



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Diseño e instrumentación de un banco de  
pruebas para uniones tubulares en  
vehículos**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecatrónico**

**P R E S E N T A**

Juan Antonio Mendoza Flores

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Antonio Zepeda Sánchez



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019**

# Agradecimientos

A la UNAM y a la Facultad de Ingeniería, por abrirme sus puertas y darme el conocimiento a manos llenas.

A mis padres, por darme la vida y motivarme a ser siempre un mejor ser humano.

A mis tías; Hortensia, Marisol y Rosa que junto a mis abuelos; Gloria y Juan cuidaron de mí y me acogieron dentro de su familia. Porque con ustedes comprendí lo que significa amar.

A mis padrinos; Juana y Gabino, por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de mi vida y considérame parte de su familia.

Al Mtro. Antonio y el Mtro. Jesús, de quienes aprendí, a través de sus enseñanzas, lo que es ser un ingeniero.

Al TRA y a todos sus miembros, por apoyarme en el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos, con quienes he crecido dentro y fuera de las aulas.

Sea por el determinismo del universo, la casualidad o el libre albedrío, saber que han formado parte de mi vida, me llena de júbilo.

A todos ustedes, Gracias.

# Índice

|  |    |
|--|----|
| Objetivo y Alcances.....                                       | 1  |
| Introducción .....   | 2  |
| Antecedentes.....  | 3  |
| 1. Estudio de uniones soldadas en estructuras.....             | 17 |
| 1.1 Fundamentos de la soldadura.....                           | 17 |
| 1.1.1 Tipos de uniones y tipos de soldadura .....              | 18 |
| 1.1.2 Características de la unión soldada.....                 | 20 |
| 1.2 Estructuras tubulares.....                                 | 21 |
| 1.2.1 Parámetros en las uniones soldadas.....                  | 22 |
| 1.2.2 Pruebas en uniones tubulares.....                        | 24 |
| 2. Diseño conceptual del banco de pruebas .....                | 28 |
| 2.1 Condiciones y necesidades planteadas para el banco .....   | 28 |
| 2.2 Interpretación de las necesidades.....                     | 30 |
| 2.3 Organización jerárquica en las necesidades.....            | 32 |
| 2.4 Especificaciones del banco .....                           | 34 |
| 2.5 Generación de conceptos .....                              | 35 |
| 2.5.1 Aclarar el problema.....                                 | 37 |
| 2.5.2 Solución de funciones .....                              | 41 |
| 2.5.3 Exploración sistemática de las soluciones .....          | 44 |
| 3. Diseño de configuración.....                                | 48 |
| 3.1 Depuración de funciones .....                              | 48 |
| 3.1.1 Fijar la probeta en el banco de pruebas .....            | 49 |
| 3.2 Distintos conceptos para generar el banco de pruebas ..... | 59 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.3   | Selección del concepto .....   | 67  |
| 3.3.1 | Organización del concepto .....  | 72  |
| 3.4   | Pruebas de validación .....  | 73  |
| 3.4.1 | Funciones implementadas.....   | 74  |
| 3.4.2 | Manufactura del prototipo.....   | 78  |
| 3.4.3 | Ensamble del prototipo del banco de pruebas. ....                        | 84  |
| 3.4.4 | Pruebas del prototipo.....   | 88  |
| 3.4.5 | Resultados y observaciones .....   | 91  |
| 3.5   | Depuración del concepto .....  | 95  |
| 3.5.1 | Sistema de sujeción de la probeta.....                                   | 96  |
| 3.5.2 | Sistema de aplicación de carga (parte mecánica).....                     | 96  |
| 4.    | Diseño de los sistemas de control e instrumentación .....                | 100 |
| 4.1   | Sistema de aplicación de carga .....                                     | 100 |
| 4.1.1 | Organización por niveles del circuito electroneumático .....             | 100 |
| 4.1.2 | Secuencia neumática.....   | 102 |
| 4.1.3 | Conmutación de la electroválvula.....                                    | 103 |
| 4.2   | Sistema de instrumentación .....   | 105 |
| 4.2.1 | Integración de la PC.....  | 105 |
| 4.2.2 | Método para la detección de la fractura.....                             | 108 |
| 4.2.3 | Circuito de adaptación para la tinta.....                                | 110 |
| 4.2.4 | Detección del cambio de estado en el circuito de acondicionamiento ..... | 112 |
| 4.2.5 | Pruebas del método para la detección de la fractura.....                 | 113 |
| 4.3   | Sistema de almacenamiento de la información de la prueba .....           | 114 |
| 5.    | Fabricación y pruebas del banco .....                                    | 117 |
| 5.1   | Manufactura y ensamble de sistemas mecánicos.....                        | 117 |
| 5.1.1 | Sistema de sujeción por mordazas en “V” .....                            | 117 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.1.2 | Sistema de aplicación de carga .....             | 121 |
| 5.2   | Ensamble y montaje de circuitos eléctricos ..... | 123 |
| 5.3   | Pruebas del banco.....                           | 125 |
| 5.3.1 | Tratamiento a la probeta.....                    | 125 |
| 5.3.2 | Protocolo .....                                  | 126 |
| 5.3.3 | Pruebas y resultados.....                        | 130 |
|       | Conclusiones.....                                | 134 |
|       | Trabajo a futuro .....                           | 136 |
|       | Referencias.....                                 | 138 |

# Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 Funciones típicas de esfuerzo-tiempo en una máquina rotatoria.   | 6  |
| Figura 2 Diagrama S-N (figura 4-2, pág. 235 de Norton, 2011)  | 7  |
| Figura 3 Ejemplos de chasis bidimensionales, sup. Configuración en "escalera", inf. Configuración "cruciforme". (figura 6.8, pág. 137, y figura 6.13, pág. 140 en Happian-Simth, 2001)  | 9  |
| Figura 4 Funciones de densidad (PSD) típicas de los caminos (de la figura 5.2, pág. 127 de Gillespie)   | 11 |
| Figura 5 Esquema simplificado de la suspensión de un vehículo.  | 14 |
| Figura 6 Tipos básicos de configuraciones en uniones (de la figura 30.2, pág. 694 de Goover, 2007)  | 19 |
| Figura 7 Características de la unión soldada por fusión (de la figura 30.8, pág. 700 de Goover, 2007)   | 20 |
| Figura 8 Ejemplo de chasis tubular (cortesía del CDMIT)   | 22 |
| Figura 9 Ubicación del "hot spot stress" en una unión soldada (Yong-Bo, 2007, pág. 1353)  | 23 |
| Figura 10 Disposición del radio en el cordón de soldadura. (figura 1, pág. 32 de Schijve, 2012)   | 24 |
| Figura 11 Bancos de pruebas en estructuras soldadas (Cheng, Yongbo, & Jie, 2013, pág. 27) (Saleh, Mirghaderi, & Zahrai, 2016, pág. 219) (Bertini, Cera, & Frenzo, 2014, pág. 181) (Ahmadi, Lotfollahi-Yaghin, & Yong-Bo, 2013, pág. 96) | 25 |
| Figura 12 Disposición de strain gauges sobre una T-joint (de la figura 7, pág. 1355 de Yong-Bo, 2006)   | 26 |
| Figura 13 Vista lateral de la configuración de la probeta.  | 28 |
| Figura 14 Punto y forma de aplicación de la carga sobre la probeta.   | 29 |
| Figura 15 Método de generación de conceptos (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 122)   | 36 |
| Figura 16 Diagrama general de funciones.  | 38 |
| Figura 17 Diagrama de funciones del banco.  | 39 |
| Figura 18 Ángulo $\alpha$ creado por la aplicación de la carga.   | 43 |
| Figura 19 Árbol de clasificación de conceptos para la función:  | 45 |
| Figura 20 Estructura para la prueba.  | 49 |
| Figura 21 Formas de sujetar la probeta, izquierda: verticalmente en los extremos,   | 50 |
| Figura 22 Ubicación de los ángulos del yaw, pitch y roll.   | 50 |
| Figura 23 Bases con el maquinado de la probeta.   | 51 |
| Figura 24 Bases cónicas.  | 51 |
| Figura 25 Disposición de la "sujeción horizontal".  | 51 |
| Figura 26 Concepto con maquinado circular.  | 52 |
| Figura 27 Concepto de bloques en "V".   | 52 |
| Figura 28 Patrón vertical de barrenos.  | 53 |
| Figura 29 Montaje de la base de unión al banco.   | 53 |
| Figura 30 Concepto A sujeción por medio de conos opresores.   | 54 |
| Figura 31 Concepto B sujeción por medio de bases opresoras.   | 55 |
| Figura 32 Concepto C sujeción por mordazas circulares.  | 56 |

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 33 Concepto D sujeción por mordazas en "V".</i>  | 57 |
| <i>Figura 34 Concepto 1.</i>   | 60 |
| <i>Figura 35 Variación del ángulo <math>\Omega</math>.</i>   | 61 |
| <i>Figura 36 Concepto 2.</i>   | 61 |
| <i>Figura 37 Concepto 3.</i>   | 62 |
| <i>Figura 38 Concepto 4.</i>   | 63 |
| <i>Figura 39 Contador mecánico.</i>  | 64 |
| <i>Figura 40 Concepto 5.</i>   | 64 |
| <i>Figura 41 Circuito neumático para el concepto 5.</i>  | 65 |
| <i>Figura 42 Concepto 6.</i>   | 66 |
| <i>Figura 43 Concepto 7.</i>   | 67 |
| <i>Figura 44 Cilindro X.</i>   | 74 |
| <i>Figura 45 Cilindro Y.</i>   | 75 |
| <i>Figura 46 Patrón de barrenos.</i>   | 76 |
| <i>Figura 47 Base superior movable.</i>  | 76 |
| <i>Figura 48 Concepto de unión entra la probeta y el actuador.</i>                                   | 77 |
| <i>Figura 49 Base inferior.</i>  | 79 |
| <i>Figura 50 Cono móvil.</i>   | 80 |
| <i>Figura 51 Cono fijo.</i>  | 80 |
| <i>Figura 52 Base superior dcha. Vista superior izq. Vista frontal.</i>                              | 80 |
| <i>Figura 53 Base de unión al banco con barrenos para la unión de la base superior del concepto.</i> | 80 |
| <i>Figura 54 Barras paralelas para aumentar la rigidez.</i>  | 81 |
| <i>Figura 55 Corte mediante sierra cinta de la adaptación del cilindro.</i>                          | 81 |
| <i>Figura 56 Elemento de adaptación para el cilindro.</i>  | 82 |
| <i>Figura 57 Extensión del vástago.</i>  | 82 |
| <i>Figura 58 Maquinado del barreno de 1 1/2 [pulg].</i>  | 83 |
| <i>Figura 59 Eje roscado en la extensión de la probeta.</i>  | 84 |
| <i>Figura 60 Adaptación del cilindro.</i>  | 84 |
| <i>Figura 61 Sujeción del cilindro al marco.</i>   | 85 |
| <i>Figura 62 Vista lateral de la sujeción del cilindro al marco.</i>                                 | 85 |
| <i>Figura 63 Montaje del sistema de fijación por conos opresores, en el marco.</i>                   | 86 |
| <i>Figura 64 Montaje de la electroválvula 5/2.</i>   | 87 |
| <i>Figura 65 Montaje de la unidad mantenimiento.</i>   | 87 |
| <i>Figura 66 Circuito neumático.</i>   | 87 |
| <i>Figura 67 Brazo de palanca.</i>   | 90 |
| <i>Figura 68 Pequeños desgarres sobre la periferia del cordón de soldadura.</i>                      | 92 |
| <i>Figura 69 Direcciones de propagación de la fractura.</i>  | 92 |
| <i>Figura 70 Probeta fracturada.</i>   | 93 |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Figura 71</i> Concepto de sujeción.  | 96  |
| <i>Figura 72</i> Nuevo concepto de unión entre la probeta y el actuador.                              | 97  |
| <i>Figura 73</i> Eje de rotación (vista frontal).   | 98  |
| <i>Figura 74</i> Concepto para agregar el grado de libertad extra (vista lateral).                    | 98  |
| <i>Figura 75</i> Inmovilización de la placa móvil.  | 99  |
| <i>Figura 76</i> Niveles del circuito neumático.  | 101 |
| <i>Figura 77</i> Secuencia neumática.   | 102 |
| <i>Figura 78</i> Esquema simplificado de la activación de la válvula.                                 | 103 |
| <i>Figura 79</i> Relevador de estado sólido 4 canales G3MB-202P.                                      | 103 |
| <i>Figura 80</i> Esquema de circuito electrónico.   | 104 |
| <i>Figura 81</i> Diagrama de flujo del programa principal.  | 106 |
| <i>Figura 82</i> Diagrama de flujo del microcontrolador.  | 107 |
| <i>Figura 83</i> Esquema de conexiones eléctricas.  | 108 |
| <i>Figura 84</i> Mediciones de resistencia eléctrica.   | 110 |
| <i>Figura 85</i> Adaptación de la señal obtenida de la tinta.   | 110 |
| <i>Figura 86</i> Patrón de líneas.  | 114 |
| <i>Figura 87</i> Diagrama de flujo para el almacenamiento de información en la prueba.                | 116 |
| <i>Figura 88</i> Posicionamiento del perfil en "L" para crear la "V" del concepto.                    | 118 |
| <i>Figura 89</i> Prueba de colinealidad entre las bases.  | 118 |
| <i>Figura 90</i> Cartabones en la mordaza fija.   | 119 |
| <i>Figura 91</i> Unión entre la mordaza A y la mordaza B para la manufactura de los barrenos.         | 120 |
| <i>Figura 92</i> Montaje y disposición de apriete en las mordazas.                                    | 120 |
| <i>Figura 93</i> Adaptación para la rotación del cilindro.  | 121 |
| <i>Figura 94</i> Montaje del cilindro y su articulación en el banco.                                  | 122 |
| <i>Figura 95</i> Vista frontal a) y lateral b) del ensamble del elemento para aplicación de la carga. | 122 |
| <i>Figura 96</i> Circuito de corriente alterna.   | 123 |
| <i>Figura 97</i> Diagrama de conexiones.  | 124 |
| <i>Figura 98</i> Panel de conexiones.   | 125 |
| <i>Figura 99</i> Muestra del espacio requerido para insertar la probeta.                              | 127 |
| <i>Figura 100</i> Unión entre la extensión del vástago y la probeta.                                  | 127 |
| <i>Figura 101</i> Navegación dentro de la terminal para iniciar la prueba.                            | 128 |
| <i>Figura 102</i> Despliegue del aumento de ciclos sobre la terminal.                                 | 129 |
| <i>Figura 103</i> Cierre del programa principal.  | 129 |
| <i>Figura 104</i> Fractura de una probeta soldada mediante TIG.                                       | 132 |
| <i>Figura 105</i> Fractura de probeta soldada con MIG.  | 133 |

# Índice de tablas

|   |            |
|---|------------|
| <i>Tabla 1 Necesidades para el diseño del banco de pruebas.</i>   | <i>30</i>  |
| <i>Tabla 2 Lista de necesidades para el diseño del banco de pruebas.</i>  | <i>31</i>  |
| <i>Tabla 3 Tabla de ponderación.</i>  | <i>33</i>  |
| <i>Tabla 4 Especificaciones para el banco de pruebas.</i>   | <i>34</i>  |
| <i>Tabla 5 Conceptos generados.</i>   | <i>46</i>  |
| <i>Tabla 6 Combinación de soluciones.</i>   | <i>47</i>  |
| <i>Tabla 7 Evaluación de los conceptos para la función: Fijar la probeta al banco de pruebas.</i>                     | <i>58</i>  |
| <i>Tabla 8 Evaluación del concepto para el banco de pruebas</i>   | <i>70</i>  |
| <i>Tabla 9 Continuación de la evaluación del concepto para el banco de pruebas.</i>                                   | <i>71</i>  |
| <i>Tabla 10 Parámetros de la prueba.</i>  | <i>89</i>  |
| <i>Tabla 11 Resultados de las pruebas sobre la probeta.</i>   | <i>93</i>  |
| <i>Tabla 12 Característica del módulo de relevadores de estado sólido.</i>  | <i>104</i> |
| <i>Tabla 13 Características de la tinta implementada.</i>   | <i>109</i> |
| <i>Tabla 14 Parámetros de las pruebas para pruebas sobre probetas de <math>\frac{3}{4}</math> [pulg] calibre 14..</i> | <i>130</i> |
| <i>Tabla 15 Resultados de las pruebas sobre probetas de <math>\frac{3}{4}</math> [pulg] calibre 14.</i>               | <i>131</i> |

# Objetivo y Alcances

## Objetivo general

Diseñar e instrumentar un banco de pruebas para uniones tubulares de estructuras y suspensiones de vehículos, con el fin de obtener datos de su comportamiento.

