y robusta del diseño, incluyendo geometría y dimensiones, lista de materiales, etc.
- Permite una reutilización sencilla de diseños de datos y mejores prácticas.

2.3.3. INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR (CAE)

Ingeniería asistida por computadora (CAE) es el uso de software computacional para simular desempeño y así poder hacer mejoras a los diseños de productos o bien apoyar a la resolución de problemas de ingeniería para una amplia gama de industrias. Esto incluye la simulación, validación y optimización de productos, procesos y herramientas de manufactura.

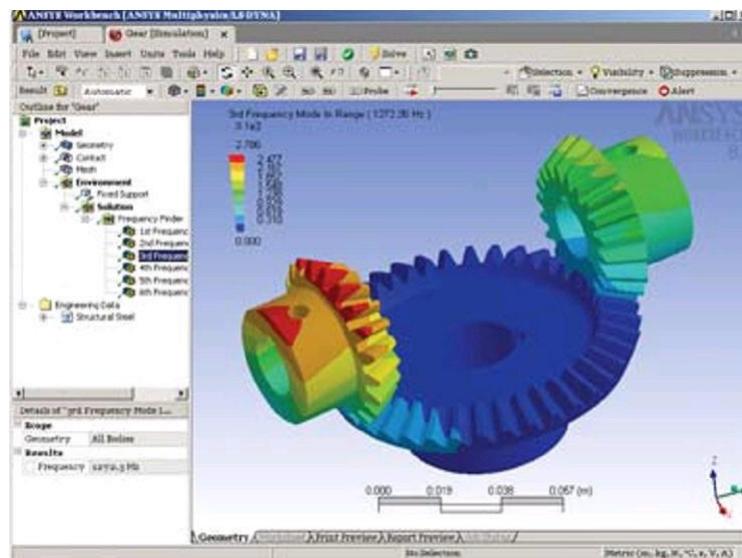


Figura 53. Análisis de un sistema de engranajes

Fuente: (Mathplane, 2009)

Un proceso típico de CAE incluyen pasos de pre-procesado, solución y post-procesado. En la fase de pre-procesado, los ingenieros modelan la geometría y las propiedades físicas del diseño, así como el ambiente en forma

de cargas y restricciones aplicadas. En la fase de post-procesado, los resultados se presentan al ingeniero para su revisión.

Las aplicaciones CAE soportan una gran variedad de disciplinas y fenómenos de la ingeniería incluyendo:

- Análisis de estrés y dinámica de componentes y ensambles utilizando el análisis de elementos finitos (FEA)
- Análisis Termal y de fluidos utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD)
- Análisis de Cinemática y de dinámica de mecanismos (Dinámica multicuerpos)
- Simulación mecánica de eventos (MES)
- Análisis de control de sistemas
- Simulación de procesos de manufacturera como forja, moldes y troquelados
- Optimización del proceso del producto

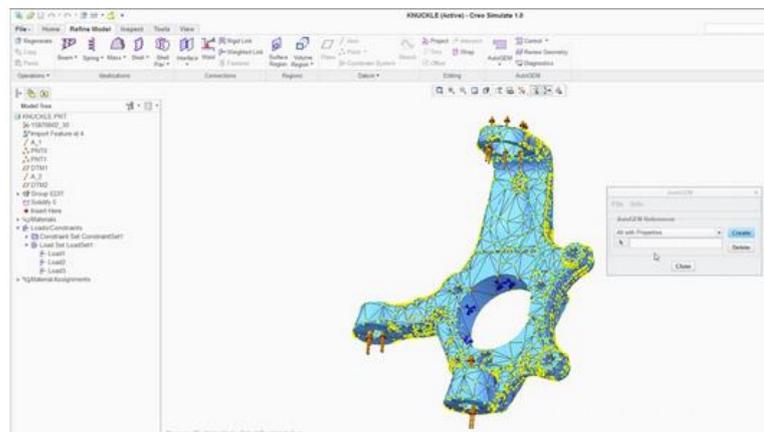


Figura 54. Optimización de una pieza

Fuente: (Mathplane, 2009)

Algunos problemas de la ingeniería requieren la simulación de fenómenos múltiples para representar la física subyacente. Las aplicaciones CAE que abordan dichos problemas usualmente se llaman soluciones de física múltiple.

2.3.4. BENEFICIOS DE CAE

Los beneficios de software de tipo CAE incluyen reducción del tiempo y costo de desarrollo de productos, con mayor calidad y durabilidad del producto.

- Las decisiones sobre el diseño se toman con base en el impacto del desempeño del producto.
- Los diseños pueden evaluarse y refinarse utilizando simulaciones computarizadas en lugar de hacer pruebas a prototipos físicos, ahorrando tiempo y dinero.
- Aplicaciones CAE brindan conocimientos sobre el desempeño más temprano en el proceso de desarrollo, cuando los cambios al diseño son menos costosos de hacer.
- Aplicaciones CAE apoyan a los equipos de ingeniería a administrar riesgos y comprender las implicaciones en el desempeño de sus diseños.
- Los datos integrados y la gestión del proceso del CAE amplían la capacidad de balancear con eficacia los conocimientos del funcionamiento mientras se mejoran los diseños para una comunidad más amplia.
- La exposición de garantía es reducida al identificar y eliminar problemas potenciales. Cuando integrado al producto y desarrollo de la manufactura, CAE puede facilitar desde etapas tempranas la resolución de problemas, lo que puede reducir dramáticamente los costos asociados al ciclo de vida del producto.

2.4. BREVE RESEÑA DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS E INSTRUMENTACIÓN

Los fenómenos físicos, químicos y eléctricos se presentan en diferentes procesos que son realizados por la naturaleza y provocados por los seres vivos. Estos últimos pueden detectar estos fenómenos gracias a los sentidos que poseen, los seres vivos poseen detectores de señales que comúnmente son llamados sensores.



Figura 55. Oído humano detectando un sonido

Fuente: (Directindustry, 2008)

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes de orden físico, químicas, etc. Los cuales son llamados variables de instrumentación. Algunos sensores son capaces de convertir estas variables en variables eléctricas.



Figura 56. Interruptor

Fuente: (Directindustry, 2008)

Este cotidiano aparato es un sensor de fuerza, cuando presionamos o empujamos un interruptor este cambia de posición y permite el flujo de energía eléctrica encienda un led o un foco. Mientras no se aplique una cierta fuerza este permanecerá abierto o cerrado según sea la posición original.

Existen diferentes naturalezas de señales, como las siguientes:

- Temperatura
- Presión
- Caudal
- Posición
- Velocidad

Una señal es importante cuando lleva la información precisa de lo que está ocurriendo, se encuentra en:

- La magnitud
- Forma de onda
- Valores máximos y mínimos
- Variación
- Frecuencia

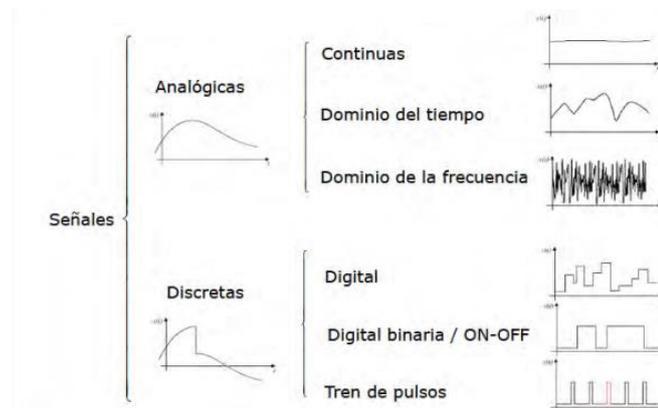


Figura 57. Tipos de Señales

Fuente: (Echeverría, 2010)

Un instrumento es un sistema abierto, el cual recibe parámetros de entrada, se realizan procesos dentro de el y otorga una salida.



Figura 58. Modelo de sistema de un instrumento

Fuente: (Echeverría, 2010)

Se debe recalcar las diferencias entre un sensor y un actuador, por ejemplo un sensor de temperatura llamado Termómetro de mercurio. Este sensor recibe una temperatura, el mercurio se expande y como resultado se entrega una dilatación. El aumento del volumen del mercurio se traduce como un aumento de temperatura. Por tanto el sensor entrega información del fenómeno que está ocurriendo, en este caso se Transfiere Calor.



Figura 59. Aumento de Temperatura detectado por un Termómetro

Fuente: (Directindustry, 2008)

Un actuador también recibe una entrada, para este ejemplo se supone que se cuenta con un motor eléctrico que funciona con el voltaje típico del país (120 V). Al conectar el enchufe del motor a los toma corrientes y encender el motor, el flujo de corriente viaja por las líneas del motor. El resultado es un eje girando. La salida de este sistema es velocidad angular y torque, lo que simplemente indica una conversión de energía.



Figura 60. Modelo del sistema Motor AC

Fuente: (Echeverría, 2010)

Un transductor es un dispositivo que convierte una señal de una forma física en una correspondiente pero de otra forma física distinta. Convierte un tipo de energía en otro pero a diferencia del actuador no entrega un movimiento sino una señal de diferente naturaleza a la de entrada.



Figura 61. Transductor de Temperatura

Fuente: (Directindustry, 2008)

Al transformar energía se tiene que asegurar que esta no afecte al dispositivo. En la práctica se conoce como transductores a los sensores que ofrecen como señal de salida una de tipo eléctrica. Estos sistemas electrónicos tienen sus ventajas:

- Estructura electrónica de algunos materiales que variando parámetros no eléctricos del mismo como someter a presiones o desplazamientos va de la mano con variaciones eléctricas del material como resistencia.
- Las señales eléctricas se pueden acondicionar para su mejor interpretación y mejorar su comportamiento
- Transmitir una señal eléctrica es mucho más versátil que una señal mecánica
- Existe una variedad de recursos para para registrar o presentar información si una señal es eléctrica y la manipulación de esta información puede ser tabulada o mostrada en ciertos gráficos.

| in \ out | RADIANT | MECHANICAL | THERMAL | ELECTRICAL | MAGNETIC | CHEMICAL |
|------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| RADIANT | <i>Photo-luminescence</i> | <i>Radiation pressure</i> | <i>Radiation heating (sun)</i> | <i>Photo-conductivity</i> | <i>Photomagnetism</i> | <i>Photochemical reaction</i> |
| MECHANICAL | <i>Photoelastic effect</i> | <i>Conservation of momentum</i> | <i>Friction heat</i> | <i>Piezoelectric effect</i> | <i>Magnetostriction</i> | <i>Pressure induced reaction</i> |
| THERMAL | <i>Incandescence</i> | <i>Thermal expansion</i> | <i>Heat conductivity</i> | <i>Seebeck effect</i> | <i>Curie-Weiss law</i> | <i>Endothermic reaction</i> |
| ELECTRICAL | <i>Electro-luminescence</i> | <i>Piezoelectric effect</i> | <i>Peltier effect</i> | <i>P-n junction</i> | <i>Ampere's law</i> | <i>Electrolysis</i> |
| MAGNETIC | <i>Faraday effect</i> | <i>Magnetostriction</i> | <i>Ettling-hausen effect</i> | <i>Hall effect</i> | <i>Magnetic induction</i> | |
| CHEMICAL | <i>Chemo-luminescence</i> | <i>Explosive reaction</i> | <i>Exothermic reaction</i> | <i>Volta effect</i> | | <i>Chemical reaction</i> |

Figura 62. Fenómenos de Transducción de Señal

Fuente: (Echeverría, 2010)

2.4.1. CARACTERÍSTICA ESTÁTICA

Cuando la variable de interés que está midiendo un sensor basta con conocer su característica estática. La característica estática relaciona la entrada del sensor con su salida, en otras palabras los datos que arroja el sensor con una señal de entrada. A la entrada se la conoce como Input (I) y la salida como Output (O), se puede representar de las siguientes formas:

- Una función algebraica ($O = f(I)$)
- Gráfico que representa la Salida frente la Entrada O-I
- Un diagrama de la función

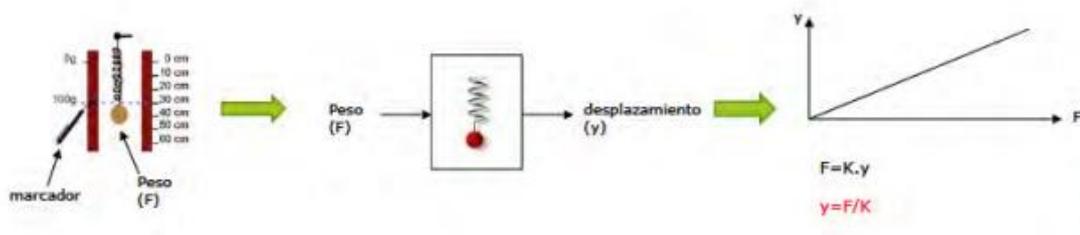


Figura 63. Característica Estática de un Sensor de Peso a base de un Resorte

Fuente: (Echeverría, 2010)

La Característica estática describe la actuación del sensor en régimen permanente o con cambios muy lentos de la variable a medir. Los puntos a tomar en cuenta son los siguientes:

Rango de medida: el conjunto de valores que puede tomar la señal de entrada comprendidos entre el máximo y el mínimo detectados por el sensor con una tolerancia de error aceptable. El alcance es la diferencia entre los valores máximos y mínimos de entrada y salida.

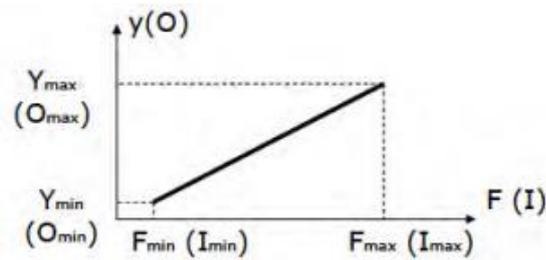


Figura 64. Rango de Entrada y Salida

Fuente: (Echeverría, 2010)

Resolución: indica la capacidad del sensor para discernir entre valores muy próximos de la variable de entrada. Indica que variación de la señal de entrada produce una variación detectable en la señal de salida.

Precisión: define la variación máxima entre la salida real obtenida y la salida teórica dada como patrón para el sensor.

Repetitibilidad: Indica la máxima variación entre valores de salida obtenidos al medir varias veces la misma entrada con el mismo sensor y en idénticas condiciones ambientales.

Linealidad: un transductor es lineal si existe una constante de proporcionalidad única que relaciona los incrementos de la señal de salida con los respectivos incrementos de la señal de entrada en todo el rango de medida.

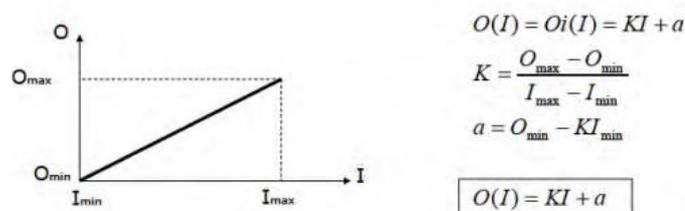


Figura 65. Sensor Lineal

Fuente: (Echeverría, 2010)

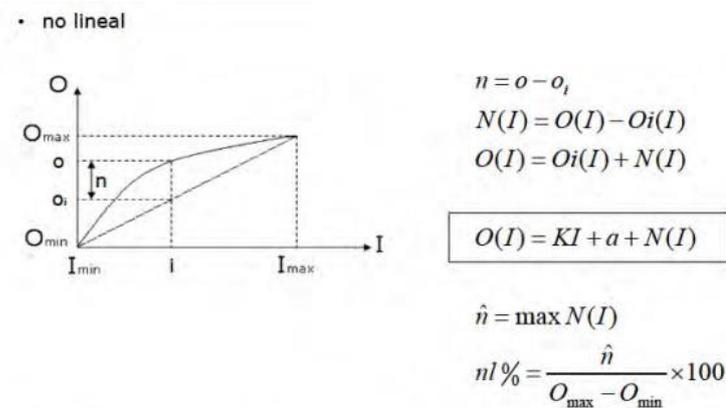


Figura 66. Sensor No Lineal

Fuente: (Echeverría, 2010)

Sensibilidad: indica la mayor o menor variación de la señal de salida por unidad de la magnitud de entrada. Cuanto mayor sea la variación de la señal de salida producida por una variación en la señal de entrada, el sensor es más sensible. A continuación se muestra para sensores:

Para un sensor lineal:

$$O_i(I) = KI + a$$

$$sens = \frac{dO}{dI} = K$$

Para un sensor no lineal:

$$O_i(I) = KI + a + N(I)$$

$$sens = \frac{dO}{dI} = K + \frac{dN(I)}{dt}$$

Figura 67. Sensibilidad en sensores

Fuente: (Echeverría, 2010)

Ruido: cualquier perturbación aleatoria del propio sistema de medida que afecta la señal que se quiere medir.

Efectos Medioambientales: Las condiciones de temperatura y presión afectan al comportamiento y característica estática del sensor, estas pueden ser:

- Modificantes: Rotan la gráfica teniendo como pivote el valor cuando la entrada es cero.

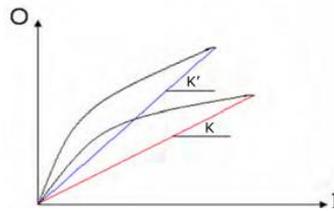


Figura 68. Efecto Modificante

Fuente: (Echeverría, 2010)

- Interferentes: Tienden a trasladar la gráfica de manera vertical.

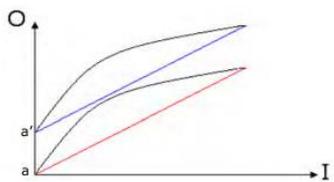


Figura 69. Efecto Interfrente

Fuente: (Echeverría, 2010)

Histéresis: Cuando un sensor no presenta el mismo de comportamiento en la fase de carga y descarga, es decir tiene dos curvas que empatan en los valores mínimos y máximos.

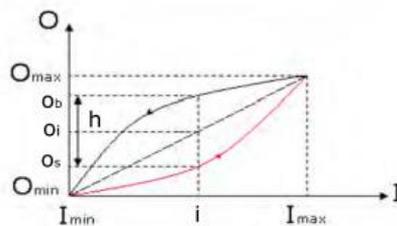


Figura 70. Sensor con Histéresis

Fuente: (Echeverría, 2010)

2.4.2. CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS

Es cuando se describe el comportamiento del sensor en régimen transitorio, cuanto tiempo le toma al dispositivo responder a un estímulo. Ningún instrumento responde instantáneamente a un cambio en las condiciones de entrada. El tiempo de respuesta depende de la estructura interna del dispositivo y su función tiene un comportamiento físico-matemático.

Velocidad de respuesta: mide la capacidad del sensor para que la señal de salida siga sin retraso las variaciones de la señal de entrada.

Respuesta en frecuencia: mide la capacidad del sensor para seguir las variaciones de la señal de entrada a medida que aumenta la frecuencia, generalmente los sensores convencionales presentan una respuesta del tipo pasa bajos.

Estabilidad: indica la desviación en la salida del sensor con respecto al valor teórico dado, al variar parámetros exteriores distintos al que se quiere medir (condiciones ambientales, alimentación, etc.).

Las características estática y dinámica dependen en sí de como reacciona el sensor según la condición que se presente. Pero el sensor interfiere en cierto nivel con el proceso o variable que está midiendo.

Impedancia: Capacidad del sensor para obtener energía del proceso y afectar directamente al mismo. Si el sensor llega a alterar el proceso se dice que existe un error por carga.

En el proceso de medida de una variable (x_1) siempre interviene otra variable (x_2), el producto de las dos variables tiene dimensiones de potencia, es decir:

Ecuación No. 40: Impedancia

$$P_0 = x_1 \times x_2 \quad (40)$$

| Variable medida | Variable que interviene |
|------------------------|--------------------------------|
| Fuerza | Velocidad |
| Caudal | Diferencia de presión |
| Temperatura | Flujo de calor |
| Corriente | Diferencia de tensión |

Figura 71. Variables Mecánicas

Fuente: (Echeverría, 2010)

2.4.3. GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

Estos sensores conocidos en el idioma inglés como “Strain Gauge” se basan en la variación de resistencia de un conductor o semiconductor cuando es sometido a un esfuerzo mecánico. Este efecto fue descubierto por Lord Kelvin en 1856. Si se considera un hilo metálico su resistencia eléctrica R es:

Ecuación No. 41: Resistencia Eléctrica de un Material

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (41)$$



Figura 72. Probeta de un material

Fuente: (Directindustry, 2008)

Si se somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las tres magnitudes que intervienen en el valor R experimenta un cambio y por lo tanto R también cambia de forma.

Cualquiera que estos parámetros se modifique hace que la resistencia cambie, se puede emplear fuerzas, presiones, cambios de temperatura, etc. Toda magnitud es válida siempre y cuando afecte a cualquiera de los parámetros que componen la resistencia de un material. Su señal de salida es de tipo resistiva. Por ejemplo el cambio de Longitud resulta de aplicar la Ley de Hooke, que consiste en aplicar una fuerza siempre que no sobrepase la zona de fluencia del material. Es válida en el rango elástico de un material. Se expresa de la siguiente manera:

Ecuación No. 42: Ley de Hooke

$$F = k * x \quad (42)$$

Para relacionar la ley de Hooke a la zona elástica de un material y la resistencia del mismo utilizamos el concepto de presión:

Ecuación No. 43: Ley de Hooke en la Zona Elástica

$$\sigma = \frac{F}{A} = E * \varepsilon \quad (43)$$

El módulo de Elasticidad se expresa en unidades de presión y recordando que la deformación unitaria es el cociente de la variación de longitud con la longitud inicial (valor adimensional). Típicamente la deformación unitaria se entrega en valores de microdeformaciones.

$$1 \text{ microdeformación} = 1 \mu\varepsilon = 10^{-6} \text{ mm/mm}$$

Considerando que en una pieza varía la longitud (l) y el área (u) se tiene una relación llamada coeficiente de Poisson:

Ecuación No. 44: Coeficiente de Poisson

$$\mu = \frac{\frac{dt}{t}}{\frac{dl}{l}} \quad (44)$$

Este valor es adimensional está en un rango de valores desde 0 hasta 0.5 (valor para la conservación del volumen).

Tabla 6

Coefficientes de Poisson

| Material | Coefficiente Poisson |
|--------------------|----------------------|
| Fundición Maleable | 0.17 |
| Acero | 0.303 |
| Aluminio y Cobre | 0.33 |

Fuente: (Pallás Areny, 2005)

2.4.3.1. PARTES DE UNA GALGA EXTENSIOMÉTRICA Y COMPORTAMIENTO

Es un hilo delgado colocado de manera ondulada dentro de una base y posee dos terminales para su conexión. Estos sensores responden a esfuerzos o fuerzas que se aplican a lo largo del mismo. La medición se realiza en el centro de gravedad de la galga y sus partes se muestran en la siguiente figura.

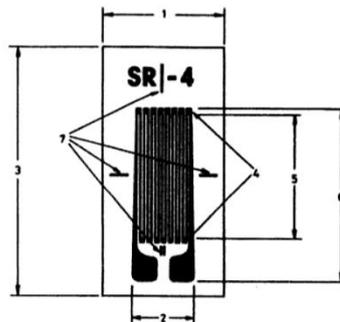


Figura 73. Galga Extensiométrica

Fuente: (Pallás Areny, 2005)

Tabla 7

Partes de una Galga

| Número | Parte |
|--------|-------------------------|
| 1 | Anchura del Soporte |
| 2 | Anchura de la Galga |
| 3 | Longitud del Soporte |
| 4 | Extremos ensanchados |
| 5 | Longitud Activa |
| 6 | Longitud total de Galga |
| 7 | Marcas de Alineación |

Fuente: (Pallás Areny, 2005)

El esfuerzo aplicado no debe llevar a las deformaciones fuera del límite elástico del material de la galga. Para que la presión se transmita completamente se debe colocar de manera correcta el sensor y crear una relación de hermandad con el elemento sometido a un fenómeno mecánico. En resumen la galga y la pieza sometida tienen que ser un solo cuerpo. Los elementos que intervienen en el montaje de una galga son:

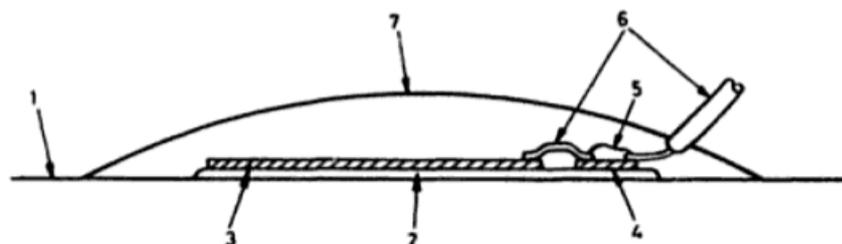


Figura 74. Montaje de una Galga

Fuente: (Pallás Areny, 2005)

Tabla 8

Elementos Montaje de una Galga

| Número | Elemento |
|--------|-------------------------|
| 1 | Sustrato donde se monta |
| 2 | Adhesivo |
| 3 | Galga |
| 4 | Terminales para soldar |
| 5 | Soldadura |
| 6 | Hilos de conexión |
| 7 | Aislamiento protector |

Fuente: (Pallás Areny, 2005)

Las galgas al ser de hilos muy delgados pueden ser afectadas por la temperatura ambiente y por la corriente que circula dentro de ella. Para el primer caso, la temperatura afecta a la resistividad propia del material y transfiere calor por convección y radiación a la misma. Al tener un tamaño diminuto se hace difícil que pueda disipar calor. La corriente que circula debido a la Ley de Ohm genera una potencia eléctrica que a su vez se transforma en energía calórica. Para el cambio de resistividad por temperatura y la baja disipación de calor se obtiene valores de resistencias alejados de la realidad.

La afectación de temperatura se puede compensar con una galga adicional que se denomina “pasiva” la cual se coloca perpendicular a la galga que está siendo utilizada para medir deformaciones (galga activa). En algunos casos se puede utilizar un medio mecánico para aprovechar la convección forzada y disipar de mejor manera el calor que se genera en las galgas.

2.4.3.2. SENSIBILIDAD

El factor de sensibilidad se determina por muestreo, ya que una vez utilizada una galga es irrecuperable. Se da un valor probable de la sensibilidad con una tolerancia. Los métodos de ensayo y la especificación de características para las galgas metálicas están normalizados. Las galgas se pueden aplicar a la medida de cualquier variable que pueda convertirse, con el sensor apropiado, en una fuerza capaz de provocar deformaciones del orden 10 μm e incluso inferiores.

2.4.3.3. TIPOS APLICACIONES Y MATERIALES

Los materiales empleados para la fabricación de galgas extensiométricas son diversos conductores metálicos, como aleaciones y también semiconductores como el Silicio y Germanio. Las aleaciones metálicas tienen la ventaja de un bajo coeficiente de temperatura por la disminución de movimiento de electrones. Las galgas pueden tener o no soporte propio, esto en función de la temperatura que se va a medir. Para sensores táctiles en robots se emplean elastómeros conductores. En casos de grandes deformaciones de estructuras biológicas se usan galgas elásticas que consisten en un tubo elástico lleno de mercurio u otro líquido conductor. Diferentes configuraciones de galgas:

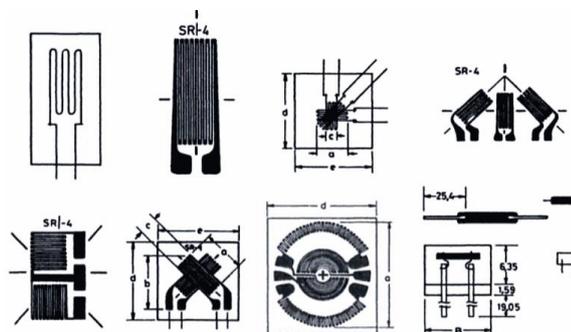


Figura 75. Diferentes tipos de Galgas

Fuente: (Pallás Areny, 2005)

Las galgas que poseen dos configuraciones de alambre y son perpendiculares entre sí se denominan Biaxiales. Las que tienen forma circular se utilizan en diafragmas.

Los materiales más comunes de las galgas son los metales y semiconductores, en el siguiente cuadro se muestran algunas de sus características:

Tabla No. 9

Comparación Materiales de Galga

| Parámetro | Metálicas | Semiconductoras |
|------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| Margen de Medida ($\mu\epsilon$) | 0.1 - 40000 | 0.001 - 3000 |
| Sensibilidad | 1.8 – 2.35 | 50 – 200 |
| Resistencia (Ω) | 120,350,600...5000 | 1000 - 5000 |
| Tolerancia en la resistencia (%) | 0.1 - 0.2 | 1 – 2 |
| Tamaño (mm) | 0.4 – 150 (común 3 - 6) | 1 – 5 |

Fuente: (Pallás Areny, 2005)

2.4.4. ROSETA DE DEFORMACIONES

Una galga extensiométrica tiene la capacidad de medir la deformación en un solo eje, a estas se las conoce como axiales. Existen galgas con dos configuraciones perpendiculares y toman el nombre de biaxiales.

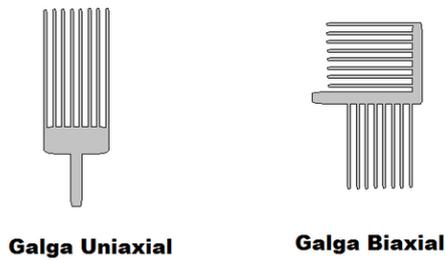


Figura 76. Galgas Axiales y Biaxiales

Fuente: (Directindustry, 2008)

Para cargas generadas en un cuerpo se necesita determinar las deformaciones unitarias normales en un punto de superficie libre. Un conjunto de tres galgas colocadas en una superficie con arreglos específicos se conoce como Roseta de Deformaciones.

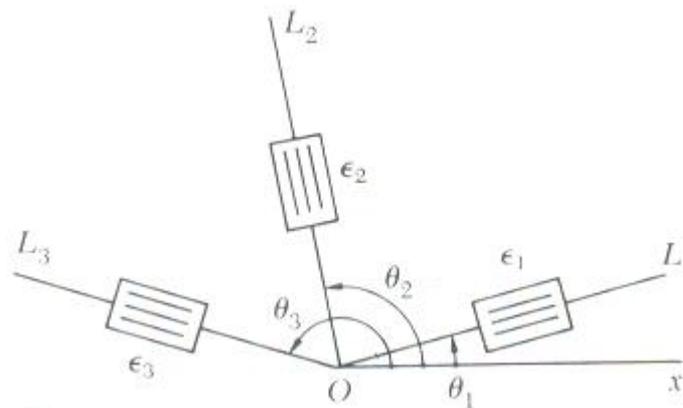


Figura 77. Arreglo de tres galgas (Roseta)

Fuente: (Directindustry, 2008)

Una vez que se determinan las lecturas de deformación de las tres galgas, estas pueden emplearse para determinar el estado de deformación unitaria en el punto. Las deformaciones captadas por la Roseta son las generadas en el Centro de Gravedad (CG) de la misma. Estas deformaciones unitarias solo se miden en el plano de las galgas, estas pueden emplearse para determinar el

estado de deformación unitaria en el CG. Sin embargo hay que aclarar que estas deformaciones unitarias solo se miden en el plano de las galgas y como el cuerpo no tiene esfuerzos en la superficie. Los medidores pueden estar sometido a esfuerzos planos pero no a deformación plana. Con respecto a esto la línea normal a la superficie libre es un eje principal de deformación, por lo que la deformación unitaria normal principal a lo largo de ese eje no mide la roseta de deformación. Es muy importante el desplazamiento fuera del plano causado por esta deformación unitaria principal, no afectará las medidas en el plano adquiridas por las galgas.

2.4.4.1. TIPOS DE ROSETAS

En el caso general los ejes de las tres galgas se arreglan en ángulos:

$$\theta_a, \theta_b \text{ y } \theta_c$$

Cada ángulo es correspondiente entre cada galga, el eje de referencia y el ángulo en la galga anteriormente colocada:

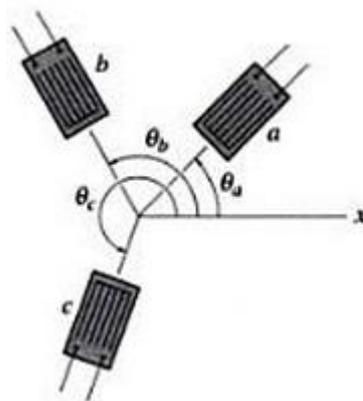


Figura 78. Arreglo Genérico de una Roseta

Fuente: (Mott, 2009)

Cada una de las galgas tiene su deformación unitaria axial y se denominan de la siguiente manera:

$$\varepsilon_a, \varepsilon_b \text{ y } \varepsilon_c$$

Con la deformación que entrega cada galga se pueden determinar las componentes:

$$\varepsilon_x, \varepsilon_y \text{ y } \gamma_{xy}$$

Correspondientes a los esfuerzos normales y tangencial respectivamente en el CG de la roseta de deformación. Para el caso general se aplica la ecuación de transformación de deformaciones unitarias de cada galga, de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\varepsilon_a &= \varepsilon_x \cos^2 \theta_a + \varepsilon_y \sin^2 \theta_a + \gamma_{xy} \sin \theta_a \cos \theta_a \\ \varepsilon_b &= \varepsilon_x \cos^2 \theta_b + \varepsilon_y \sin^2 \theta_b + \gamma_{xy} \sin \theta_b \cos \theta_b \\ \varepsilon_c &= \varepsilon_x \cos^2 \theta_c + \varepsilon_y \sin^2 \theta_c + \gamma_{xy} \sin \theta_c \cos \theta_c\end{aligned}$$

Figura 79. Ecuaciones de las deformaciones unitarias

Fuente: (Mott, 2009)

Resolviendo el sistema se obtienen las deformaciones unitarias.