## Objetivos específicos

- Diseñar y manufacturar una estructura rígida adaptable a diversos diámetros de tubo.
- Implementar un método de almacenamiento de la información proveniente de la prueba.
- Desarrollar e implementar un método para la detección de la grieta en una unión soldada en T.

## Alcances

El desarrollo del trabajo se centra y parte de la probeta; una estructura de tubo soldada sometida a una carga cíclica hasta la fractura. Limitando la fatiga y la configuración de la probeta a:

- La aplicación de carga será únicamente carga fluctuante para causar la fatiga y en el extremo de la unión soldada.
- La unión soldada a probar está limitada a probetas en T y manufacturadas de tubo de sección transversal circular.

# Introducción

El origen del banco residió en la creación de una herramienta dentro del CDMIT (Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica), para evaluar la vida útil de un chasis (tubular) a través de la resistencia de una unión soldada, concentrando el análisis sobre una unión en T, sometida a una carga cíclica hasta el punto de una posible fractura.

El presente trabajo muestra el desarrollo de dicho banco de pruebas para uniones soldadas, abarcando desde el diseño conceptual hasta la manufactura de un prototipo.

En los Antecedentes se hace una recapitulación de los conceptos necesarios para entender de mejor manera el tema de fatiga y su injerencia en estructuras de vehículos, por medio de las cargas que afectan a dichas estructuras.

En el capítulo 1 se explican a detalle las uniones soldadas y su estudio a través de pruebas de fatiga. Se hace una revisión de algunos de los parámetros más usados para la caracterización de la fatiga junto con las características que tienen en común los diversos bancos de pruebas de fatiga en estructuras.

A lo largo del capítulo 2 se aborda el diseño conceptual del banco, partiendo de las características de la probeta y las necesidades requeridas para la prueba, hasta llegar a una serie de conceptos generales para el banco junto con una lista de especificaciones.

En el capítulo 3 se retomarán los conceptos generados, se detallan y agrupan en sistemas, para posteriormente validar y seleccionar el concepto que cumpla con las especificaciones generadas, tomando en cuenta los recursos disponibles.

El capítulo 4 es una extensión del capítulo 3, donde se aborda el diseño y selección de componentes para los sistemas de instrumentación y de control del banco.

Finalmente, la manufactura del prototipo y las pruebas se llevan a cabo en el capítulo 5.

Con toda la información recopilada se establecen las conclusiones del trabajo y se muestran los puntos donde el trabajo se puede mejorar.

# Antecedentes

Todos los equipos mecánicos a lo largo de su vida sufren de cualquier tipo de fatiga (en menor o mayor escala), ya sea por un diseño defectuoso o por el simple hecho de cumplir con su régimen de servicio. Las cargas que sufren los elementos no siempre son constantes, dependiendo de la naturaleza de la aplicación (por ejemplo, en estructuras tubulares) es el comportamiento de la fatiga, de modo que se debe de conocer, estudiar y analizar el comportamiento de las cargas presentes (en la aplicación) para poder diseñar de forma integral la solución. Este apartado muestra la fatiga y sus características, así como su injerencia en chasis (estructuras tubulares) de vehículos.

## Fatiga

Se da el nombre de falla por fatiga a cualquier falla que se presente por la consecuencia de ciclos de carga invertidos sucedidos constantemente. Se reconocen tres fases o etapas en la falla por fatiga: *Inicio de grieta, propagación de grieta y fractura repentina debida al crecimiento inestable de la grieta* (Norton, 2011). La aparición de la grieta es de corta duración, la segunda etapa implica la mayor parte de la vida de la pieza, y la tercera etapa puede suceder al instante.

**Fase de inicio de grieta.** Los materiales dúctiles a pesar de no presentar grietas en su fabricación, a nivel microscópico, no son homogéneos ni isotrópicos. Generando regiones geométricas concentradoras de esfuerzos (discontinuidades en el material), que conforme oscilan los esfuerzos en ella, puede ocurrir una fluencia local por la concentración de esfuerzos, aun cuando el esfuerzo nominal en la sección esté muy por debajo de la resistencia a la fluencia del material. La fluencia local crea distorsión y bandas de deslizamiento. Conforme el esfuerzo oscila, se presentan bandas de deformación adicionales fusionándose para dar paso a grietas microscópicas.

Los materiales menos dúctiles no tienen la capacidad para ceder paulatinamente, por lo que lo harán de manera más rápida. Los materiales frágiles (en especial los fundidos) que no ceden pueden evitar la fase inicial, pasando directamente a la propagación de la grieta.

**Fase de propagación de la grieta.** Una vez aparecida la grieta, se crea una concentración de esfuerzos más grande que la de la muesca original, por lo que se desarrolla una zona plástica en el extremo de la grieta, cada que un esfuerzo abre la grieta. Cuando el esfuerzo oscila hacia un régimen de esfuerzo compresivo (hasta cero), o lo suficientemente menor que el esfuerzo de tensión, la grieta se cierra. La fluencia cesa para dar paso a una grieta más grande, repitiéndose el mecanismo conforme la variación de esfuerzo. El mecanismo se repite, siempre y cuando, el esfuerzo local oscile de un valor por debajo de la fluencia a la tensión a un valor por encima de la fluencia a la tensión en la punta de la grieta, de modo que el crecimiento de la grieta se debe al esfuerzo de tensión, creciendo a lo largo de los planos normales al esfuerzo de tensión máximo. Las fallas por fatiga se consideran una consecuencia principal de los esfuerzos de tensión, aun cuando el esfuerzo cortante inicia el proceso en materiales dúctiles. Los esfuerzos cíclicos, que siempre son de compresión, no causan el corrimiento de la grieta, dado que tienden a cerrarla.

Otro factor que influye en la propagación de la grieta es la corrosión, que en combinación con la aplicación de un esfuerzo tiene un efecto sinérgico corroyendo el material de manera más rápida de la que lo haría sin la presencia de dicho esfuerzo. Este fenómeno es conocido como esfuerzo por corrosión o agrietamiento asistido por el ambiente. Del mismo modo si se aplican cargas de esfuerzo cíclico sobre una pieza en un ambiente corrosivo (Fatiga por corrosión), la grieta se provocará de manera más sencilla.

**Fractura.** La grieta continuará creciendo siempre que exista un esfuerzo de tensión cíclica y/o factores de corrosión severos. En cierto punto el tamaño de la grieta se vuelve lo suficientemente grande para aumentar el valor de intensidad  $K$  de esfuerzo en la esquina de la grieta, hasta el nivel de tenacidad a la fractura  $K_c$  y se dé una falla repentina en el siguiente ciclo de esfuerzo. Este mecanismo es el mismo para un aumento en el esfuerzo nominal, generando de igual forma una falla abrupta y repentina.

Si el esfuerzo máximo en la probeta no sobrepasa el límite elástico del material, la probeta regresará a sus condiciones iniciales una vez retirada la carga. Sugiriendo que la carga se puede aplicar “n” veces sin cambio alguno en las propiedades de la probeta (sin sobrepasar el límite elástico de la probeta).

Los materiales dúctiles sometidos a cargas dinámicas se comportan como un material frágil, por lo que es necesario usar el factor de concentración de esfuerzos siempre que existan cargas dinámicas. Debido a las propiedades mismas del material, habrá materiales que sean más sensibles a las cargas dinámicas; generando así un nuevo parámetro “ $q$ ”. Llamado sensibilidad a la muesca que depende de cada material y sirve para modificar los factores geométricos  $K_s$  y  $K_{ts}$  cuando se aplican cargas dinámicas.

El estudio de la fatiga requiere de un método de análisis, para ello, en la actualidad se utilizan tres métodos: *esfuerzo-vida*(S-N), *deformación-vida* ( $\epsilon$ -N) y *mecánica de la fractura lineal elástica* (LEFM) (Norton, 2011). Las fallas por fatiga se dividen en regímenes de fatiga de ciclo bajo (LFC) y fatiga de ciclo alto (HFC), refiriéndose al número de ciclos a los que se espera sea sometida la pieza a lo largo de su vida.

El método *esfuerzo-vida*(S-N) se utiliza en aplicaciones de fatiga de régimen alto. El modelo busca determinar una resistencia a la fatiga y/o un límite de resistencia basado en el esfuerzo al que está sometida la pieza, manteniendo los esfuerzos cíclicos por debajo de ese límite y se elimine la falla. En otras palabras, se busca que los esfuerzos y las deformaciones se mantengan dentro de la zona elástica, evitando la fluencia y el surgimiento de la grieta.

El método *deformación-vida* ( $\epsilon$ -N) toma en cuenta la fluencia en la pieza y el daño acumulado debido a las fluctuaciones en los ciclos de carga, como cualquier otro esfuerzo que pudiera sufrir la pieza a lo largo de su vida. Se aplica principalmente a piezas con régimen LCF, que son sometidas a cargas lo suficientemente grandes para causar la fluencia local.

El último método se aplica principalmente a regímenes LFC, donde se conoce la magnitud de los esfuerzos cíclicos y ésta es lo suficientemente grande como para causar el surgimiento de la grieta. El método se aplica de forma conjunta con pruebas no destructivas de forma periódica en programas de inspección de las piezas. Su exactitud depende de la caracterización previa de la grieta, conociendo el factor geométrico de la intensidad del esfuerzo, así como el tamaño estimado de la grieta en su comienzo.

## Cargas por fatiga

Las cargas que recibe una máquina o pieza a lo largo de su vida de trabajo (fluctuando a través del tiempo) pueden ocasionar fallas por fatiga. En máquinas rotatorias estas cargas generalmente son de índole cíclica (repitiéndose con cierta frecuencia y con la misma magnitud). En un equipo de servicio, las cargas son totalmente variables a través del tiempo, tanto en magnitud como en frecuencia.

Se suele representar al esfuerzo cíclico como una función de onda o de diente de sierra, que se propaga (continuamente) a lo largo del tiempo, Los periodos de reposo de la pieza no son significativos para el análisis de la fatiga, siempre y cuando la pieza no esté inmersa en un ambiente corrosivo (la corrosión propicia el crecimiento de la grieta).

En las máquinas rotatorias se pueden presentar tres formas de onda, que representan los posibles comportamientos de la carga cíclica (*ciclo invertido*, *esfuerzo repetido* y el *esfuerzo variable* o *fluctuante*), como se indica en la Figura 1.

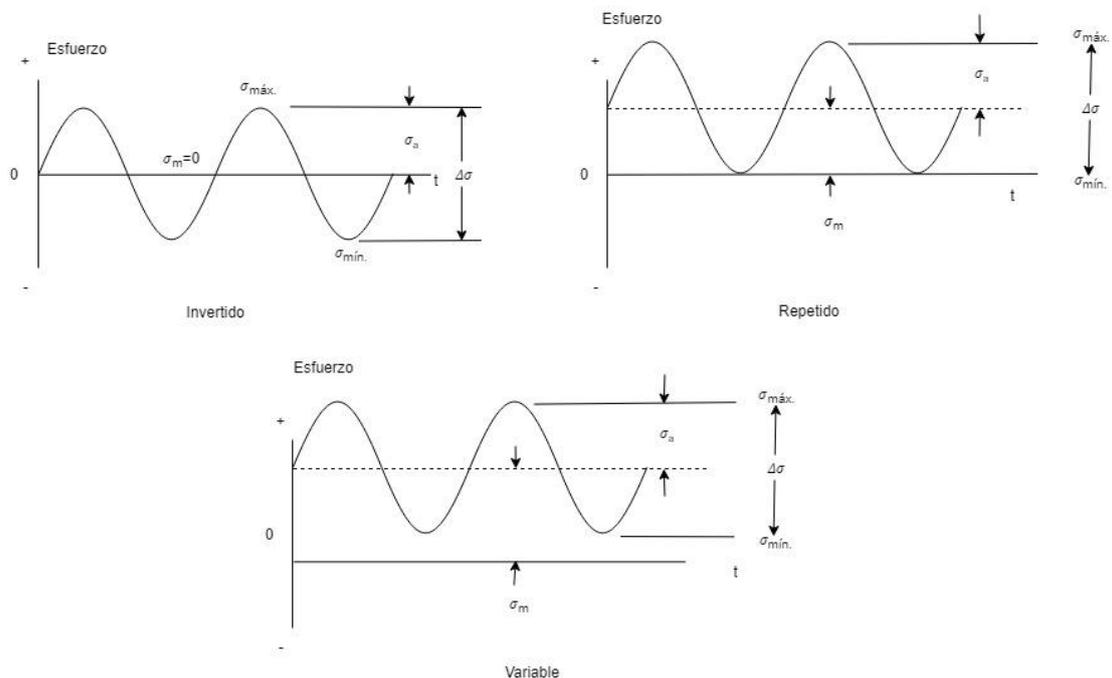


Figura 1 Funciones típicas de esfuerzo-tiempo en una máquina rotatoria.

El comportamiento de cualquiera de los tres tipos de onda se puede caracterizar conociendo dos parámetros, la media y las componentes alternativas, sus valores máximos y mínimos o mediante razones entre ellos.

Las cargas presentes en un equipo de servicio presentan variaciones aleatorias de esfuerzo a lo largo del tiempo, de modo que no se pueden aplicar los tipos de esfuerzos cíclicos descritos en la Figura 1. En este caso las mediciones se hacen directamente sobre el equipo durante su régimen de trabajo; mediante el uso de diversas herramientas como lo son el uso de acelerómetros, transductores de fuerza, medidores de deformación, etc. Actualmente la información es almacenada y procesada mediante equipos de cómputo, que mediante modelos y usando la información recopilada recrean el comportamiento de la pieza para conocer su comportamiento bajo la fatiga recibida.

### Pruebas mecánicas de fatiga

Existen diversas pruebas de fatiga dependiendo del “tipo” de fatiga que se pretenda evaluar. El primer enfoque fue el descrito por Wohler, quien aplicó esfuerzos fluctuantes en el extremo de una viga (en cantiléver) rotatoria, posteriormente R.R. Moore adaptó el método para aplicar sobre una viga ciclos de flexión pura e invertida. De estas investigaciones se descubrió la existencia de un límite de resistencia (a la fatiga) presente en los aceros, y se creó el diagrama S-N, ilustrado en la Figura 2, que relaciona un nivel de esfuerzo aplicado en una pieza con la cantidad de ciclos de carga (hasta la fractura) bajo este esfuerzo.

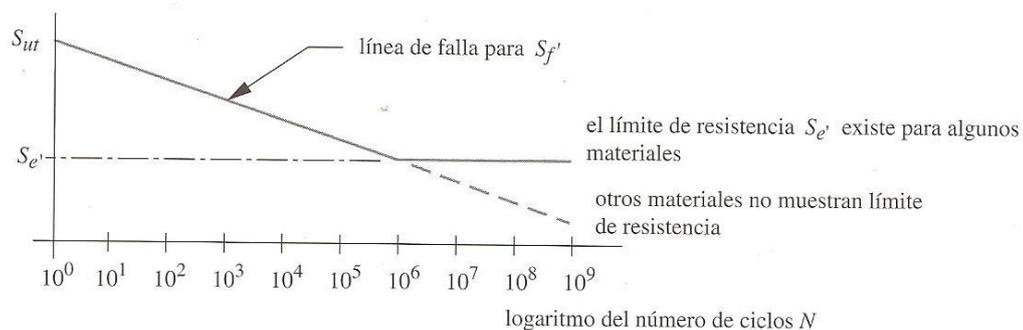


Figura 2 Diagrama S-N (figura 4-2, pág. 235 de Norton, 2011)

*Prueba con viga rotatoria.* La prueba fue aplicada por R. R. Moore sobre una viga de aproximadamente 3 [pulg] de diámetro, montada en un dispositivo que aplica flexión pura a una magnitud constante sobre el espécimen mientras éste gira a 1 725 [rpm]. Los datos informados en la literatura para la resistencia a la fatiga, de ciclo invertido, provienen de esta prueba. La prueba se repite en diversos especímenes (del mismo material), variando los niveles de esfuerzo, con los datos obtenidos (número de ciclos hasta la falla) y el

esfuerzo normalizado ( $S_f/S_{ut}$ ) aplicado, se crea un diagrama S-N del material en cuestión. Los tiempos de la prueba varían (hasta la falla) dependiendo del material, pero aproximadamente, toma medio día alcanzar una magnitud de  $10^6$  ciclos y cuarenta días para lograr los  $10^8$  ciclos.

*Pruebas de fatiga Axial.* La prueba de fatiga también se puede desarrollar de forma axial, se usa un espécimen de sección transversal circular, sujeto por los extremos. La pieza se monta en una máquina servohidráulica, donde se ajusta la carga a aplicar; pudiendo generar cualquier combinación de esfuerzos medios y alternativos. La carga se aplica sobre la sección transversal de la pieza (ya sea compresión o extensión). Bajo esta prueba se ha encontrado que los datos obtenidos de resistencias a la fatiga son menores a los reportados en la prueba de la viga rotatoria. Esta diferencia se atribuye al tamaño de la sección sometida a la carga y a la distribución de esfuerzos sobre la sección; es más probable que exista una microgrieta en la sección transversal de la prueba axial (sentida a toda la carga), que sobre la sección exterior de la viga rotatoria.

*Pruebas de flexión en voladizo.* La creación de un mecanismo que aplique carga sobre el extremo de una viga en voladizo permite crear cualquier combinación de esfuerzos medios y alternativos. Este tipo de pruebas no es tan común como las anteriores, se usa en casos específicos, donde se requiera conocer los efectos de la fatiga en una pieza sometida a cargas similares en su régimen de trabajo.

*Pruebas de fatiga por torsión.* En este tipo de pruebas la pieza (cilíndrica) se somete a ciclos de carga de torsión invertida. De estas pruebas se concluye que la relación entre la resistencia a la torsión y la resistencia a la fatiga es similar a lo descrito para un caso de carga estático.

## **Chasis**

El chasis es la estructura del vehículo, se encarga principalmente de cargar los elementos que componen al vehículo y soportar de igual forma una gran variedad de cargas, provenientes tanto del camino como del mismo vehículo y su configuración. Los criterios de clasificación para el chasis varían de acuerdo con cada autor (dada la naturaleza tan particular de la aplicación), de las posibles configuraciones se tienen: *Body on frame* y

*Unibody*; el primer término se refiere a que la carrocería se monta sobre el chasis, mientras que en la segunda configuración la carrocería y el chasis son una misma unidad.

Los primeros chasis tenían una configuración geométrica bidimensional, como se indica en la Figura 3, pensada para montar todos los componentes del vehículo sobre un solo elemento. Entre este tipo se tiene el chasis en *forma de escalera*, de *cuerpos cruciformes*, con barra de torsión, etc.

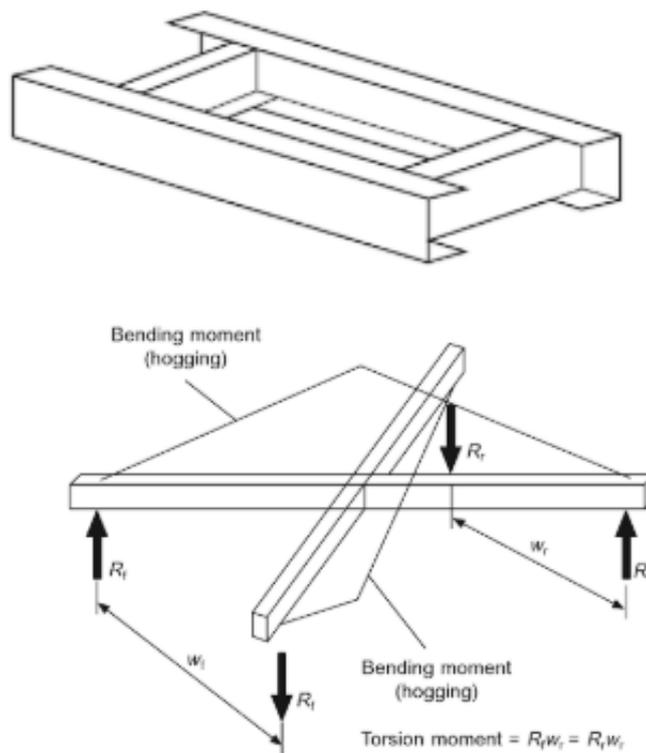


Figura 3 Ejemplos de chasis bidimensionales, sup. Configuración en "escalera", inf. Configuración "cruciforme". (figura 6.8, pág. 137, y figura 6.13, pág. 140 en Happian-Simth, 2001)

Una mejora que se aplicó a los chasis bidimensionales fue el incremento en la profundidad de su configuración (agregando una "dimensión" extra al chasis), la estructura se triangula en todos los planos, buscando que los elementos trabajen a compresión y tracción, incrementando la rigidez a la torsión y a la flexión del chasis.

El chasis está sometido principalmente a tres tipos de cargas: Flexión, torsión y la combinación de ambas (flexión y torsión).

La flexión se debe principalmente al peso de los componentes en el vehículo, que ejercen una fuerza vertical hacia el suelo, flexionando el chasis sobre su eje longitudinal y

transversal. La torsión se debe a la aplicación de cargas de diferentes magnitudes y direcciones en los ejes delantero y trasero, provocando una tendencia al giro sobre el eje longitudinal del vehículo. En la práctica se tiene que no existe torsión ni flexión pura sobre el chasis del vehículo, siempre van a estar acompañadas una con la otra.

### **Fuentes de excitaciones**

Todos los vehículos, por el simple hecho de viajar, experimentan vibraciones (excitaciones). Las vibraciones son transmitidas a los pasajeros, ya sea por el tacto, de manera visual o auditiva. Las vibraciones presentes se pueden clasificar de acuerdo con la frecuencia a la que se producen, *del camino* (0-25 [Hz]) y *ruido* (25-20,000 [Hz]). El vehículo es un sistema dinámico que responde con vibraciones a excitaciones externas. Las vibraciones se pueden estudiar y agrupar dentro de tres grandes tópicos:

- Excitaciones provenientes del camino.
- Las propiedades mecánicas del mismo vehículo.
- Percepción humana y tolerancia a las vibraciones.

A continuación, se abordarán con más detalle las cargas que se presentan en las dos primeras clasificaciones.

### ***Excitaciones provenientes del camino***

Estas excitaciones se pueden producir debido a dos casos; por las deformaciones presentes en el mismo camino y las excitaciones producidas por los elementos del mismo vehículo al circular en el camino.

Las deformaciones del camino son discontinuidades presentes en el pavimentado del camino. Las deformaciones son descritas como una “elevación” en el perfil de la llanta al circular en el camino. “Una de las representaciones más usadas es la Power Spectral Density (PSD) function” (Gillespie, pág. 127). La Figura 4, muestra ejemplos del comportamiento de las perturbaciones del camino, mediante funciones de onda, que varían su amplitud y su longitud de onda de acuerdo con la ecuación:

$$G_z(v) = \frac{G_0[1 + (v_0/v)^2]}{(2\pi v)^2} \quad (1)$$

Donde:

$G_z(v) = PSD \text{ amplitud } (ft^2/ciclos/ft).$

$v = \text{longitud de onda } (ciclos/ft).$

$G_0 = \text{constante de rigidez del caminio.}$

$v_0 = \text{constante del camino para la longitud de onda.}$

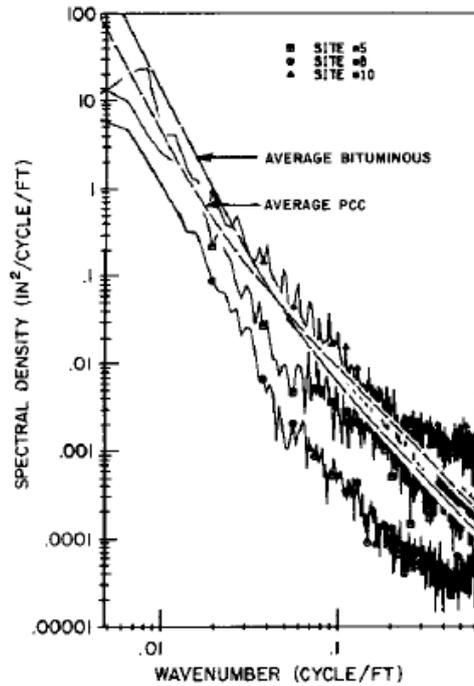


Figura 4 Funciones de densidad (PSD) típicas de los caminos (de la figura 5.2, pág. 127 de Gillespie)

La rugosidad del camino es el cambio de altura visto sobre el perfil de la llanta, mientras se recorre el camino, que también puede ser expresada en términos de la aceleración (dado que las vibraciones se expresan en términos de aceleración), para esto, se debe asumir una velocidad constante para el vehículo y derivar dos veces (con respecto al tiempo) la función de onda para encontrar la aceleración.

$$Z_R = A * \sin(2\pi v X) \quad (2)$$

Donde:

$Z_R =$  Elevación del perfil de la llanta.

$A =$  Amplitud de la onda.

$v =$  Longitud de onda.

$X =$  Distancia a lo largo del camino.

Poniendo  $X$  en función de la velocidad y del tiempo queda:

$$Z_R = A * \sin(2\pi vVt) \quad (3)$$

Y derivando dos veces la función se obtiene:

$$\ddot{Z}_R = -(2\pi vV)^2 A * \sin(2\pi vVt) \quad (4)$$

Que representa el comportamiento de las vibraciones en función de la velocidad a la que se esté conduciendo y la función de onda.

### *Llantas y su montaje*

Idealmente las llantas funcionan como atenuadores de las deformaciones, presentes en el camino y no aportan carga extra alguna al vehículo, sin embargo, debido a las imperfecciones de la manufactura y el ensamble (principalmente en las partes rotativas) se presentan cargas que afectan al vehículo. Estas cargas se deben principalmente a tres causas:

1. Variación de la masa.
2. Variaciones en las dimensiones.
3. Variaciones en la rigidez de los elementos.

Esas tres componentes combinadas afectan el desempeño del vehículo en las curvas (y en la conducción en general), que se ve reflejado en vibraciones a través del volante y el sistema de dirección.

### *Excitaciones en el tren motriz*

El tren motriz es otro de los elementos que causan el mayor número de vibraciones dentro del vehículo, en específico, el eje de acoplamiento (junta homocinética) a la transmisión se presenta como el elemento con mayor contribución de vibraciones.

La mayoría de los vehículos pequeños presentan un único eje (eje Cardán) para transmitir la potencia de la transmisión a las llantas traseras; sin embargo, mientras más grande sea el vehículo se requerirá de más de un eje para llevar la transmisión a las llantas traseras, aumentando por consiguiente el número de juntas homocinéticas.

Las juntas permiten transmitir la potencia entre dos elementos que no son colineales, a la vez que crean cargas y momentos debido a la angulación (masa desbalanceada) con la que entregan la potencia.

### *Motor y transmisión*

El motor es la principal fuente de poder en el vehículo; se encarga de transformar la energía proveniente del combustible en energía mecánica para mover el vehículo. La rotación está presente en los elementos que lo componen siendo, junto con la transmisión, un generador de vibraciones. De igual forma, por su tamaño y peso puede ser usado (junto con la transmisión) como atenuador de vibraciones.

El par generado en el cigüeñal (por el movimiento de los pistones) no es un par constante, se da por pulsos (que son el reflejo del movimiento de los pistones), derivando en vibraciones en los componentes unidos al cigüeñal. Debido al arreglo y montaje del motor/transmisión, las vibraciones se van a presentar en seis direcciones (correspondientes a los grados de libertad presentes en un plano coordenado de tres dimensiones).

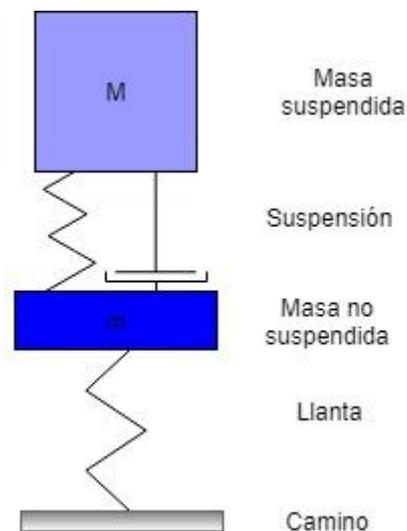
La clave para lograr aislar el vehículo (chasis) de las vibraciones del motor, es crear una base que tenga un punto de rotación alineado con el eje de rotación interno del motor con una frecuencia de resonancia menor a la del motor, atenuando las vibraciones por encima de este límite y manteniéndolas en el motor, evitando así su transmisión al chasis.

## ***Las propiedades dinámicas del vehículo***

El análisis y estudio del comportamiento del vehículo comienza descomponiendo el vehículo en sus sistemas básicos, de modo que, si se quiere hacer un análisis del comportamiento dinámico del vehículo, el sistema por el que se debe empezar, es el sistema de suspensión, encargado principalmente de:

- Compensar verticalmente el movimiento de las llantas y aislar el chasis de las deformaciones presentes en el camino.
- Mantener las llantas en su posición de diseño (estático y dinámico).
- Reaccionar a las fuerzas que genera el movimiento de la llanta.
- Mantener el chasis estable durante el movimiento.
- Mantener las llantas siempre en contacto.

Para generalizar el comportamiento de la suspensión y facilitar su análisis, el modelo que representa su comportamiento consta de una masa suspendida (chasis, carrocería, motor, etc.), la suspensión (resorte y amortiguador), una masa no suspendida (equivalente a los componentes rígidos involucrados en el montaje de la llanta), soportados por la llanta (resorte) que está en contacto con el camino.



*Figura 5 Esquema simplificado de la suspensión de un vehículo.*

A partir del modelo, ilustrado en la Figura 5, se puede representar y obtener el comportamiento de la suspensión en cada llanta del vehículo.

La rigidez de la suspensión está determinada principalmente por la constante de deformación presente en el resorte, mientras más grande sea, el resorte se comprimirá en menor medida (dependiendo de la magnitud de la fuerza), evitando la oscilación del resorte, por el contrario, si es baja el resorte oscilará durante más tiempo (respuesta sobre amortiguada). Otro factor de suma importancia que produce la amortiguación es propiamente la constante de amortiguación del amortiguador, que se encarga de disipar la energía (absorbida por la suspensión) en forma de calor. Las suspensiones se pueden clasificar en dos tipos; suspensiones de eje rígido y suspensiones independientes.

En las suspensiones de eje rígido, las llantas están posicionadas en los extremos de un eje, de modo que cada movimiento de una llanta se transmite a la llanta contraria. Esta configuración se usa principalmente en la suspensión trasera de vehículos y camiones que requieren transportar grandes cargas. A diferencia de las suspensiones de eje rígido, las suspensiones independientes permiten a cada llanta moverse sin afectar directamente a la llanta contraria. Se usa principalmente en vehículos de pasajeros y camiones de carga ligera por su amplia resistencia a las vibraciones de la dirección.

#### *Movimiento de pitch/roll*

La distancia entre ejes (delantero y trasero) provoca movimientos de rotación en el vehículo (sobre los ejes longitudinal y transversal) al circular por el camino, debidos a la inercia que posee. Mientras el vehículo circula, las deformaciones del camino son absorbidas por los ejes de manera independiente, es decir, si el eje delantero pasa un montículo el eje trasero eventualmente lo pasará (si se sigue en la misma dirección) con un retaso de tiempo, este tiempo de retraso se obtiene dividiendo la distancia entre ejes y la velocidad a la que se desplaza el vehículo.