2.4.4.1.1. ROSETA EN T

Consiste en dos galgas axiales colocadas a 90 grados, es decir se obtiene las deformaciones en el eje x y el eje y. El valor del ángulo θ_c y al no existir ε_c el sistema se reduce a dos ecuaciones y el valor que mide la galga es directamente las deformaciones en x e y.

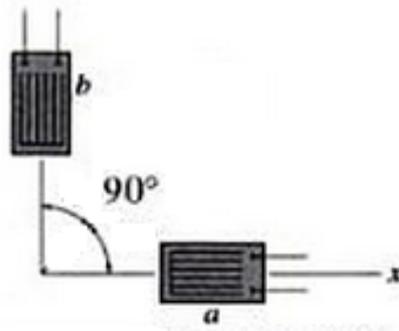


Figura 80. Roseta en forma de T

Fuente: (Mott, 2009)

Este arreglo es el único que utiliza solo dos galgas, los demás modelos tienen 3 galgas.

2.4.4.1.2. ROSETA DE DEFORMACIÓN A 45°

Este arreglo consiste en colocar una galga alineada al eje x y las dos restantes a 45° entre galgas. Los ángulos Θ de las galgas a, b y c tienen los siguientes valores: 0°, 45° y 90° respectivamente.

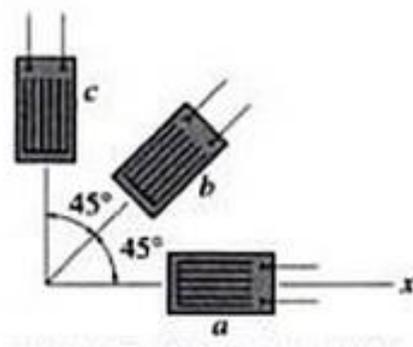


Figura 81. Roseta a 45°

Fuente: (Mott, 2009)

Determinando las deformaciones unitarias finales así:

Ecuación No. 45: Deformaciones Direccionales Roseta 45°

$$\varepsilon_x = \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_c \quad (45)$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)$$

2.4.4.1.3. ROSETA DE DEFORMACIÓN A 60°

Respecto de la anterior, se coloca de igual manera pero aumentando 15° a cada galga, los ángulos Θ de a, b y c dan los valores de 0°, 60° y 120° respectivamente:

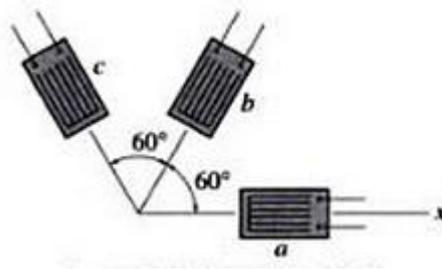


Figura 82. Roseta de Deformación a 60°

Fuente: (Mott, 2009)

Determinando las deformaciones unitarias finales así:

Ecuación No. 46: Deformaciones Direccionales Roseta 60°

$$\varepsilon_x = \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{3}(2\varepsilon_b + 2\varepsilon_c - \varepsilon_a) \quad (46)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2}{\sqrt{3}}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)$$

2.4.4.1.4. ROSETA DELTA

Es la misma roseta de 60°, se utiliza la ecuación (46) pero tiene un pequeño cambio de ubicación en sus galgas:

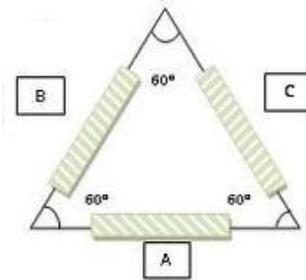


Figura 83. Roseta Delta

Fuente: (Directindustry, 2008)

Una vez determinadas ε_x , ε_y y γ_{xy} se utilizan las ecuaciones del Círculo de Mohr que se explica anteriormente para determinar los esfuerzos principales en el plano y el esfuerzo cortante máximo en el plano en el punto.

2.4.5. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL DE UNA GALGA EXTENSIOMÉTRICA

Los sensores resistivos tienen como salida una magnitud de resistencia, pero en instrumentación se prefiere trabajar con señales eléctricas de corriente o voltaje. Esto significa que se necesita un paso más para captar la onda que genera el uso de una galga para la medición de deformaciones.



Figura 84. Pasos para acondicionar una Galga

Existe un método que permite medir las resistencias desconocidas, que consiste en colocar tres resistencias de valor conocido y una cuarta a ser explorada. Se denomina Puente de Wheatstone, inicialmente fue descrito por Samuel Hunter Christie en el año de 1833 y finalmente aplicado en varios escenarios por Charles Wheatstone en 1843.

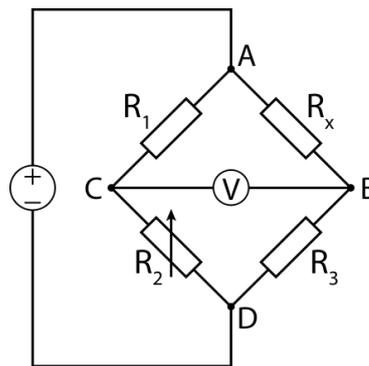


Figura 85. Puente de Wheatstone

Fuente: (Directindustry, 2008)

La configuración del puente es especial, debido a que se alimenta por sus extremos (A y D) y se mide un voltaje de salida en sus extremos laterales (C y B).

El puente consiste en una fuente de corriente continua que alimenta el circuito.

R_1 , R_2 y R_3 que son resistencias con valores conocidos (R_2 puede ser variable). R_x como el valor de resistencia a determinar. Existe una condición para que este puente esté balanceado y el voltaje de salida arroje un valor nulo. El brazo izquierdo del puente (R_1/R_2) debe ser proporcional al brazo derecho (R_x/R_3) de la siguiente manera:

Ecuación No. 47: Equilibrio del Puente de Wheatstone

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_3} \quad (47)$$

Cuando se cumpla esta condición el Voltaje medido entre los puntos C y B del puente tendrá un valor de cero. Para determinar el valor de la resistencia desconocida se despeja R_x de la fórmula anterior:

Ecuación No. 48: Resistencia Incógnita del Puente de Wheatstone

$$R_x = R_3 \frac{R_1}{R_2} \quad (48)$$

Para el caso de una galga no se necesita determinar su valor de resistencia, pero si interesa el valor del Voltaje de Salida del puente. Se calcula con la siguiente fórmula:

Ecuación No. 49: Voltaje de Salida del Puente

$$\Delta V = V_A \left[\frac{R_2}{R_2 + R_1} - \frac{R_3}{R_3 + R_x} \right] \quad (49)$$

2.4.5.1. CONFIGURACIONES DEL PUENTE DE WHEATSTONE

Para realizar una compensación de temperatura y tener valores similares de resistencias en los brazos del puente se puede utilizar más de una galga para armar el circuito del puente de Wheatstone. Se puede tener configuraciones conocidas como:

2.4.5.1.1. CUARTO DE PUENTE

Esta configuración se caracteriza por tener una baja sensibilidad, de igual forma aparece la desventaja de solo tener una galga y no tener una compensación de temperatura con una galga pasiva. Un aumento de temperatura en la galga causa una variación de resistencia y provoca que el puente no esté en equilibrio. La longitud de los cables de la galga puede aumentar la resistencia, pero esto sucede con las galgas de dos hilos. Este problema no ocurre con las galgas de tres hilos.

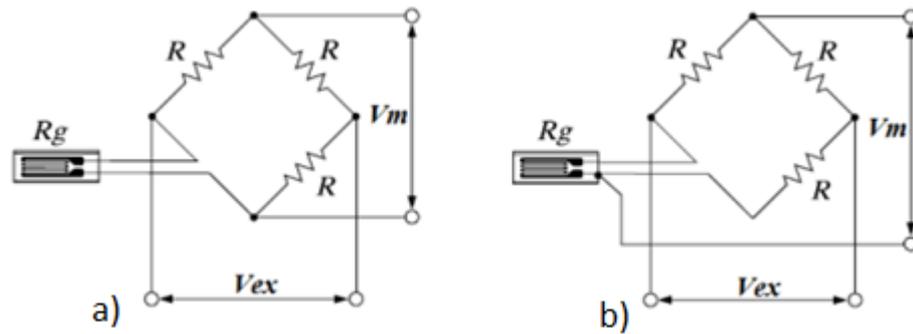


Figura 86. Configuración Cuarto de Puente a) Dos Hilos b) Tres Hilos

Fuente: (Idrovo-Quintanilla, 2010)

2.4.5.1.2. MEDIO PUENTE

La configuración de medio puente sirve para mejorar la sensibilidad de la medición y también compensar los efectos de la temperatura que pueda ocurrir en el momento de la medición. Se puede usar la siguiente configuración para mejorar la sensibilidad:

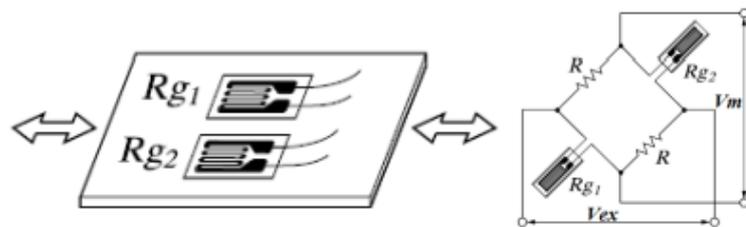


Figura 87. Medio Puente con dos galgas Activas

Fuente: (Idrovo-Quintanilla, 2010)

Para realizar la compensación de temperatura de medio puente se utiliza una galga pasiva:

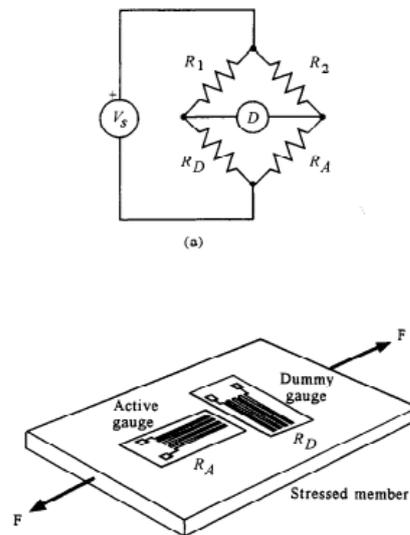


Figura 88. Medio Puente con galga activa (active) y pasiva (dummy)

Fuente: (Johnson, 2000)

2.4.5.1.3. PUENTE COMPLETO

Utilizar cuatro galgas mejora la sensibilidad del puente frente a las anteriores configuraciones, así mismo mejorando la compensación por temperatura. Es muy común utilizar este arreglo para las celdas de carga.

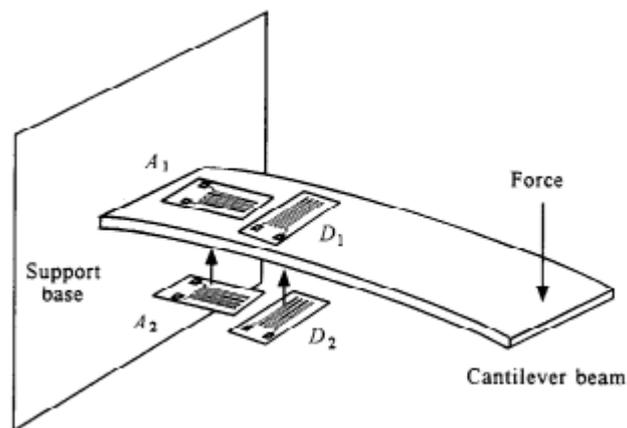


Figura 89. Viga en Cantilever con cuatro galgas extensiométricas

Fuente: (Johnson, 2000)

El puente queda armado de acuerdo con las explicaciones anteriores:

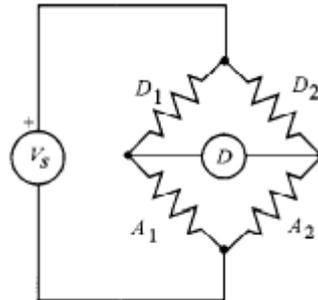


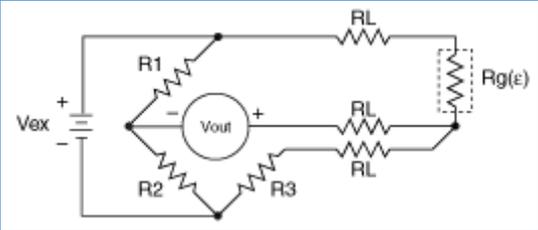
Figura 90. Puente Completo dos galgas activas (A1 A2) y dos pasivas (D1 D2)

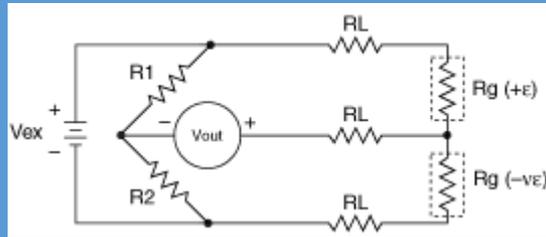
Fuente: (Johnson, 2000)

A partir de las configuraciones mencionadas, se derivan algunas variantes para formar el puente de Wheatstone con galgas extensiométricas, en la siguiente tabla se indican los arreglos más utilizados y sus respectivas fórmulas de medición.

Tabla 10

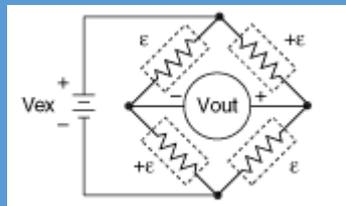
Configuraciones Puente de Wheatstone

| Diagrama del Puente | Deformación (ϵ) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
|  <p data-bbox="456 1854 740 1890">Cuarto de Puente I</p> | $\epsilon = \frac{-4V_r}{GF(1 + 2V_r)} \left(1 + \frac{R_l}{R_g} \right)$ |



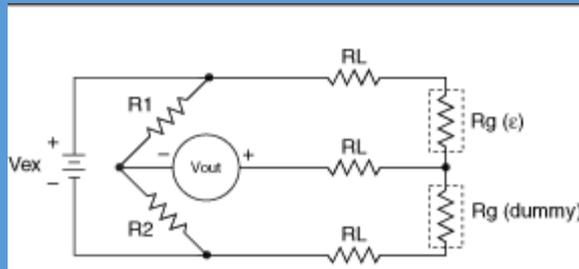
Medio Puente I

$$\varepsilon = \frac{-4V_r}{GF[(1+u) - 2V_r(u-1)]} \left(1 + \frac{R_l}{R_g}\right)$$



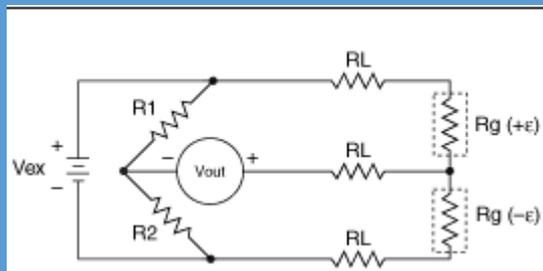
Puente Completo I

$$\varepsilon = \frac{-V_r}{GF}$$



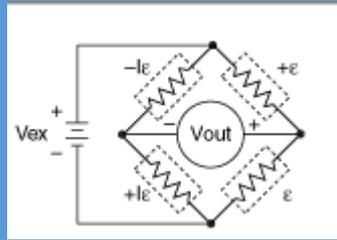
Cuarto de Puente II

$$\varepsilon = \frac{-4V_r}{GF(1 + 2V_r)} \left(1 + \frac{R_l}{R_g}\right)$$



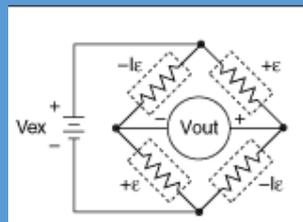
Medio Puente II

$$\varepsilon = \frac{-2V_r}{GF} \left(1 + \frac{R_l}{R_g}\right)$$



Puente Completo II

$$\varepsilon = \frac{-2V_r}{GF(u + 1)}$$



Puente Completo III

$$\varepsilon = \frac{-2V_r}{GF[(1 + u) - V_r(u - 1)]}$$

Fuente: (National-Instruments, 2013)

2.4.6. AMPLIFICADORES DE SEÑAL

El resultado de intercambiar la variación de resistencia de una galga en el puente de Wheatstone alimentado por una tensión constante en valores de Voltios, puede ser un voltaje de salida de ese mismo puente en el rango de los milivoltios. Para que se pueda captar de excelente manera la señal y tener un transductor que lleve señales de 0-20 mA, 0-5 o 0-10 V es necesario amplificar la señal.



Figura 91. Amplificador de Señal

2.4.7. ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos o adquisición de señales, consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otros aparatos electrónicos (sistema digital). Consiste, en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora. Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ).

La adquisición de datos inicia cuando el sensor transductor entrega una señal de voltaje o corriente. El objetivo es cambiar la señal analógica a digital.

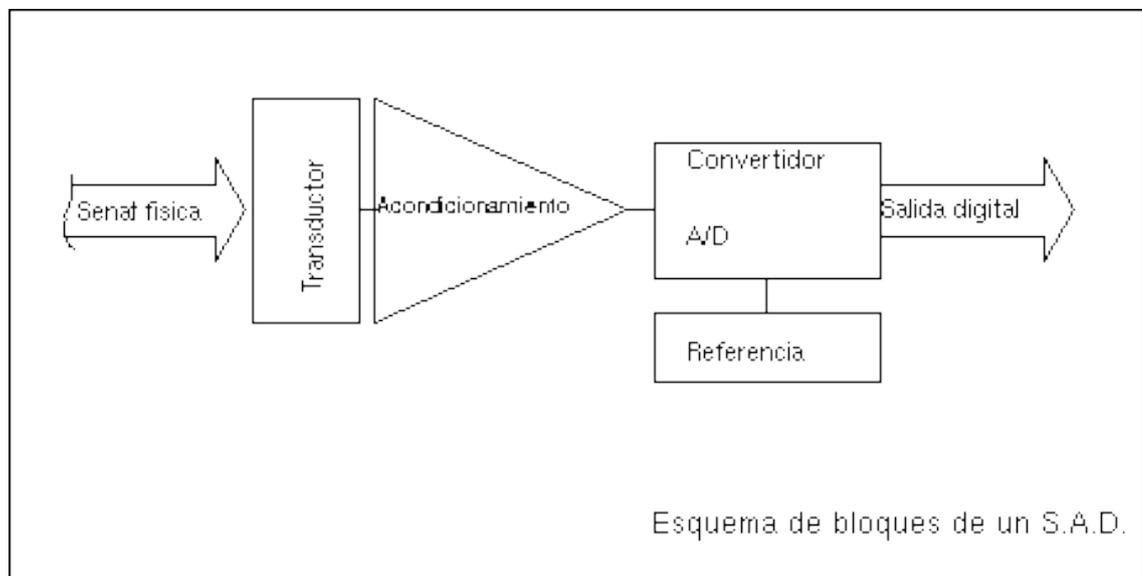


Figura 92. Esquema de un sistema Analógico-Digital

Fuente: (Unicrom, 2012)

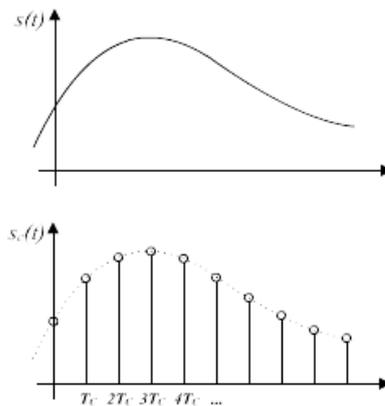
El proceso de adquisición inicia de la siguiente manera:

2.4.7.1. FRECUENCIA DE MUESTRO

Es el número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua para producir una señal discreta, durante el proceso necesario para convertirla de analógica en digital. La cantidad de datos o muestras que se pueden captar en un segundo, está dado por la siguiente fórmula:

Ecuación No. 50: Frecuencia de Muestreo

$$f_m = \frac{\# \text{ muestras}}{t} \left[\frac{S}{s} \right] \quad (50)$$



Señal original y muestreo de la misma.

Figura 93. Muestreo de una señal

Fuente: (Unicrom, 2012)

El muestreo toma los datos de una señal a manera de serie, pues resulta muy difícil tomar todos los datos generados. Demanda muchos recursos y procesar la señal toma un mayor lapso de tiempo. La frecuencia de muestreo depende del tipo de señal que emita el proceso. El número de muestras, según el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, para poder replicar la señal con exactitud (es decir, siendo matemáticamente reversible en su

totalidad) la forma de una onda es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear.

$$f_m > 2f$$

2.4.7.2. DIGITALIZACIÓN DE LA SEÑAL

Consiste en convertir señales analógicas en digitales, con el propósito de facilitar el procesamiento y obtención de la misma. En la siguiente figura se ilustra la conversión de tipo de señal.

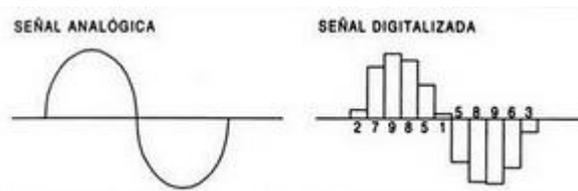


Figura 94. Conversión Analógico-Digital

Fuente: (Unicrom, 2012)

Una señal digital se encuentra descrita por números en base binaria, los valores de señal se convierten en combinaciones de números uno y cero.

La suavidad con la que se digitaliza una señal depende de la resolución de una tarjeta y está dado por el número de bits de la misma. A mayor número de bits, mayor grado de elaboración de la curva.

Para calcular la cantidad de elementos binarios digitales se aplica la siguiente fórmula:

Ecuación No. 51: Número de elementos binarios

$$\#elementos\ bin = 2^n \quad (51)$$

La amplitud de la señal de la onda digitalizada se divide en segmentos iguales a razón de 2^n-1 . El primer elemento es el número 0 y último el valor de 2^n . Cada nivel tiene el valor de la amplitud de la onda dividido para 2^n-1

Por ejemplo para una tarjeta con un número de bits n igual a 4 se tiene:

$$2^4 = 16 \text{ elementos}$$

El elemento número 1 es el 0000 y el número 16 es el 1111.

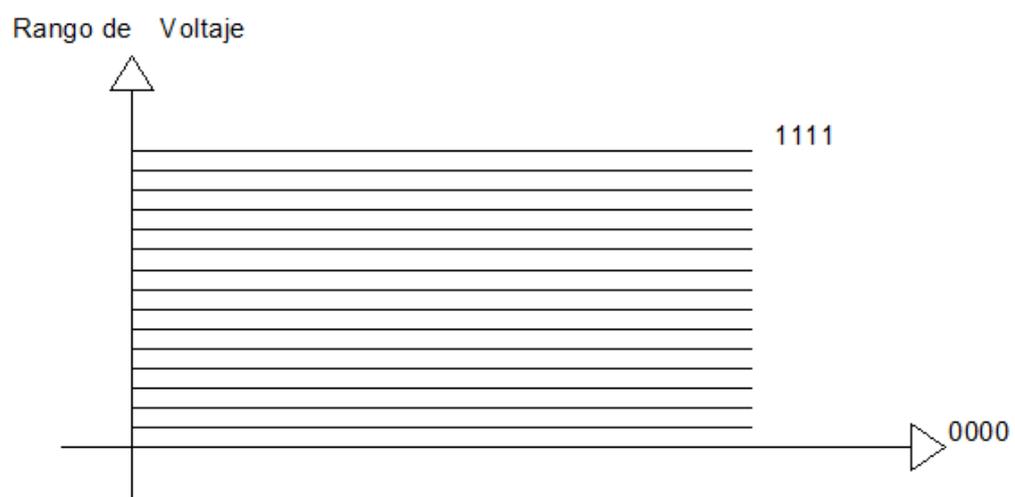


Figura 95. Digitalización con resolución de 4 bits

Los valores que no coinciden con los de los elementos no se presentan en la curva digitalizada. Esto reafirma lo que se menciona anteriormente, se necesita una mayor cantidad de bits de resolución de la tarjeta para tener una curva con menos valores cortados.

Un sistema digital nunca entrega el valor verdadero, pero mejora la manera de captar los datos. Los factores que influyen en una conversión Analógico-Digital son:

- Frecuencia de Muestreo
- Rango de entrada de Datos
- Resolución de la Tarjeta DAQ
- Amplificación de la Señal.

Cuando los datos son obtenidos, se puede guardar, visualizar en pantallas o también usados para controlar procesos y equipos.

CAPÍTULO 3: EJECUCIÓN DEL MODELADO 3D Y ANALISIS DEL MARCO

3.1. ESPECIFICACIONES DE LA BICICLETA

La bicicleta elegida se puede encontrar en el mercado local, el vehículo tiene los siguientes datos informativos:

- **Marca:** PRIMAXI
- **Modelo:** Advanced
- **Modalidad:** Free Style y Dirt
- **Masa:** 12,78 kg



Figura 96 Bicicleta BMX Advanced

Fuente: (Primaxi, 2014)

Tabla 11

Partes Bicicleta Primaxi Advanced

| Elemento | Material/Tipo | Dimensiones |
|----------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Cuadro | 100% AISI 4130 Chromoly | Top Tube 20.5 pulg |
| Trinche | AISI 4130 Chromoly | Dropouts 5 mm |
| Hedset | - | Sellamientos Internos |
| Bottom Bracket | Cr-Mo con rodamientos | |
| Crank | Tubulares Light 3 PC Cr-Mo | 175 mm |
| Catalina | Aluminio 6061 | |
| Cadena | - | KMC 1/2" x 1/8" CP |
| Frenos | Tipo U-Brake (solo posterior) | |
| Volante | AISI 1020 HI-TEN | h: 8.25" w: 29" |
| Stem | Aluminio 6061 Frontload | 51 mm |
| Asiento/Poste | Pivotal Primaxi Pro Desing | |
| Pedales | Plástico | |
| Aro Delantero | Alientation PBR 36H | 20 pulg |
| Aro Trasero | Alientation Black Sheep 36H | 20 pulg |
| Piñón | Kenda Kontakt (delantera y posterior) | 20 x 2.125 pulg |
| Llantas | Alloy 9T PRIMAXI Pro Design | |

Fuente: (Primaxi, 2014)

El marco o cuadro es la parte fundamental del estudio, el acero del cual fue construido es en su totalidad AISI 4130. Es un acero aleado que contiene

Cromo y Molibdeno como agentes de endurecimiento. Con un contenido bajo de Carbono este material es fácilmente soldable. La composición química se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 12

Composición Química del Acero AISI 4130

| Elemento | Contenido (%) |
|----------------|---------------|
| Hierro (Fe) | 97.03 - 98.22 |
| Cromo (Cr) | 0.8 – 1.10 |
| Manganeso (Mn) | 0.40 – 0.60 |
| Carbono (C) | 0.288 – 0.330 |
| Silicio (Si) | 0.15 – 0.30 |
| Molibdeno (Mo) | 0.15 – 0.25 |
| Azufre (S) | 0.040 |
| Fósforo (P) | 0.035 |

Fuente: (AZoM, 2000-2015)

Tabla 13

Propiedades Físicas del Acero AISI 4130

| Propiedades | Sistema SI |
|-----------------|------------------------|
| Densidad | 7.85 g/cm ³ |
| Punto de Fusión | 1432°C |

Fuente: (AZoM, 2000-2015)

Tabla 14

Propiedades Mecánicas del Acero AISI 4130

| Propiedades | Sistema SI |
|-------------------------------------------|---------------|
| Esfuerzo Último a la Tracción | 560 MPa |
| Limite Elástico | 460 MPa |
| Módulo de Elasticidad | 190 – 210 GPa |
| Módulo de Compresibilidad | 140 GPa |
| Módulo de Rigidez | 80 GPa |
| Relación de Poisson | 0.27 – 0.30 |
| Elongación a la ruptura (en 50 mm) | 21.50% |
| Reducción de Área | 59.6% |
| Dureza Brinell | 217 |
| Dureza Rockwell B | 95 |

Fuente: (AZoM, 2000-2015)

Para la fabricación y Tratamientos térmicos se tienen las siguientes propiedades:

Maquinabilidad: Este acero puede ser fácilmente maquinable con los métodos convencionales, no obstante la maquinabilidad se complica mientras aumenta la dureza del acero.

Formado: Se puede realizar este proceso cuando se aplique un tratamiento térmico de recocido.

Soldabilidad: Absolutamente aplicable con todos los procesos comerciales de soldadura.

Tratamiento Térmico: El AISI 4130 puede ser calentado hasta los 871°C y templado en Aceite, usualmente se eleva la temperatura del material en el rango de 899 hasta 927 °C. El recocido se realiza a una temperatura de 843°C, el cual se refrigera con aire a una temperatura de 482°C. Para el revenido se eleva su temperatura entre 399 – 566 °C dependiendo del nivel de resistencia deseado.

Trabajo en Caliente: Para dar forma a este acero se calienta en un intervalo desde 816 a 1093 °C. La temperatura para forjar este acero aplica desde los 954 hasta 1204 °C.

Endurecimiento: Se realiza mediante trabajo en frío o aplicando Tratamientos Térmicos.

Las aplicaciones más famosas de este Acero son para partes de motor en aeroplanos y tubería soldada. Para el caso de una bicicleta BMX se utiliza en los eslabones que componen el marco debido a su gran resistencia frente a aceros al carbono.

3.2. OBTENCIÓN DE MEDIDAS Y CARACTERÍSTICAS DEL MARCO

Por especificaciones de la bicicleta el único valor conocido es del tubo superior conocido en inglés como “Top Tube”, este eslabón alcanza una longitud de 20.5 pulgadas el cual es equivalente a 521 milímetros. Los demás valores como longitud, espesor y diámetro de los tubos que conforman el marco de la bicicleta deben ser medidos experimentalmente.

Inicialmente la bicicleta es desarmada con el objetivo de tener una mayor comodidad en el marco al momento de realizar las mediciones. El marco es el elemento de interés, por lo tanto el enfoque cae sobre este eslabón



Figura 97. Marco Bicicleta BMX Advanced

En la fotografía se puede observar que el eje y los rodamientos se encuentran montados en el bastidor, esto se debe a la complejidad de insertar y desmantelar un rodamiento. De igual manera el eje que atraviesa los rodamientos genera dificultad para la respectiva sustracción.

Para facilitar las mediciones es indispensable dividir el marco por zonas, las mismas que tienen la característica de poseer similar espesor. Primero se procede a tomar las medidas de los espesores de cada tubo del marco, utilizando un equipo de medición de espesores de ultrasonido. Finalmente se hace uso de un flexómetro y un calibrador para medir las longitudes y diámetros respectivamente.

3.2.1. EQUIPOS DE MEDICIÓN

Para medir los elementos son necesarios instrumentos de medición, se presenta un cuadro que contenga información específica de los aparatos de medición:

Tabla 15

Instrumentos de Medición

| Instrumento | Marca | Modelo | Alcance | Apreciación |
|--------------------|-------------|--------|---------|-------------|
| Ultrasonido | Cole Parmer | UTG-1 | 5 mm | 0.01 mm |
| Calibrador | Truper | MCA | 150 mm | 0.02 mm |
| Flexómetro | RS | 502 | 5000 mm | 1 mm |

3.2.2. MEDICIÓN DE ESPESORES Y DIÁMETROS DE LOS TUBOS

Las zonas del marco de la bicicleta quedan delimitadas de la siguiente manera:



Figura 98. Zonas de Medición de Espesores

Fuente: (Primaxi, 2014)

Los tubos de la zona e están distribuidos de la siguiente manera:



Figura 99. Zona de Tubos e

Los tubos de esta zona son exactamente los mismos, motivo por el cual todo este conjunto de tubos está declarado como uno solo. El equipo de medición se encuentra operable y adicionalmente se cuenta con manual de uso.

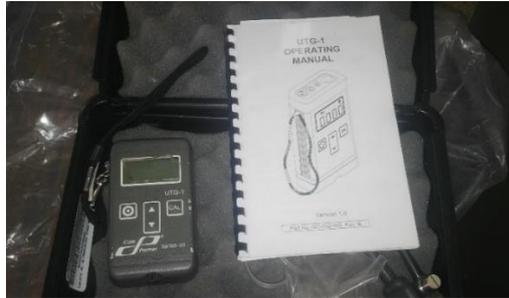


Figura 100. Equipo de Medición de Espesores Ultrasonido

Cada tubo es medido tres veces y corroboradas sus medidas cada cierta longitud para determinar sus valores medios.