El movimiento de rotación sobre el eje longitudinal se provoca cuando las deformaciones en el camino tienen una longitud de onda igual a la distancia entre ejes o su longitud de onda es mucho más grande que la distancia entre ejes, de igual forma las longitudes de onda que dividan la distancia entre ejes en distancias iguales. La rotación sobre el eje transversal se da cuando el camino tiene una longitud de onda de dos veces la distancia entre centros, también se presenta para longitudes de onda más chicas que sean múltiplos impares de la distancia entre centros.

Como ya se mencionó, el vehículo necesita una estructura para soportar las cargas mencionadas. Estas estructuras son generalmente seccionadas y unidas por medio de procesos de soldadura. Las características de los procesos de soldadura y las uniones soldadas, en general, se muestran en el capítulo siguiente.

# 1. Estudio de uniones soldadas en estructuras

## 1.1 Fundamentos de la soldadura

La soldadura es un proceso de fusión (unión) de dos piezas en contacto, mediante la aplicación de calor y/o presión (Goover, 2007). El proceso se puede aplicar tanto a materiales metálicos como a polímeros.

“La American Welding Society ha catalogado más de cincuenta tipos de operaciones de soldadura que utilizan diversos tipos o combinaciones de energía para proporcionar la energía requerida. Los procesos de soldadura pueden dividirse en dos grupos principales: 1) soldadura por fusión y 2) soldadura de estado sólido.” (Goover, 2007, pág. 691) .

*Soldadura por fusión.* Requiere de la aplicación de calor para fundir los materiales a unir; en algunos procesos es necesario la inclusión de un material de aporte para unir las piezas e incrementar ciertas características físicas de la unión. Dentro de este grupo se tienen:

- Soldadura con arco (AW). En este proceso el calentamiento de las piezas se da mediante un arco eléctrico, se puede usar o no material de aporte.
- Soldadura por resistencia (RW). Las piezas funcionan como una resistencia eléctrica, que con el paso de una corriente entre ellas genera su calentamiento y fusión. Es necesario que las piezas estén presionadas una contra otra para que se unan.
- Soldadura con oxígeno y gas combustible (OFW). Se crea una flama mediante un proceso de combustión, entre el oxígeno y cualquier otro gas. La flama se usa para calentar los materiales hasta fundirlos y poder unir las piezas.

Existen otros tipos de métodos aparte de los ya mencionados, como lo son la soldadura por haz de electrones y la soldadura con rayo láser.

*Soldadura de estado sólido.* Ese tipo de soldadura implica la aplicación de presión entre las piezas a unir, la unión también se puede dar con una combinación de calor y presión. A diferencia de la soldadura por fusión si se aplica calor, la temperatura está por debajo de la temperatura de fusión de los materiales a soldar. Dentro de los procesos más representativos se tienen:

- Soldadura por difusión (DWF). Las piezas para unir son calentadas a una temperatura elevada y se colocan una contra otra bajo presión, logrando la unión requerida.
- Soldadura por fricción (FRW). El calor y la presión requerida para unir las piezas se logra mediante la fricción entre las superficies de las piezas a unir.
- Soldadura ultrasónica (USW). Se logra aplicando una presión moderada en las piezas a unir mientras un movimiento oscilatorio (a frecuencias ultrasónicas) entre las piezas se lleva a cabo. La combinación de las fuerzas normales y las vibraciones remueven las partículas superficiales de las piezas en su punto de contacto creando una unión atómica de las superficies.

Los procesos mencionados son una breve semblanza de toda la gama de métodos y procesos que hay disponibles en la industria para llevar a cabo el proceso de unión por soldadura.

### 1.1.1 Tipos de uniones y tipos de soldadura

La unión con soldadura por fusión permite crear piezas con formas complejas, estas formas complejas se pueden crear a partir de cinco formas básicas de acuerdo con la Figura 6, que son: *La unión empalmada, unión de esquina, unión superpuesta, unión en T y unión de bordes.*

- Unión empalmada. Las piezas se encuentran al mismo nivel y se unen en sus bordes.

- Unión de esquina. Como su nombre lo indica, las piezas forman un ángulo recto donde se aplica la soldadura.
- Unión superpuesta. Consiste en la sobre posición de dos piezas, unidas en la intersección de ambas piezas.
- Unión en T. Una de las piezas es perpendicular a la otra, creando una disposición parecida a la forma de la letra T.
- Unión de bordes. Algunas de las caras de las piezas están en contacto, creando bordes paralelos entre ellas donde se efectúa la unión.

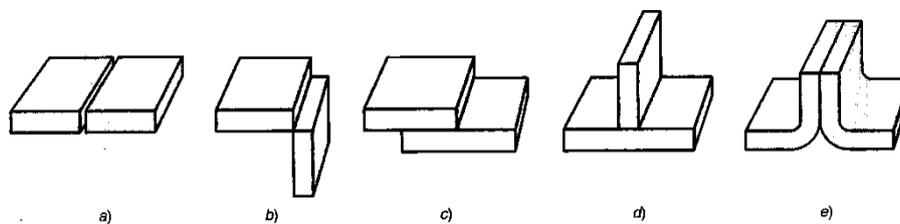


Figura 6 Tipos básicos de configuraciones en uniones (de la figura 30.2, pág. 694 de Goover, 2007)

De acuerdo con la aplicación para la que sea requerida la pieza soldada y con el tipo de unión, se aplicará el tipo (modo) de soldadura (por fusión) más conveniente para efectuar la unión de la pieza. Los tipos de soldadura más comunes son:

*Soldadura de filete.* Se usa para unir los bordes generados en las uniones de esquina, sobrepuestas y en T, no es necesario hacer una preparación de los bordes, lo cual facilita su uso e implementación en soldaduras de arco eléctrico y en la de oxígeno y gas combustible.

*Soldadura con surco.* Requiere de una preparación previa, maquinado en las orillas de las piezas para ayudar a la penetración de la soldadura. Las formas incluyen diversos maquinados (en cuadrado, en bisel, en V, etc.). Este tipo de soldadura se puede aplicar a todos los tipos de uniones antes mencionados, excepto a la unión sobrepuesta.

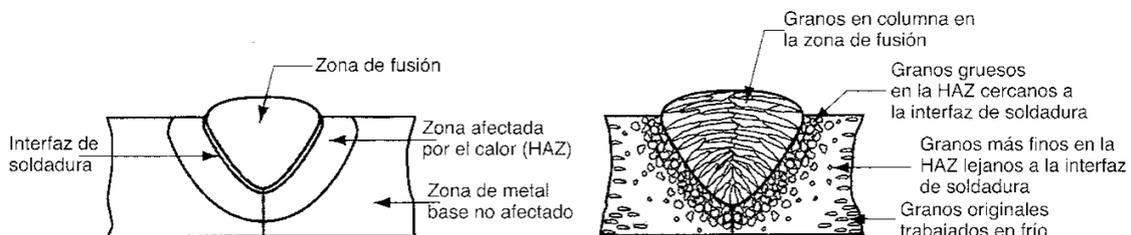
*Soldadura con insertos y soldaduras ranuradas.* Consisten en la creación de “huecos” o ranuras en una de las piezas a soldar, de modo que en el espacio maquinado es donde se aplica la soldadura, que a diferencia de una soldadura por filete deja los bordes libres de soldadura.

*Soldadura de puntos y soldadura de costura.* La soldadura de puntos consiste en la aplicación de una o más “gotas” de soldadura, creando pequeñas secciones de uniones espaciadas entre ellas. La soldadura con costura es básicamente la soldadura con puntos, solo que en ésta, la soldadura se aplica de forma más continua.

*Soldadura en reborde y soldadura en superficie.* La soldadura por reborde se aplica a piezas que presentan la posibilidad de ser soldadas en los bordes de las uniones. La soldadura en superficie se usa para rellenar discontinuidades presentes en una pieza (no se utiliza para unir dos o más piezas), aumentando el espesor de la pieza con la aportación del material de la soldadura.

## 1.1.2 Características de la unión soldada

La aplicación de soldadura por fusión cambia las características de los materiales unidos, en este tipo de uniones se distinguen cuatro zonas creadas por el efecto del proceso: *zona de fusión*, *interfaz de la soldadura*, *zona afectada por el calor*, y *zona de metal base no afectada*, mostradas en la Figura 7.



*Figura 7 Características de la unión soldada por fusión (de la figura 30.8, pág. 700 de Goover, 2007)*

En la zona de fusión existe una combinación del material de aporte y el material base, fundidos uno con el otro por la aplicación de calor. Durante la solidificación de la mezcla aparecen granos, donde, a diferencia de un proceso de fundición “convencional”, la etapa de nucleación no está presente debido al crecimiento epitaxial del grano, donde los átomos de la mezcla se solidifican en los sitios reticulares sobre el metal base adyacente y sólido. El grano en esta zona tiende a crecer con una orientación preferencial, perpendicular a los límites de la interfaz de soldadura. La estructura de grano formada en esta zona, en comparación con las estructuras de grano en las demás zonas de la soldadura, se aprecia en la Figura 7.

La zona adyacente a la zona de fusión es la interfaz de soldadura. Esta zona es una pequeña frontera de metal base fundido que separa la zona de fusión de la zona afectada por el calor. El metal base de la frontera se solidificó con mayor velocidad que la zona de fusión, evitando mezclarse con la mezcla de metal base y material de aporte, por lo que conserva la composición química del metal base.

En la zona afectada por el calor, el metal base ha sido expuesto a temperaturas menores a su punto de fusión, provocando cambios en sus propiedades y estructura. Los cambios en sus características dependen principalmente de factores como la temperatura máxima alcanzada, el calor total transferido a la zona, el tiempo durante el que se aplicó la temperatura máxima, la distancia a la zona de fusión, la velocidad de enfriamiento. Es en esta zona donde se crea el mayor concentrador de esfuerzos cambiando las propiedades mecánicas del material y provocando el mayor número de fallas en la unión.

Finalmente, la última región es la zona que no ha sido afectada por el calor. En esta zona se conservan las propiedades originales del material. Sin embargo, el material adyacente en la frontera de la zona afectada por calor también conserva un alto grado de esfuerzos residuales provocando posibles fallas mecánicas de la unión en esta frontera.

## 1.2 Estructuras tubulares

Las cargas cíclicas también están presentes en los componentes de un vehículo, causando el surgimiento de grietas y eventualmente derivando en la fractura del componente. Para asegurar la durabilidad y resistencia de los elementos se hacen pruebas y análisis de fatiga sobre los componentes; las pruebas se hacen principalmente sobre el tren motriz, la suspensión, el sistema de dirección y el sistema de frenado, siendo los sistemas más críticos en cuestión de seguridad en el vehículo.

Generalmente, para la aplicación de la carga cíclica se usan equipos hidráulicos, permitiendo variar la carga para caracterizar el comportamiento de la pieza y obtener una curva S-N. Este tipo de pruebas van acompañadas por lo general de un análisis por elemento finito que junto con la aplicación de galgas extensiométricas validan los resultados obtenidos en la prueba. (Koh, 2009).

## 1.2.1 Parámetros en las uniones soldadas

La complejidad de la estructura que compone a un chasis dificulta su manufactura en una sola pieza, de modo que es necesario segmentar el chasis y manufacturar, de manera independiente, las partes que lo conformarán. Los materiales y sus características dependen en su totalidad de la aplicación para la cual esté pensado el vehículo. Sin embargo, la segmentación genera que en el chasis existan (prácticamente en todos los vehículos) puntos de unión (uniones soldadas) sobre toda la geometría de la estructura creada.

En un chasis tubular se presentan diversas disposiciones en las uniones, que dependiendo de la forma que tengan es como se nombran. Entre las más comunes están las uniones tipo T, K y X (que son derivaciones de los tipos de unión vistos en la sección 1.1.1).



*Figura 8 Ejemplo de chasis tubular (cortesía del CDMIT)*

La Figura 8 muestra un chasis tubular con las configuraciones en T, K y X. Este tipo de chasis se usa principalmente para vehículos deportivos y de pista. Lo que se busca con este tipo de chasis es que los elementos (secciones tubulares) trabajen a compresión o a tracción, evitando, en la medida de lo posible, la flexión. La triangulación de los elementos en la estructura es vital para lograr este objetivo.

La fatiga es un fenómeno de falla muy común en este tipo de estructuras soldadas, y más en estructuras que se encuentran en la intemperie y bajo los efectos de la naturaleza (su diseño y análisis no es tan común como lo son las fallas). Esto se debe principalmente a la fusión de los materiales, que cambia las propiedades físicas y químicas de las piezas. Las

irregularidades del cordón de soldadura dificultan su análisis (Yong-Bo, 2007), junto con el crecimiento irregular de los granos y la aparición de zonas porosas e inclusiones. A pesar de que no existe un método de análisis unificado para la fatiga en soldadura, se han creado procedimientos que usan los mismos parámetros para evaluar la falla por fatiga presente en estructuras (generalmente con configuración en T, X y K). Entre estos parámetros se encuentran: el esfuerzo nominal, *the hot spot stress*, el esfuerzo de la muesca, entre otros (Sonsino, y otros, 2012), (Bertini, Cera, & Frenzo, 2014) .

En algunos casos la fatiga se estima por medio de la curva S-N, con el punto de esfuerzo máximo (*hot spot stress*) debido a la soldadura, se determina el número de ciclos hasta la fractura. Para determinar el esfuerzo en la soldadura se aplica el factor de concentración de esfuerzos (SCF), que, si bien ayuda a determinar el número de ciclos, no determina el lugar dentro de la pieza donde comenzará la fractura (en esta zona se encuentra la mayor concentración de esfuerzos). El factor está dado por la relación entre el esfuerzo máximo en la soldadura (*hot spot stress*) y el esfuerzo aplicado sobre la unión.

$$SCF = \frac{\sigma_{hs}}{\sigma_{aplicado}}$$

Este factor se aplica generalmente a pruebas donde se tienen cargas axiales en las uniones tubulares y se considera que el esfuerzo  $\sigma_{hs}$  es el mismo a lo largo de todo el cordón de soldadura.

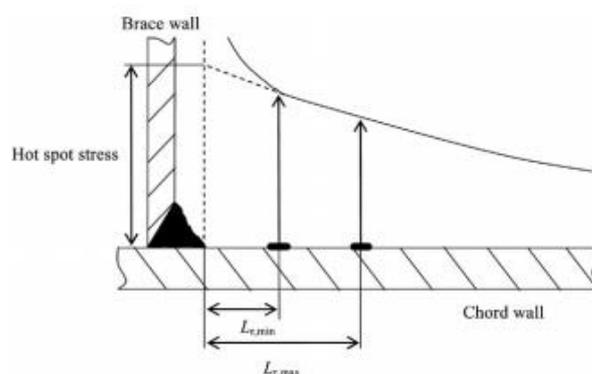


Figura 9 Ubicación del "hot spot stress" en una unión soldada (Yong-Bo, 2007, pág. 1353)

El esfuerzo en la muesca (*notch spot stress*) consiste en tratar al cordón soldado como una pieza uniforme de un radio específico en el punto de unión de la soldadura. El radio por lo general es de 1 [mm] o de 0.05 [mm] para el análisis.

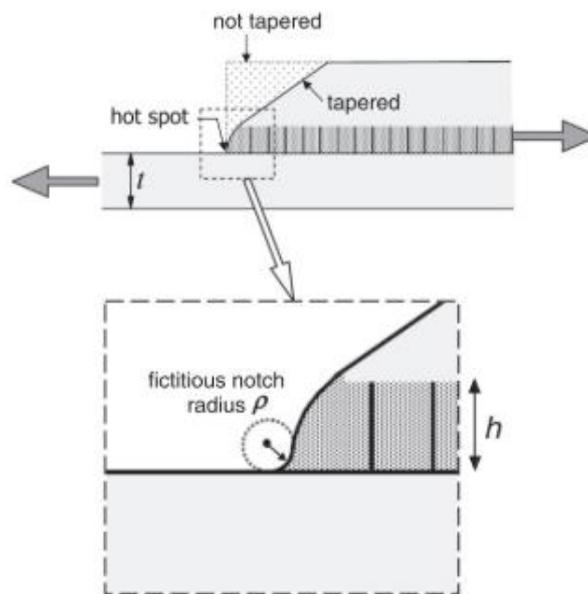


Figura 10 Disposición del radio en el cordón de soldadura. (figura 1, pág. 32 de Schijve, 2012)

El ciclo de vida de la fatiga bajo esta consideración consta de dos fases, la fase inicial que es donde comienza la grieta, seguida de una fase de desprendimiento hasta llegar a la falla.

## 1.2.2 Pruebas en uniones tubulares

Como ya se mencionó en la sección anterior, conocer el comportamiento de estructuras ante el fenómeno de la fatiga resulta imprescindible para asegurar el correcto funcionamiento de los elementos junto con su vida útil.

Para conocer el comportamiento de la fatiga se hacen análisis (teóricos o por medio de software) y pruebas mecánicas sobre los elementos que se desea caracterizar su comportamiento. La aplicación de las pruebas requiere de equipo especializado y de aplicar una serie de normas en la manufactura de los elementos y aplicación de carga, la conjunción de estos requerimientos permite la estandarización y reproductibilidad del proceso.

Las pruebas mecánicas realizadas a una unión en T y en K reportadas por Bo-Young (Yong-Bo, 2007) muestran un apego a la normatividad; siguiendo la manufactura de los especímenes a probar de acuerdo con la API 5L Grado B y el AWS Structure Welding Code.

El montaje de los elementos a probar requiere de una estructura rígida, capaz de absorber las reacciones debido a las cargas aplicadas en las pruebas y mantener el espécimen a probar fijo durante la prueba. La aplicación de carga se hace mediante circuitos hidráulicos (Xu, y otros, 2004), dispuestos de la forma en que se desee recrear la carga. En las figuras se muestran algunos ejemplos de configuraciones de bancos de pruebas empleados en el estudio de uniones soldadas.

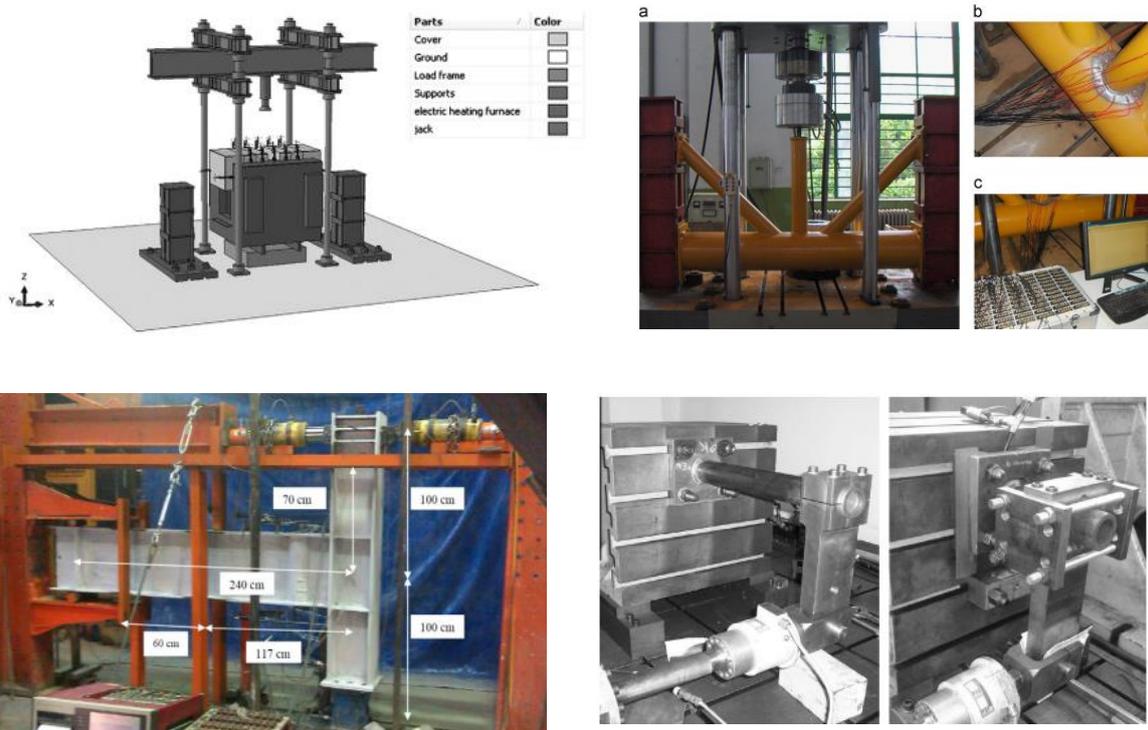
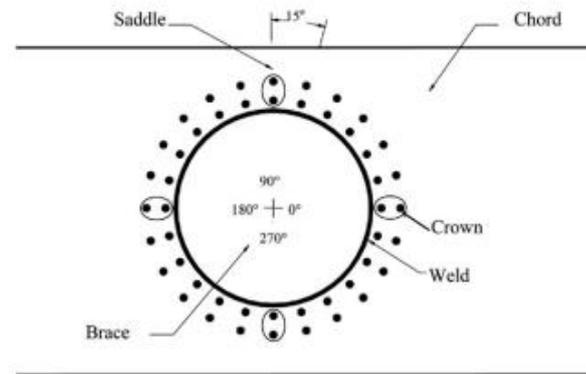


Figura 11 Bancos de pruebas en estructuras soldadas (Cheng, Yongbo, & Jie, 2013, pág. 27) (Saleh, Mirghaderi, & Zahrai, 2016, pág. 219) (Bertini, Cera, & Frendo, 2014, pág. 181) (Ahmadi, Lotfollahi-Yaghin, & Yong-Bo, 2013, pág. 96)

Los principales instrumentos de medición utilizados en este tipo de pruebas son *strain gauges*, colocadas preferentemente alrededor de la unión soldada y sobre el *hot spot stress*. Un ejemplo de la disposición de *strain gauges* se muestra en la Figura 12.



a. Strain gauge location on tubular T-joint specimen.

Figura 12 Disposición de strain gauges sobre una T-joint (de la figura 7, pág. 1355 de Yong-Bo, 2006)

Además de *strain gauges*, se utilizan LVDT y celdas de carga. Los LVDT miden el desplazamiento de algún punto en el espécimen de prueba y las celdas de carga muestran la fuerza aplicada en algún punto requerido en la prueba. Toda la información obtenida por los sensores es almacenada en data loggers.

Durante o antes de las pruebas mecánicas se lleva a cabo (la mayoría de las veces) un análisis por elemento finito (aplicado mediante software especializado) con las características de la prueba (Esderts, Willen, & Kassner, 2011), (Gao, 2006). El análisis por elemento finito resulta más eficiente y conveniente al momento de calcular la distribución de esfuerzos a lo largo del espécimen. Sin embargo, tiene algunos inconvenientes inherentes a su aplicación, como la recreación de la pieza en software y el mallado de la misma; es difícil recrear fielmente las diversas geometrías presentes en la pieza y más la referente al cordón de soldadura. Estos inconvenientes muestran que no es un método contundente que se pueda usar como referente (por sí solo) para dar un veredicto del comportamiento de los especímenes. Los resultados obtenidos deben ser comparados con los resultados experimentales y los resultados teóricos para corroborar su veracidad.

La conjunción de estos tres resultados brinda un grado de entendimiento mucho mayor del problema y su comportamiento, comparado con la información individual obtenida de cada uno de los análisis, que aunado a la reproductibilidad de las pruebas generan la base del conocimiento en la materia.

El estudio de las uniones soldadas y la fatiga mostraron un panorama general sobre lo descrito en cuanto a pruebas mecánicas (principalmente de fatiga) se refiere, sentando las bases, a las cuales referirse para el diseño y desarrollo del banco de pruebas que se buscaba realizar.

# 2. Diseño conceptual del banco de pruebas

## 2.1 Condiciones y necesidades planteadas para el banco

El diseño del banco se dio por medio de la metodología de Ulrich (Ulrich & Eppinger, 2013), apoyándose en ella hasta llegar a la generación de un modelo funcional. El primer paso fue recopilar y entender las necesidades requeridas para el banco de pruebas. Como la esencia del banco de pruebas es la probeta, se comenzó por recopilar las características y especificaciones que debía poseer el espécimen de prueba. Las características se enlistan a continuación:

- El espécimen por probar (a partir de ahora llamado probeta) era tubo de acero.
- Las probetas estaban formadas por dos tubos, unidos a  $90^\circ$  (Figura 13), por medio de algún método de soldadura (MIG, TIG, SMAW, etc.).

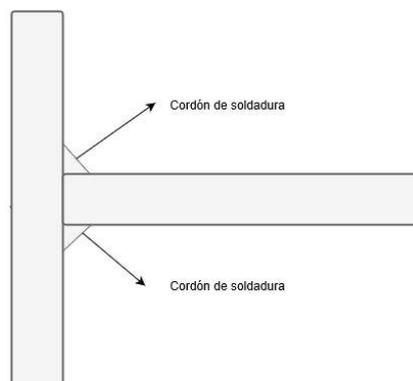


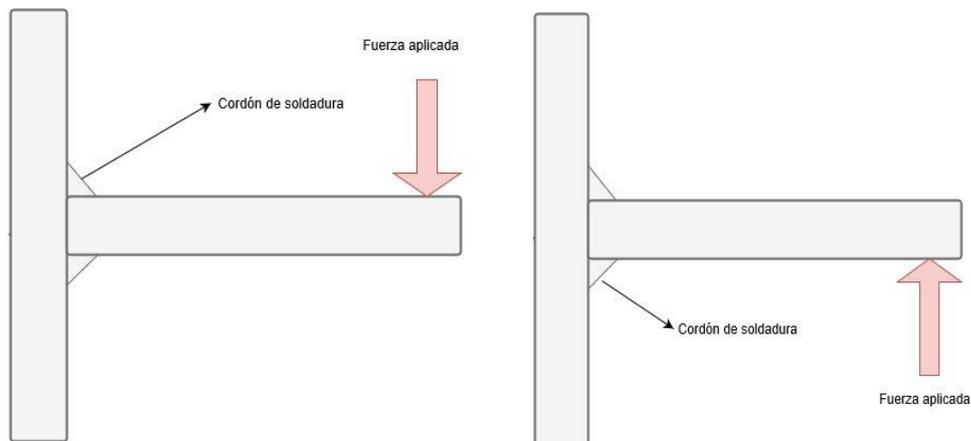
Figura 13 Vista lateral de la configuración de la probeta.

- Las probetas podían estar manufacturadas con diversos diámetros de tubo comprendidos entre  $\frac{3}{4}$  [pulg] y  $1 \frac{1}{2}$  [pulg] de calibre 14, respetando siempre la configuración de la Figura 13.
- La longitud de los tubos se planteó, por parte del equipo de trabajo, de aproximadamente 30 [cm] (sin ser una norma estricta).

Las características de la probeta están basadas en las uniones presentes en un vehículo deportivo utilitario dentro del CDMIT, sobre el cual se requiere dar una validación de las uniones soldadas y la vida útil de su estructura.

En cuanto al banco y la prueba, las necesidades que se plantearon se enlistan como sigue:

- Carga cíclica aplicada en un extremo de la probeta, como se muestra en la Figura 14 (sometiendo la unión soldada a un esfuerzo invertido).



*Figura 14 Punto y forma de aplicación de la carga sobre la probeta.*

- Montaje fácil y rápido de la probeta en el banco.
- Poder probar diversos diámetros y calibres de tubo.
- Poder visualizar el número de ciclos a los que se ha sometido la probeta en todo momento.
- Detección del momento de fractura en la probeta (si lo hubiese).
- Almacenamiento del número de ciclos de carga.

## 2.2 Interpretación de las necesidades

Estas necesidades se interpretaron y tradujeron a través de cinco directrices, dando cualidades y propiedades al banco de pruebas, que servirán para poder trabajar la generación de conceptos y propuestas de solución.

1. Expresar la necesidad en términos de lo que el producto tiene que hacer, no en términos de cómo puede hacerlo.
2. Expresar la necesidad tan específicamente como la información original recopilada.
3. Utilizar enunciados en forma afirmativa, no en forma negativa.
4. Expresar la necesidad como un atributo del producto.
5. Evitar el uso de las palabras debe y debería.

*Tabla 1 Necesidades para el diseño del banco de pruebas.*

| Núm. | Necesidades   | Necesidades interpretadas  |
|------|---|--|
| 1    | La carga debe ser cíclica y estar aplicada en un extremo de la probeta (dado que lo que se quiere evaluar es la unión soldada bajo fatiga). | El banco aplica carga cíclicamente en el extremo de la probeta hasta fractura.   |
| 2    | Montaje fácil de la probeta en el banco.  | El banco tiene un punto accesible y específico para colocar las probetas.        |
| 3    | Poder probar diversos diámetros y calibres de tubo.   | El banco se adapta a diversos diámetros y calibres de tubo.                      |
| 4    | Poder visualizar el número de ciclos a los que se ha sometido la probeta en todo momento.   | El banco muestra al usuario el número de ciclos transcurridos en la prueba.      |
| 5    | Detección del momento de fractura en la probeta (si lo hubiese).  | El banco detecta si la probeta ha sufrido una fractura.                          |
| 6    | Almacenar el número de ciclos de carga.   | El banco es capaz de almacenar el número de ciclos.                              |
| 7    | Iniciar la prueba cuando el usuario lo especifique.   | El banco inicia la prueba hasta que el usuario lo indique.                       |
| 8    | El usuario puede detener la prueba en cualquier momento.  | El banco da la posibilidad al usuario de detener la prueba en cualquier momento. |

Con la finalidad de explicar más a detalle las necesidades iniciales (Tabla 1) y así acotar las características (tamaño, forma, componentes, etc.) que el banco debía poseer, se hizo

una recopilación más profunda de información, quedando la lista final de necesidades para trabajar.

*Tabla 2 Lista de necesidades para el diseño del banco de pruebas.*

|    | <b>Lista de necesidades interpretadas</b>   |
|----|---|
| 1  | El banco aplica carga cíclicamente en el extremo de la probeta.                           |
| 2  | El banco tiene un punto accesible y específico para colocar las probetas.                 |
| 3  | El banco se adapta a diversos diámetros y calibres de tubo.                               |
| 4  | El banco muestra al usuario el número de ciclos transcurridos en la prueba.               |
| 5  | El banco detecta si la probeta ha sufrido una fractura.                                   |
| 6  | El banco es capaz de almacenar el número de ciclos.                                       |
| 7  | El banco inicia la prueba hasta que el usuario lo indique.                                |
| 8  | El banco da la posibilidad al usuario de detener la prueba en cualquier momento.          |
| 9  | La frecuencia de los ciclos puede ser controlada en el banco.                             |
| 10 | La magnitud de carga se puede controlar.  |
| 11 | El banco mantiene fija la probeta en la misma posición en todo momento durante la prueba. |
| 12 | El banco puede guardar el orden de magnitud de los ciclos.                                |
| 13 | El banco guarda los datos de forma ordenada.  |
| 14 | El banco almacena los datos de manera automática.   |
| 15 | El banco indica el momento de la fractura.  |
| 16 | El banco cuenta el número de ciclos.  |

Finalmente, con la Tabla 2, se prosiguió a organizar tal información para continuar con el proceso de diseño.

## 2.3 Organización jerárquica en las necesidades

Las necesidades recolectadas en el apartado anterior son necesidades sin organizar, no presentan algún tipo de patrón que las relacione, lo cual dificulta el trabajar con ellas. Por lo cual, el paso siguiente fue organizarlas en una lista jerárquica, partiendo de lo general a lo particular, agrupándose por necesidades primarias y necesidades secundarias, resultando la siguiente organización:

### **El banco aplica carga en la probeta**

- El banco aplica carga cíclicamente en el extremo de la probeta hasta fracturarla.
- La frecuencia de los ciclos puede ser controlada en el banco.
- La magnitud de carga se puede controlar.

### **El banco se adapta a diversas probetas**

- El banco se adapta a diversos diámetros y calibres de tubo.
- El banco mantiene fija la probeta en la misma posición en todo momento durante la prueba.
- El banco tiene un punto accesible y específico donde se coloca la probeta.

### **El banco guarda los datos de la prueba**

- El banco es capaz de almacenar el número de ciclos.
- El banco puede guardar el orden de magnitud de los ciclos.
- El banco guarda los datos en forma ordenada.
- El banco almacena los datos de manera automática.