Figura 101. Medición de espesores del tubo A

El bastidor donde se están alojados los rodamientos tiene que ser medido en su parte central, esto a causa de los extremos donde se asientan los rodamientos y pueden presentar medidas erróneas.



Figura 102. Medición de espesores en los alojamientos

La medición de los diámetros externos de los tubos es menos complicada que determinar los espesores. Cada tubo tiene que ser dimensionado un mínimo de tres veces para obtener datos suficientes de su diámetro.



Figura 103. Medición Diámetro Top Tube Tubo b

Con las mediciones de los espesores y diámetros de cada tubo, se presenta una tabla de los datos obtenidos:

Tabla 16

Espesores Tubos

| Tubo/Zona | t1 (mm) | t2 (mm) | t3 (mm) | tprom (mm) |
|----------------------------|---------|---------|---------|------------|
| A | 2.64 | 2.8 | 2.6 | 2.68 |
| B | 1.97 | 1.83 | 1.86 | 1.88 |
| C | 1.62 | 1.62 | 1.60 | 1.61 |
| D | 1.63 | 1.62 | 1.6 | 1.61 |
| E | 2.12 | 2.16 | 2.1 | 2.12 |
| BastidorRodamientos | 3.83 | 3.85 | 3.8 | 3.83 |

Obtenidos los espesores, Se procede a dimensionar el valor del diámetro externo de cada tubo.

Tabla 17

Diámetros Externos Tubos

| Tubo/Zona | OD1 (mm) | OD2 (mm) | OD3 (mm) | OD (mm) |
|----------------------|----------|----------|----------|---------|
| a | 39.3 | 39 | 39.5 | 39.2 |
| b | 35.2 | 35.1 | 35.3 | 35.2 |
| C | 38.5 | 38.6 | 38.2 | 38.4 |
| d | 29 | 29.5 | 29.2 | 29.23 |
| e | 19.2 | 19.6 | 19 | 19.2 |
| b.rodamientos | 46 | 45.9 | 46.3 | 46 |

El elemento de la zona A (tubo) tiene una forma particular, aquí se alojan dos partes fundamentales como el volante y el trinche de la bicicleta. Para determinar las medidas se requiere un trabajo más exhaustivo por su geometría, el resultado de las mediciones muestra lo siguiente:

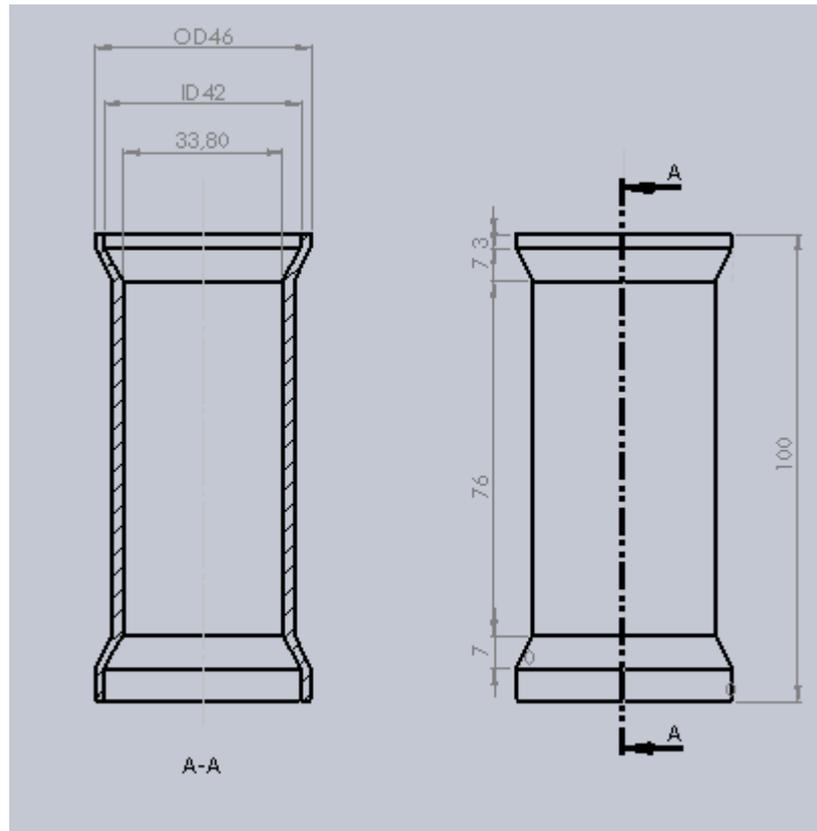


Figura 104. Vista Detallada tubo A

El tubo B (Top Tube) está conectado a los eslabones A y D, todos tienen diferente valor. La conexión desde A hacia B no registra problema por mayor valor del diámetro A respecto a B. El problema ocurre en la sujeción hacia el tubo D con un valor promedio de 29.2 mm frente al valor promedio de B de 35.2 mm. El elemento B tiene la particularidad de cambiar de sección cierta distancia. La longitud del tubo B es de 521 mm (20.5 in.), a continuación se muestra la variación del diámetro en los tramos.

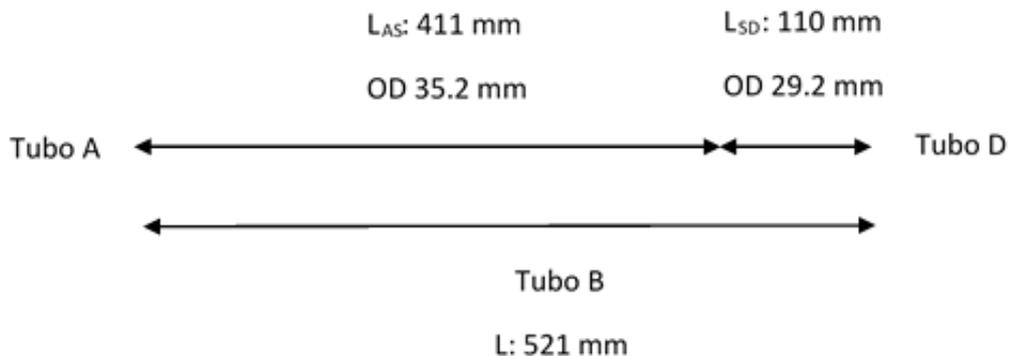


Figura 105. Cambio de Sección Tubo B

3.2.3. MEDICIÓN DE LA LONGITUD DE LOS TUBOS

La última parte para tener todas las medidas de los elementos del marco, es la longitud de cada tubo. Es importante determinar la distancia que hay entre los ejes axiales de los tubos para aproximarse de mejor manera al diseño del marco. Con la ayuda de un flexómetro se procede a dimensionar estos valores, la vista frontal de la bicicleta se refleja de la siguiente manera:

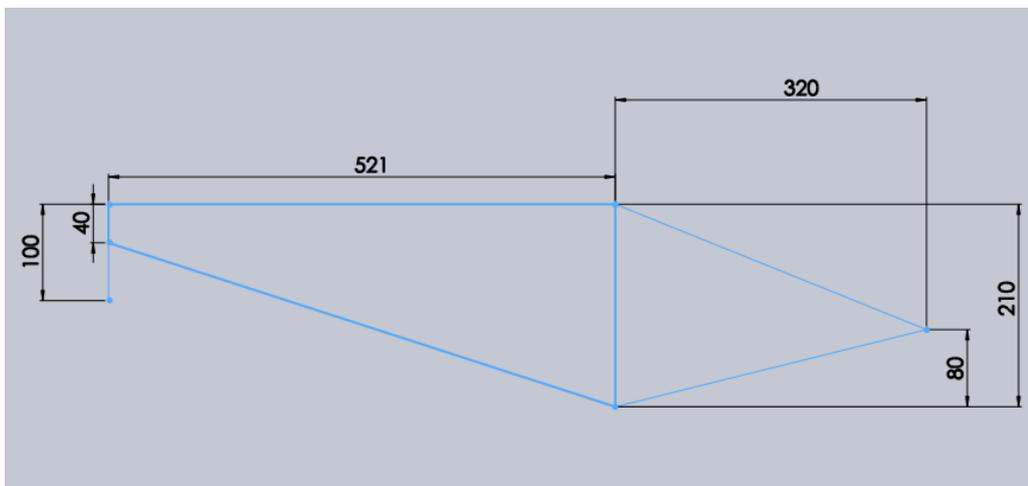


Figura 106. Vista Frontal Longitudes

Para no exceder el número de cotas, no se toma cuenta el valor de la cota del tubo C. Su valor alcanza los 550 milímetros. La zona de tubos E contiene

una mayor cantidad de eslabones, es necesario determinar sus dimensiones mediante tres vistas:

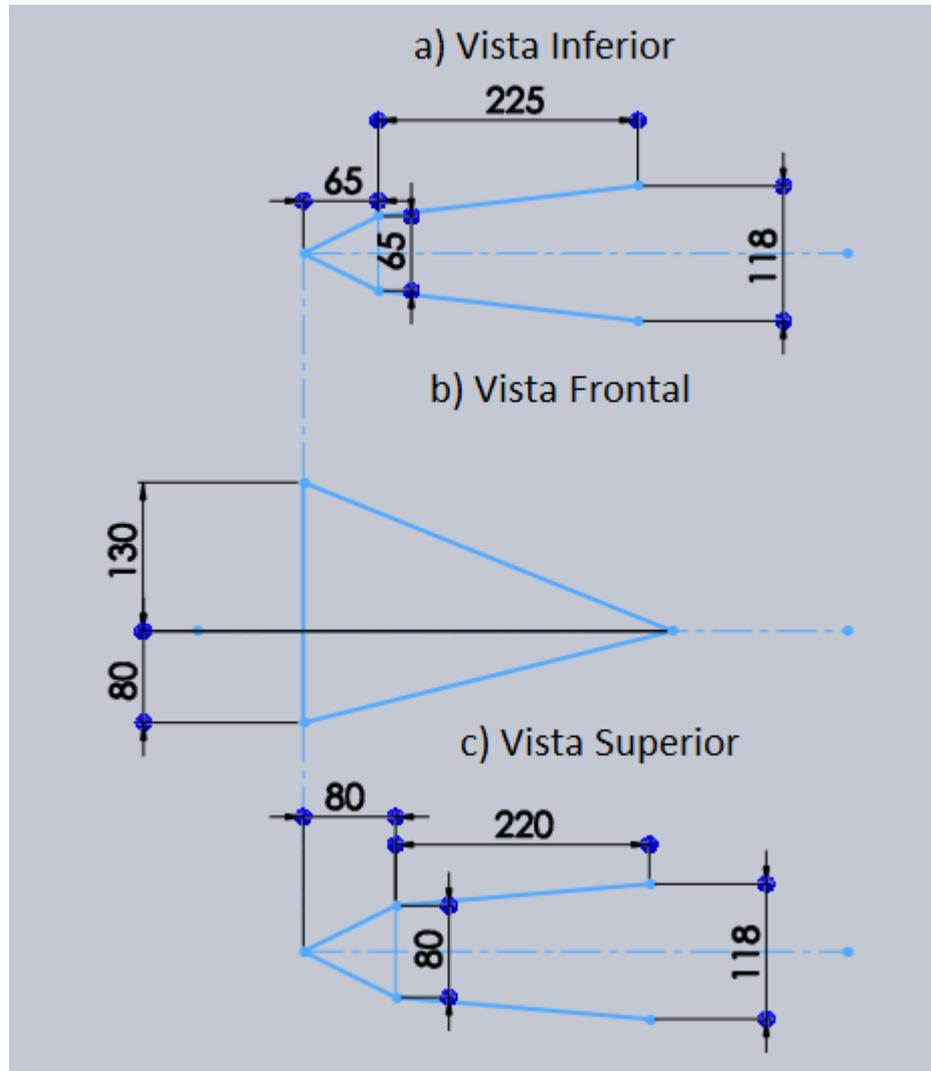


Figura 107. Dimensionamiento Parte Trasera

3.2.4. ALOJAMIENTOS DEL EJE TRASERO DE LA BICICLETA

Esta parte ubicada en la zona de tubos E, que tiene como función sostener al eje trasero. El mismo que transmite el par de potencia de los pedales hacia la rueda posterior.



Figura 108. Alojamiento

El croquis para el modelado se conforma de la siguiente manera:

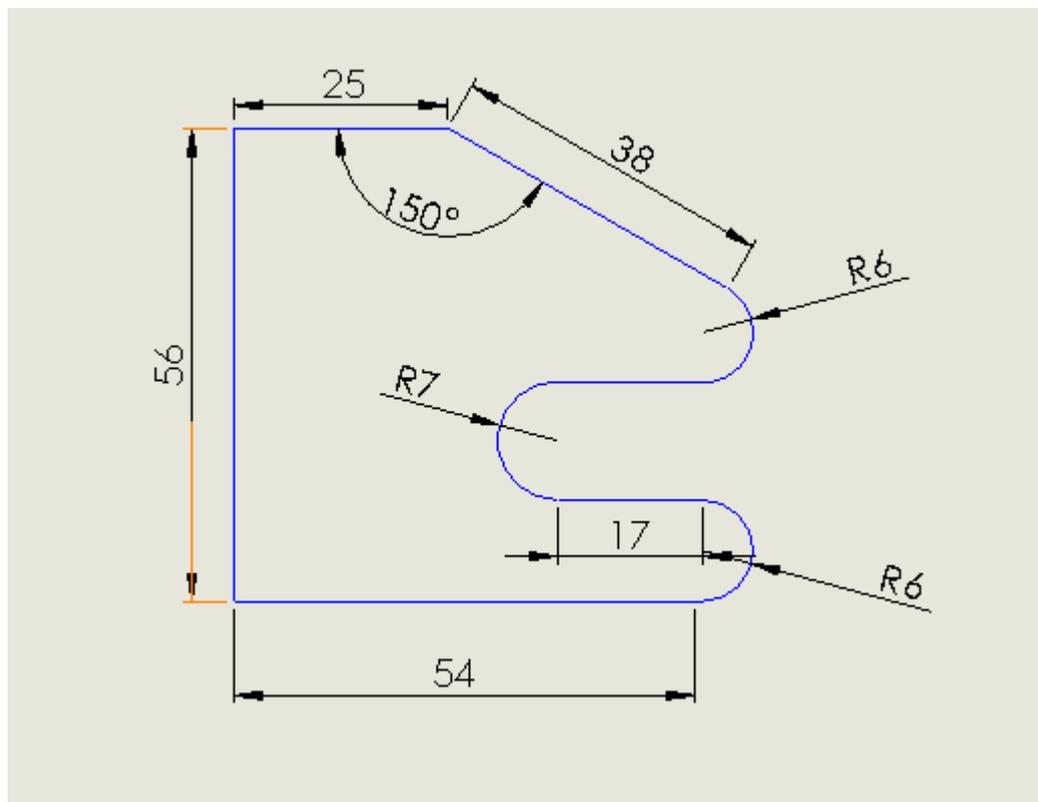


Figura 109. Croquis Alojamiento Eje Trasero

El espesor de este elemento tiene un valor de 5 mm.

3.2.5. DIMENSIONAMIENTO DEL TRINCHE

El marco de la bicicleta posee dos apoyos, el primero se aloja la llanta delantera (trinche) y el segundo donde se asienta la llanta trasera. Es importante el modelado de este elemento para tener un grado más alto de realismo con respecto de las restricciones o partes ancladas.



Figura 110. Trinche de una Bicicleta BMX

Fuente: (IBMXFF, 2011)

Una ventaja de este elemento de nuestra bicicleta es que el material del cual fue fabricado es el mismo que el del marco. Así en la simulación solo es necesario cargar los datos de resistencia del ASIS 4130.

3.3. CONSIDERACIONES PARA EL MODELADO

Determinadas todas las medias y geometrías necesarias para el modelado del marco de la bicicleta y su trinche, es necesario tener este segundo elemento porque entrega un realismo de conjunto. La zona de alojamiento de la llanta trasera se encuentra en la parte posterior del marco, el mismo que se

obtiene al momento de modelar el marco. El punto de apoyo donde se ubica el neumático delantero no se encuentra en el marco, se localiza en la parte baja del trinche. Por este motivo es importante unir este eslabón al bastidor (marco de la bicicleta). De esa manera el conjunto Marco-Trinche se conjugan perfectamente para obtener los mismos apoyos en la realidad y dentro del modelado.

En el proceso de captación de medidas de los tubos se ven reflejados los siguientes valores promedios:

Tabla 18

Datos promedio de espesores y diámetros externos Tubos

| Tubo/Zona | tprom (mm) | ODpr (mm) |
|---------------------------------|------------|-----------|
| A | 2.68 | 39.2 |
| B | 1.88 | 35.2 |
| C | 1.61 | 38.4 |
| D | 1.61 | 29.23 |
| E | 2.12 | 19.2 |
| BASTIDOR RODAMIENTOS | 3.83 | 46 |

Los datos presentados contienen cifras muy pequeñas hasta las centésimas de milímetros. Por motivos computacionales del programa CAD y

CAE no es muy recomendable utilizar valores muy minúsculos. Esto puede provocar que el equipo tarde un mayor tiempo en generar los vectores de construcción, de igual forma se utiliza una gran cantidad de recursos computacionales al momento de generar el mallado con elementos para la simulación de Fuerzas. Finalmente éstas son las cifras definitivas para el modelado de estos elementos:

Tabla 19

Espesores y Diámetros de Modelado CAD

| Tubo/Zona | t (mm) | OD (mm) |
|-------------------------|--------|---------|
| A | 2.6 | 39 |
| B | 1.6 | 35 |
| C | 1.6 | 38 |
| D | 1.6 | 29 |
| E | 2 | 19.2 |
| Bastidor Rodamientos | 3.8 | 46 |

Otro motivo para la reducción de medidas es un criterio optimista de modelado y diseño del marco. Esto también válido para obtener esfuerzos un tanto mayores a los esperados en la realidad y poder llevar el diseño y material a zonas más críticas. Las longitudes de los tubos no tienen cambio alguno de valor, ni los croquis de las demás piezas. Tomando como referencia en el

marco la zona donde se asienta el volante, las coordenadas donde se encuentra cada tubo son las siguientes:

Tabla 20

Coordenadas de los Tubos

| Punto | X | Y | Z |
|-------|-----|------|-----|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | -35 | |
| 3 | 521 | 0 | 0 |
| 4 | 521 | -210 | 0 |
| 5 | 601 | -32 | 40 |
| 6 | 601 | -32 | -40 |
| 7 | 586 | -194 | 35 |
| 8 | 586 | -194 | -35 |
| 9 | 846 | -130 | 52 |
| 10 | 846 | -130 | -52 |

Fuente: El Autor

Tabla 21

Puntos Tubos

| Tubo/Zona | Puntos |
|-----------|--------|
| A | 1-2 |
| B | 2-3 |
| C | 2-4 |
| D | 3-4 |
| E | 3-10 |

Vistos simplemente unidos por líneas, se puede visualizar de esta manera:

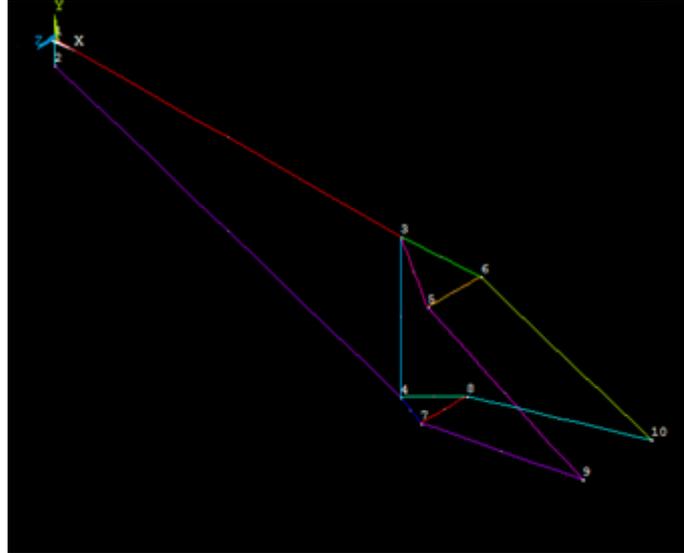


Figura 111. Unión de Puntos

El asiento de la bicicleta no tiene influencia alguna al momento en el que el ciclista se encuentra realizando saltos y compitiendo en ningún instante decide sentarse, peor aún caer con su cadera en el asiento. Con todos estos datos y consideraciones se puede realizar el modelado de las partes en un programa CAD.

3.4. MODELADO DEL MARCO Y TRINCHE

Los eslabones del marco al ser elementos soldados entre sí proponen un modelamiento del marco en una sola pieza. No se puede construir uno a uno los tubos y luego unirlos mediante un ensamble de piezas. La única pieza que puede ser realizada particularmente del marco es el trinche. Estos dos si pueden fusionarse mediante un ensamblaje, debido a que la sujeción existente es de tipo telescópica entre sus tubos siendo la misma concéntrica.

Utilizando las medidas y consideraciones para el modelado, el marco queda formado de la siguiente manera:

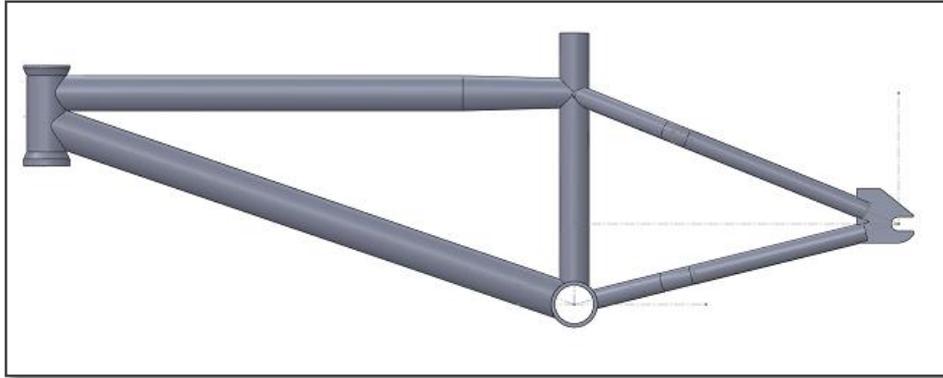


Figura 112. Vista Frontal del Marco



Figura 113. Isometría del Marco

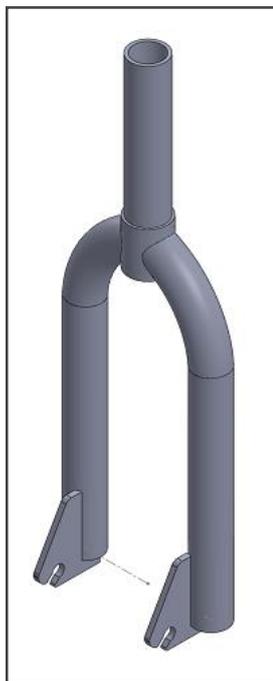


Figura 114. Isometría Trinche

El ensamblaje de estas dos partes de la bicicleta se realiza considerando la unión como tubos concéntricos que tiene que existir y el punto en donde se asienta el trinche en el marco.



Figura 115. Isometría Ensamble Marco-Trinche

3.5. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS EN CAMPO

La importancia de determinar que fuerzas actúan en todo el conjunto de la bicicleta y más aún en el marco obliga a la realización de recorridos. Tener la certeza de que fuerzas realmente se generan durante el trayecto es muy importante, facilita tener un estudio más real y no hacer uso de fuerzas teóricas.

El lugar elegido para estas pruebas es el Parque la Carolina en la Ciudad de Quito, ubicado entre las avenidas Los Shyris, Naciones Unidas, Río Amazonas y Eloy Alfaro. Este espacio público cuenta con un pequeño complejo para el uso de bicicletas y en especial las bicicletas de BMX. Existe un sitio donde se combinan las modalidades de Jump, Freestyle y Half Pipe. Cercano a ese escenario se asienta una pista para la modalidad de Race.



Figura 116. Imagen Satelital de las Pistas en el parque La Carolina

Fuente: (Google, 2014)

El interés de este trabajo es analizar los esfuerzos en un trayecto continuo y que presente obstáculos de salto. Por lo que las pruebas son realizadas en la pista de Race.

3.5.1. CARACTERÍSTICAS DE LA PISTA

La pista tiene una longitud de 350 metros, a base de tierra con una combinación de saltos entre pequeñas y grandes rampas que sus alturas y distancia entre ellas oscilan entre los 1.5-2 metros y 2-4 metros respectivamente. Posee tres curvas que cambian el sentido de la pista en 180 grados y adicionalmente ayudan al ciclista a adquirir impulso para los saltos siguientes.



Figura 117. Vista desde la Largada

Como toda pista de Race su largada se encuentra en el punto más alto, para que el conductor logre un impulso inicial que permita sacar el mejor provecho a los obstáculos.



Figura 118. Vista panorámica de la Pista

Como se puede observar hay un considerable número de saltos que favorecen el estudio, con el objetivo de evaluar las caídas. Finalmente el recorrido recae en una recta con un número determinado de pequeñas dunas para agregar emoción hasta llegar a la meta.



Figura 119. Etapa final de la Pista

Una constante de este tipo de pista es la ubicación del fin del trayecto, la llegada siempre se encuentra en el punto más bajo de la pista.



Figura 120. Fin del Trazado Race

3.5.2. CICLISTA Y EQUIPO DE PROTECCIÓN

En primera instancia necesitamos de una persona capaz de aprovechar las bondades que ofrece la pista, con un alto nivel y necesarios conocimientos del BMX.

El ciclista elegido para estas pruebas cuenta con experiencia en pistas de Race y saltos. A seguir se presentan datos sobre el conductor de nuestra bicicleta:

Tabla 22

Datos Informativos del Ciclista BMX

| Nombre | Luis Mayorga |
|-----------------|-------------------|
| Edad | 25 años |
| Altura | 1.69 metros |
| Peso | 73 kgf |
| Experiencia BMX | Dirt, Jump y Race |

Un dato importante que envuelve al ciclista y a la bicicleta, el Top Tube del vehículo de pruebas tiene una medida de 20.5 pulgadas. El rango de alturas que permite esta medida se encuentra entre 1.68 a 1.73 metros, motivo por el cual la persona es la indicada para el tamaño de la bicicleta adquirida.

El equipo de protección personal (EPP³) consta de los siguientes elementos:

- Casco
- Chaqueta con refuerzos laterales y centrales
- Guantes
- Pantalón con refuerzos en las rodillas y canillas
- Zapatos y Pedales especiales

³ EPP siglas, Equipo de Protección Personal. En este caso aplica para el deporte de ciclismo BMX



Figura 121. Ciclista equipado con EPP

Los zapatos y pedales son especiales, no se puede utilizar un calzado normal y los pedales con los que cuenta en el conjunto de la bicicleta. Este sistema Zapato-Pedal tiene una particularidad, viene con unos alojamientos especiales para que zapato se ancle en el pedal y no permita deslizamientos en ninguna dirección. De esta manera el ciclista no tiende a resbalar de la bicicleta en el trayecto, aportando seguridad y firmeza para continuar a un ritmo constante su recorrido por la pista.



Figura 122. Pedal con Sistema de Anclaje para Calzado

Fuente: (IBMXFF, 2011)

El material de cual está construido este pedal es similar al del marco y trinche de la bicicleta, el acero AISI 4130.

3.5.3. ACELERÓMETRO Y REGISTRADOR DE DATOS

Medir las Fuerzas que se presentan en todo el trayecto resulta muy complicado por la instrumentación y equipamiento de las mismas. Por este motivo se usa un sensor llamado Acelerómetro. Como su nombre lo indica este puede medir las aceleraciones que experimenta una masa dentro del recinto de referencia del sensor. En este caso el sensor es capaz de medir las aceleraciones en los tres ejes, una gran ayuda para determinar las fuerzas en campo. Este dispositivo se encuentra ligado a un registrador de datos que guarda los datos aceleración de cada eje y tiempo de prueba en una memoria USB. Este registrador es colocado en un sitio del marco donde no lleve peligro de ser golpeado por elementos de la bicicleta o por el mismo ciclista. Obtenida la aceleración solo falta una constante para calcular la fuerza, se trata de la masa. En el momento que el ciclista y la bicicleta realizan los trayectos en una pista se convierten en un solo cuerpo, debido a la sujeción de la persona en los manubrios y en los pedales de la bicicleta. En la bicicleta no viaja solo el conductor, de la misma manera lo hace el sensor, el registrador y la fuente de alimentación de energía para el dispositivo electrónico. Con esta información se calcula la masa total, siendo la suma de la masa de la bicicleta, conductor, registrador de datos y batería.

Tabla 23

Datos Registrador

| Registrador | Características | |
|------------------|---------------------|-----------|
| Peso | 193 g | |
| Resolución | 12 bits | |
| Tasa de Muestreo | 800 muestras/s | |
| Alimentación | 6-16 VDC | |
| Consumo | 2.6 W | |
| Sensores | Acelerómetro | |
| | Número de Ejes | 3 |
| | Rango | ± 8 g |

Fuente: (National-Instruments, 2013)

3.5.4. PRUEBAS DE ACELERACIONES

El sensor está ubicado de tal forma que los ejes indican las siguientes aceleraciones:

- Eje X: Dirección de la Gravedad (Color Azul)
- Eje Y: Dirección Frontal de la bicicleta en el trayecto (Color Naranja)
- Eje Z: Dirección de Inclinación lateral de la Bicicleta (Color Gris)

De esta manera se obtienen las fuerzas al momento que la bicicleta realiza un salto y cae (Eje X), cambios de la dirección en el trayecto (Eje Y) y finalmente la inclinación lateral durante el pedaleo y curvas (Eje Z).

Previamente a realizar la toma de datos el ciclista realiza unos giros de reconocimiento del estado del terreno y posibles ajustes en la bicicleta.

Son necesarias cuatro pruebas en el mismo trayecto, con el mismo punto de salida y llegada. La masa total del conjunto alcanza un valor de 88 kilogramos, este valor multiplicado por la aceleración obtenida da como resultado la fuerza aplicada en el trayecto.

Ensayos de Aceleraciones: Ver Anexo 1

La tendencia en las gráficas de Fuerza con respecto del tiempo es muy similar en todas las pruebas, este aspecto es favorable para repetibilidad que ofrece el conductor dentro de una misma pista. El análisis de los valores se determina que la prueba con mayor valor de fuerzas es la Prueba 2.

Las gráficas de Fuerza en función del tiempo muestran picos en ciertos tramos del recorrido, estas variaciones dependen del principio Acción-Reacción de las fuerzas. Por ese motivo un pico de ocho gravedades positivas tiene a continuación su parte contraria de ocho gravedades en el otro sentido. Estos datos de alto valor emergen por presentarse en muy tiempos muy cortos (instantáneos). En una carga de impacto se produce un contacto entre cuerpos en lapsos muy minúsculos de tiempo, para aplicar en tan corto tiempo la carga se necesita una alta aceleración. Las aceleraciones en los ejes horizontales (Y) y laterales (Z) no aportan ninguna aceleración funcional para las cargas que soporta la bicicleta. En el eje horizontal está presente la

aceleración que proporciona el movimiento traslacional al vehículo, los altos valores se debe al impulso necesario para subir una rampa. La inclinación de la bicicleta afecta el momento de caer en una superficie, pero el ciclista corrige el ángulo con todas sus extremidades.

3.6. ANÁLISIS DE FUERZAS EN EL MARCO

Con los valores de las aceleraciones experimentales y aclarado el efecto que ejerce cada magnitud en la bicicleta, se procede a determinar ubicación de los apoyos fijos y las fuerzas en el conjunto Marco-Trinche. Las restricciones o apoyos van a ser los mismos en todo el proceso de simulación, la ubicación y valor de las fuerzas tienen que cambiar con los distintos escenarios.

3.6.1. ANCLAJE DEL CONJUNTO MARCO-TRINCHE

Estos eslabones que conforman un solo conjunto deben ser fijados de una manera muy similar, debe mostrar claramente la geometría de apoyos del marco de la bicicleta en la realidad. En la práctica el Marco y el Trinche se apoyan sobre las ruedas posterior y frontal respectivamente. En los apoyos se alojan los ejes que llevan el aro y la llanta, sujetados por pernos y arandelas para una mejor cohesión de los elementos. Para la simulación se eligen soportes empotrados a los tres ejes, más conocido como un soporte fijo. Esto permite restringir cualquier tipo de movimiento en los lugares apoyados. A seguir se muestra dónde están ubicados los soportes

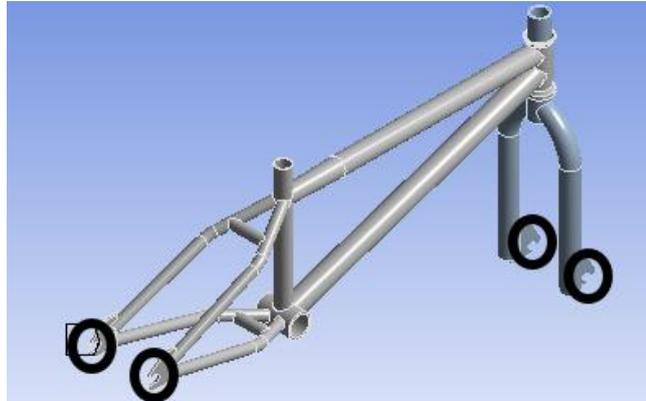


Figura 123. Puntos de Anclaje del Sistema

Observando una vista isométrica de todo el sistema se aprecia donde se encuentra anclado el vehículo de pruebas.

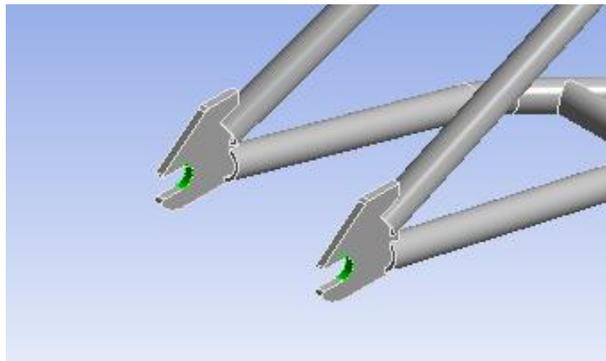


Figura 124. Soportes del Marco

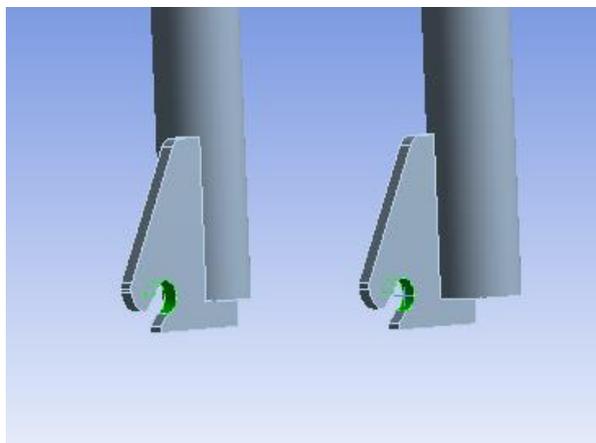


Figura 125. Soportes del Trinche

Presentado un detalle de las sujeciones se procede a evaluar cada escenario de fuerzas.

3.6.2. APLICACIÓN DE LAS FUERZAS

Una bicicleta BMX en un trazado de Race está sometida a varios tipos de fuerza, por tal motivo se plantean los siguientes escenarios:

Tabla 24

Escenarios de Simulación

| Escenario | Pedales | Volante |
|-----------|-------------|---------------|
| E1 | F. Vertical | F. Vertical |
| E2 | F. Vertical | F. Horizontal |
| E3 | F. Vertical | - |

Es importante aclarar lo siguiente:

- La Fuerza Máxima vertical en los pedales corresponde al máximo valor de Fuerza en el eje X determinada en campo (6899 N).
- En el volante la mayor fuerza posible es el peso del conductor (716 N)

Las resistencias a la fluencia y a la ruptura del material se tabulan en el programa para el cálculo del factor de seguridad.

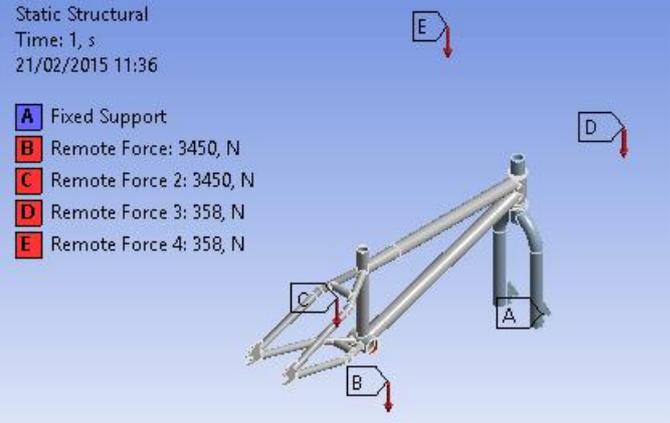
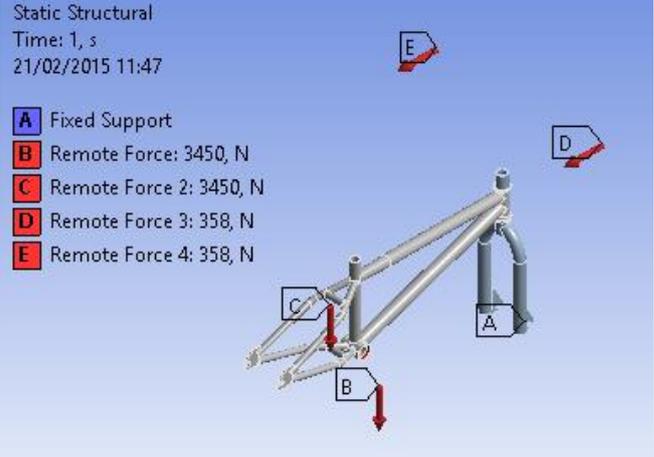
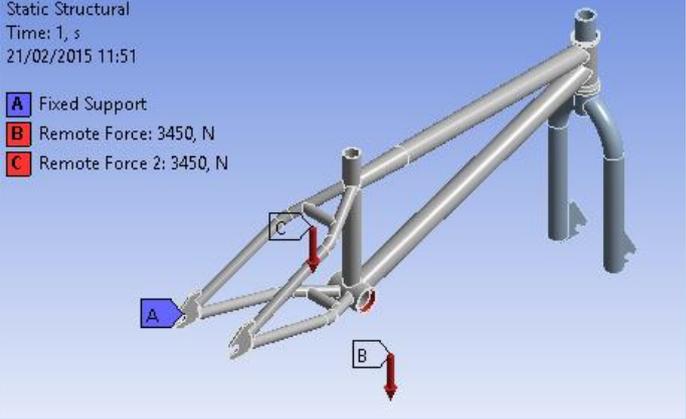
| | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----|
|  Tensile Yield Strength | 4,6E+08 | Pa |
|  Compressive Yield Strength | 4,6E+08 | Pa |
|  Tensile Ultimate Strength | 5,6E+08 | Pa |

Figura 126. Resistencias del Material

Definidas las fuerzas, los escenarios y las resistencias del material se ubican las fuerzas en el conjunto y simulan:

Tabla 25

Ubicación de las Fuerzas en cada Escenario

| Escenario | Ubicación de las Fuerzas |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| E1 | <p>Static Structural Time: 1, s 21/02/2015 11:36</p> <ul style="list-style-type: none"> A Fixed Support B Remote Force: 3450, N C Remote Force 2: 3450, N D Remote Force 3: 358, N E Remote Force 4: 358, N  |
| E2 | <p>Static Structural Time: 1, s 21/02/2015 11:47</p> <ul style="list-style-type: none"> A Fixed Support B Remote Force: 3450, N C Remote Force 2: 3450, N D Remote Force 3: 358, N E Remote Force 4: 358, N  |
| E3 | <p>Static Structural Time: 1, s 21/02/2015 11:51</p> <ul style="list-style-type: none"> A Fixed Support B Remote Force: 3450, N C Remote Force 2: 3450, N  |

3.7. DETERMINACIÓN DE LAS ZONAS CRÍTICAS EN EL MARCO

Los valores de Esfuerzo Equivalente Von Mises son los necesarios para determinar las zonas con mayor valor de esfuerzo.

Tabla 26

Esfuerzo de Von Mises en Cada Escenario

| Escenario | Esfuerzo de Von Mises |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| E1 | <p>Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 1 21/02/2015 11:39</p> <p>217,23 Max 193,09 168,96 144,83 120,69 96,562 72,429 48,295 24,162 0,029167 Min</p> |
| E2 | <p>Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 1 21/02/2015 11:48</p> <p>217,11 Max 192,99 168,87 144,75 120,63 96,505 72,385 48,265 24,144 0,024114 Min</p> |
| E3 | <p>Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 1 21/02/2015 11:53</p> <p>217,35 Max 193,2 169,05 144,91 120,76 96,614 72,468 48,321 24,174 0,027585 Min</p> |

Cada escenario tiene sus zonas de mayor esfuerzo, se presenta una tabla por cada escenario propuesto:

Tabla 27

Zonas Críticas Escenario 1

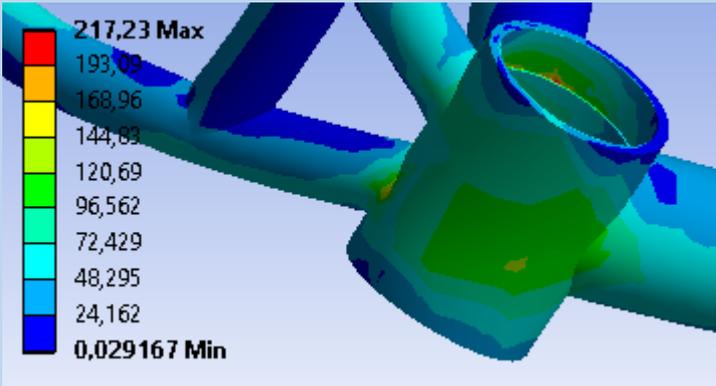
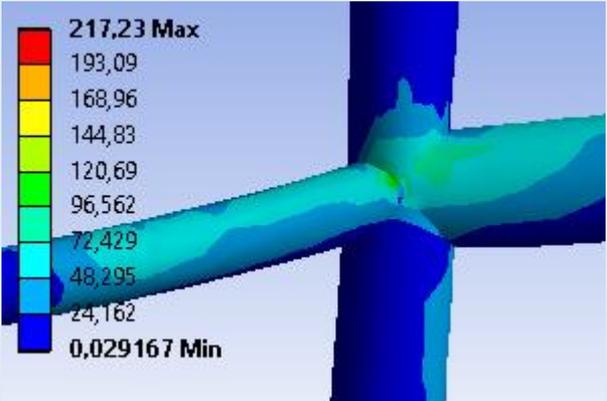
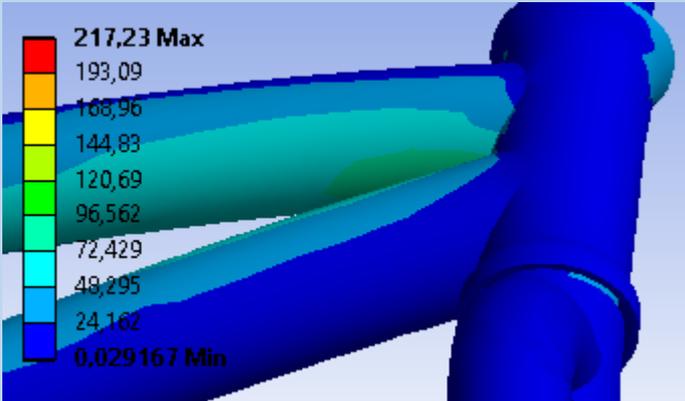
| Escenario E1 | Zona Crítica |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ZC1 |  |
| ZC2 |  |
| ZC3 |  |

Tabla 28

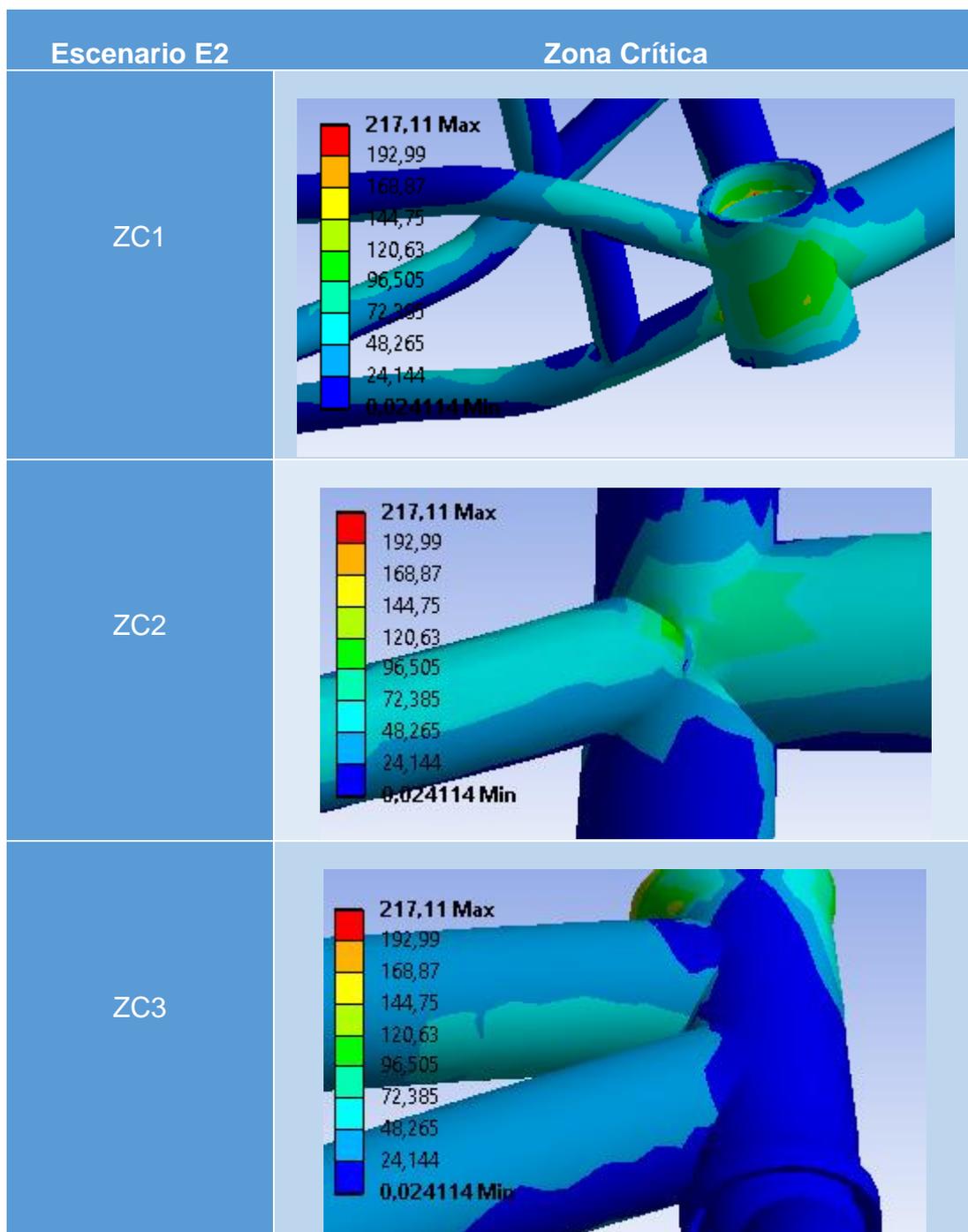
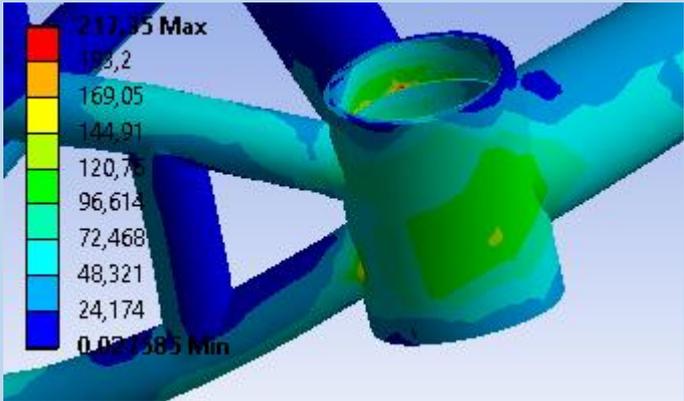
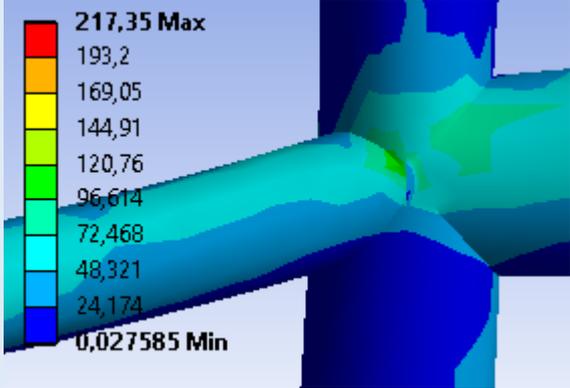
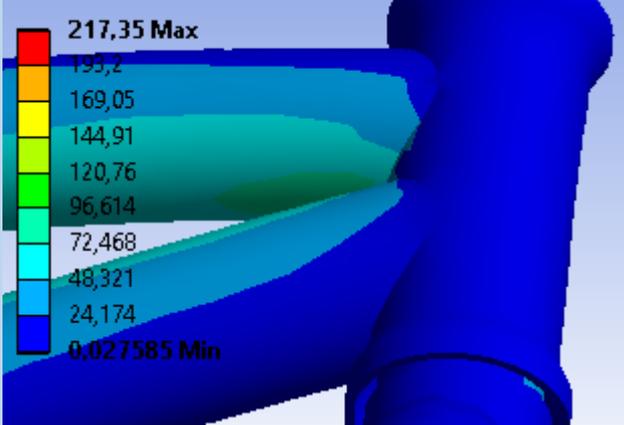
Zonas Críticas Escenario 2

Tabla 29

Zonas Críticas Escenario 3

| Escenario E3 | Zona Crítica |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ZC1 |  |
| ZC2 |  |
| ZC3 |  |

Analizando cada una de las tres zonas críticas de cada escenario se puede determinar que hay dos claras tendencias en todos los escenarios. La zona crítica 1 y 2 se presenta en los tres ensayos. Definiendo como estas zonas aptas para colocar la roseta de deformaciones. La zona crítica 3 muestra mayores valores en los escenarios 1 y 3, pero con menos intensidad en el 2.

CAPÍTULO 4: SELECCIÓN Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

En este proyecto uno de los pilares más importantes es la obtención de los datos. Nuestro caso particular resalta dos factores fundamentales en donde es utilizado el dispositivo de adquisición de datos. En primera instancia el dispositivo debe ser montado en la bicicleta y el segundo que debe ser completamente autónomo de un ordenador. Si envía los datos inalámbricamente o puede almacenar dentro de una memoria sea interna o portátil pasa a un segundo plano de selección. Principalmente el enfoque de selección se reduce dos factores de ubicación e independencia. Algunas de las opciones para la adquisición de datos son:

4.1.1. DATA LOGGER

Un registrador de datos (data logger) es un dispositivo electrónico que registra datos en tiempo real o en relación a la ubicación por medio de instrumentos y sensores propios o externos. Casi todos están basados en microcontroladores. Por lo general son pequeños, usan baterías de larga duración, portátiles, conteniendo un microprocesador y una memoria interna para almacenamiento de datos así como sensores.



Figura 127. Data Logger

Fuente: (Omega, 2014)

Algunos registradores de datos se comunican con una computadora y utilizan software específico para activar el registro de datos, ver y analizar los datos recogidos, mientras que otros tienen un dispositivo de interfaz local que puede ser utilizado como un dispositivo independiente. Los registradores de datos varían entre los de propósito general para una amplia gama de aplicaciones a los dispositivos de medición muy específicos para medir en un medio ambiente o aplicaciones particulares. Los registradores de datos electrónicos han reemplazado a los registradores circulares y lineales en muchas aplicaciones así mismo el ahorro en consumibles como papel, tinta, electricidad, mantenimiento e instalación especializada.

Uno de los principales beneficios del uso de registradores de datos (datalogger) es la capacidad para recopilar automáticamente datos las 24 horas del día. Tras la activación, los registradores de datos normalmente se dejan sin vigilancia para medir y registrar la información durante toda la duración del periodo de seguimiento. Esto permite una visión global y precisa de las condiciones ambientales objeto de seguimiento, tales como la temperatura del aire y la humedad relativa, etc.

4.1.2. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ)

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con un ordenador un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ⁴ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y un computador con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en ordenadores aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las computadoras estándares en la

⁴ Siglas en Inglés de "Data Acquisition", en español Adquisición de Datos

industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable.



Figura 128 Sistema de Adquisición de Datos DAQ

Fuente: (National-Instruments, 2013)

El dispositivo DAQ consiste en una tarjeta que recibe las señales del sensor o varios sensores según sea la necesidad. En algunos casos la señal puede ingresar directamente a la tarjeta, esto aplica para los casos en que la señal tiene una magnitud de Voltaje. En otros casos cuando la señal no es convertida a voltaje se requiere acondicionarla previamente antes de ser captada por la tarjeta. Existen tarjetas especiales que pueden recibir señales que no sean de voltaje, un caso conocido es una tarjeta DAQ que recibe señales de variación de resistencias. Esta tarjeta internamente realiza el acondicionamiento de señal para leer voltaje.



Figura No. 129: Dispositivo Tarjeta DAQ

Fuente: (Semtech, 2011)

4.1.3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS WIRELESS

Los sistemas inalámbricos de adquisición de datos pueden eliminar el costo de la instalación y el tiempo requerido para cablear todos los sensores. Estos sistemas constan de uno o más transmisores inalámbricos enviando datos de un receptor inalámbrico conectado a un ordenador remoto. Los transmisores inalámbricos pueden recibir señales de corriente y voltaje. Los receptores pueden ser conectados al puerto USB o Ethernet de un computador.



Figura 130. Termocupla con sistema de adaptador inalámbrico

Fuente: (Semtech, 2011)

4.1.4. CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO

La búsqueda de un equipo capaz de cumplir con las exigencias y superar los requerimientos, debe ser realizada de manera eficaz para escoger la mejor opción. Realizar una tabla comparativa para enfrentar las mejores opciones y así depurar a la más conveniente es una herramienta muy exitosa. Los criterios de selección para el dispositivo son los siguientes (sin orden de importancia):

- **Robustez**

Este término combina perfectamente con las exigencias Mecánicas y Electrónicas. En la parte Mecánica tener un aparato capaz de soportar vibraciones y movimientos bruscos sin afectar su estructura interna. Por la otra

orilla la Electrónica, ejecutar varios procesos de manera simultánea sin generar fallos.

- **Programación**

El dispositivo debe soportar un Lenguaje de programación apto para realizar todas las acciones durante el proceso de Adquisición de Datos. La complejidad para programar es un factor académico importante.

- **Autonomía**

Se unen dos criterios para esta definición, la alimentación necesaria de voltaje para operación del dispositivo y el tipo de conexión con el computador. Por las altas exigencias de los ensayos es imposible contar con el ordenador adjunto en la bicicleta.

- **Transmisión de Datos**

Es importante conocer el medio por el cual los datos se transmiten desde el equipo al computador para posteriores análisis.

- **Señal de Entrada**

Magnitud de la señal que puede recibir el equipo, siendo voltaje o corriente las menos apropiadas y de resistencia la ideal.

- **Almacenamiento**

Destino y formato del archivo que contiene los datos capturados por el dispositivo.

- **Precio**

Sistema de adquisición de datos capaz de cumplir con las rigurosas necesidades a un costo al alcance del presupuesto.

Estos criterios son enfrentados en una matriz para determinar el puntaje de cada una. De esta forma se depura que criterios son los más influyentes en la decisión final. La importancia viaja de mayor a menor, siendo 1 el valor más ponderado y 4 el menos necesario.

Tabla 30

Jerarquía de Criterios

| Criterio | Importancia | Orden |
|----------------------|-------------|-------|
| Robustez | 1 | 1 |
| Autonomía | 1 | 2 |
| Transmisión de Datos | 2 | 3 |
| Señal de Entrada | 2 | 4 |
| Precio | 3 | 5 |
| Programación | 3 | 6 |
| Almacenamiento | 4 | 7 |

Tabla 31

Combinex Matrix Criterios

| # | Criterio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Punt | Indice | WF |
|---|----------------------|-----|-----|-----|---|---|---|---|-------|------|--------|------|
| 1 | Robustez | 0 | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6.5 | 0.232 | 0.23 |
| 2 | Autonomía | 0.5 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6.5 | 0.232 | 0.23 |
| 3 | Transmisión de Datos | | | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4.5 | 0.161 | 0.16 |
| 4 | Señal de Entrada | | | 0.5 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4.5 | 0.161 | 0.16 |
| 5 | Programación | | | | | 0 | 1 | 1 | 1 | 2.5 | 0.089 | 0.09 |
| 6 | Precio | | | | | 1 | 0 | 1 | 1 | 2.5 | 0.089 | 0.09 |
| 7 | Almacenamiento | | | | | | | 0 | 1 | 1 | 0.036 | 0.04 |
| | | | | | | | | | Total | 28 | 1.000 | 1 |

El WF es la abreviación de “Weighting Factor” que significa Valor de Ponderación. Refleja la importancia de ese criterio frente a otros.

4.1.5. SELECCIÓN DEL EQUIPO

Las opciones posibles para elegir al equipo son las siguientes:

- **Bridge/Strain Gauge Data Logger (Omega)**

Registrador de Datos exclusivo para Galgas Extensiométricas, que se conectan directamente en el dispositivo. Utiliza la energía de una batería, los datos se descargan en el ordenador y se realiza mediante un software. Este dispositivo posee un sistema es completamente autónomo.



Figura 131. Data Logger Omega

Fuente: (Omega, 2013)

- **Tarjeta myRio (National Instruments)**

Dispositivo de Diseño embebido para varios conceptos de proyectos, contiene en su arquitectura procesadores. Recibe solamente señales de voltaje y posee un acelerómetro interno. Puede enviar datos mediante una red wireless, cable de Datos USB o guardar en una memoria USB introducida en la tarjeta. Su alimentación puede ser mediante baterías o energía del

suministro público. Programable con Labview, Lenguaje C y otros tipos de Lenguajes.



Figura 132. Tarjeta MyRio de National Instruments

Fuente: (National-Instruments, 2013)

- **Tarjeta myDAQ USB-6009 (National Instruments)**

Tarjeta DAQ compacta para proyectos aplicaciones didácticas, energizada mediante puerto USB del computador y transmisión de datos mediante el mismo medio. Programable con Labview y Lenguaje C.



Figura 133. Tarjeta myDAQ de National Instruments

Estas tres opciones consideradas forman parte de una matriz de decisión la misma que por medio de los valores ponderados (WF) y los valores de atributo (RF) determinan la mejor opción. Los valores ponderados se determinan mediante Combinex Matrix y los valores de atributo tienen un rango de 0 a 10 siendo 10 el más alto.

Tabla 32

Matriz de Decisión Equipo Adquisición de Datos

| Orden | Criterio | WF | Data Logger | | myRIO | | myDAQ 6009 | |
|------------------|----------------------|------|-------------|-------|-------|-------|------------|-------|
| | | | RF | Valor | RF | Valor | RF | Valor |
| 1 | Robustez | 0.23 | 8 | 1.84 | 10 | 2.3 | 6 | 1.38 |
| 2 | Autonomía | 0.23 | 10 | 2.3 | 8 | 1.84 | 0 | 0 |
| 3 | Transmisión de Datos | 0.16 | 5 | 1.15 | 10 | 2.3 | 5 | 1.15 |
| 4 | Señal de Entrada | 0.16 | 10 | 2.3 | 4 | 0.92 | 4 | 0.92 |
| 5 | Programación | 0.09 | 10 | 2.3 | 5 | 1.15 | 5 | 1.15 |
| 6 | Precio | 0.09 | 2 | 0.46 | 7 | 1.61 | 9 | 2.07 |
| 7 | Almacenamiento | 0.04 | 7 | 1.61 | 10 | 2.3 | 7 | 1.61 |
| suma | | 1 | 11.96 | | 12.42 | | 8.28 | |
| Prioridad | | | 2 | | 1 | | 3 | |

Las opciones de Data Logger y myRio están cercanas, los valores indican que cualquiera de los dos puede ser una gran opción. Las desventajas de la primera opción son:

- Necesidad de utilizar dos Equipos
- Costo elevado
- Importación Compleja

La opción myRio tiene como única desventaja la necesidad de acondicionamiento de señal.

Por los motivos mostrados se elige a la segunda opción, la tarjeta myRio de National Instruments.

Especificaciones de la Tarjeta: Ver Anexo 2

4.2. SELECCIÓN DE LOS SENSORES Y ACONDICIONADORES DE SEÑAL

Debido a las características del dispositivo de adquisición de datos, es necesario acondicionar la señal de salida de las galgas Extensiométricas que son utilizadas.

4.2.1. SENSORES: GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

Estos sensores pueden ser muy pequeños, o tan grandes como sea la necesidad. Depende también del área o punto a ser evaluado experimentalmente. En superficies planas o rectas como una viga de sección cuadrada o un diafragma el sensor encaja perfectamente debido a su geometría. Este proyecto es diferente, los elementos deben ubicarse en el tubo de una bicicleta, esto complica y añade parámetros más demandantes al momento de la elección. Una opción puede ser colocar sensor por sensor para completar la roseta, en el mercado existen rosetas que cuentan con las tres galgas y una geometría determinada. Los parámetros de elección son los siguientes:

- Facilidad de montaje
- Tamaño
- Temperatura de Operación
- Aplicación de Cargas Dinámicas

Para la selección de las galgas Extensiométricas se recurre a dos tipos diferentes. En la siguiente tabla se expone las características más importantes de cada elemento.

Tabla 33

Características de los Sensores

| Sensor | BFH350-3AA | RY11 6/120 |
|----------------------|--------------|-------------------------------------|
| Marca | CSS | HBM |
| País de Origen | China | Alemania |
| Orientación Galga | Uniaxial | Roseta 0/45°/90° |
| Resistencia Nominal | 350 ± 1 Ω | 120 Ω ± 0.35% |
| Voltaje Alimentación | 5 V Max | 3 V Max |
| Factor de Galga | 2.1 ± 1% | 1.94 ± 1% |
| Cuadrícula de Medida | 3.2 x 3.1 mm | 2 x 1.3 mm |
| Cuadrícula Base | 7.2 x 4.1 mm | 11 x 11 mm |
| Material | Acero | Acero |
| Temperatura Trabajo | -30°C a 60°C | -70°C a 200°C |
| Máxima ε positiva | 20000 umm/mm | 50000 umm/mm |
| Máxima ε negativa | 20000 umm/mm | 50000 umm/mm |
| Cargas Dinámicas | No Aplica | ±1000 um/m (10 ⁷ ciclos) |

Fuente: (HBM, 2010), (CSSCorporation, 2008)

Con todos los datos de cada sensor, es evidente que el más adecuado para la necesidad del proyecto es la roseta 0/45°/90°. Representa menos trabajo colocar una roseta completa y el centro de gravedad ya está definido en la base. Tener alta resistencia a cargas estáticas y soportar fatiga asegura que el sensor no colapse en los ensayos de esfuerzos.

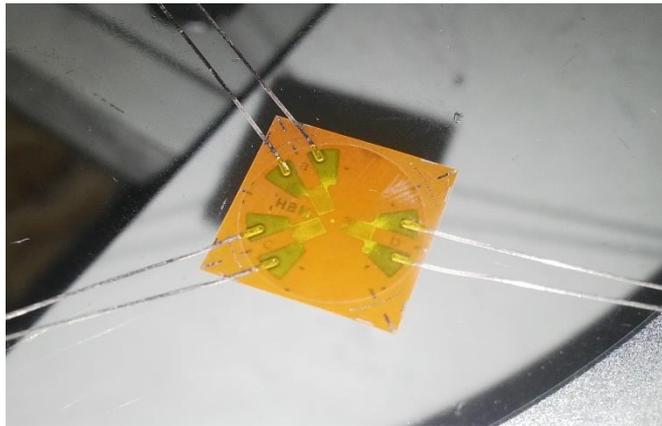


Figura 134. Strain Gauge HBM RY11 6/120

Especificaciones de los sensores ver Anexo 3

4.2.2. ACONDICIONAMIENTO: TRANSDUCCIÓN DE SEÑAL

Las galgas extensiométricas tienen una señal de salida de magnitud de Resistencia, la tarjeta de adquisición de datos solo recibe señales de voltaje. Por este motivo es indispensable canjear los valores de resistencia por voltaje, esto se logra con un circuito llamado Puente de Wheatstone.

La cantidad de zonas críticas en la bicicleta refleja el número de rosetas que deben ser adjuntadas al marco. La bicicleta necesita tres rosetas, cada una con tres galgas extensiométricas colocadas con una geometría específica. En total hay una cantidad de nueve sensores, los mismos que necesitan ser acondicionados por separado. En resumen son requeridos nueve puentes de wheatstone para obtener valores de voltaje. El alto número

de sensores restringe por completo las configuraciones de medio y puente completo, únicamente se utiliza el arreglo de un cuarto de puente. En Tabla N.10 se exponen algunas configuraciones, de todas las opciones se elige Cuarto de Puente I.

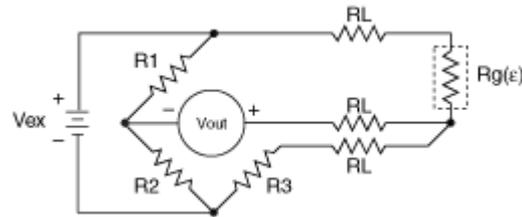


Figura 135. Cuarto de Puente I

Fuente: (National-Instruments, 2013)

Cada configuración contiene su propia ecuación para transformar el valor de Voltaje en Deformación Unitaria.