### **El banco despliega datos durante la prueba**

- El banco muestra al usuario el número de ciclos transcurridos en la prueba.
- El banco indica el momento de la fractura.

### **El banco detecta variables en la prueba**

- El banco detecta si la probeta ha sufrido una fractura.
- El banco cuenta el número de ciclos.

### **El banco permite la interacción del usuario (al inicio y durante la prueba)**

- El banco inicia la prueba hasta que el usuario lo indique.
- El banco da la posibilidad al usuario de detener la prueba en cualquier momento.

La agrupación anterior, por sí sola, no brinda información sobre la importancia de cada una de las funciones en el diseño del banco de pruebas, por lo que el paso siguiente fue dar una ponderación relativa, por parte del equipo de trabajo, a las necesidades para identificar las más relevantes y generar de manera más objetiva las especificaciones para el banco de pruebas.

La ponderación se dio usando la siguiente escala:

1. La función es indeseable, no está considerada dentro del banco.
2. La función no es importante, no afecta si está presente.
3. Sería bueno tener esta función, pero no es necesaria.
4. La función es altamente deseable.
5. La función es de importancia crítica.

*Tabla 3 Tabla de ponderación.*

| <b>Necesidad</b>  | <b>Importancia</b> |
|---|--------------------|
| <b>El banco aplica carga en la probeta</b>  |                    |
| El banco aplica carga cíclicamente en el extremo de la probeta hasta fracturarla.         | 5                  |
| La frecuencia de los ciclos puede ser controlada en el banco.                             | 4                  |
| La magnitud de carga se puede controlar.  | 3                  |
| <b>El banco se adapta a diversas probetas</b>   |                    |
| El banco se adapta a diversos diámetros y calibres de tubo.                               | 5                  |
| El banco mantiene fija la probeta en la misma posición en todo momento durante la prueba. | 5                  |
| El banco tiene un punto accesible y específico donde se coloca la probeta.                | 4                  |
| <b>El banco guarda los datos de la prueba</b>   |                    |
| El banco es capaz de almacenar el número de ciclos.                                       | 4                  |
| El banco puede guardar el orden de magnitud de los ciclos.                                | 4                  |

|  |   |
|--|---|
| El banco guarda los datos en forma ordenada.                                       | 3 |
| El banco almacena los datos de manera automática.                                  | 4 |
| <b>El banco despliega datos durante la prueba</b>                                  |   |
| El banco muestra al usuario el número de ciclos transcurridos en la prueba.        | 4 |
| El banco indica el momento de la fractura.   | 3 |
| <b>El banco detecta variables en la prueba</b>                                     |   |
| El banco detecta si la probeta ha sufrido una fractura.                            | 5 |
| El banco cuenta el número de ciclos.   | 5 |
| <b>El banco permite la interacción del usuario (al inicio y durante la prueba)</b> |   |
| El banco inicia la prueba hasta que el usuario lo indique.                         | 5 |
| El banco da la posibilidad al usuario de detener la prueba en cualquier momento.   | 5 |

Con las necesidades organizadas, la siguiente actividad fue plantear las especificaciones para cada una de ellas, sabiendo las necesidades donde se tenía que hacer un mayor énfasis.

## 2.4 Especificaciones del banco

Las necesidades generalmente se expresan en términos de cualidades subjetivas, siendo útiles para crear un primer acercamiento al problema, pero sirviendo de muy poco respecto a cómo diseñar y construir la solución; dejando demasiado margen a la interpretación. Por esta razón es necesario establecer un conjunto de especificaciones, que expliquen con detalles precisos y cuantificables la solución a implementar.

La generación de especificaciones se basó, tanto en las condiciones iniciales planteadas para la prueba, como en la búsqueda externa de información obtenida en la literatura.

*Tabla 4 Especificaciones para el banco de pruebas.*

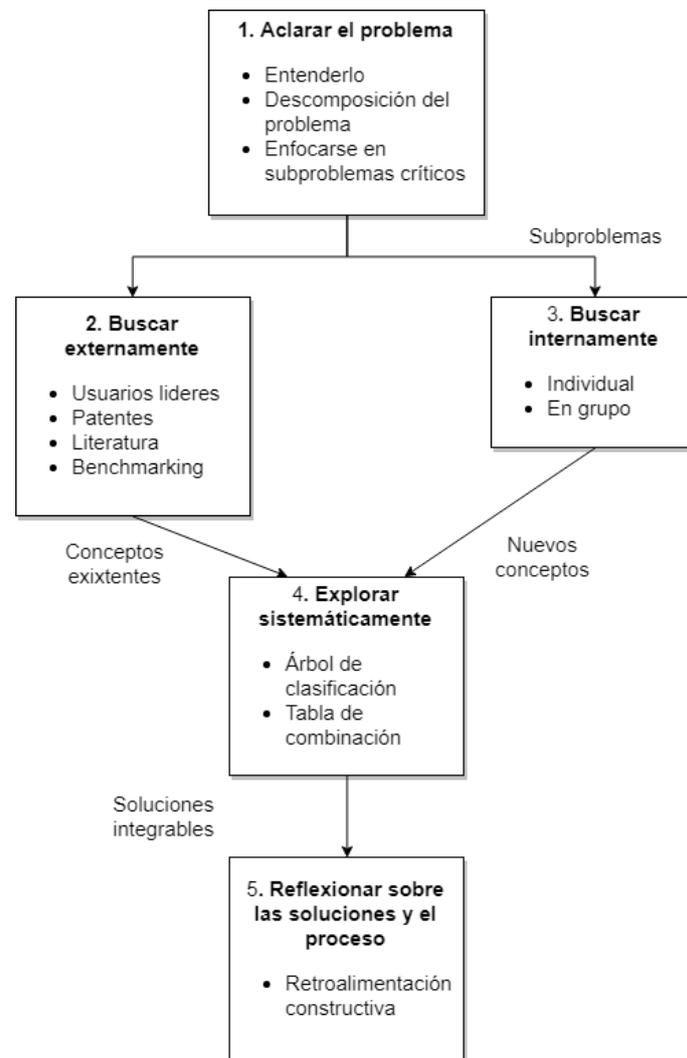
| Necesidad   | Especificación   |
|---|--|
| <b>El banco aplica carga en la probeta</b>  |  |
| El banco aplica carga cíclicamente en el extremo de la probeta hasta fracturarla. | Cambio de sentido en la fuerza aplicada de (+) N a (-) N |
| La frecuencia de los ciclos puede ser controlada en el banco.                     | Intervalos de tiempo de 0.5 [s] y 5 [s].                 |
| La magnitud de carga se puede controlar.  | Variación de la carga entre 0 [N] y 500 [N].             |
| <b>El banco se adapta a diversas probetas</b>                                     |  |

|   |  |
|---|--|
| El banco se adapta a diversos diámetros y calibres de tubo.                               | Diámetro de tubo para manufactura de 3/4 [pulg] a 1 ½ [pulg].  |
| El banco mantiene fija la probeta en la misma posición en todo momento durante la prueba. | Ángulos de posicionamiento fijos ( <i>Roll, Pitch y Jaw</i> ).   |
| El banco tiene un punto accesible y específico donde se coloca la probeta.                | Un área de entre 0.15 [m <sup>2</sup> ] y 0.20 [m <sup>2</sup> ].  |
| <b>El banco guarda los datos de la prueba</b>   |  |
| El banco es capaz de almacenar el número de ciclos.                                       | Creación de una recopilación de ciclos.  |
| El banco puede guardar el orden de magnitud de los ciclos.                                | Mínimo de 10 <sup>6</sup> .  |
| El banco guarda los datos en forma ordenada.  | Formato: <i>ciclo actual/ciclo donde ocurrió la fractura</i> .   |
| El banco almacena los datos de manera automática.   | Después del inicio de la prueba no hay necesidad de interactuar con el banco.  |
| <b>El banco despliega datos durante la prueba</b>   |  |
| El banco muestra al usuario el número de ciclos transcurridos en la prueba.               | El ciclo cambia continuamente de cero al n-ésimo ciclo.  |
| El banco indica el momento de la fractura.  | Actualización del segundo término del formato de almacenamiento.   |
| <b>El banco detecta variables en la prueba</b>  |  |
| El banco detecta si la probeta ha sufrido una fractura.                                   | Cambio de estado de una variable bivalente.  |
| El banco cuenta el número de ciclos.  | Aumento unitario desde 0 hasta 10 <sup>6</sup> ciclos.   |
| <b>El banco permite la interacción del usuario (al inicio y durante la prueba)</b>        |  |
| El banco inicia la prueba hasta que el usuario lo indique.                                | Es necesario que después de colocar la probeta el usuario ejecute por lo menos una acción con el banco.  |
| El banco da la posibilidad al usuario de detener la prueba en cualquier momento.          | Interrupción de los ciclos de carga posterior al inicio de la prueba mediante interacción del usuario con el banco (se mantiene el último ciclo de trabajo). |

Con las necesidades explicadas finalmente a través de especificaciones, el desarrollo del banco pudo pasar hacia el siguiente paso en el proceso de diseño: la generación de conceptos.

## 2.5 Generación de conceptos

La generación de conceptos a través de un método estructurado se convierte en una herramienta muy útil, que permite conjuntar información de diversas fuentes, mediante la exploración de diversas opciones y proporciona mecanismos para la generación de soluciones parciales. Uno de estos mecanismos es la sucesión de pasos, que permiten aplicar el método de una forma sencilla y ordenada.



*Figura 15 Método de generación de conceptos (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 122)*

El método utilizado se descompone en cinco pasos, basando su funcionamiento en la descomposición de un problema complejo, como se indica en la Figura 15, en subproblemas cada vez más sencillos.

## 2.5.1 Aclarar el problema

El primer paso dentro del diagrama se refiere a un entendimiento del problema, lo que involucra el uso de las especificaciones generadas en el apartado anterior, de las cuales se destacan las siguientes, por representar la importancia relativa más alta y brindar la esencia a la prueba.

- Probetas manufacturadas con tubo desde  $\frac{3}{4}$  [pulg] a  $1 \frac{1}{2}$  [pulg] de diámetro exterior.
- Cambio de sentido en la fuerza aplicada (carga cíclica).
- Modificar el tiempo de aplicación de la fuerza (la frecuencia de carga).
- Conteo de ciclos con un aumento unitario hasta el n-ésimo ciclo.
- Despliegue del número de ciclos transcurrido en la prueba.
- Almacenamiento del número de ciclos transcurridos.
- Cambio de alguna señal, que indique el momento de la fractura.
- Interacción del usuario con el banco después de colocar la probeta, para iniciar la prueba.

El listado mostró una gran variedad de funciones que se pretendía que el banco pudiera desempeñar. Por la complejidad de las funciones, se decidió que debía haber sistemas; cada uno encargado de al menos de una función, por lo cual el problema total pasó a convertirse de un solo problema a subproblemas, que brindaran un acercamiento más *amigable* hacia la solución parcial de cada uno de ellos.

El primer paso para descomponer el problema funcionalmente fue, representarlo por medio de una *caja negra* que opera con un flujo de entrada (materiales, señales, energía, etc.) y el flujo de salida representa los resultados que se esperan al final de la prueba.



*Figura 16 Diagrama general de funciones.*

Con el esquema general en forma de caja negra la subsecuente tarea consistió en realizar subdivisiones para crear una descripción más específica de lo que los elementos del banco pudieran hacer para lograr la resolución del problema en conjunto, además de proporcionar la interacción entre los mismos.

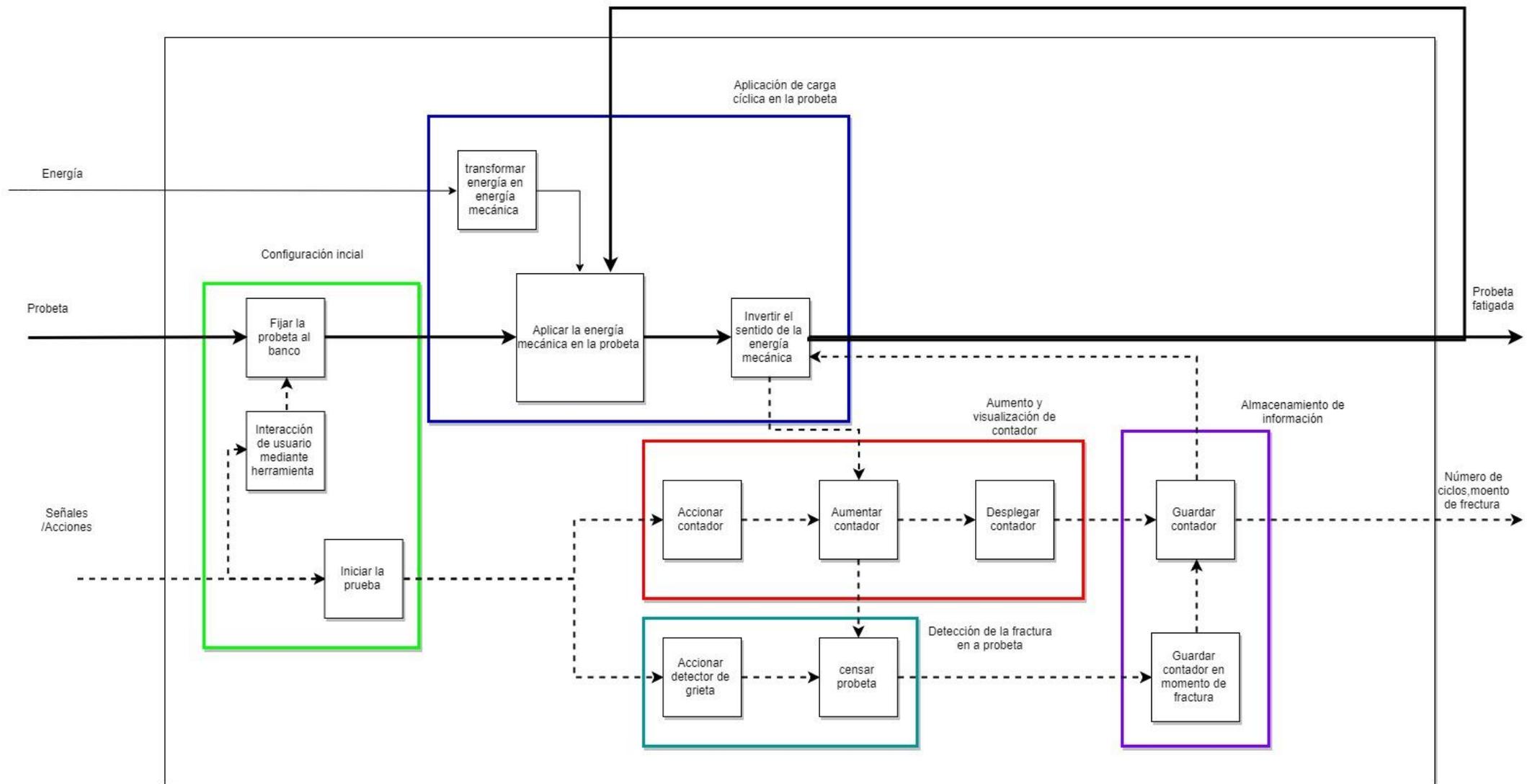


Figura 17 Diagrama de funciones del banco.

El diagrama muestra por medio de líneas continuas gruesas la entrada de material (la probeta), mientras que las señales/acciones y la entrada de energía están denotadas por medio de líneas discontinuas gruesas y líneas continuas delgadas respectivamente.

La línea de flujo que corresponde a la entrada de material fue la primera en generarse, siguiendo con las subfunciones que estarían involucradas directa o indirectamente con la probeta.

Finalmente, de esta actividad se relacionaron las subfunciones similares en grupos más grandes (sistemas) para lograr una segmentación del problema general y posteriormente solucionar de forma particular cada una de las subfunciones en caso de ser necesario, Se tomó como referencia la relación entre las funciones y sus respectivas especificaciones para la creación de los sistemas aplicables al banco de pruebas.

### **Sistema de sujeción de la probeta**

- Fijar la probeta en el banco de pruebas. Sujetar la probeta en los extremos de un brazo de la unión en T.