Ecuación No. 52: Ecuación Cuarto de Puente I

$$\varepsilon = \frac{-4V_r}{GF(1 + 2V_r)} \left(1 + \frac{R_l}{R_g} \right) \quad (52)$$

Las galgas extensiométricas tienen una resistencia nominal de 120 ohmios, para completar el circuito del puente de wheatstone se necesita tres resistencias de igual valor. Lo recomendable para trabajar con este tipo de sensores son las Resistencias de Precisión, tienen una tolerancia de 1% en su valor nominal. Se conjuga perfectamente con la tolerancia de las galgas que llegan a un valor de 0.35%. En el mercado es difícil encontrar este tipo de elementos electrónicos. Existen otro tipo de resistencias con una tolerancia del 5% de su valor nominal que pueden ser adquiridas con facilidad y a bajo costo.

En teoría el Puente de Wheatstone con cuatro resistencias nominales de 120 ohmios debe estar en equilibrio y entregar un valor de voltaje de salida igual a cero. En la realidad esto es muy difícil de lograr, por los mismos valores de la resistencia de cada elemento e impedancia adicional que proporcionan los cables. La ecuación (52) proporciona valores de deformación unitaria utilizando constantes del sensor, voltaje de excitación del puente y voltaje de salida del puente. Sin aplicación de carga el puente puede enviar voltaje de salida diferente a cero y este dato indica que existe una deformación. Para aplacar este problema se mide el valor del puente sin carga aplicada al elemento mecánico para restar del voltaje de salida con carga aplicada y obtener valores reales de deformación.

Ecuación No. 53: Relación entre Voltajes de Salida y Excitación

$$V_r = \frac{V_{sg} - V_{init}}{V_{exc}} \quad (53)$$

La diferencia de voltajes no equilibra el puente, simplemente encera el valor de la deformación unitaria cuando el elemento mecánico sometido a cargas está en reposo.

La resistencia de las galgas y su tamaño determinan el voltaje máximo efectivo de excitación del puente. En las características del sensor elegido se muestra el valor de 3 voltios como voltaje máximo de excitación.

Para elaborar el circuito de transducción de señal mediante un puente de wheatstone se necesitan los siguientes elementos:

- Placa (ruteada)
- Borneras
- Resistencias

- Cautín
- Estaño
- Fundente

El diseño del puente se conforma de la siguiente configuración:

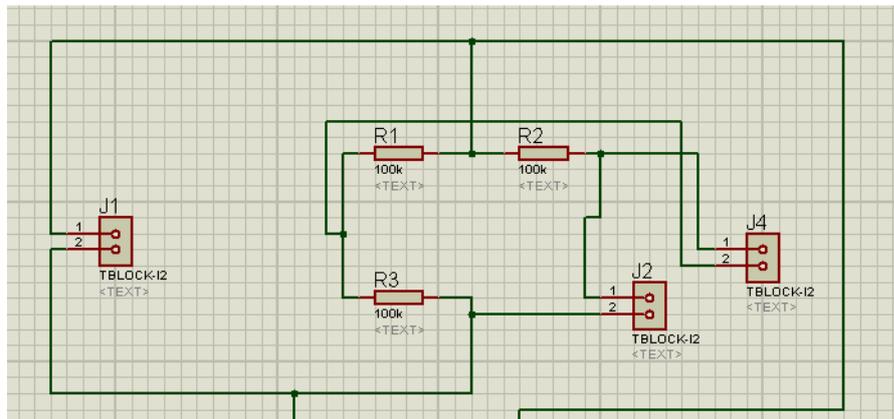


Figura 136. Diseño del Puente de Wheatstone

En la figura anterior las borneras se representan con la letra “J” y las resistencias con la letra “R”. La bornera 1 tiene la función de ser fuente de excitación del puente, la numero 2 recibe los cables que están soldados a la galga y finalmente la bornera 4 entrega el voltaje de salida del puente. Todas las resistencias tienen el valor nominal de 120 ohmios con una tolerancia de $\pm 5\%$.



Figura 137. Puente de Wheatstone para dos galgas

Este circuito tiene la capacidad de acondicionar dos sensores, lo único que tienen en común es la fuente de excitación, el resto es independiente de cada galga. Se puede elaborar un puente por placa o los 9 puentes necesarios en una sola placa. La limitación principal para esto es el espacio disponible para colocar una placa. La alimentación de voltaje no conlleva ningún tipo de restricción, solo la implementación de un regulador de voltaje.

4.2.2. ACONDICIONAMIENTO: AMPLIFICADORES DE SEÑAL

El proceso de canjear una variación de resistencia a una variación de voltaje mediante el Puente de Wheatstone arroja una señal de muy bajo valor y difícil de ser captada por un dispositivo. En algunos casos puede tener valores por debajo de los milivoltios. En la práctica la mayoría de transductores tienen como valores de salida menores a 10 mV/V , esta relación indica que existe una salida de 10 milivoltios del Puente por cada voltio de excitación del mismo. Como ejemplo para esta relación si el voltaje de excitación es 10 voltios, la salida de voltaje rodea el valor de 100 milivoltios. Si este sería el caso de los sensores y puente del proyecto, la alimentación máxima de excitación debe ser 3 voltios. Entonces la salida de voltaje del puente alcanza el valor de 30 milivoltios, un valor extremadamente bajo para la resolución de la tarjeta teniendo en cuenta la mínima lectura en el puerto multiplexado (MXP) con 1.221 milivoltios.

Es necesario amplificar la señal de salida de los puentes, en primer caso por el tamaño y adicionalmente el ruido de la señal disminuye notablemente. Existen aparatos electrónicos con la capacidad de convertir y amplificar la señal de las galgas. Por las rigurosidades de los ensayos y requerimientos de este tipo de equipos se debe buscar una solución miniaturizada y efectiva.

Las opciones para amplificar la señal son las siguientes:

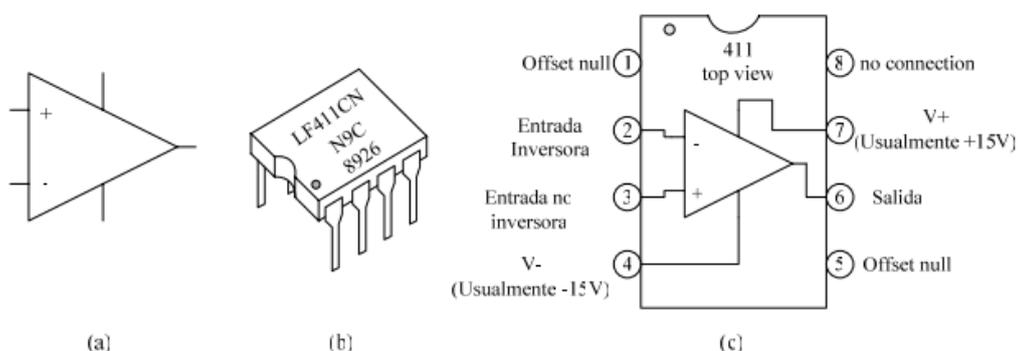
- Amplificador Industrial
- Amplificador Instrumental

La primera opción consiste en dispositivos de tamaño similares al ratón de un ordenador, su voltaje de alimentación oscila entre los 18-26 VDC. Dentro de su circuito es ajustable la salida de voltaje (0-5 o 0-10) o corriente (4-20 mA) (según la necesidad) y posee regulación para el rango de voltaje de trabajo y la calibración a cero. Este dispositivo es ideal para Controladores Lógicos Programables y equipos estacionarios. Su valor alcanza un promedio de 35 USD.

Los amplificadores instrumentales son pequeños circuitos que contienen amplificadores operacionales y resistencias. Los amplificadores operacionales mantienen una cierta polaridad de la señal, mientras que las resistencias aportan con una ganancia que en definitiva resulta en una señal amplificada. Basta con tener el rango de señal a ser amplificado y se calcula el valor de la resistencia para obtener la ganancia necesaria. Este método se puede añadir a un circuito de puentes de wheatstone y simplificar el número de circuitos necesarios. Adicionalmente la mayoría de Amplificadores operacionales deben ser alimentados con una diferencia de potencias de -30 Voltios. La tarjeta de adquisición de datos posee dos pines, con 15V y -15V, por lo que no genera ninguna acción extra. El valor de este elemento no supera los 10 USD.

Tomando en acotación las virtudes y defectos de los amplificadores de señal presentados, el más adecuado para las necesidades del proyecto es el

Amplificador Instrumental. Este amplificador de instrumentación consiste en tres amplificadores operacionales y cuatro tipos de resistencias. Un amplificador operacional ofrece un valor de ganancia tope entre diez mil y cien mil veces. Tiene el ingreso de dos señales (inversora y no inversora) y una sola señal de salida. La alimentación de estos amplificadores requiere de fuentes bipolares ($V+$ y $V-$), con una amplia gama de voltajes de suministro entre $\pm 6V$ y $\pm 18V$.



(a) Símbolo del amplificador operacional. (b) Circuito integrado *mini DIP*, (c) Conexión de pines del 411

Figura 138. Amplificador Operacional

Fuente: (Semtech, 2012)

La entrada denominada como inversora necesita una retroalimentación de la señal de salida del amplificador operacional. Un amplificador de instrumentación completo y con referencia a tierra se configura de la siguiente manera:

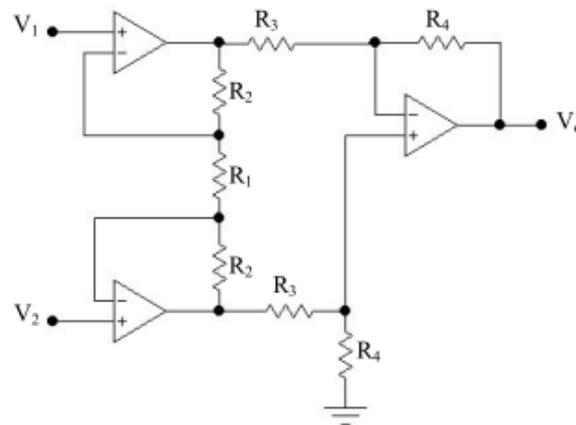


Figura 139. Amplificador de Instrumentación

Fuente: (Semtech, 2012)

Los voltajes V_1 y V_2 (entradas) representan el voltaje de salida del puente de wheatstone, la señal a ser amplificada. El arreglo de las siete resistencias colocadas R_2 , R_3 y R_4 de igual valor y R_1 especial generan la ganancia requerida que se proyecta en el valor de V_0 (salida). La ganancia de este tipo de amplificador se calcula de la siguiente manera:

Ecuación No. 54: Ganancia del Amplificador de Instrumentación

$$G_D = \left(\frac{2R_2 + R_1}{R_1} \right) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) \quad (54)$$

En un caso especial en el cual los valores de R_4 y R_3 son iguales, la ecuación 54 se reduce a lo siguiente:

Ecuación No. 55: Ganancia con resistencias iguales

$$G_D = 1 + \frac{2R_2}{R_1} \quad (55)$$

Para determinar el valor de amplificación de una señal se recurre a una ecuación similar a la de la recta. El valor de salida de voltaje es igual a la ganancia (pendiente) multiplicado por el entrada de voltaje y a todo esto sumado el voltaje inicial (punto).

Ecuación No. 56: Salida de Voltaje (Amplificado)

$$V_{out} = mV_{in} + V_o \quad (56)$$

Para obtener los valores de voltaje que necesitan ser amplificados es fundamental ejecutar pruebas en la pista. Estos valores que arroja el ensayo de voltaje de salida de los puentes son importantes para saber exactamente la ganancia necesaria por cada puente para alcanzar el rango de 0-5 Voltios de los puertos MXP de la tarjeta.

Programación en Labview para pruebas de Voltaje ver Anexo 4

En el ensayo interviene la tarjeta myRio y los sensores debidamente acondicionados solo por los puentes de Wheatstone. Los ensayos se efectúa a los nueve sensores generan, hay que resaltar que la polaridad de la señal de los puentes se invierte al momento de colocar en la tarjeta por la naturaleza de la señal de salida de un puente. Cuando existe una deformación unitaria positiva el voltaje de salida del puente es negativo y viceversa. El resultado de cambiar la polaridad en los puertos MXP de la tarjeta indica valores de voltaje positivos pero en realidad es un valor negativo. Pero los valores que se presentan a continuación se invierten para no alterar los valores que normalmente genera un puente de wheatstone:

Tabla 34

Prueba-Medición de Voltaje de los Puentes Invertida

| Zona | Galga/Ubicación | Rango [mV] |
|------|-------------------------|------------|
| ZC1 | $\epsilon_a (0^\circ)$ | -1.221 a 0 |
| | $\epsilon_b (45^\circ)$ | -2.442 a 0 |
| | $\epsilon_c (90^\circ)$ | -1.221 a 0 |
| ZC2 | $\epsilon_a (0^\circ)$ | -1.221 a 0 |
| | $\epsilon_b (45^\circ)$ | -2.442 a 0 |
| | $\epsilon_c (90^\circ)$ | -2.442 a 0 |
| ZC3 | $\epsilon_a (0^\circ)$ | -1.221 a 0 |
| | $\epsilon_b (45^\circ)$ | -2.442 a 0 |
| | $\epsilon_c (90^\circ)$ | -1.221 a 0 |

Es importante aclarar el alto porcentaje de valores similares de voltaje, la mínima lectura de voltaje capaz de adquirir por este puerto MXP de la tarjeta tiene el valor de 1.221 milivoltios. Este valor se obtiene dividiendo el rango de voltaje del puerto para el número dos elevado a los bits de resolución de la tarjeta.

Es decir no existe una medida menor que la presentada y los valores presentados solo afirman que es muy evidente una amplificación de señal con un alto valor de ganancia.

Para completar la prueba ahora se realiza con la polaridad normal de salida del puente, los resultados son los siguientes:

Tabla 35

Prueba-Medición de Voltaje de los Puentes Normal

| Zona | Galga/Ubicación | Rango [mV] |
|------|-------------------------|------------|
| ZC1 | $\epsilon_a (0^\circ)$ | 0 |
| | $\epsilon_b (45^\circ)$ | 0 |
| | $\epsilon_c (90^\circ)$ | 0 |
| ZC2 | $\epsilon_a (0^\circ)$ | 0 |
| | $\epsilon_b (45^\circ)$ | 0 |
| | $\epsilon_c (90^\circ)$ | 0 |
| ZC3 | $\epsilon_a (0^\circ)$ | 0 |
| | $\epsilon_b (45^\circ)$ | 0 |
| | $\epsilon_c (90^\circ)$ | 0 |

La explicación válida para demostrar que todos los valores adquiridos por la tarjeta sean igual a cero tiene que ver nuevamente con la mínima lectura del puerto MXP 1.221 milivoltios. Los resultados denotan que el esfuerzo aplicado no es lo suficientemente representativo para alcanzar el mínimo valor necesario.

Cartas de Valores de Voltaje en Pruebas ver Anexo 5

En la realidad los esfuerzos que afectan al Marco de la bicicleta son en su totalidad positivos o de tracción, dejando en segundo plano los pequeños o nulos esfuerzos negativos o de compresión. Para compensar los insignificantes valores de esfuerzos negativos, se procede a colocar como valor de voltaje positivo al veinte por ciento del valor de voltaje negativo. De

esa manera se asegura en un amplio rango que los esfuerzos negativos puedan ser capturados por la tarjeta. Con estas aclaraciones y restricciones los rangos de voltaje de cada puente quedan conformados.

Tabla 36

Rangos de Voltaje para Amplificación

| Zona | Galga/Ubicación | Rango [mV] |
|------|-------------------------|----------------|
| ZC1 | $\epsilon_a (0^\circ)$ | -1.221 a 0.244 |
| | $\epsilon_b (45^\circ)$ | -2.442 a 0.488 |
| | $\epsilon_c (90^\circ)$ | -1.221 a 0.244 |
| ZC2 | $\epsilon_a (0^\circ)$ | -1.221 a 0.244 |
| | $\epsilon_b (45^\circ)$ | -2.442 a 0.488 |
| | $\epsilon_c (90^\circ)$ | -2.442 a 0.488 |
| ZC3 | $\epsilon_a (0^\circ)$ | -1.221 a 0.244 |
| | $\epsilon_b (45^\circ)$ | -2.442 a 0.488 |
| | $\epsilon_c (90^\circ)$ | -1.221 a 0.244 |

Existen dos rangos únicos de amplificación y de igual forma las zonas críticas 1 y 3 requieren de igual tratamiento de señal en sus puentes. Por lo que pueden compartir el mismo circuito de acondicionamiento siempre y cuando se mida una roseta a la vez. Con la ecuación 56 se puede obtener el valor de la ganancia y el voltaje inicial de la señal.

- Rango [-1.221 a 0.244] mV

$$0 = m(-1.221 \times 10^{-3}) + V_o$$

$$5 = m(0.244 \times 10^{-3}) + V_o$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones los valores son:

$$m = \text{Ganancia} = 3413$$

$$V_o = 4.167 [V]$$

- Rango [-2.442 a 0.488] mV

$$0 = m(-2.442 \times 10^{-3}) + V_o$$

$$5 = m(0.488 \times 10^{-3}) + V_o$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones los valores son:

$$m = \text{Ganancia} = 1708$$

$$V_o = 4.166 [V]$$

Es muy notorio el gran valor de amplificación que requiere cada rango de voltaje de salida del puente, el primer valor es el doble que el segundo. El valor de voltaje inicial bordea un valor similar en los dos valores. Con los datos de ganancia, se puede elegir un Amplificador de Instrumentación capaz de cumplir con los valores establecidos.

Especificaciones del Amplificador de Instrumentación ver Anexo 6

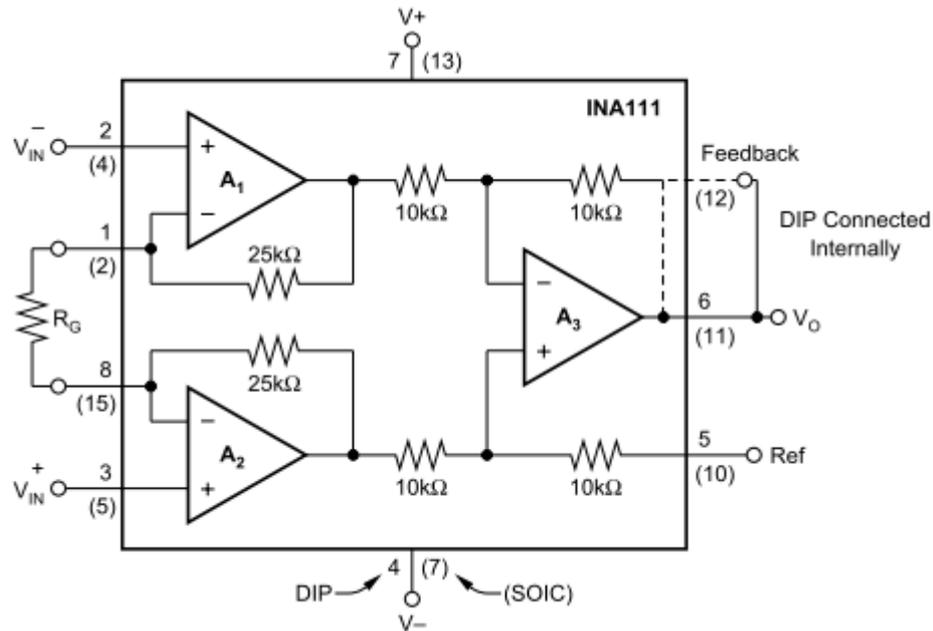


Figura No. 140: Diagrama Electrónico Amplificador INA111

Fuente: (INA, 2013)

La señal de salida del puente de wheatstone ingresa al amplificador respetando la polaridad de entrada del elemento. La resistencia que produce la amplificación de la señal que se calcula con la ecuación 55 se reduce a la siguiente expresión:

Ecuación No. 57: Valor de Resistencia de Ganancia Amplificador INA111

$$R_g = \frac{50k\Omega}{G_D - 1} \quad (56)$$

Valores de Resistencia para obtener ganancias equivalentes a:

- G_D : 3413

$$R_g = \frac{50000}{3413 - 1} = 14.65 [\Omega]$$

- G_D: 1708

$$R_g = \frac{50000}{1708 - 1} = 29.29 \text{ } [\Omega]$$

Para obtener una ganancia de 3413 y 1708 se necesitan resistencias de 14.65 y 29.29 ohmios respectivamente. Estos valores de resistencias no se fabrican y colocar un potenciómetro genera actividades tediosas de calibración. Para el primer caso se puede utilizar una combinación de dos resistencias, sumando 10 y 4.7 ohmios.

Amarillo Violeta Oro Marrón

Valor de la resistencia:

Marrón Negro Negro Marrón

Valor de la resistencia:

Figura 141. Combinación de Resistencias para aumento de 3413 veces

Finalmente la combinación para obtener un valor muy cercano a 29.29 ohmios se reduce a sumar tres resistencias de 10 ohmios.

Marrón Negro Negro Marrón

Valor de la resistencia:

Marrón Negro Negro Marrón

Valor de la resistencia:

Marrón Negro Negro Marrón

Valor de la resistencia:

Figura 142. Combinación de Resistencias para aumento de 1708 veces

La alimentación de una fuente bipolar y la conexión a tierra que requiere el amplificador se soluciona con los conectores C de la tarjeta. Los puertos 1,2 y 3 contienen +15V, -15V y GND respectivamente.

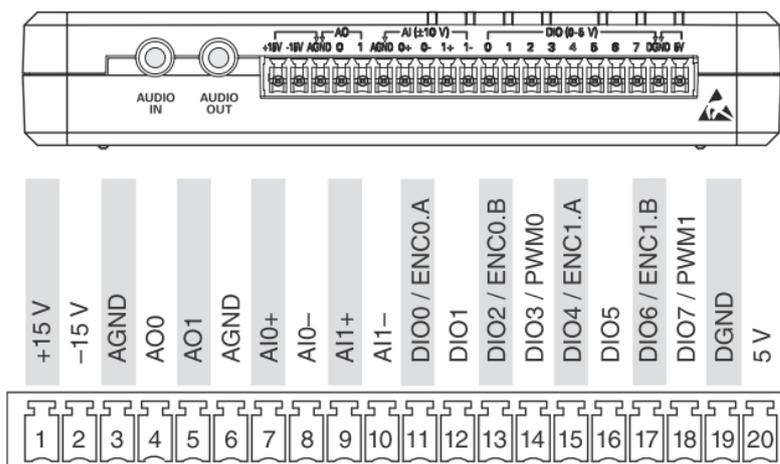


Figura 143. Fuente Bipolar y Tierra proporcionada por la tarjeta myRio

Fuente: (National-Instruments, 2013)

La cantidad de rangos de voltaje a ser amplificados es proporcional al circuito de amplificadores necesarios, en el presente caso son dos. De las nueve señales de cada sensor cinco corresponden al valor de amplificación de 3413 veces y los cuatro restantes a 1708 veces. Las Zonas Críticas 1 y 3 requieren la misma combinación de amplificadores, la zona restante difiere de las últimas. En los tres casos existen dos señales que requieren amplificar 3414 veces o 1708 veces y la restante 1708 veces y 3414 veces respectivamente. Sería absurdo construir los nueve amplificadores, mientras se pueda construir dos de cada rango de amplificación. De esta manera se combinan dos del mismo valor y uno diferente, así se satisface la necesidad de incurrir en mayores gastos. Solo existe un problema para esta decisión, solo se puede capturar los datos de una roseta por ensayo. Esto incrementa el número de giros al circuito race pero tiene la ventaja de que se puede contar con una mayor tasa de muestreo en la tarjeta y el filtrado de datos en Labview entrega un curva mejor elaborada.

Los dos amplificadores tienen la misma configuración, la única diferencia es valor de la resistencia de amplificación. Cuentan con tres borneras, la primera alimenta con voltaje al circuito, la segunda es la entrada de los cables del sensor y la última es la salida de la señal amplificada. Este circuito está comprendido por el puente de wheatstone y el amplificador de instrumentación.

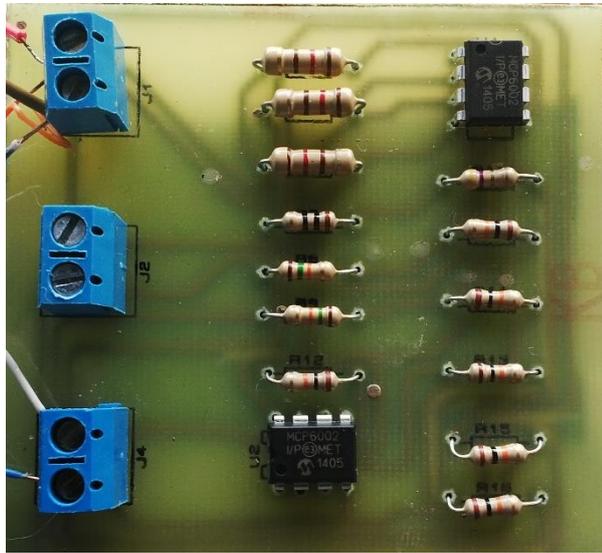


Figura 144 Circuito Puente-Amplificador 3414

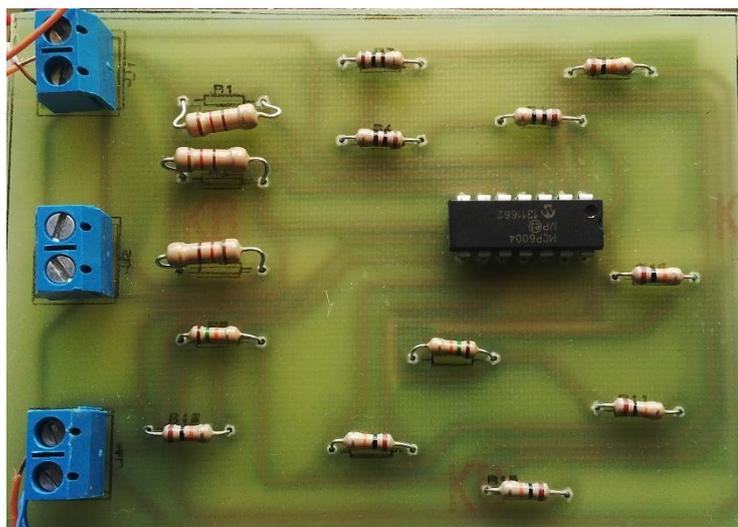


Figura 145. Circuito Puente-Amplificador 1708

Con los amplificadores listos y operativos, se concluye la fase para obtener un sensor transductor.

4.3. MONTAJE DEL SISTEMA SENSORES-ACONDICIONADORES-TARJETA

Los elementos más importantes de colocar son los sensores, su diminuto tamaño y poca resistencia puede provocar daños irreparables a los sensores. Los acondicionadores de señal son elementos más grandes y compactos que los señores, pero una caída o golpe pueden afectar su operación normal. La tarjeta de adquisición de datos es el dispositivo más grande de todos, internamente posee muchos circuitos y pequeñas partes vulnerables al impacto. Se puede diseñar una caja que proteja a la tarjeta de golpes, caídas y entregue una correcta fijación a la bicicleta. Una excelente ubicación y protección de estos tres eslabones garantiza el eficaz funcionamiento del sistema en el sitio destinado para los ensayos.

4.3.1. COLOCACIÓN DE SENSORES EN EL MARCO

Deben ser colocados en superficies libres de suciedad, grasa, capas protectoras de pinturas y debe estar completamente lisa. Estos factores aseguran la correcta adherencia de las rosetas a la superficie del tubo para que los esfuerzos que se soportados se transmitan de la misma manera a las galgas. Además la zona donde se asientan las rosetas debe aislarse del medio ambiente y los terminales de los sensores de las partes metálicas de la bicicleta. Con las zonas críticas definidas para la inserción de los sensores, se acondiciona las zonas de alojamiento.



Figura 146. Zona Crítica 1



Figura 147. Zona Crítica 2



Figura 148. Zona Crítica 3

Para desmembrar las capas protectoras de pintura es necesario utilizar lijas de agua de las denominaciones 100, 200, 400 y 600. Siempre partiendo desde la de menor valor.



Figura 149. Lijas de Agua 100, 200, 400 y 600

El procedimiento para pulir la superficie es muy similar al llamado “pulido tipo espejo”, la dirección de arrastre se rota en 90° entre cada lija. Continuamente limpiando la superficie con un trapo húmedo y evitando que los pequeños desperdicios afecten la superficie.



Figura 150. Pulido Zona Crítica 1

Completado las series de cuatro lijas en cada una de las zonas, las superficies están aptas para su limpieza y colocación de rosetas.



Figura 151. Zonas Críticas Pulidas

La primera limpieza en las superficies se realiza con un trapo sin pelusa y thinner, después se utiliza un paño con un desengrasante especial para dejar completamente limpia y seca el área.



Figura 152. Limpieza con Thinner



Figura 153. Desengrasamiento de la Superficie

Los insumos y herramientas necesarios para el montaje de las galgas en los tubos del marco de la bicicleta son los siguientes:

- Adhesivo de cianoacrilatos (brujita)
- Cinta Scotch
- Silicona Epóxica Transparente
- Pistola de Silicón (con recarga de material)
- Cautín Eléctrico
- Alambre de Estaño
- Fundente para Estaño
- Cable Multipar
- Alicata
- Corta Frío
- Cuchillo
- Bisturí
- Pinzas (Varios Tamaños)
- Tijeras
- Borradores
- Piolas

- Regla metálica
- Marcador



Figura 154. Insumos y Herramientas para colocar las galgas

Se definen los ejes de referencia para trazar líneas permiten centrar la roseta. El eje de referencia en los tubos es el axial y se lo representa con la letra X. La roseta en su cuadrícula base contiene líneas que facilita la orientación. Con las líneas de referencia dibujadas en el tubo se sostiene la roseta de la siguiente manera:



Figura 155. Sujeción de la Roseta en una Cinta

Sujetada la roseta de tal manera que su manipulación es sencilla, se vierte el adhesivo en la zona crítica y se asienta el sensor respetando los ejes establecidos.



Figura 156. Fijación del Sensor

Para asegurar que el adhesivo y el sensor queden correctamente anclados al tubo, aplicamos presión mediante un borrador ajustado por una piola a los tubos del marco.



Figura 157. Fijación Temporal para el secado del adhesivo

Transcurrido un lapso de tiempo de 20 minutos, se retira la fijación temporal y la cinta adhesiva del sensor.

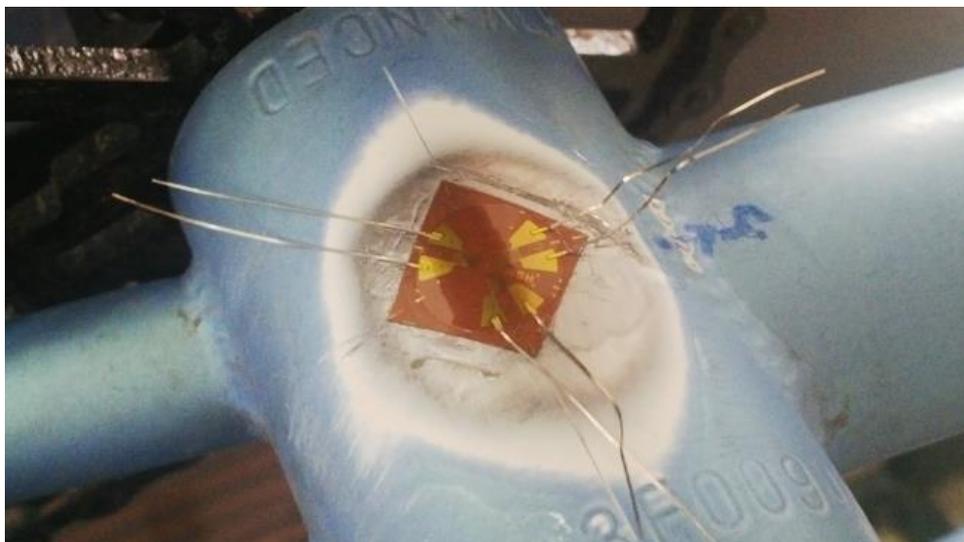


Figura 158. Roseta Fijada al tubo

El siguiente paso consiste en cortar una parte de los alambres que salen de los terminales de cada una de las galgas para colocar unos terminales en donde se sueldan los cables. Estos terminales son pequeños elementos de metal y se alinean con los terminales de las galgas de la roseta.



Figura 159. Inserción de los terminales

Posicionados los tres terminales, se retira la parte aislante de los cables. Con un playo se torsionan los alambres sueltos conformando un solo cuerpo y se sumergen en la pasta fundente de estaño. En la punta del cautín eléctrico

se coloca estaño desde el alambre y finalmente este estaño se transfiere a los alambres para fusionar en un solo cuerpo. De esta manera se facilita el proceso de soldado de los alambres en los terminales.



Figura 160. Remoción de Aislante del Cable



Figura 161. Fusión de los Alambres sueltos del Cable

En los terminales que están pegados, se inyecta una justa cantidad de fundente de estaño. Los cables se colocan en los terminales y se acerca el cautín para que los cables queden soldados a los terminales. Así quedan conectados permanentemente los dos elementos y la galga extensiométrica tiene su salida.

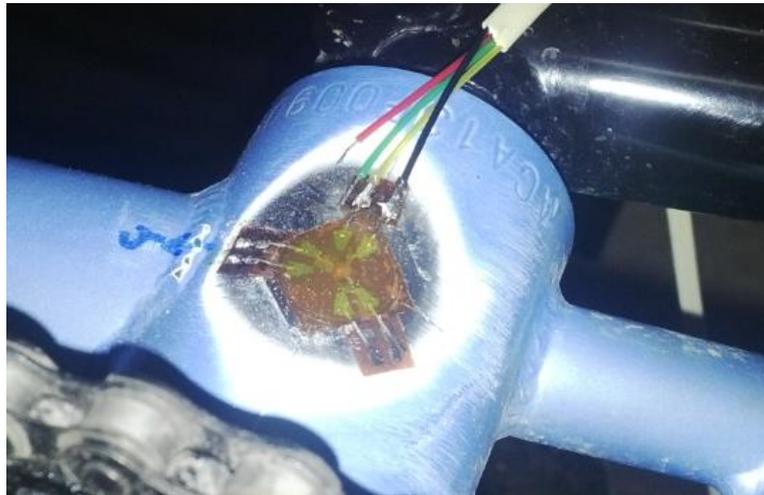


Figura 162. Unión del Cable al terminal de la galga

El mismo procedimiento se ejecuta con las otras dos galgas de la roseta y todas las conexiones quedan implantadas.

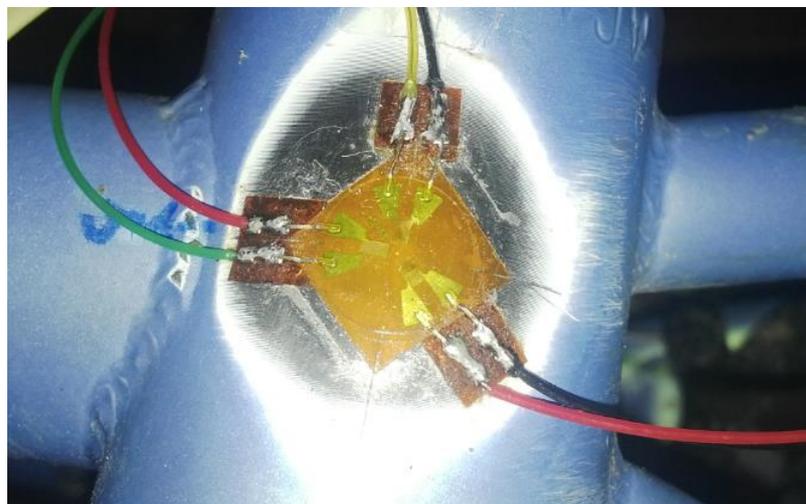


Figura 163. Conexión de Cables a Terminales en una Roseta

Con la silicona caliente se realiza un perímetro que permita evitar la fuga de la silicona epóxica. Después de concluir con ese acorralamiento se realiza la mezcla de los componentes de la silicona epóxica y se esparce por todo el entorno cerrado por la silicona. El tiempo de fijación tarda 30 minutos y su curado total un lapso de 8 horas.

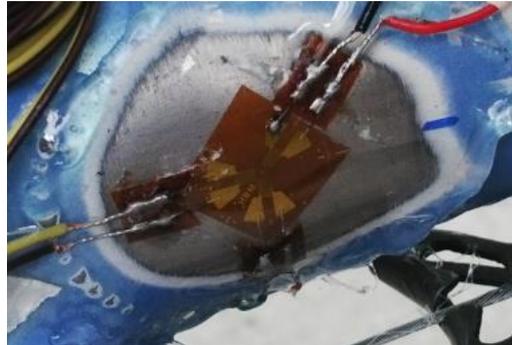


Figura 164. Aislamiento de la Roseta mediante silicona

Este procedimiento se repite para las dos zonas críticas y las dos rosetas faltantes.

4.3.2. ENSAMBLAJE DE LA TARJETA AL MARCO DE LA BICICLETA

La tarjeta de adquisición de datos debe estar posicionada en un lugar que no represente un problema para el ciclista al momento de conducir y que la misma no corra peligro de sufrir ningún tipo de golpe. Para asegurar la integridad del dispositivo y la correcta adherencia al bastidor de la bicicleta es fundamental utilizar una caja protectora. Este elemento de protección debe ser liviano y resistente a impactos. Con los datos de dimensión de la caja y el croquis de ubicación de las zonas de sujeción para pernos, se tiene los datos necesarios para diseñar la caja protectora.

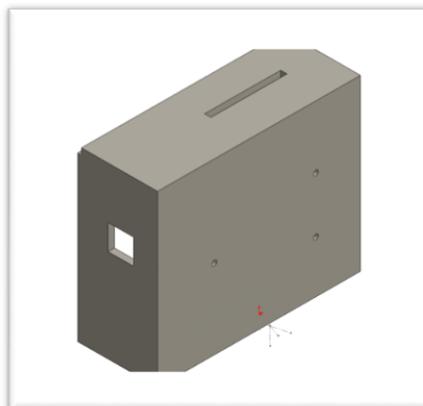


Figura 165. Isometría Caja Protectora tarjeta myRio

Esta caja posee los orificios para que mediante pernos se adjunte la tarjeta. Además se crearon ranuras respetando la configuración de los botones, puertos USB, puerto para energizar y el puerto C de entrada de señales de la tarjeta.

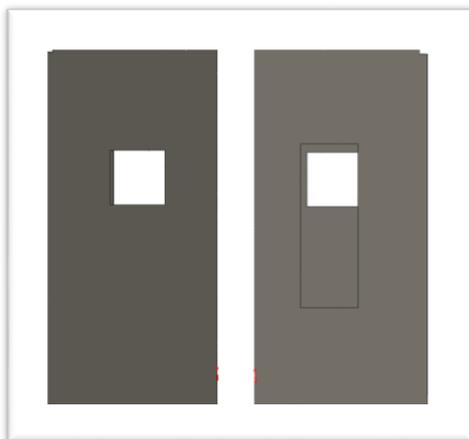


Figura 166. Ranuras (Vistas Laterales)

Para la zona que nos interesa los puertos Multiplexados A y B se cuenta con una compuerta para operar los cables de manera más fácil.

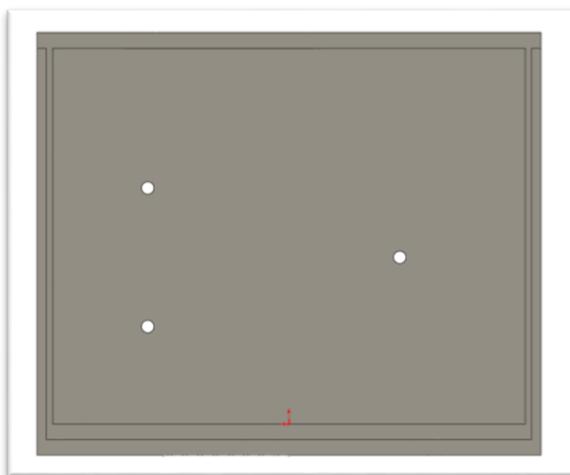


Figura 167. Compuerta de ingreso puertos MXP (Vista Frontal)

La gran abertura en esta zona de la tarjeta necesita ser compensada con una puerta o tapa que permita sellar la caja y no permitir la salida de elementos electrónicos o ingreso de agentes externos.



Figura 168. Tapa Caja de Protección

Según las especificaciones de la tarjeta los puertos Multiplexados quedan localizados en la parte inferior de la caja, esto influye para la creación de un circuito con puertos y borneras que permitan obtener las entradas analógicas requeridas.



Figura 169. Circuitos MXP

Ensamblada la tarjeta a la caja se determina que la mejor y más segura ubicación es en el punto donde convergen los tubos C y B adyacente al tubo A. Para la sujeción de la caja a la bicicleta se utiliza silicona caliente (pistola y tubos) y una cinta autosoldable.

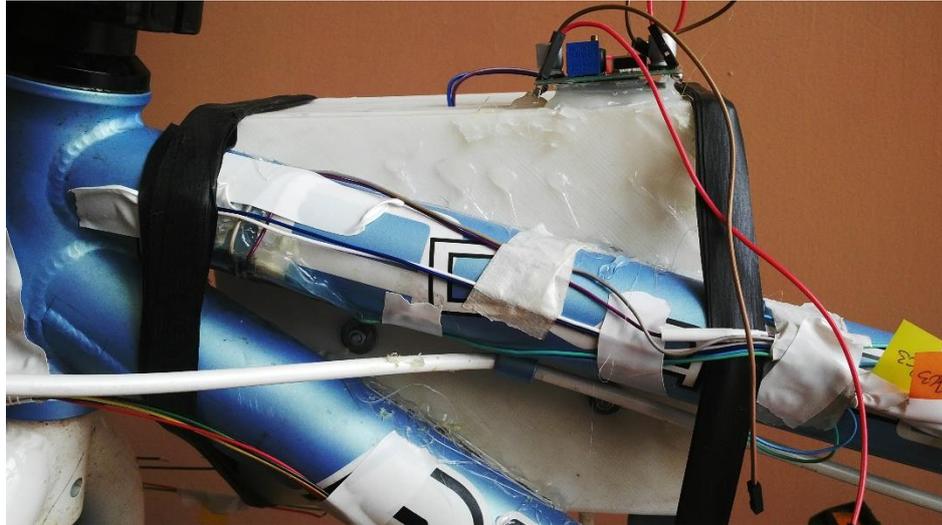


Figura 170. Ensamblaje Bicicleta-Caja Protectora



Figura 171. Ubicación de la Caja

Para alimentar con la energía requerida al myRio se coloca una batería de 12 voltios con una capacidad de corriente de 4 amperios por hora. Suficiente para la aplicación del proyecto y para un consumo promedio de 2 vatios por parte de la tarjeta. Este elemento se coloca entre los tubos B y D, asentado en una base que se ancla en el tubo C. Mediante un adaptador conectado a cables y pinzas se transfiere la energía a la tarjeta.



Figura 172. Sistema de Distribución de Energía

El puerto C de la tarjeta cuenta con pines de alimentación con valores de 0-5 y -15 a +15 Voltios, satisfaciendo completamente las necesidades para excitar los puentes y operar los amplificadores de instrumentación.

4.3.3. UBICACIÓN DE ACONDICIONADORES DE SEÑAL EN LA CAJA PROTECTORA

Los puentes-amplificadores deben colocarse de tal manera que su ubicación y distancia sean adecuadas para emparejar los sensores y tarjeta de adquisición de datos con su respectivo orden. El lugar más adecuado para

fijar estos dispositivos es la parte superior y frontal de la caja. Resulta conveniente para las borneras y accesible para los cables de los sensores. La única restricción que se presenta es el número de acondicionadores que pueden ser añadidos, esto depende del tamaño de los circuitos. Adicionalmente en la parte superior de la caja se encuentra un regulador de voltaje que es alimentado por la tarjeta con 5 voltios. Esto sirve para asegurar que no lleguen más de 3 voltios a los sensores. Esto por motivos de recomendación del fabricante de las galgas.



Figura 173. Ubicación Circuitos Puente-Amplificador y Regulador Voltaje

Las borneras que se encuentran ubicadas en la parte inferior de la tarjeta se conectan directamente a la salida de los circuitos. Para agilizar el proceso de cambio de sensor para evaluar otra zona crítica. El material que se utiliza para anclar los circuitos es una cinta adhesiva de doble cara, resistente a vibración y fuerzas axiales. Para cambiar de acondicionador solo se necesita aplicar una fuerza paralela a la superficie de contacto y retirar el elemento. La alimentación de energía que entrega el regulador se conecta al circuito más cercano, este circuito mediante cable distribuye la energía a otro circuito y

finalmente todos los circuitos cuentan con el voltaje de excitación y de operación para los amplificadores.



Figura 174. Conexiones Completas Regulador-Circuitos

4.4. PRUEBAS PRELIMINARES DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA TRANSDUCTORES-TARJETA-EQUIPO

Para asegurar la confiabilidad del sistema en el sitio de pruebas, se debe probar que las conexiones entre los sensores, acondicionadores y tarjeta se encuentren en excelente estado y operables. De igual manera se necesita verificar que el programa de Labview se compile de manera correcta. En primer lugar se verifica que los cables de los sensores entreguen una resistencia muy cercana a la descrita en sus especificaciones.



Figura 175. Medición de Resistencia en los sensores

En los circuitos de acondicionamiento de señal que se suministra voltaje de excitación del puente y de operación para amplificadores, se mide el voltaje de entrada. Se comprueba que a todas las borneras de voltaje de entrada de los circuitos lleguen valores de voltaje cercanos a 3 voltios.

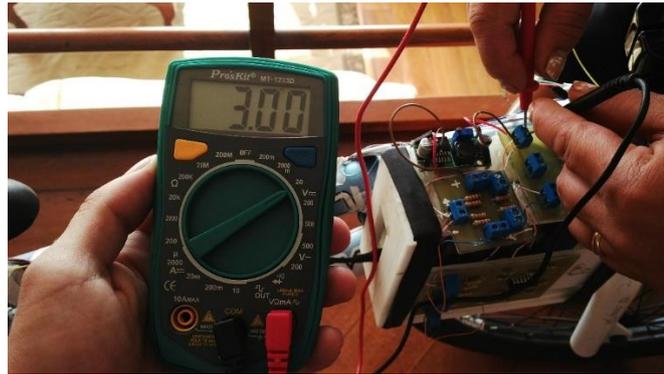


Figura 176. Voltaje Alimentación Circuito 1



Figura 177. Voltaje Alimentación Circuito 2

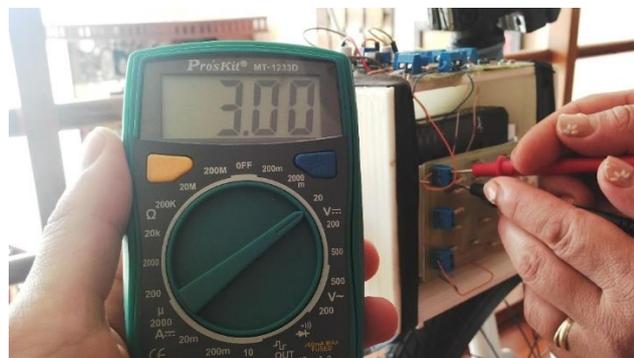


Figura 178. Voltaje Alimentación Circuito 3

Las borneras que tienen como salida a la señal de voltaje amplificado deben estar conectadas a las borneras de conexión al puerto multiplexado de la tarjeta. En el puerto multiplexado existen dos borneras, en una vista frontal de este elemento la bornera izquierda corresponde a tierra analógica (voltaje 0) y la bornera derecha las entradas analógicas. En esa bornera de derecha a izquierda en orden se hallan las entradas 0, 1 y 2 respectivamente.

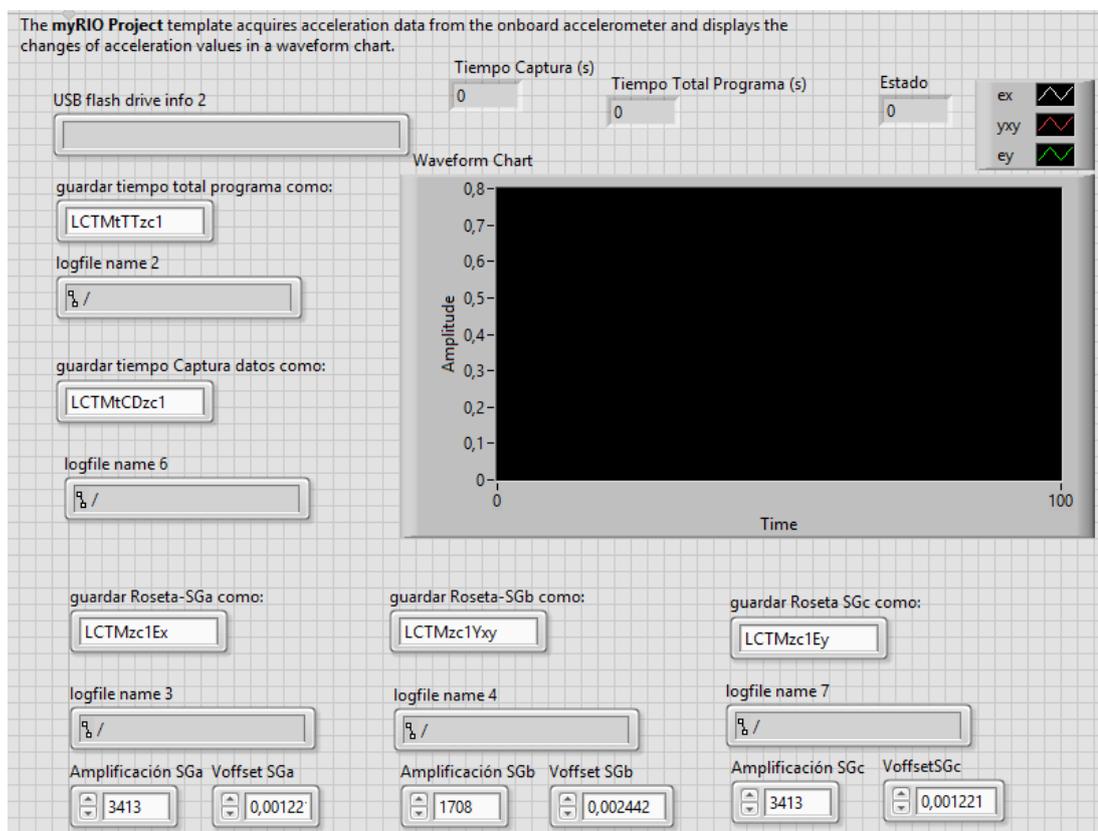


Figura 179. Panel del Control Programa Adquisición de Datos en Labview

El tiempo de captura de datos y el tiempo total de ejecución del programa así como los valores de deformación unitaria de cada galga poseen una text box en la cual se escribe el nombre con el cual se almacenarán los archivos en formato .csv. Adicionalmente se crea controles numéricos para cada sensor con el fin de cambiar los rangos de amplificación de la señal. Por defecto se encuentran los valores de amplificación y voltaje de referencia para

las zonas críticas 1 y 3. Para el ensayo de la zona crítica 2 se debe cambiar los valores de amplificación y voltaje de referencia en la galga c.

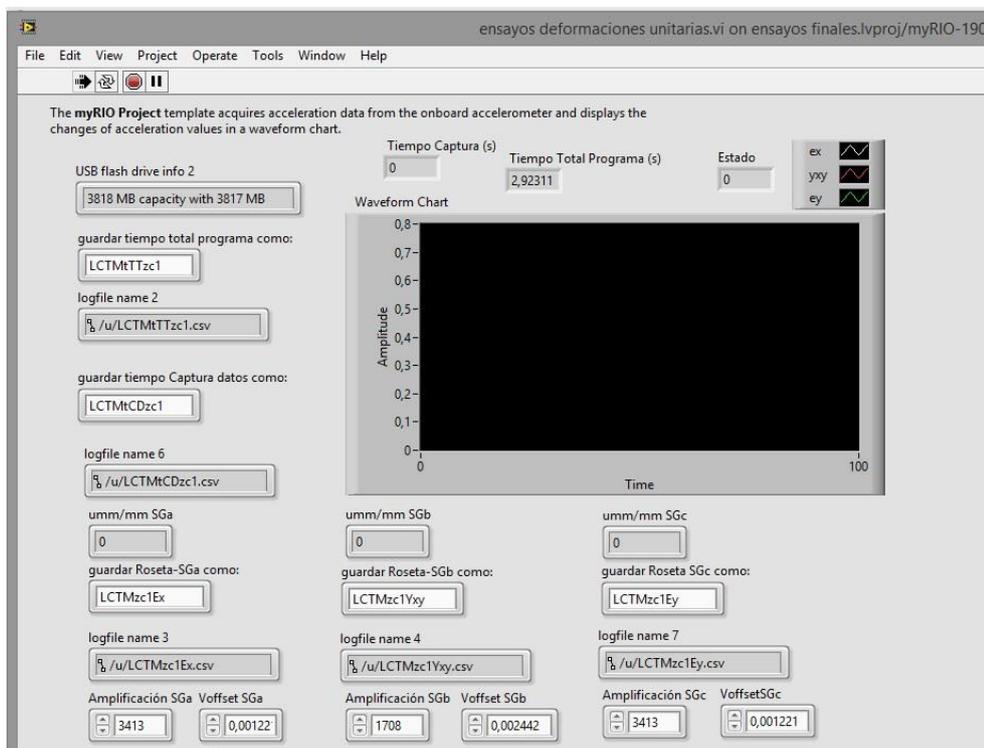


Figura 180. Compilación del Programa sin pulso de Captura de Datos

El programa se prueba para las tres zonas críticas, es fundamental verificar que los nombres con los que se almacena el archivo correspondan a la zona evaluada y los valores de deformación unitaria sean lo más cercanos a cero. Deben ser cercanos a cero porque la bicicleta no está expuesta a ningún tipo de carga. Simplemente se conecta los sensores para verificar que el programa funcione correctamente, las constantes de amplificación estén correctamente colocadas y los datos arrojados en reposo del vehículo sean válidos.

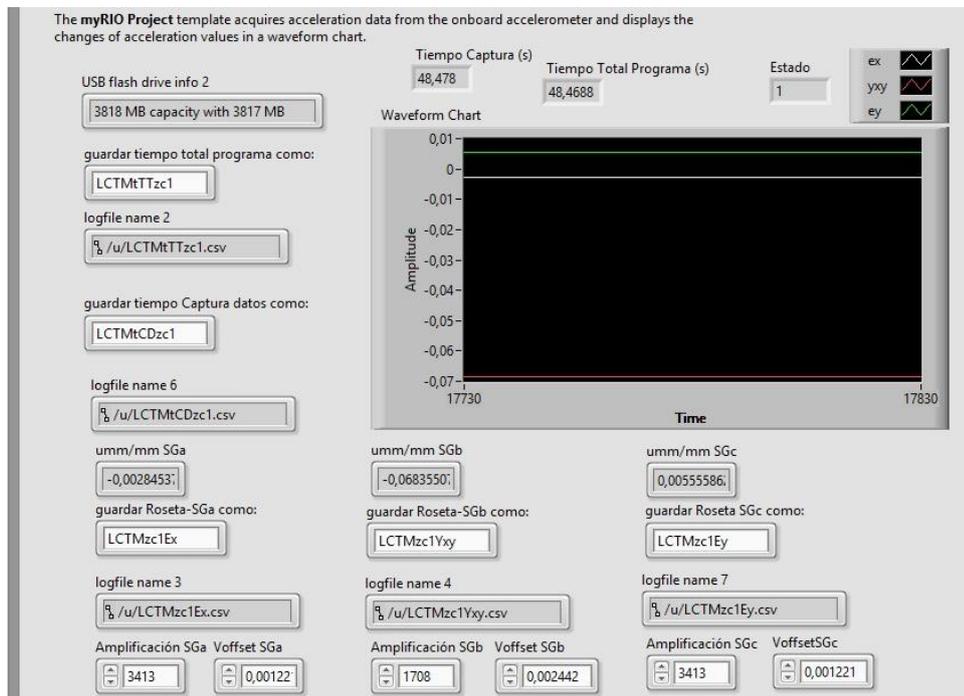


Figura 181. Pulso Captura de Datos Zona Crítica 1

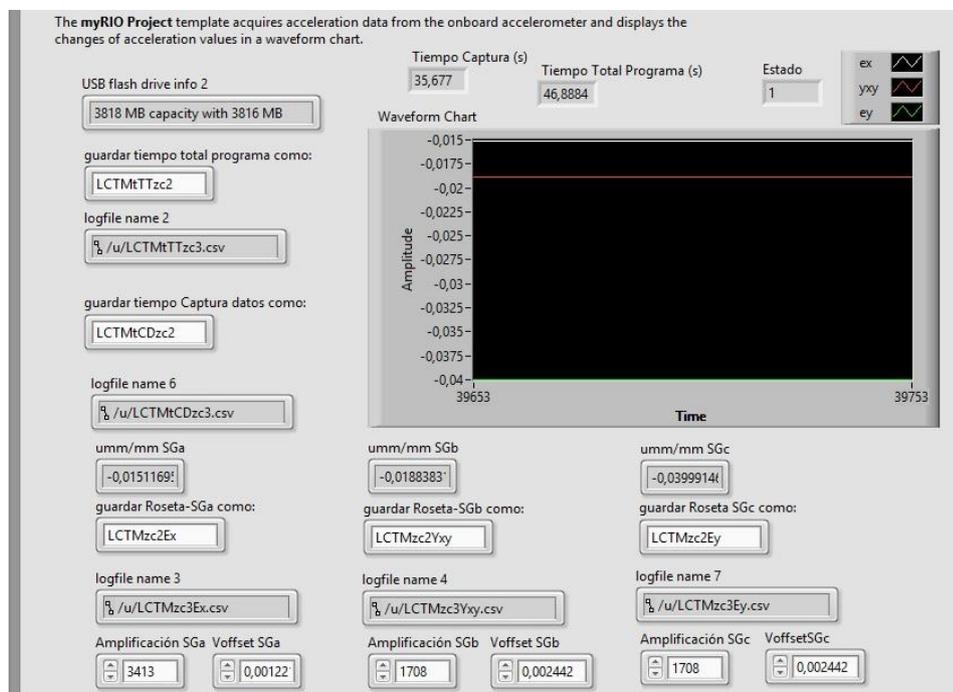


Figura 182. Pulso Captura de Datos Zona Crítica 2

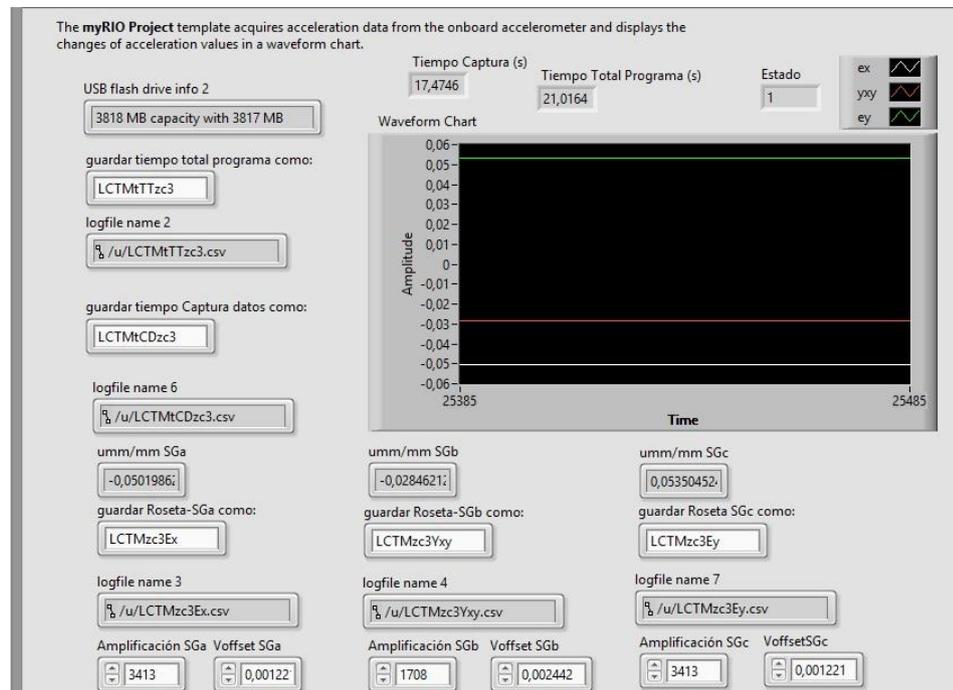


Figura 183. Pulso Captura de Datos Zona Crítica 3

Se constata en las tres zonas críticas que los archivos y valores corresponden de manera idónea a los esperados. Las conexiones desde y hacia la tarjeta no representan ningún problema así mismo como la alimentación de energía desde la batería. El conjunto electrónico compuesto por sensores, acondicionadores y tarjeta está apto para realizar las pruebas en pista.

4.5. EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

El sitio para realizar las pruebas finales es el mismo sitio de ejecución de las pruebas de aceleraciones, la pista de BMX modalidad Race del parque La Carolina. El conductor sigue siendo el mismo de las pruebas anteriores. Previo a los giros el conductor realiza maniobras de calentamiento y reconocimiento

del lugar. Para continuar con el proceso de conexión de sensores, emparejamiento de dispositivo al ordenador y compilación del programa.

En cada giro del trayecto solo es posible realizar la adquisición de datos de una sola roseta, por este motivo el número de ensayos determinados para este tramo queda definido en tres. Empezando por la zona crítica uno y culminando en la zona crítica tres.

El proceso empieza con la conexión de la batería a la tarjeta de adquisición de datos, la misma que entrega la alimentación necesaria a los circuitos de acondicionamiento.



Figura 184. Conexión Batería a Tarjeta

El siguiente paso después de tener encendido el sistema de adquisición de datos y energizados los circuitos, es conectar los sensores en las borneras de los circuitos. Previamente conectó la señal acondicionada a las borneras del puerto multiplexado.



Figura 185. Conexión Sensores-Acondicionadores de Señal

Este proceso se deshace para la roseta que fue ensayada y la siguiente en ser probada debe ser conectada de la misma manera. Los pasos se repiten hasta haber puesto a trabajar todas las rosetas a su respectivo giro. Los cables de cada sensor se ajustan al marco de tal manera que no exista posibilidad de sufrir daños y causar molestias al conductor.

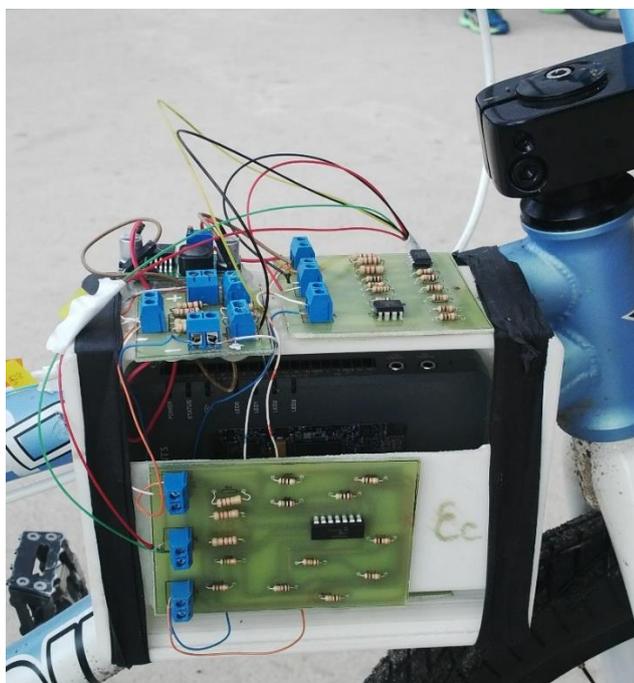


Figura 186. Conexiones Completadas para una Roseta

Al momento de completar todas las conexiones de una roseta, se enlaza la tarjeta de adquisición con el computador mediante un cable USB.



Figura 187. Conexión Data Logger-PC

El programa que realiza la adquisición de datos, filtrado, calculo y almacenamiento de datos deber ser descargado e inicializado desde el computador. El programa Labview está ejecutando debido al estado de suspensión del computador. Simplemente de debe emparejar la tarjeta y el ordenador. Los datos se almacenan en un dispositivo USB que se conecta directamente al dispositivo de adquisición de datos.



Figura 188. Compilación del Programa dese el ordenador

Después de ejecutar el programa desde la computadora, se desconecta el cable de la tarjeta. El conductor señala el momento que está listo para iniciar el recorrido y se pulsa una vez el botón de la tarjeta para iniciar la captura de datos. El primer estado ejecuta el programa pero no activa los puertos para capturar datos. El primer pulso activa los puertos y empieza a leer las señales de los sensores. Finalmente un segundo pulso al botón finaliza el programa y todos los datos se almacenan en la memoria USB introducida.

Programa de Captura de Datos en Labview: Ver Anexo 7

Finalizado el trayecto, se detiene el programa directamente desde la tarjeta y se espera por un pequeño lapso de tiempo. Este tiempo sirve para que los vectores de tiempo y deformaciones unitarias se guarden correctamente en la memoria USB introducida en la tarjeta.



Figura 189. Transferencia de Datos desde Memoria USB al Ordenador

De igual forma, el procedimiento se repite hasta evaluar las tres zonas críticas. Los datos se guardan en función de la galga medida y la zona crítica. Estos datos se almacenan en el ordenador a la espera de la fase de procesamiento de datos.

4.6. OBTENCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE RESULTADOS

Los datos obtenidos en los ensayos se guardan en un formato llamado “.csv”, que significa valores separados por comas. Pero al momento de abrir estos archivos en el programa de Excel se muestran separados por puntos. Simplemente se debe cambiar el símbolo de separación para decimales en la configuración del Excel.