### **Sistema de aplicación de carga**

- Transformar energía en energía mecánica. Convertir la fuente de energía para fatigar la probeta en energía mecánica (aplicación de una fuerza).
- Aplicar energía mecánica en la probeta. Sistema o elemento para aplicar la fuerza.
- Invertir el sentido de aplicación de la energía mecánica en la probeta.

### **Sistema de instrumentación**

- Interacción del usuario.
- Inicio de la prueba.
- Detectar el momento de la fractura en la probeta.
  - Accionar detector de fractura.
  - Sensor probeta (detección del surgimiento de la grieta).
- Visualización y aumento del contador de ciclos.
  - Accionar el contador.

- Aumentar el contador.
- Desplegar el contador.

### **Sistema de almacenamiento de información de la prueba**

- Guardar contador (ciclo actual).
- Guardar contador, indicando el momento de la fractura.

## **2.5.2 Solución de funciones**

Las condiciones particulares planteadas en la prueba, (como lo es la configuración de la probeta y la disposición en la que se requería la aplicación de la fuerza) marcaron una tendencia hacia la solución de funciones *prioritarias*, que por sí mismas podían restringir en gran manera la solución al resto de funciones de los sistemas propuestos.

### **Transformar energía en energía mecánica**

*Actuador neumático.* Requiere de un fluido de trabajo (aire) para poder moverse, lo que implica el uso de una instalación y un equipo que suministre constantemente el fluido de trabajo. El aire comprimido empuja un vástago dentro del émbolo, transformando la energía del aire comprimido en energía mecánica a la salida del actuador.

*Actuador hidráulico.* Los elementos que necesita son básicamente los mismos que un actuador neumático, cambiando únicamente el fluido de trabajo; el aire es sustituido por un fluido viscoso.

*Actuador eléctrico (motor).* Un motor eléctrico, necesita generalmente CA o CD para funcionar y dependiendo de su configuración necesita otros elementos eléctricos para su correcto funcionamiento. El movimiento que produce es rotacional, a través de una flecha.

### **Aplicar energía mecánica en la probeta**

Elemento mecánico que una al actuador con la probeta, permitiendo la aplicación vertical de la energía sobre la probeta proveniente del actuador; adaptable a diámetros de tubo entre  $\frac{3}{4}$  [pulg] y  $1 \frac{1}{2}$  [pulg].

## **Invertir el sentido de aplicación de la energía mecánica en la probeta**

La prueba requiere que la carga se aplique sobre una única línea de acción, de este modo la inversión de carga se puede efectuar de manera sencilla, si el actuador ejecuta un movimiento lineal, restringiendo así cualquier otro tipo de movimiento en cualquier otra dirección. Por medio elementos dedicados, (válvulas AND, OR, finales de carrera, etc.) o electrónicos, (circuitos lógicos secuenciales, microcontroladores, electroválvulas, relevadores, etc.) se puede ir en un sentido y cambiar posteriormente al otro.

## **Fijar la probeta en el banco de pruebas**

*Estructura rígida y adaptable.* Una estructura con una configuración específica y materiales adecuados para soportar los ciclos de carga y sostener la probeta en los extremos de la unión en T, sin comprometer la prueba.

## **Visualización y aumento del contador de ciclos**

*Contador mecánico.* Un contador accionado “manualmente” que requiere de la aplicación de una fuerza externa para cambiar el conteo.

*Pantalla LCD y microcontrolador.* El microcontrolador aumenta una variable internamente cada vez que ejecuta un ciclo de carga, y es mostrada por medio de una pantalla LCD conectada al microcontrolador.

*Microcontrolador y PC.* El microcontrolador se encarga de recibir información de la PC por medio de algún protocolo de comunicación (I<sup>2</sup>C, Serial, Bluetooth, etc.) para ejecutar los ciclos de carga. La PC despliega por medio de una interfaz (LabView, C#, Python, Java, etc.) el aumento de los ciclos de trabajo.

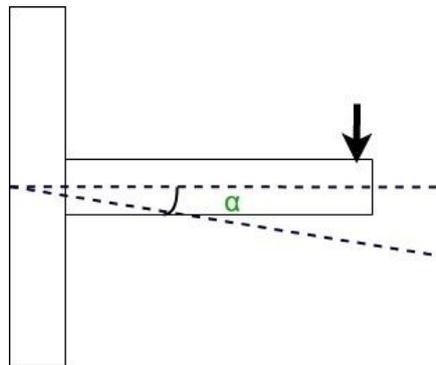
## **Detectar el momento de la fractura en la probeta**

*Trabajar con cambio de presión.* En un recipiente presurizado, la presencia de una grieta generará un cambio de presión, es decir, habrá una despresurización (si es que el recipiente está a una presión mayor en el interior que la presión del exterior). El cambio de presión sirve como indicador de que el recipiente ha sido abierto o cerrado dependiendo del signo del delta de presión.

La probeta está hecha de tubo, si los extremos del tubo son sellados la parte interna del tubo queda aislada del exterior. La forma de la probeta permite que sea sellada, por lo que, es posible introducir un fluido a presión dentro de la probeta, haciendo que quede presurizada.

En el momento en que la fractura atraviesa la pared del tubo, el fluido a presión comenzará a salir a la atmósfera generando una caída de presión dentro de la probeta.

*Variación de ángulo.* La carga se aplica perpendicular al eje del brazo de la probeta, esta carga hace que el brazo se desplace verticalmente hacia abajo. Al tener un punto de sujeción (la unión soldada en la probeta) el brazo no puede desplazarse completamente perpendicular al eje de aplicación de la fuerza. La flexión que sufre el brazo genera un ángulo entre él y la vertical mostrado en la Figura 18 (línea paralela al eje de aplicación de la fuerza). El ángulo mencionado se incrementa conforme la magnitud de ciclos aumenta por la fatiga. El ángulo puede ser determinado por medio de un acelerómetro.



*Figura 18 Ángulo  $\alpha$  creado por la aplicación de la carga.*

*Material conductor.* Existen materiales conductivos que se pueden aplicar sobre superficies no conductoras, para crear una capa conductora sobre la superficie de dicho material. Tal es el caso de las pinturas a base de grafito y agua que permiten crear conexiones “flexibles” sobre el material.

*Visión artificial.* Inspeccionar la probeta con algoritmos de visión artificial, específicamente en la zona de interés (periferia del cordón de soldadura); caracterizando el surgimiento de la fractura. Existen diversas bibliotecas de visión artificial, que normalmente se pueden implementar en diversos lenguajes de programación facilitando su implementación.

*Galgas extensiométricas.* Las galgas son elementos pequeños (del orden de 25mm<sup>2</sup>) hechos de un material conductor aislado entre dos capas de un material flexible, que cuando son deformadas en alguna de sus dimensiones presentan un cambio en su resistencia eléctrica. Al aplicarle un voltaje, el cambio por la deformación es muy pequeño, por lo que generalmente necesitan de un arreglo de resistores, en la configuración conocida como puente de Wheatstone para trabajar con dicho voltaje.

### **Almacenar información de la prueba**

*Microcontrolador.* Un microcontrolador dentro de sus posibilidades cuenta con espacios en memoria EEPROM, pudiendo almacenar en esos espacios información que el microcontrolador le proporcione.

*Módulo SD o microSD junto con microcontrolador.* Existen módulos que permiten interconectar elementos electrónicos de manera más sencilla y facilitar su uso; como en este caso las memorias SD a tarjetas de desarrollo (microcontrolador) y guardar en ellas información proveniente del mismo microcontrolador por medio de comunicación SPI.

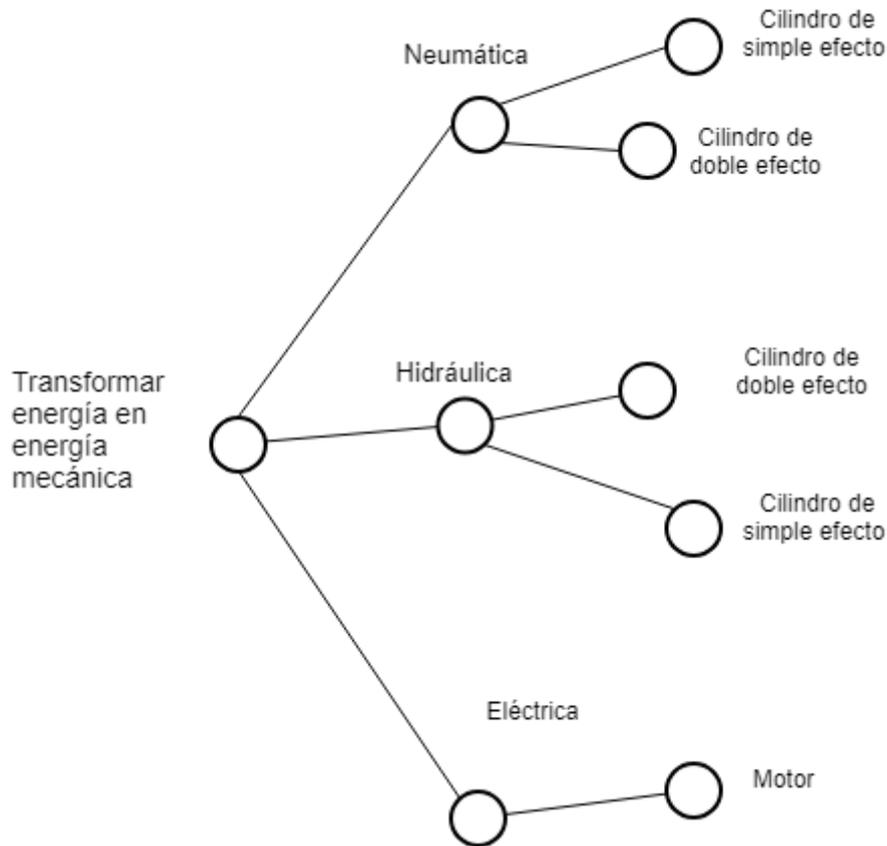
*Microcontrolador y PC.* Si el microcontrolador puede detectar el momento de la fractura, se puede enviar dicha información a la PC por medio de algún protocolo de comunicación (I<sup>2</sup>C, Serial, Bluetooth, etc.) a un programa (LabView, C#, Python, Java, etc.) que reciba la información referente al momento de la fractura y lo guarde en su memoria interna, del mismo modo que lo haría al guardar un archivo de cualquier tipo en ella.

## **2.5.3 Exploración sistemática de las soluciones**

Dar solución a las funciones, puede generar un gran número de ideas para satisfacer la necesidad, lo cual ayuda a tener un mejor entendimiento del problema. Sin embargo, de entre el número total de soluciones generadas habrá algunas más viables, (de acuerdo con las necesidades y características del proyecto) por lo que la detección pronta y oportuna evitará el desperdicio de recursos, enfocándose donde sean necesarios.

Con la ayuda de un árbol de clasificación de conceptos Figura 19, se desarrolló la subfunción, *transformar energía en energía mecánica*, (que es un problema fundamental)

con la finalidad de analizar de manera paralela las posibles soluciones y poder restringir en alto grado las posibles soluciones a las subfunciones restantes.



*Figura 19* Árbol de clasificación de conceptos para la función:  
*Transformar energía en energía mecánica.*

Del análisis del árbol se obtuvo que, tanto por las restricciones económicas, como por las limitantes de infraestructura y por las restricciones de la prueba, las opciones correspondientes a la energía hidráulica y eléctrica resultaban opciones menos viables, dejando la rama de energía neumática como la línea base para la exploración y desarrollo de soluciones.

La mayoría de las soluciones planteadas para cada subfunción, (sección 2.5.2) eran independientes una de la otra, de modo que se podían combinar y obtener diversas soluciones generales (con cada una de estas combinaciones) al diseño del banco de

pruebas. De modo que para analizar toda la gama de combinaciones posibles y discernir entre la viabilidad de estas, se elaboró una tabla de combinaciones conceptos.

*Tabla 5 Conceptos generados.*

| <b>Transformar energía en energía mecánica</b> | <b>Aplicar energía mecánica en la probeta</b>         | <b>Invertir el sentido de aplicación de la energía mecánica en la probeta</b>       | <b>Fijar la probeta en el banco de pruebas</b> | <b>Visualización y aumento del contador de ciclos</b> | <b>Detectar el momento de la fractura en la probeta</b> | <b>Almacenar información de la prueba</b> |
|--|---|---|--|---|---|---|
| Cilindro neumático de simple efecto.           | Elemento mecánico que una el actuador con la probeta. | componentes neumáticos (válvulas n vías n posiciones, AND, OR, finales de carrera). | Estructura rígida adaptable.                   | Contador mecánico.                                    | Trabajar con cambio de presión.                         | Memoria EEPROM (microcontrolador).        |
| Cilindro neumático de doble efecto.            | Elemento mecánico que una el actuador con la probeta. | Componentes electroneumáticos.  | Estructura rígida adaptable.                   | Pantalla LCD y microcontrolador.                      | Variación de ángulo.                                    | Memoria SD.                               |
|  |   |   |  | Microcontrolador y PC.                                | Material conductivo.                                    | Memoria micro SD                          |
|  |   |   |  |   | Galgas extensiométricas.                                | Registro manual.                          |
|  |   |   |  |   | Visión artificial.                                      | PC.                                       |

El número total de combinaciones posibles con las soluciones propuestas arrojó un número bruto de 240 posibles combinaciones, sin embargo, no todas estas combinaciones resultaban compatibles entre sí. Depurándose la tabla, se llegó a un arreglo de combinaciones reducido para obtener las soluciones viables a los problemas planteados.

Resultando en siete diferentes conceptos a explorar y sobre los cuales se trabajó para encontrar el mejor concepto aplicable, contemplando los requerimientos y especificaciones planteadas.

Tabla 6 Combinación de soluciones.

| Concepto | Transformar energía en energía mecánica | Aplicar energía mecánica en la probeta                | Invertir el sentido de aplicación de la energía mecánica en la probeta              | Fijar la probeta en el banco de pruebas | Visualización y aumento del contador de ciclos                    | Detectar el momento de la fractura en la probeta | Almacenar el momento de la fractura. |
|----------|---|---|---|---|---|--|--------------------------------------|
| 1        | Cilindro neumático de doble efecto      | Elemento mecánico que una el actuador con la probeta. | Componentes neumáticos (válvulas n vías n posiciones, AND, OR, finales de carrera). | Estructura rígida adaptable.            | Pantalla LCD, microcontrolador y final de carrera (micro switch). | Trabajar con cambio de presión.                  | Memoria EEPROM (microcontrolador).   |
|          |   |   |   |   |   |  | Memoria SD.                          |
|          |   |   |   |   |   |  | Memoria microSD.                     |
| 2        | Cilindro neumático de doble efecto.     | Elemento mecánico que una el actuador con la probeta. | Componentes electroneumáticos.  | Estructura rígida adaptable.            | Pantalla LCD y microcontrolador.                                  | Variación de ángulo (acelerómetro).              | Memoria EEPROM (microcontrolador).   |
|          |   |   |   |   |   |  | Memoria SD.                          |
|          |   |   |   |   |   |  | Memoria microSD.                     |
| 3        | Cilindro neumático de doble efecto.     | Elemento mecánico que una el actuador con la probeta. | Componentes electroneumáticos.  | Estructura rígida adaptable.            | Pantalla LCD y microcontrolador.                                  | Galgas extensiométricas                          | Memoria EEPROM (microcontrolador).   |
|          |   |   |   |   |   |  | Memoria SD.                          |
|          |   |   |   |   |   |  | Memoria microSD.                     |
| 4        | Cilindro neumático de doble efecto.     | Elemento mecánico que una el actuador con la probeta. | Componentes electroneumáticos.  | Estructura rígida adaptable.            | Microcontrolador y PC.  | Material conductivo.                             | PC.                                  |
| 5        | Cilindro neumático de doble efecto.     | Elemento mecánico que una el actuador con la probeta  | Componentes neumáticos (válvulas n vías n posiciones, AND, OR, finales de carrera). | Estructura rígida adaptable.            | Contador mecánico.  | Trabajar con cambio de presión                   | Registro manual.                     |
| 6        | Cilindro neumático de doble efecto.     | Elemento mecánico que una el actuador con la probeta. | Componentes electroneumáticos.  | Estructura rígida adaptable.            | Microcontrolador y PC.  | Visión artificial.                               | PC.                                  |
| 7        | Cilindro de simple efecto.              | Elemento mecánico que una el actuador con la probeta. | Componentes neumáticos (válvulas n vías n posiciones, AND, OR, finales de carrera). | Estructura rígida adaptable.            | Pantalla LCD y microcontrolador.                                  | Trabajar con cambio de presión.                  | Memoria EEPROM (microcontrolador).   |
|          |   |   |   |   |   |  | Memoria SD.                          |
|          |   |   |   |   |   |  | Memoria microSD.                     |

# 3. Diseño de configuración

## 3.1 Depuración de funciones

Analizando la Tabla 6 de la sección anterior, se observó que las funciones *Aplicar energía mecánica en la probeta* y *Fijar la probeta en el banco de pruebas*, tenían la misma solución para cada concepto generado, soluciones que aún resultaban muy ambiguas. Por lo que se tenía que profundizar en el desarrollo de las soluciones para ambas funciones. Sin embargo, la función *Aplicar energía mecánica en la probeta* dependía de la selección del actuador a implementar; dejando su desarrollo y depuración para el momento de la selección del concepto a probar.