En el estado uno del programa de adquisición de datos se tiene a las señales en un estado denominado “OFF” que quiere decir apagado. No se capta ninguna señal de los sensores, simplemente se arrojan ceros al vector de deformaciones unitarias. Con el pulso en el botón a bordo de la tarjeta tenemos los datos que arrojan los sensores, estos datos se apilan en el vector hasta dar el segundo y definitivo pulso. Para esos instantes el vector tiene almacenados los datos de tiempo y deformaciones unitarias. El vector es de tipo columna y por cada vector obtenido se tiene un archivo de Excel. Es decir en el ensayo de una roseta se tienen cinco vectores, dos con los datos de tiempo total y captura de datos y tres con los valores de deformación unitaria de cada sensor. El vector de tiempo total solo muestra el tiempo transcurrido desde la compilación desde el ordenador hasta el pulso final después del ensayo. El tiempo por captura de datos es necesario para saber el momento en que se producen los esfuerzos, los cuatros vectores poseen como datos iniciales el valor de 0. Esto se debe a los valores nulos que se obtienen antes de ejecutar el primer pulso.

| | A |
|---|---|
| 1 | 0 |
| 2 | 0 |
| 3 | 0 |
| 4 | 0 |
| 5 | 0 |
| 6 | 0 |
| 7 | 0 |
| 8 | 0 |

Figura 190. Datos Nulos previos a la captura

Manualmente se debe buscar la celda que contenga un valor diferente de cero. Resulta más fácil realizar la búsqueda en el vector de tiempo de captura de datos. Es fácil observar como transcurre el tiempo y saber que cuando empieza a recoger los datos.

| | A |
|-----|-------|
| 244 | 0 |
| 245 | 0 |
| 246 | 0 |
| 247 | 0 |
| 248 | 0.012 |
| 249 | 0.024 |
| 250 | 0.036 |
| 251 | 0.049 |
| 252 | 0.061 |
| 253 | 0.075 |

Figura 191. Datos Iniciales de la Captura de Datos

En este caso el valor inicial de captura de datos inicia en la celda A247 con el primer dato de valor 0. Todas las filas desde 1 hasta 246 deben desecharse para tener los datos de interés.

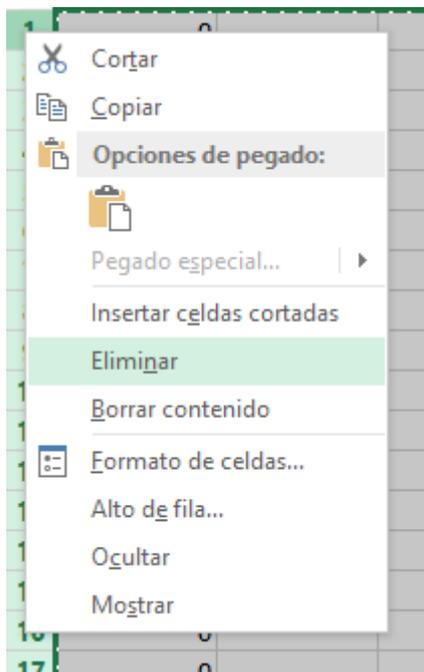


Figura 192. Eliminación de Filas con datos nulos

Con la eliminación de todas esas filas se obtiene el vector listo para realizar los cálculos.

| | A |
|----|-------|
| 1 | 0 |
| 2 | 0.012 |
| 3 | 0.024 |
| 4 | 0.036 |
| 5 | 0.049 |
| 6 | 0.061 |
| 7 | 0.075 |
| 8 | 0.087 |
| 9 | 0.1 |
| 10 | 0.113 |
| 11 | 0.126 |
| 12 | 0.138 |

Figura 193. Depuración de Datos

Para finalizar se guarda este vector como archivo .xls, de no ser así y mantener la extensión .csv el programa de procesado de datos no reconoce el vector.

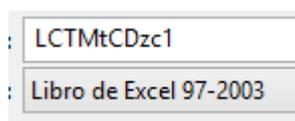


Figura 194. Formato correcto de almacenamiento .xls

Este proceso es similar para los vectores con datos de deformación unitaria, de igual manera se eliminan el mismo número de filas y se guarda con el mismo formato.

| IDB ▶ DAVID ▶ ESPE ▶ TESIS DB ▶ PRUEBAS EN CAMPO-SIMULACIONES ▶ ZC1 ▶ ZC1 | | | |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|--------|
| Nombre | Fecha de modifica... | Tipo | Tamaño |
| LCTMtCDzcc1 | 31/03/2015 22:24 | Hoja de cálculo d... | 231 KB |
| LCTMzcc1Ex | 31/03/2015 22:01 | Hoja de cálculo d... | 234 KB |
| LCTMzcc1Ey | 31/03/2015 22:05 | Hoja de cálculo d... | 234 KB |
| LCTMzcc1Yxy | 31/03/2015 22:23 | Hoja de cálculo d... | 234 KB |

Figura 195. Carpeta de datos Zona Crítica 1

Todos los pasos se aplica de la misma manera para las dos zonas restantes.

| DB ▶ DAVID ▶ ESPE ▶ TESIS DB ▶ PRUEBAS EN CAMPO-SIMULACIONES ▶ ZC2 ▶ ZC2 | | | |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|--------|
| Nombre | Fecha de modifica... | Tipo | Tamaño |
| LCTMtCDzcc2 | 27/03/2015 16:40 | Hoja de cálculo d... | 230 KB |
| LCTMzcc2Ex | 31/03/2015 22:44 | Hoja de cálculo d... | 234 KB |
| LCTMzcc2Ey | 31/03/2015 23:15 | Hoja de cálculo d... | 234 KB |
| LCTMzcc2Yxy | 31/03/2015 23:21 | Hoja de cálculo d... | 234 KB |

Figura 196. Carpeta de datos Zona Crítica 2

/IDB > DAVID > ESPE > TESIS DB > PRUEBAS EN CAMPO-SIMULACIONES > ZC3 > ZC3

| Nombre | Fecha de modifica... | Tipo | Tamaño |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|--------|
|  LCTMtCDzc3 | 27/03/2015 16:40 | Hoja de cálculo d... | 230 KB |
|  LCTMzc3Ex | 31/03/2015 23:57 | Hoja de cálculo d... | 234 KB |
|  LCTMzc3Ey | 01/04/2015 0:01 | Hoja de cálculo d... | 234 KB |
|  LCTMzc3Yxy | 01/04/2015 0:01 | Hoja de cálculo d... | 234 KB |

Figura 197. Carpeta de datos Zona Crítica 3

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1. PROCESAMIENTO DE RESULTADOS

Después de finalizadas la pruebas en campo y obtenidos los vectores con extensión de archivo .xls que contienen los datos de tiempo y deformaciones unitarias ε_x , ε_y y γ_{xy} , se puede realizar el tratamiento de datos necesario para efectuar un análisis de esfuerzos. Para determinar en primera instancia los esfuerzos normales y el esfuerzo cortante en estado plano se recurre a la definición de esfuerzos en un estado plano. Resulta ambiguo aplicar directamente la ley de Hooke que contempla el producto entre el módulo de elasticidad o rigidez por la deformación unitaria normal o tangencial respectivamente. La Ley de Hooke para Esfuerzos en un estado plano describe lo siguiente:

Ecuación No. 58: Ley de Hooke Esfuerzos en Estado Plano

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1 - \mu^2} (\mu\varepsilon_x + \varepsilon_y) \\ \tau_{xy} &= \frac{E}{2(1 + \mu)} \gamma_{xy} = G\gamma_{xy}\end{aligned}\tag{58}$$

Estos tres esfuerzos son necesarios para realizar el cálculo del Círculo de Mohr y el Esfuerzo de Von Mises. Por la excesiva cantidad de datos resulta extremadamente tedioso y sofocante realizar el cálculo manualmente. Los vectores pueden ser operados en el mismo programa de Excel, pero los arreglos y adecuaciones para obtener gráficos y resultados máximos requieren de un notable lapso de tiempo. La opción más accesible y rápida de todas es generar un programa que utilice como datos de entrada los vectores

de deformación unitaria, tiempo, las constantes requeridas como el Módulo de Elasticidad del material y el coeficiente de poisson. El código debe calcular los esfuerzos en estado plano, determinar los esfuerzos principales y cortante máximo de círculo de Mohr y el Esfuerzo de Von Mises. De igual manera graficar los todos los esfuerzos en el tiempo y presentar el valor más representativo del esfuerzo de von mises. Un programa capaz de trabajar con grandes cantidades de datos, generar gráficos y operar con facilidad vectores satisface por completo el requerimiento. Además el lenguaje de programación y las funciones internas del programa deben ser claramente conocidas por el programador del mismo, siempre y cuando sepa que los valores y resultados obtenidos tengan una clara expectativa de la realidad. El programa más apto para realizar este masivo cálculo de datos es Matlab, diseñado para trabajar con matrices y operar datos de manera más precisa.

Las funciones aritméticas que sirven para calcular los datos y las opciones de graficar resultados son muy fáciles de utilizar. Pero la función que enlaza los valores de Excel de cada vector para generar un vector en Matlab y operar con facilidad los datos es extremadamente importante. Ahorra el tiempo de transcribir manualmente los datos para crear un vector en Matlab.

Programa en Matlab Calculadora de Circulo de Mohr y Von Mises: Ver Anexo 8

Para evitar errores y confusiones entre los vectores de cada zona se crea una carpeta por cada roseta. En cada carpeta se encuentran los cuatro vectores de cada roseta.

| | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------|
|  ZC1 | 01/04/2015 23:58 | Carpeta de archivos |
|  ZC2 | 02/04/2015 12:42 | Carpeta de archivos |
|  ZC3 | 02/04/2015 12:43 | Carpeta de archivos |

Figura 198. Carpetas Independientes por Rosetas

En las figuras 195, 196 y 197 se pueden visualizar los archivos de cada zona crítica. En el programa, los comandos para cargar los vectores se presentan de la siguiente manera:

```
%def unitaria x
ex=xlsread('nombre del archivo.xls');
%def unitaria y
ey=xlsread('nombre del archivo.xls');
%def unitaria cortante
jxy=xlsread('nombre del archivo.xls');
%tiempo
t=xlsread('nombre del archivo.xls');
```

Figura 199. Función xlsread de Matlab

El programa y los vectores deben estar contenidos en la misma carpeta, de lo contrario se presentan errores y no compila el programa. Esto se debe a que no reconoce el vector porque no encuentra el archivo en la carpeta.

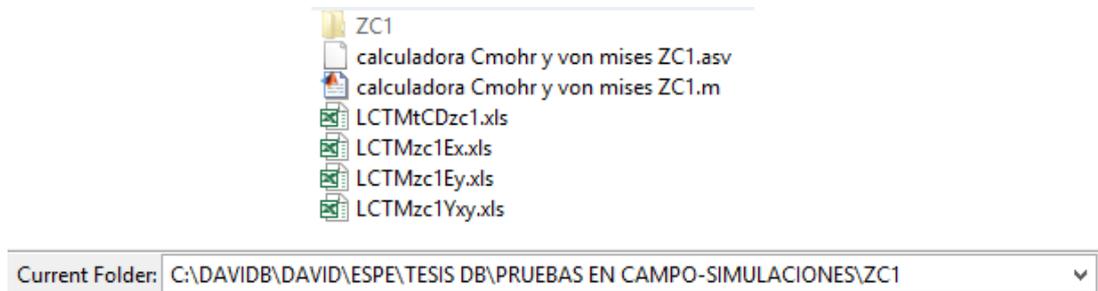


Figura 200. Ubicación Carpeta Zona Crítica 1

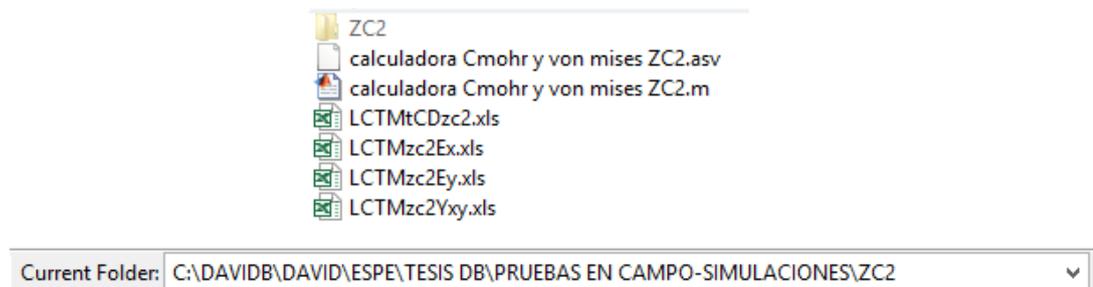


Figura 201. Ubicación Carpeta Zona Crítica 2

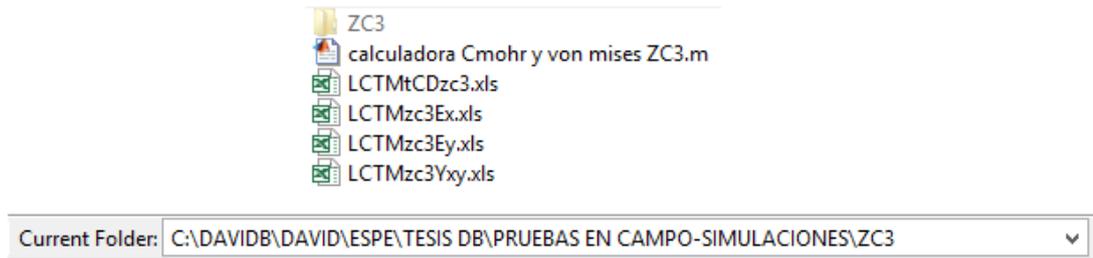


Figura 202. Ubicación Carpeta Zona Crítica 2

Como ejemplo, para correr el programa para la Zona Crítica 1 los vectores deben colocarse en los comandos xlsread de la siguiente manera:

```

%def unitaria x
ex=xlsread('LCTMzc1Ex.xls');
%def unitaria y
ey=xlsread('LCTMzc1Ey.xls');
%def unitaria cortante
jxy=xlsread('LCTMzc1Yxy.xls');
%tiempo
t=xlsread('LCTMtCDzc1.xls');

```

Figura 203. Input vectores ZC1

Finalmente en la barra de menú principal en la opción “Debug” se elige la opción “Run” o simplemente se guarda el documento de se pulsa la tecla F5.

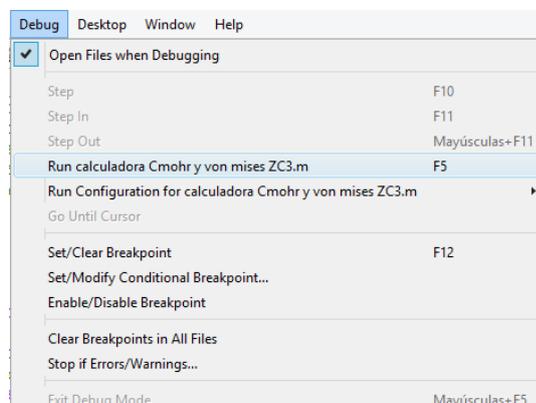


Figura 204. Compilación del Programa para ZC1

Estos pasos se realizan para las tres zonas críticas, los resultados para cada Zona son los siguientes:

- Gráfico Esfuerzo Normal X-tiempo
- Gráfico Esfuerzo Normal Y-tiempo
- Gráfico Esfuerzo Cortante-tiempo
- Gráfico Esfuerzo de Von Mises-tiempo
- Valor del Esfuerzo Máximo de Von Mises (pantalla de comandos)

Adicionalmente se presenta un mensaje indicando si los esfuerzos principales cumplen la condición:

$$\sigma_1 > \sigma_2$$

En la pantalla de comandos se imprime “El círculo está correctamente trazado”. Esto indica que las fórmulas se aplicaron de manera correcta y los datos tienen coherencia.

Resultados Zona Crítica 1: Ver Anexo 9

Resultados Zona Crítica 2: Ver Anexo 10

Resultados Zona Crítica 3: Ver Anexo 11

5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS GLOBAL

Después de realizar las tres pruebas en pista (una prueba por cada roseta) y procesar los resultados, es conveniente comparar los esfuerzos obtenidos con el trayecto de la pista. En los ensayos de aceleraciones se comprobó que el conductor posee una repetibilidad muy alta y los resultados de cada giro son casi similares.

Es necesario recordar que los esfuerzos de cada zona crítica difieren entre sí, debido a la ubicación de cada uno en el marco de la bicicleta. Se debe analizar si existe una tendencia, es decir comprobar que en los puntos de caídas y obstáculos se presenten variaciones notables en cuanto a esfuerzo se refiere.

El trayecto de la pista contiene tres tipos de obstáculos:

- Rampas tipo Meseta: Cantidad 2

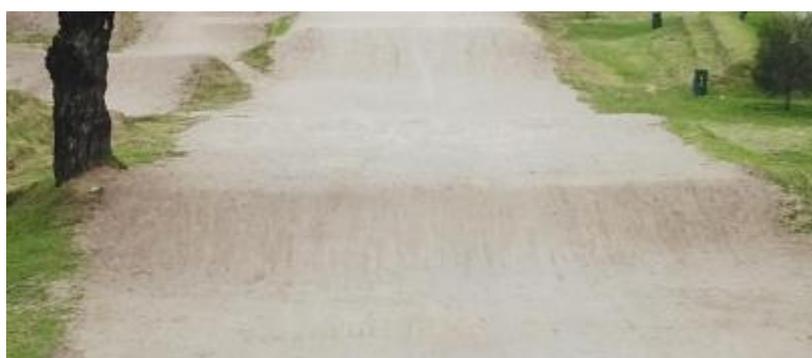


Figura 205. Rampa Meseta

- Rampas de Salto Doble: Cantidad 5



Figura 206. Rampa de Salto Doble

- Dunas: Cantidad 19



Figura 207. Dunas

La pista está compuesta por 4 trayectos definidos, para el primer trayecto se utiliza el impulso de la salida ubicada en lo más alto de la pista. Para los trayectos restantes se cuenta con tres giros en “U” diseñados con peraltes inclinados que intercambian su altura por velocidad al momento de abandonar.



Figura 208. Giros Elevados Inclinados

Los trayectos se componen de los siguientes obstáculos:

Tabla 37

Distribución de Obstáculos por Trayecto

| Trayecto/Obstáculos | R. Meseta | R. Doble | Dunas |
|---------------------|-----------|----------|-------|
| 1 | 1 | 2 | 0 |
| 2 | 0 | 3 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 8 |
| 4 | 1 | 0 | 11 |

Para visualizar de mejor manera se divide el análisis por tramos. Las gráficas de Esfuerzo de Von Mises en el tiempo de las tres zonas críticas se recortan en función del trayecto que se analice. En cada intervalo, se presenta una tabla que conjuga los valores de los gráficos con las fotografías del circuito recorrido.

5.2.1. PRIMER TRAYECTO

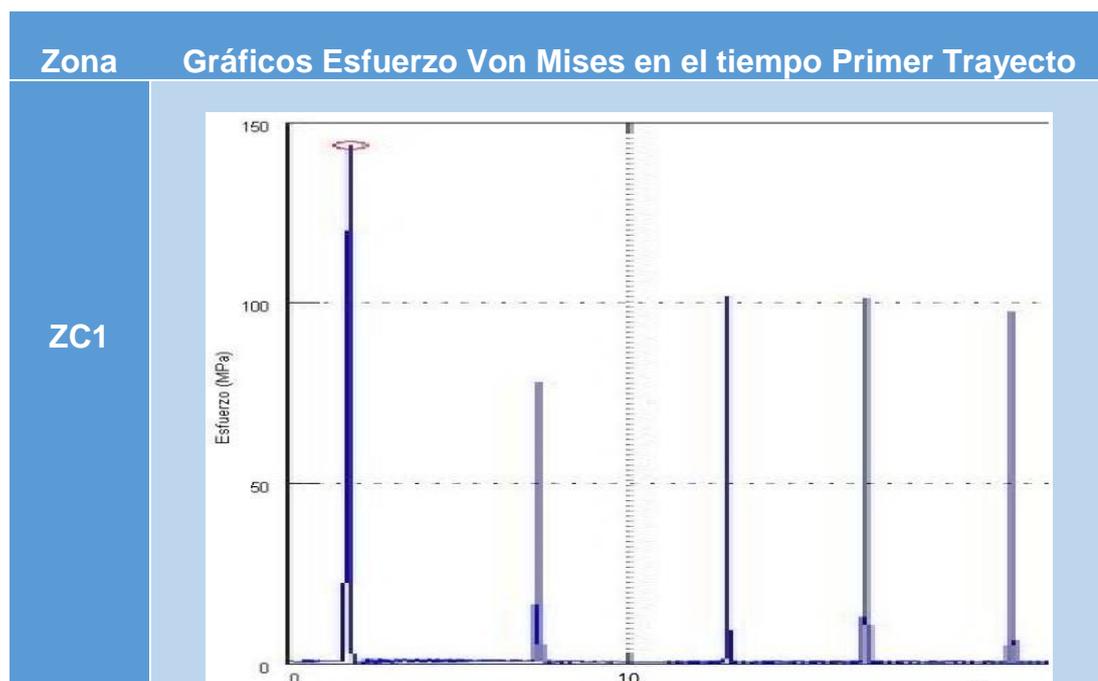
Por los obstáculos presentes en este tramo y la gran velocidad inicial que se presenta a la salida de la largada, se presume que los esfuerzos producidos sean los más altos de toda la pista.

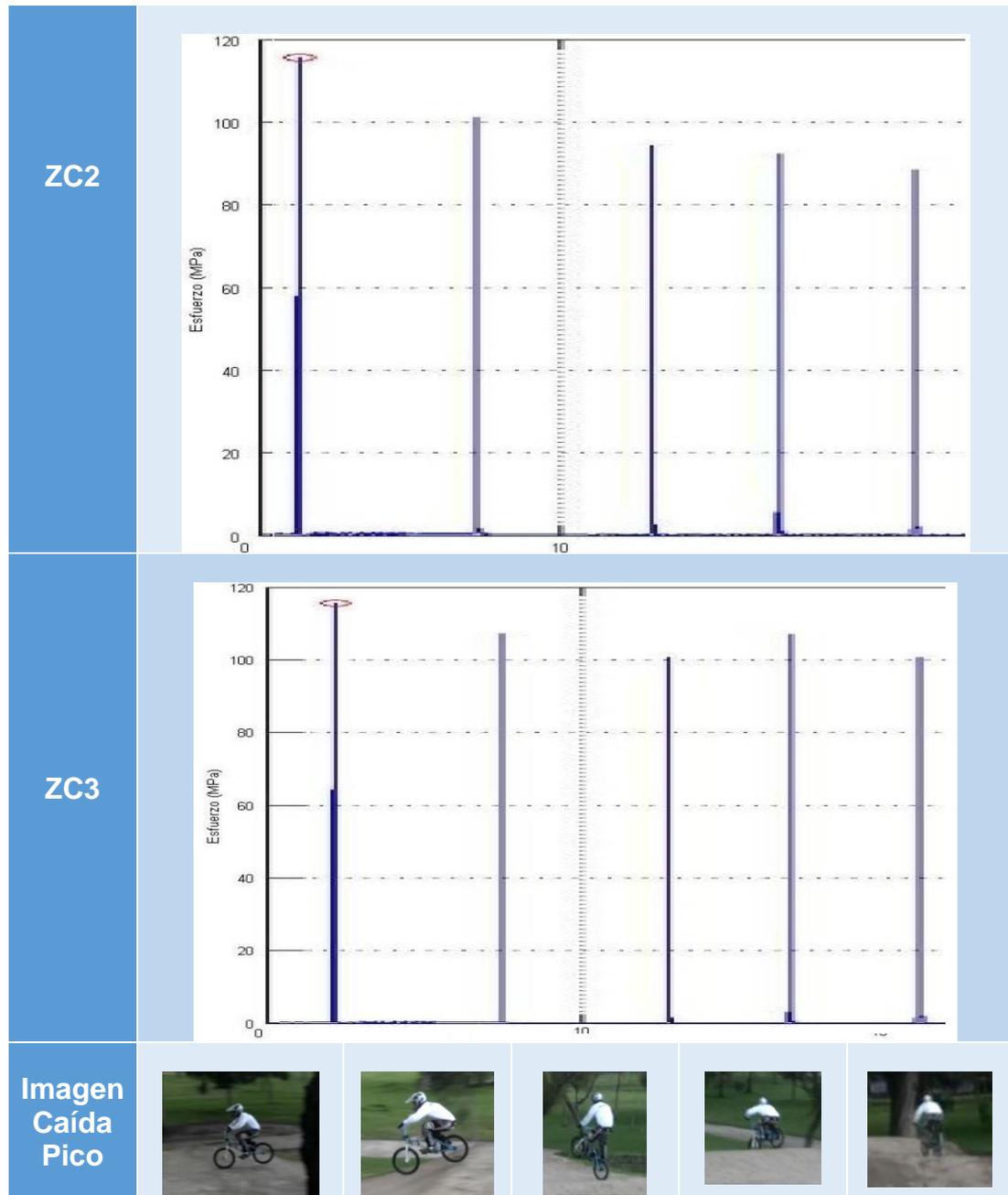


Figura 209. Primer Trayecto

Tabla 38

Análisis Primer Trayecto





El primer pico corresponde a la primera caída y al valor más altos de todos los picos del trayecto. El primer impacto lleva la mayor velocidad posible de alcanzar por el cambio de energía potencial a cinética y el torque que añade el conductor a los pedales. Conforme avanza el circuito, se pierde velocidad y

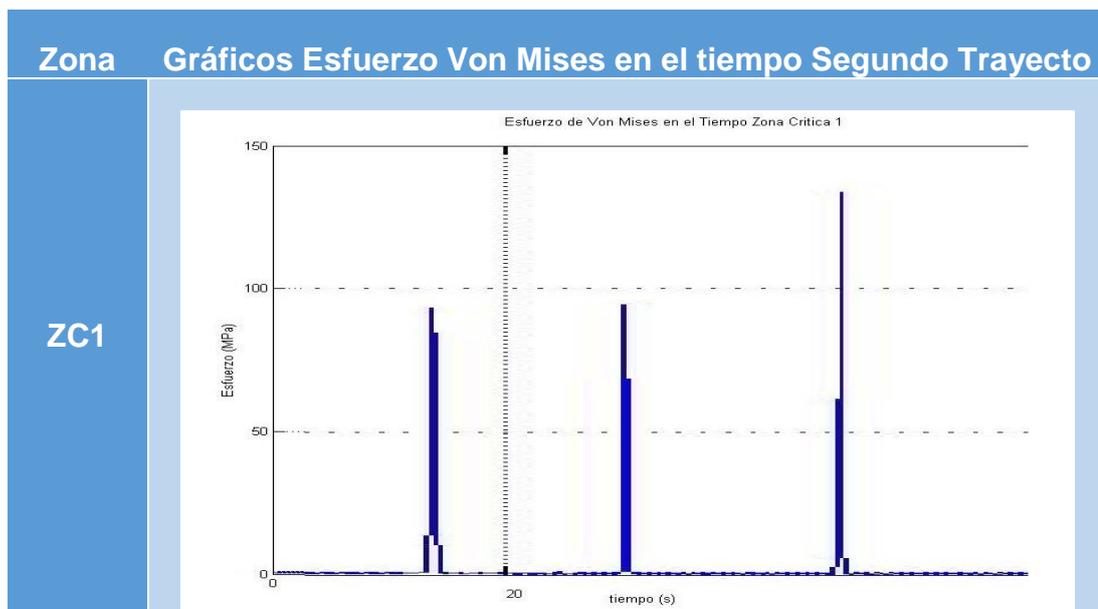
la altura que gana el conjunto ciclista-vehículo en cada obstáculo es menor. La tendencia en los gráficos es obtener valores menores a la caída inicial.

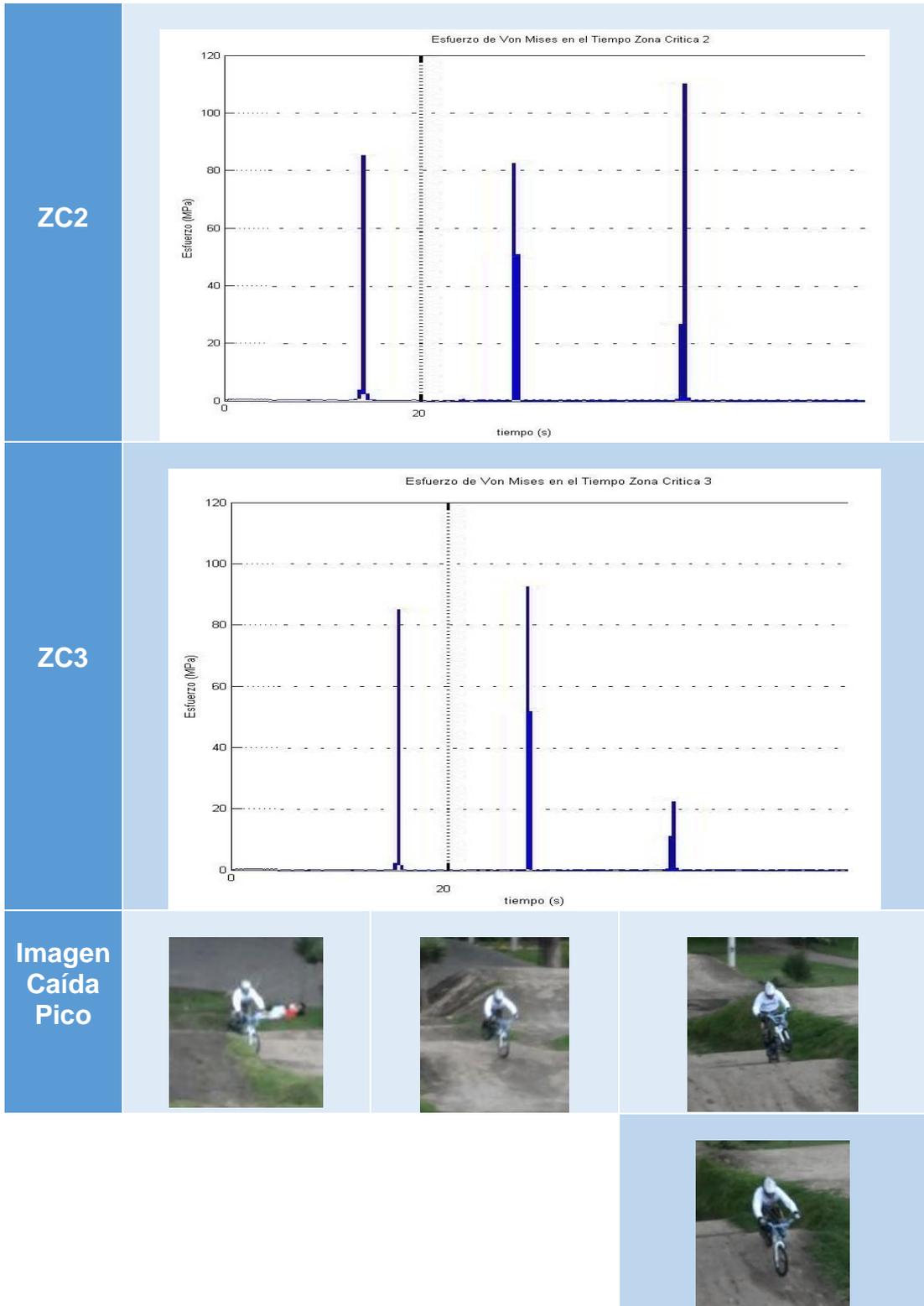
5.2.2. SEGUNDO TRAYECTO

A partir de este trayecto el impulso que entrega la pista para enfrentar los primeros obstáculos de cada intervalo es proporcionado por los giros en “U” inclinados. Los obstáculos presentes en el segundo trayecto consisten solamente en rampas dobles, con la particularidad que la distancia entre bordes de cada rampa crece conforme el ciclista recorre el trayecto. Para atravesar una rampa con mayor distancia en sus bordes se necesita mayor velocidad de entrada.

Tabla 39

Análisis Segundo Trayecto





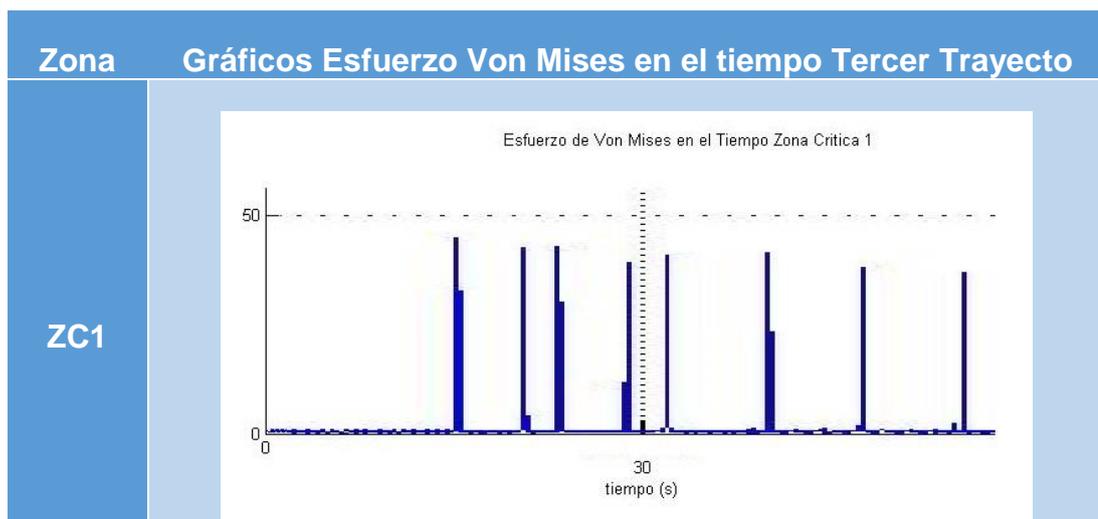
Este trayecto contiene solo tres rampas dobles, existen tendencia en la mayoría de caídas, exceptuando la zona crítica 3. Esto se debe al tipo de caída, para las primeras dos caídas las todo el peso recae sobre los dos neumáticos. Pero la última caída es totalmente diferente, primero cae con el neumático trasero y después aterriza el delantero. Por este motivo el esfuerzo de la tercera caída en la zona crítica 3 es menor. El impulso con el que se asienta la llanta delantera se amortigua por la presencia de la parte trasera en la pista. Las zonas críticas 1 y 2 si reciben completamente el golpe generado por la caída, dejando en segundo plano el esfuerzo soportado por la zona crítica 3 para la última caída.

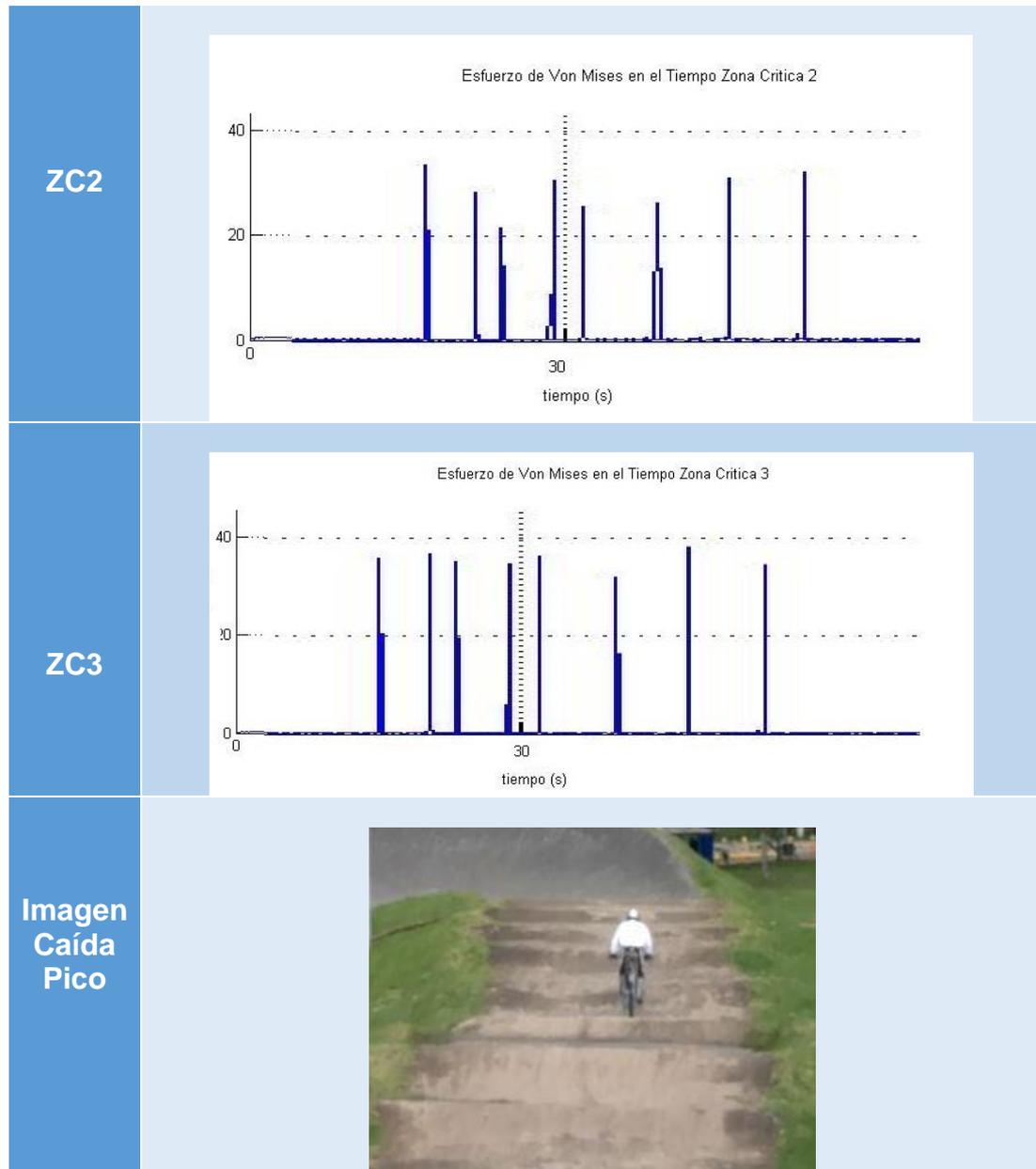
5.2.3. TERCER TRAYECTO

La intensidad en obstáculos baja en este tramo, existen simplemente ocho dunas. En este caso las dunas exigen más al ciclista, necesita agregar constantemente torque a los pedales para traspasar sin problemas la ruta.

Tabla 40

Análisis Tercer Trayecto





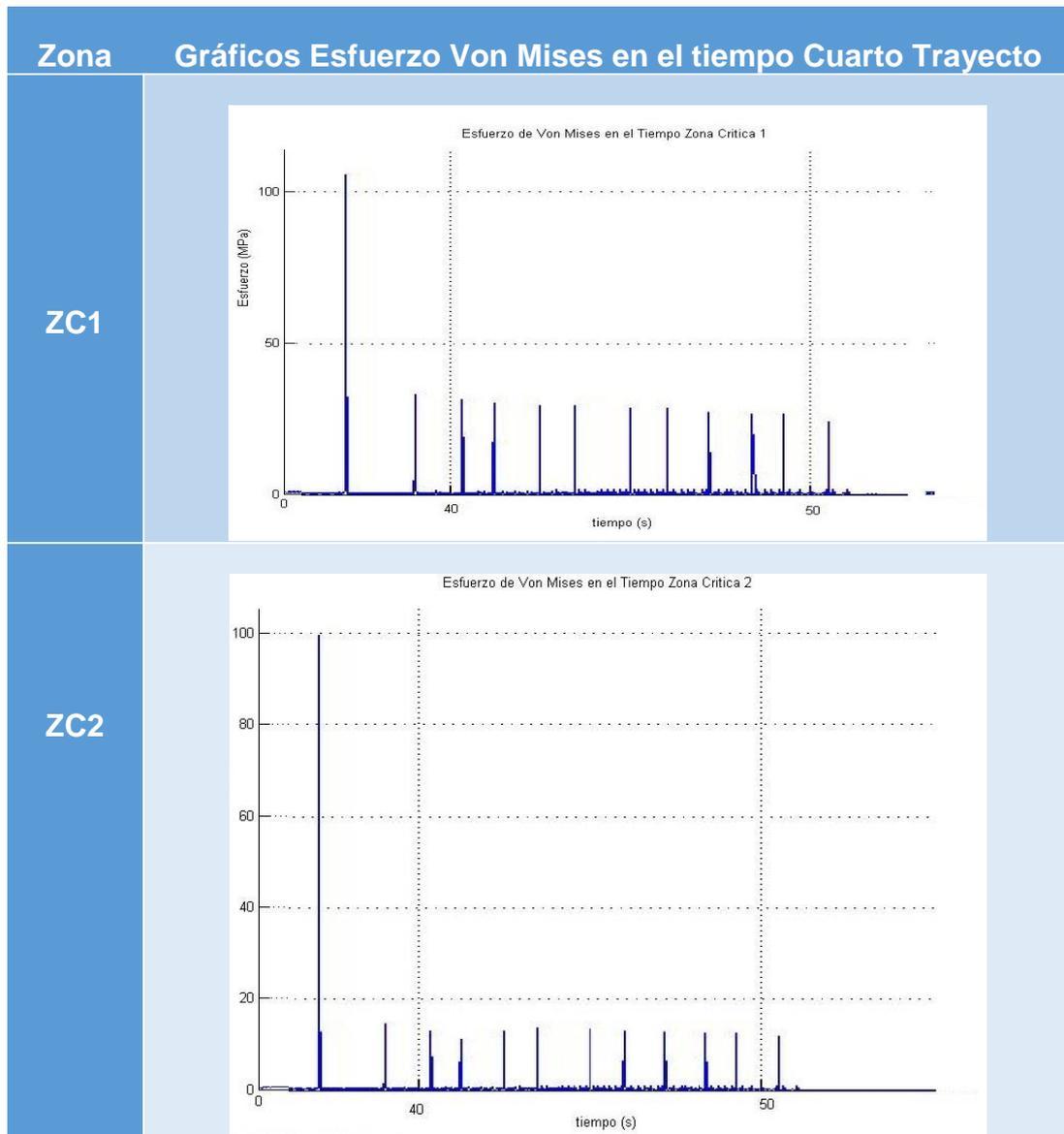
La presencia de similares trabas en todo el tercer intervalo hace variar muy poco los valores en los esfuerzos. Las dunas al ser pequeños en tamaño no representan mayor esfuerzo soportado por el marco de la bicicleta, pero si consiste en un gran trabajo empleado por el ciclista.

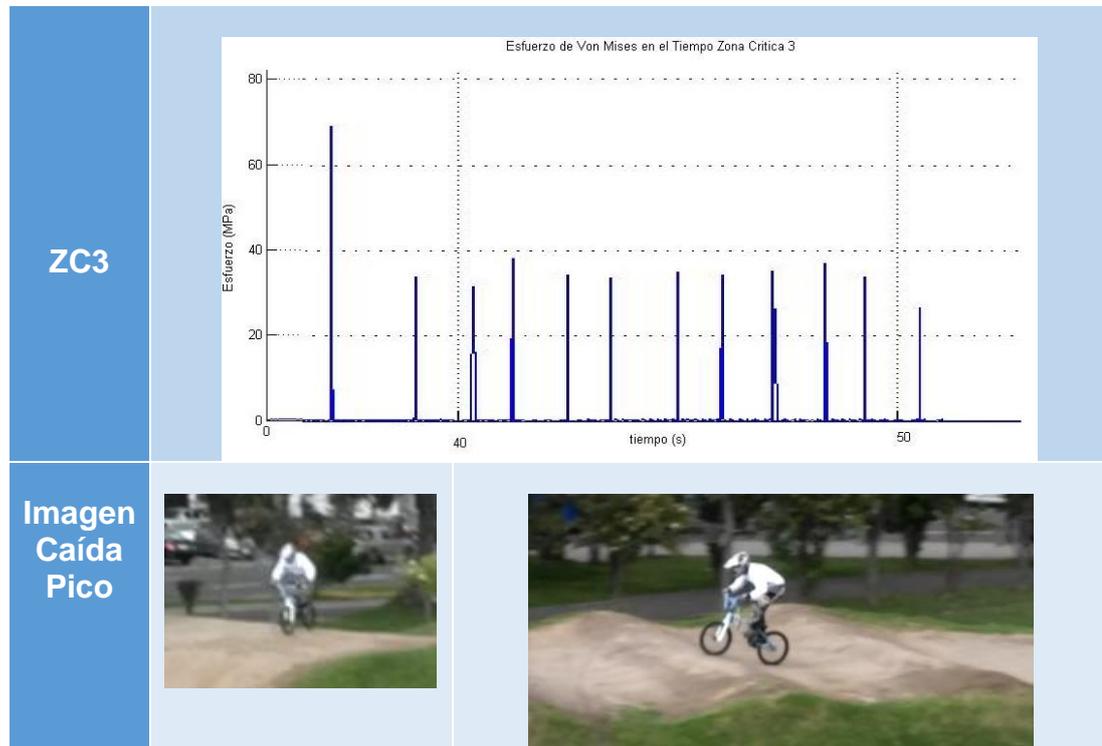
5.2.4. CUARTO TRAYECTO

La última manga del circuito Race combina un obstáculo exigente como una rampa meseta y once dunas con una separación mayor a las dunas del anterior trayecto. Este intervalo se convierte en la recta final del circuito, en el que se combina velocidad y tenacidad del conductor para tratar de llegar primero a la meta.

Tabla 41

Análisis Cuarto Trayecto





Fuente: El Autor

Como se espera, la rampa meseta provoca un esfuerzo considerable en las dos primeras zonas críticas, la tercera zona sufre menos que las anteriores. Las once dunas restantes no provocan un esfuerzo considerable y al igual que el trayecto anterior se presentan en valores casi similares

5.3. ANÁLISIS DE ESFUERZOS MÁXIMOS

Después de analizar por tramos y tomando en cuenta los obstáculos presentes en cada trayecto, es tiempo de analizar con mayor profundidad los esfuerzos más notables. Existen tres escenarios que se proponen en las simulaciones, en este análisis se debe determinar el escenario que sucede en las pruebas y observar la manera en que se manifiesta en los esfuerzos soportados por el marco.

Los tres esfuerzos más preponderantes en valor y en apariciones se presentan en los siguientes obstáculos, los esfuerzos se ordenan de mayor a menor:

- Trayecto 1: Primera Rampa Meseta

El primer obstáculo de todo el circuito es el responsable de generar el mayor esfuerzo soportado por el marco de la bicicleta. Esto producido por la mayor velocidad posible producida por la rampa de largada y la superficie de caída que brinda la rampa.



Figura 210. Secuencia de Imágenes Caída Esfuerzo Máximo 1

La secuencia de imágenes de la caída muestra claramente el aterrizaje de la bicicleta en sus dos llantas. El peso del ciclista se distribuye entre los pedales y los manubrios del volante, esto permite discriminar información. El escenario 3 que corresponde a puntualizar todo el peso en los pedales queda descartado. Ahora hay que revisar la manera en que se inclina la bicicleta al caer. El vehículo se encuentra completamente el horizontal al momento de caer, los brazos balancean el ángulo de giro de la bicicleta. Para que esto ocurra, la fuerza aplicada por los brazos tiene que ser aplicada verticalmente hacia abajo. El escenario que se cumple en esta caída es el número 1, el peso distribuido verticalmente en los pedales y los manubrios. El esfuerzo de Von Mises producido en este punto tiene el valor de:

Tabla 42

Valores Esfuerzo Máximo 1 por Zonas

| Zona Crítica | Esfuerzo VM (MPa) |
|--------------|-------------------|
| 1 | 143.76 |
| 2 | 115.53 |
| 3 | 115.50 |

- Trayecto 2: Tercera Rampa Doble

Una suposición que conlleva este punto de análisis es decir que el vehículo llega al último obstáculo con la velocidad más baja del intervalo. En la realidad esto no ocurre, el impulso que imprime el ciclista para superar los posteriores obstáculos entregan velocidad. El propio impulso que suministra el ciclista permite llegar con una velocidad considerable al obstáculo en análisis.

**Figura 211. Secuencia de Imágenes Caída Esfuerzo Máximo 2**

En la primera imagen de la cinta se puede observar la altura ganada por el sistema vehículo-ciclista debido a la velocidad de entrada al obstáculo. La segunda fotografía muestra como cae la bicicleta, en la llanta trasera e inclinada. El ciclista no balancea el vehículo para este caso, lo que indica que utiliza sus brazos para acercar el volante hacia su pecho. Con estos argumentos el escenario más idóneo que ocurre en este lapso es el número

2. El peso del ciclista distribuido en pedales y manubrios, vertical y horizontal respectivamente. Los esfuerzos captados en este punto son los siguientes:

Tabla 43

Valores Esfuerzo Máximo 2 por Zonas

| Zona Crítica | Esfuerzo VM (MPa) |
|--------------|-------------------|
| 1 | 138.95 |
| 2 | 112.53 |
| 3 | 23.05 |

- Trayecto 4: Rampa Meseta

En la recta final del circuito, el obstáculo más exigente del lapso después de salir del último giro en “U” con el mayor impulso posible del trayecto. Este intervalo se encuentra en la parte más baja de la pista.

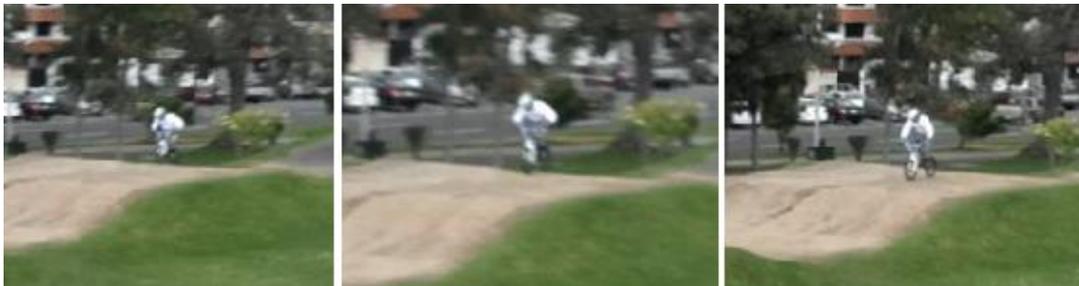


Figura 212. Secuencia de Imágenes Caída Esfuerzo Máximo 3

La bicicleta llega con el impulso suficiente para ganar una pequeña altura de salto. Las condiciones de este obstáculo permiten que el vehículo realice un contacto con la superficie mediante sus dos neumáticos al mismo tiempo. Para que este fenómeno ocurra debe el ciclista nuevamente balancear el ángulo de giro de la bicicleta para mantener una posición horizontal. El escenario que aflora en este punto es el primero, se presentan los siguientes esfuerzos:

Tabla 44

Valores Esfuerzo Máximo 3 por Zonas

| Zona Crítica | Esfuerzo VM (MPa) |
|--------------|-------------------|
| 1 | 107.17 |
| 2 | 99.54 |
| 3 | 78.69 |

5.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS SIMULADOS Y EXPERIMENTALES

Para simulación y determinación de zonas críticas en el marco, se trabaja con las fuerzas más críticas producidas. Por consecuencia el programa de simulación arroja los resultados menos importantes y los más altos. Los esfuerzos que más afectan a una estructura siempre serán los de mayor valor, por consecuencia de esto se debe comparar los valores más altos simulados y experimentales. Se resume la tabla (26) con los valores máximos teóricos:

Tabla 45

Valores Máximos Simulados

| Zona Crítica | Esfuerzo VM (MPa) |
|--------------|-------------------|
| 1 | 145 |
| 2 | 120 |
| 3 | 120 |

En la tabla (42), se presentan los valores máximos experimentales, se prepara una tabla de comparación entre los dos tipos de valores:

Tabla 46

Comparación Esfuerzos Simulación y Experimentales

| Zona Crítica | Esfuerzo Máximo VM Simulación (MPa) | Esfuerzo Máximo de VM Ensayos (MPa) | Error Porcentual (%) |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 1 | 145 | 143.76 | 0.855 |
| 2 | 120 | 115.53 | 3.725 |
| 3 | 120 | 115.50 | 3.75 |

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE COSTOS

Este proyecto tiene un carácter investigativo y no pertenece ninguna empresa u organización de cualquier tipo. Solo existen egresos, los mismos que se cubren con capital propio. Los ingresos de la tesis no se reflejan en valores monetarios, se presentan en conocimientos adquiridos para proporcionar un servicio que en un futuro pueda realizar el desempeño y verificar elementos mecánicos en operación.

6.1. COSTOS DIRECTOS

Los costos indirectos se denominan a los insumos y la mano de obra que se pueden divisar en el vehículo de pruebas y que intervienen directamente en los ensayos en campo. Los componentes mecánicos y los electrónicos se describen por separado.

Tabla 47

Tabla Componentes Mecánicos Directos

| Orden | Item | P. Unitario | Cantidad | P. Total |
|-------|-----------------------|-------------|----------|----------|
| 1 | Bicicleta BMX | 377.99 | 1 | 377.99 |
| 2 | Caja Protectora myRio | 90 | 1 | 90 |
| 3 | Soporte Bateria | 30 | 1 | 30 |
| 4 | Silicona Fría | 3.68 | 1 | 3.68 |
| 5 | Silicona Aislante | 4.7 | 1 | 4.7 |
| 6 | Cinta AutoSoldable | 9 | 1 | 9 |
| 7 | Pernos | 4 | 1 | 4 |

| | | | | |
|----|---------------------|------|-------|--------|
| 8 | Cinta Adhesiva | 1.5 | 1 | 1.5 |
| 9 | Estaño (Alambre) | 0.9 | 2 | 1.8 |
| 10 | Adhesivo Doble lado | 3.5 | 1 | 3.5 |
| 11 | Silicona Caliente | 0.25 | 5 | 1.25 |
| | | | Total | 527.42 |

Algunos materiales se utilizan como producto del reciclaje, reduciendo el costo monetario y ecológico. El soporte de la batería es construido en base de chatarra y simplemente incurre en gasto de servicio de construcción.

Tabla 48

Tabla Componentes Electrónicos Directos

| Or. | Item | P. Unitario | Cantidad | P. Total |
|-----|----------------------|-------------|----------|----------|
| 1 | Tarjeta NI-myRio | 504.84 | 1 | 504.84 |
| 2 | Regulador de Voltaje | 5.60 | 1 | 5.00 |
| 3 | Circuito MXP | 6.76 | 2 | 13.52 |
| 4 | Conector Energía E. | 1.00 | 1 | 1.00 |
| 5 | Bateria 12v 4Ah | 22.00 | 2 | 44.00 |
| 6 | Sensores SG | 1.32 | 9 | 11.88 |
| 7 | Cables Tipo Arduino | 0.2 | 4 | 0.8 |

| | | | | |
|----|-------------------------|------|-------|--------|
| 8 | Cable Multipar Flexible | 2.73 | 1 | 2.73 |
| 9 | Circuito Puente W. | 5.83 | 1 | 5.83 |
| 10 | Cable Rígido | 1.8 | 1 | 1.8 |
| 11 | Acond. De Señal | 12 | 4 | 44 |
| 12 | USB Flash Drive | 5 | 1 | 5 |
| | | | Total | 640.40 |

El excedente de materiales eléctricos directos, se utiliza para ensayos de conexiones y circuitos. Esto reduce los gastos de materiales electrónicos indirectos.

6.2. COSTOS INDIRECTOS

Los productos o servicios que no son parte del vehículo de pruebas y tampoco intervienen en la operación del mismo.

Tabla 49

Insumos Mecánicos Indirectos

| Or. | Item | P. Unitario | Cantidad | P. Total |
|-----|-------------------|-------------|----------|----------|
| 1 | Pasta para Soldar | 2.13 | 1 | 2.13 |
| 2 | Brocas | 5 | 2 | 10 |
| 3 | Sierra para Acero | 2.8 | 1 | 2.8 |

| | | | | |
|---|-----------------------|------|-------|-------|
| 4 | Lijas de Agua | 0.5 | 4 | 2 |
| 5 | Llave Hexagonal | 0.25 | 1 | 0.25 |
| 6 | Juego llaves Stanley | 25 | 1 | 25 |
| 7 | Pistola para Silicona | 3 | 1 | 3 |
| 8 | Cautín Electrico | 3.55 | 1 | 3.55 |
| | | | Total | 48.73 |

Tabla 50

Insumos Electrónicos Indirectos

| Or. | Item | P. Unitario | Cantidad | P. Total |
|-----|--------------------|-------------|----------|----------|
| 1 | Pilas AA (x6) | 6.42 | 1 | 6.42 |
| 2 | Multímetro | 19.65 | 1 | 19.65 |
| 3 | Protoboard | 3 | 1 | 3 |
| 4 | Resistencias | 0.02 | 20 | 0.4 |
| 5 | Potenciómetro | 0.5 | 2 | 1 |
| 6 | Amp. Operacionales | 0.8 | 2 | 1.6 |
| 7 | Pilas AAA (x6) | 6.42 | 1 | 6.42 |
| | | | Total | 38.49 |

Tabla 51

Servicios Indirectos

| Or. | Item | P. Unitario | Cantidad | P. Total |
|-----|-------------------------------|-------------|----------|----------|
| 1 | Armado y desmontaje bicicleta | 20 | 1 | 20 |
| 2 | Traslado Pista | 10 | 3 | 30 |
| 3 | Traslados Logística | 5 | 5 | 25 |
| | | | Total | 75 |

Fuente: El Autor

6.3. COSTO TOTAL

El costo total del proyecto es la suma de los costos directos e indirectos.

Tabla 52

Costo Total del Proyecto

| Orden | Costo | Valor |
|-------------------|---------------------------------|---------|
| 1 | Insumos Mecánicos Directos | 527.42 |
| 2 | Insumos Electrónicos Directos | 640.4 |
| 3 | Insumos Mecánicos Indirectos | 48.73 |
| 4 | Insumos Electrónicos Indirectos | 38.49 |
| 5 | Servicios | 75 |
| Costo Total (USD) | | 1330.04 |

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- El escenario propuesto que incurre mayor veces en el recorrido de la pista es el primero, en segundo plano al escenario dos y descartando completamente el tercero.
- El tercer escenario propuesto en la realidad es muy poco probable que suceda en un circuito Race BMX, por la ergonomía de conducción del ciclista y seguridad del mismo.
- La configuración de la pista permite que solo se presente en una ocasión el mayor esfuerzo posible en el marco, coincidentalmente ocurre en el primer obstáculo de la pista donde se produce el mayor impulso y velocidad posible.
- Los esfuerzos que se producen después de atravesar la primera traba de la pista tienden a ser menores por la pérdida de celeridad a causa de atravesar los posteriores obstáculos.
- El esfuerzo que más se acerca al máximo se presenta en la tercera rampa del segundo trayecto, debido al impulso que adquiere el vehículo después de atravesar a gran velocidad la segunda rampa.
- El método utilizado para determinar las cargas, simulación y datos de esfuerzos obtenidos de manera experimental funciona correctamente. Prueba de esto son los aceptables valores de error porcentual entre los datos simulados y experimentales.
- El sistema de sensores, acondicionadores y adquisición de datos, opera de excelente manera en los ensayos. Por lo tanto la selección de todos los dispositivos electrónicos es la correcta.

7.2. RECOMENDACIONES

- Para tener una mejor idea que como cae el ciclista y poder ubicar de mejor manera las cargas para una simulación, se debe capturar el recorrido con una grabadora de video de alta velocidad.
- Al existir varias modalidades de BMX conlleva a tener diferentes tipos de bicicletas, cada una diseñada para una o varias ramas de esta disciplina. Previamente es fundamental determinar el escenario BMX y el costo del vehículo idóneo para esa necesidad antes de realizar la compra del mismo.
- A pesar de que el sistema de instrumentación y adquisición de datos no presenta ningún problema de operación, existe en el mercado internacional un registrador de datos miniatura que no necesita de una batería externa e internamente posee el acondicionamiento de señal para galgas. El único problema existente con este dispositivo es el costo y los trámites de compra.
- Por el uso de equipos electrónicos en este proyecto es obligatorio y necesario realizar las pruebas en días soleados asegurando que la pista esté completamente seca. Si existen charcos de fango pueden presentar riesgo para el ciclista y consecuentemente los equipos.
- En el país no existe una oferta necesaria de equipos de instrumentación y adquisición. El tiempo mínimo que puede tardar en llegar al país un elemento electrónico puede ser de un mes. Es fundamental realizar con tiempo de anticipación las compras en el exterior.
- El método utilizado en este proyecto se recomienda para verificar el funcionamiento de elementos críticos en un sistema mecánico. Pero solo aplicable para elementos construidos en acero.

BIBLIOGRAFÍA

- AZoM. (2000-2015). *AZO Material*. Obtenido de <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6742>
- Beer. (2006). *Mecánica de Materiales*. Ciudad de México: McGrawHill.
- Budynas-Nisbett. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
- CSSCorporation. (2008). *CSS Sensors and Signal Conditioning*. Obtenido de <http://www.csschina.com>
- Deushtman. (1987). *Diseño de Máquinas Teoría y Práctica*. Ciudad de México: Compañía Editorial Continental.
- Echeverría, L. (2010). *Instrumentación Mecánica y Mecatrónica. Instrumentación*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Faires, V. (2003). *Diseño de Elementos de Máquinas*. Barcelona: Montaner y Simon, S.A.
- Gieck, K. (1981). *Manual de Fórmulas Técnicas*. México D.F.: Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A.
- HBM. (2010). *HBM Transductores*. Obtenido de <http://www.hbm.com>
- IBMXFF. (2011). *International BMX Freestyle Federation*. Obtenido de <http://www.ibmxff.org/>
- Idrovo-Quintanilla. (Junio de 2010). *Aplicación de galgas extensiométricas en el laboratorio de mecánica de materiales*. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- Johnson, C. (2000). *Process Control Instrumentation Technology*. New Jersey: Pearson Education.

Lopez-Martinez. (2005). *Universidad de Málaga*. Obtenido de <http://www.uma.es>

Mott, R. (2009). *Resistencia de Materiales*. Ciudad de México: Pearson Educación.

National-Instruments. (2013). *National Instruments*. Obtenido de National Instruments Web Site: <http://www.ni.com>

Pallás Areny, R. (2005). *Sensores y Acondicionadores de Señal*. Barcelona: Marcombo S.A.

Primaxi. (2014). Catálogo Bicicletas.

Bibliografía de Imágenes

<http://www.quia.com/jg/1767099list.html>

<http://fisica.laguia2000.com/general/condiciones-de-equilibrio>

<http://es.slideshare.net/bryan6894973/las-leyes-de-newton-44269776>

<http://pablo-fisicadultos.blogspot.com/2010/04/equilibrio-y-estabilidad.html>

<http://william-159.blogspot.com/>

<http://www.xarxatic.com/esfuerzos-mecanicos-castella/>

<https://ibiguridp3.wordpress.com/res/fpura/>

<https://es.slideshare.net/bryan6894973/las-leyes-de-newton-44269776>

<http://physicsatmhs.com/wp-content/uploads/CSIRO-2012-MS-Student-Notes.pdf>

http://help.solidworks.com/2013/spanish/SolidWorks/cworks/c_stress_strain.htm?format=P

http://www.mathplane.com/gate_edestinations/parallelogram_parking

[http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/22585/1/C%C3%A0lcul%20de%20l'Estructura%20d'una%20Grua%20Super%20Post%20Panamax%20\(Albert\).pdf](http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/22585/1/C%C3%A0lcul%20de%20l'Estructura%20d'una%20Grua%20Super%20Post%20Panamax%20(Albert).pdf)

<http://civil.njit.edu/beyondtheclassroom/labs/materials-planestress.php>

<http://www.arpem.com/motos/modelos/honda/modelos-11/honda-crf-450-r.html>

<http://www.decathlon.es/C-1020934-bicicletas-bmx>

<http://www.fcm.org.br/noticia.php?id=1926>

<http://www.nikonistas.com/digital/foro/?showtopic=83408>

<http://bmx-bikes.gearsuite.com/compare/238-536/2011-Subrosa-Salvador-Street-vs-2013-United-X-Red-Bull-KL40>

<http://www.vitalbmx.com/product/category/Frames,7>

http://www.lexpress.fr/diaporama/diapo-photo/actualite/sport/jo-2012-la-journee-de-jeudi-en-images_1148112.html

<http://www.foro3d.com/f90/10-actividad-de-modelado-pequenos-objetos-cotidianos-45161.html>

<http://www.rincad.es/viewtopic.php?f=38&t=5548>

<http://www.directindustry.es/prod/ansys/software-9123-274843.html>

<http://es.ptc.com/product/creo/3d-cad/parametric>

<http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/003043.htm>

<http://www.hogarutil.com/bricolaje/tareas/electricidad/201112/instalar-interruptor-sensor-12851.html>

<http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/003090.htm>

http://it.aliexpress.com/store/group/sensors/528065_251622492.html

http://es.mashpedia.com/Roseta_de_deformaci%C3%B3n

http://www.unicrom.com/Tut_puente_wheatstone.asp

<http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>

<http://www.fotonostra.com/digital/muestreoaudio.htm>

<http://www.emssiweb.com/cursos/tutoriales/fuentes-de-sonido-en-car-audio-4/el-radiocd-4/4-el-cd-compact-disc-26.html>

<https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>

<http://old.mountainbike.es/bijforum/posts/list/18281.page>

<http://www.racelogic.co.uk/index.php/en/racelogic-products>

<http://es.omega.com/prodinfo/adquisicion-de-datos.html>

<http://www.semtech.com/circuit-protection/emi-filters/stf203/>

<http://www.ti.com/lit/ds/sbos015/sbos015.pdf>

<http://www.digikey.com/es/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-resistor-color-code-4-band>