La función *Fijar la probeta en el banco de pruebas* tenía como solución planteada usar una *estructura rígida adaptable*. Mientras que, para este punto del diseño resultaba evidente que una estructura era necesaria, no solo para cumplir con la solución planteada, sino también para colocar los elementos de los sistemas que se preveían en el banco. Como base de partida se proporcionó una estructura con forma de marco; dicha estructura respetaba la disposición señalada en la Figura 20, con las siguientes características:

- Construido con perfil de acero en “U” de 6 [pulg].
- Las uniones entre elementos eran mecánicas por medio de tornillos.
- Patrón de barrenos sobre los perfiles verticales.
- Con dimensiones de 1760 [mm], 711 [mm] y 152 [mm] aproximadamente.



*Figura 20 Estructura para la prueba.*

Es importante mencionar que, a partir de este momento, el marco pasó a formar parte de las acotaciones en la aplicación de los conceptos planteados.

### 3.1.1 Fijar la probeta en el banco de pruebas

La solución para esta función requería, que la forma en que se implementara, permitiera la adaptación a los diámetros exteriores de tubo comprendidos entre  $\frac{3}{4}$  [pulg] y  $1 \frac{1}{2}$  [pulg] y que la probeta se mantuviera en la posición que se muestra en la Figura 14 durante toda la prueba, (eso con respecto a las especificaciones de la prueba) pero además de ello, la solución tenía que contemplar el uso del marco; que por sí mismo carecía de una manera de sujetar la probeta.

Como primer acercamiento a la solución se establecieron las maneras en que la probeta podía ser sostenida (permitiendo la aplicación de la carga cíclica en el extremo) de manera independiente al marco propuesto. Una forma era aplicando fuerzas por los extremos del tubo (sobre la misma línea de acción) pero con sentidos contrarios (sujeción vertical), Figura 21 (a). Mientras que para la segunda se propuso que la probeta se sujetara en una pequeña sección en cada uno de los extremos (sujeción horizontal) por medio de fuerzas perpendiculares a la aplicación de carga Figura 21 (b).

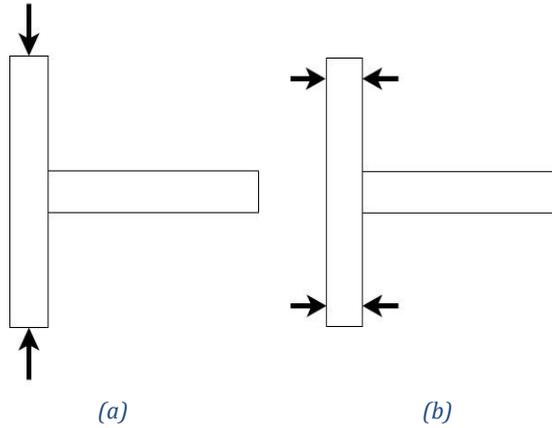


Figura 21 Formas de sujetar la probeta, izquierda: verticalmente en los extremos, derecha: lateralmente en los extremos.

Para cada forma de sujetar la probeta se crearon diferentes arreglos de elementos que cumplieran con las especificaciones y limitantes.

### Soluciones propuestas

La especificación para mantener fija la probeta requería de la ubicación de los ángulos yaw, pitch y roll; sobre la probeta se montó un sistema de referencia y sobre este sistema se ubicaron los ángulos de acuerdo con la Figura 22.

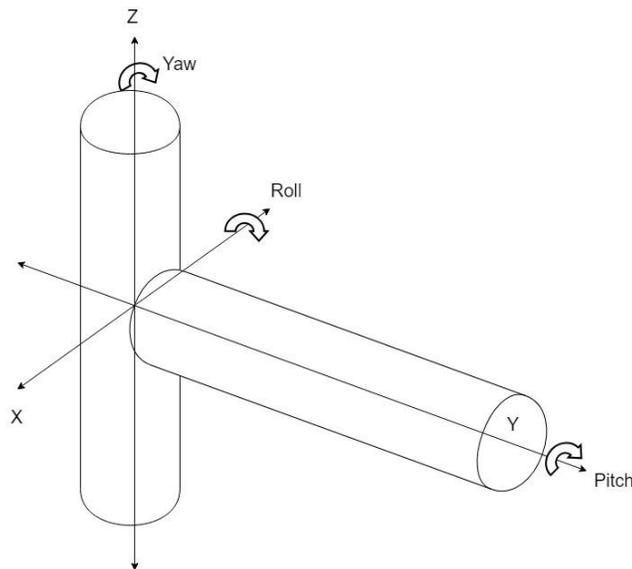
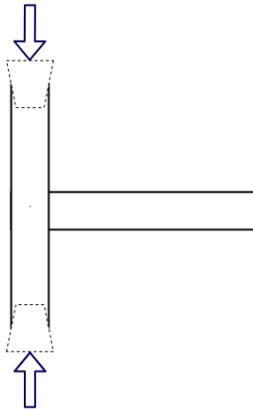


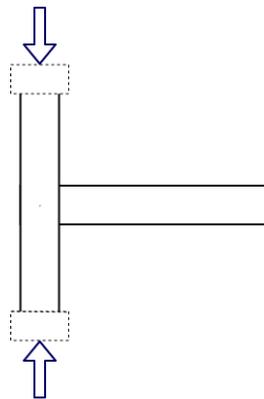
Figura 22 Ubicación de los ángulos del yaw, pitch y roll.

Las soluciones propuestas para esta función se centran en mantener los ángulos pitch y roll en la misma posición, ubicando la probeta sobre el plano Y-Z.

La Figura 24 muestra la primera solución, donde, la sujeción se da por medio de dos elementos cónicos, que se introducen en el tubo por los extremos. Manteniendo uno de ellos fijo y presionado el contrario contra el cono fijo, se encapsula e inmoviliza la probeta. El segundo concepto, señalado en la Figura 23, se basa en el uso de bases que tienen un maquinado circular con el diámetro exterior de la probeta, de modo que la probeta se introduce en ellas y de igual forma, manteniendo una base fija y presionando la contraria hacia la fija se logra la inmovilización de la probeta.

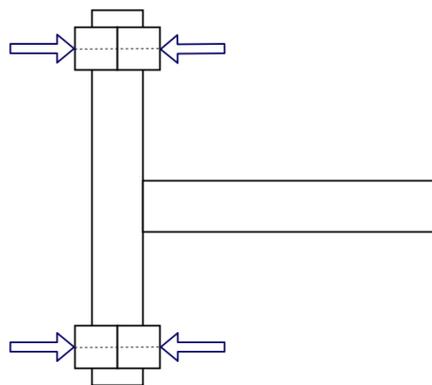


*Figura 24 Bases cónicas.*



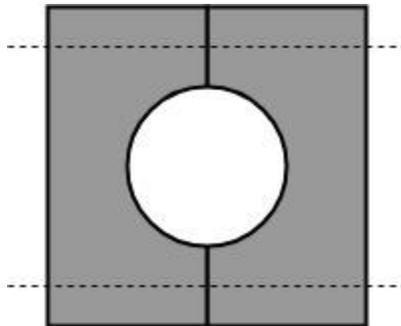
*Figura 23 Bases con el maquinado de la probeta.*

Para el tipo de sujeción horizontal se propuso utilizar pares de mordazas en cada extremo de la probeta sobre una pequeña sección de ella, con una forma que permitiera aprisionar la probeta entre las mordazas.



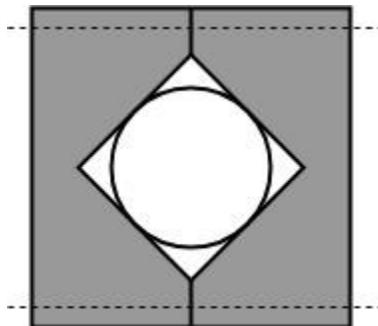
*Figura 25 Disposición de la "sujeción horizontal".*

La configuración que resulta más intuitiva, para la mordaza, es el maquinado de la mitad de la forma de la sección transversal del perfil de la probeta (circular) en cada una, de modo que al poner las mordazas juntas con la probeta entre ellas quedaría aprisionada; evitando el movimiento mediante uniones mecánicas (tornillos y tuercas) sobre la línea punteada Figura 26. Teniendo pares de mordazas con diversos maquinados para cada diámetro de tubo a probar.



*Figura 26 Concepto con maquinado circular.*

Derivado de esta propuesta surgió el uso de pares de bloques en “V”, que dispuestos el uno contra el otro presionan en dos puntos a la probeta por medio de dos líneas tangentes al perfil circular de la probeta manteniéndola sujeta y, de igual forma, uniendo los bloques por medio de tornillos y tuercas en los extremos.



*Figura 27 Concepto de bloques en "V".*

Para completar los conceptos, se prosiguió a integrar el uso del marco y obtener los conceptos con las características y necesidades contempladas.

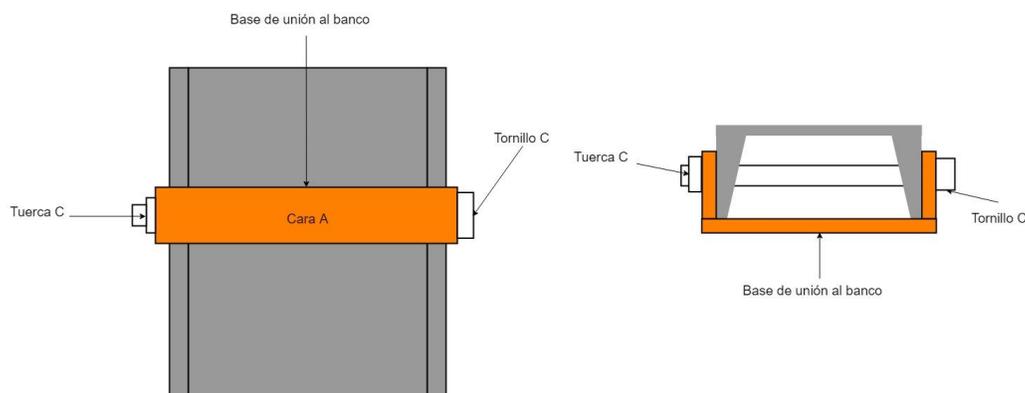
## Adaptación del marco para aplicar los conceptos

El marco propuesto contaba con un patrón vertical de barrenos sobre el costado de los postes de acuerdo con la Figura 28, permitiendo sujetar, al marco, elementos mecánicos por medio de tornillos (con su respectiva tuerca). De modo que los conceptos de sujeción se complementaron con esta idea.



*Figura 28 Patrón vertical de barrenos.*

La adaptación al marco consistió en un elemento mecánico con forma de “C”, mostrado en color naranja en la Figura 29, que con barrenos a los costados permitiera la sujeción al banco en su patrón de barrenos verticales por medio del tornillo C y la tuerca C, apretando las caras laterales de la base de unión al banco contra el perfil en “U” manteniendo la cara A siempre en contacto con el perfil del marco.



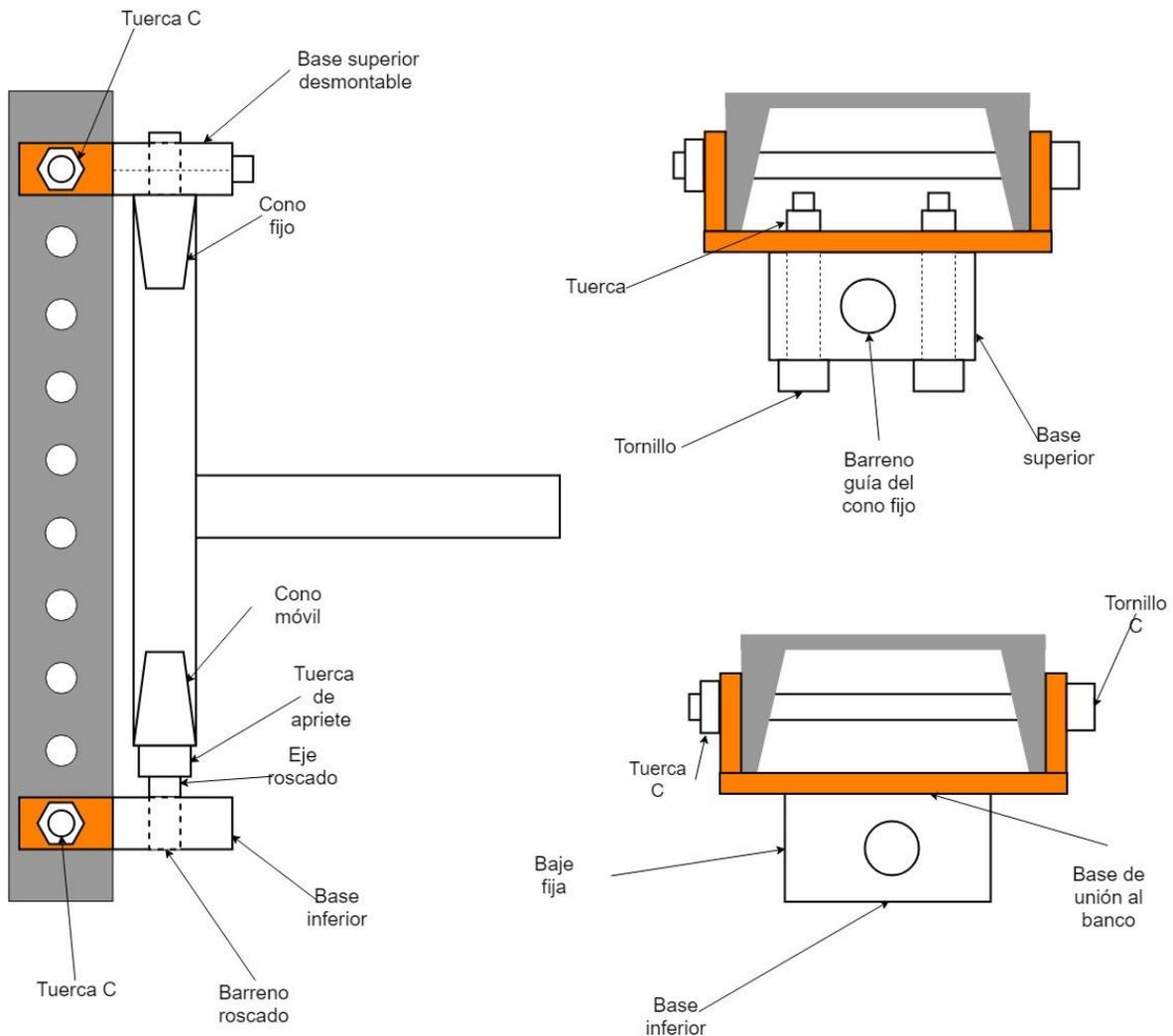
*Figura 29 Montaje de la base de unión al banco.*

*Izq. Vista frontal del montaje. Dcha. Vista superior del montaje.*

Los conceptos finales se resumen en cuatro, nombrándose de la “A” a la “D” como sigue:

- Concepto A: Sujeción por medio de conos opresores.
- Concepto B: Sujeción por medio de bases opresoras.
- Concepto C: Sujeción por mordazas circulares.
- Concepto D: Sujeción por mordazas en “V”.

### Concepto A

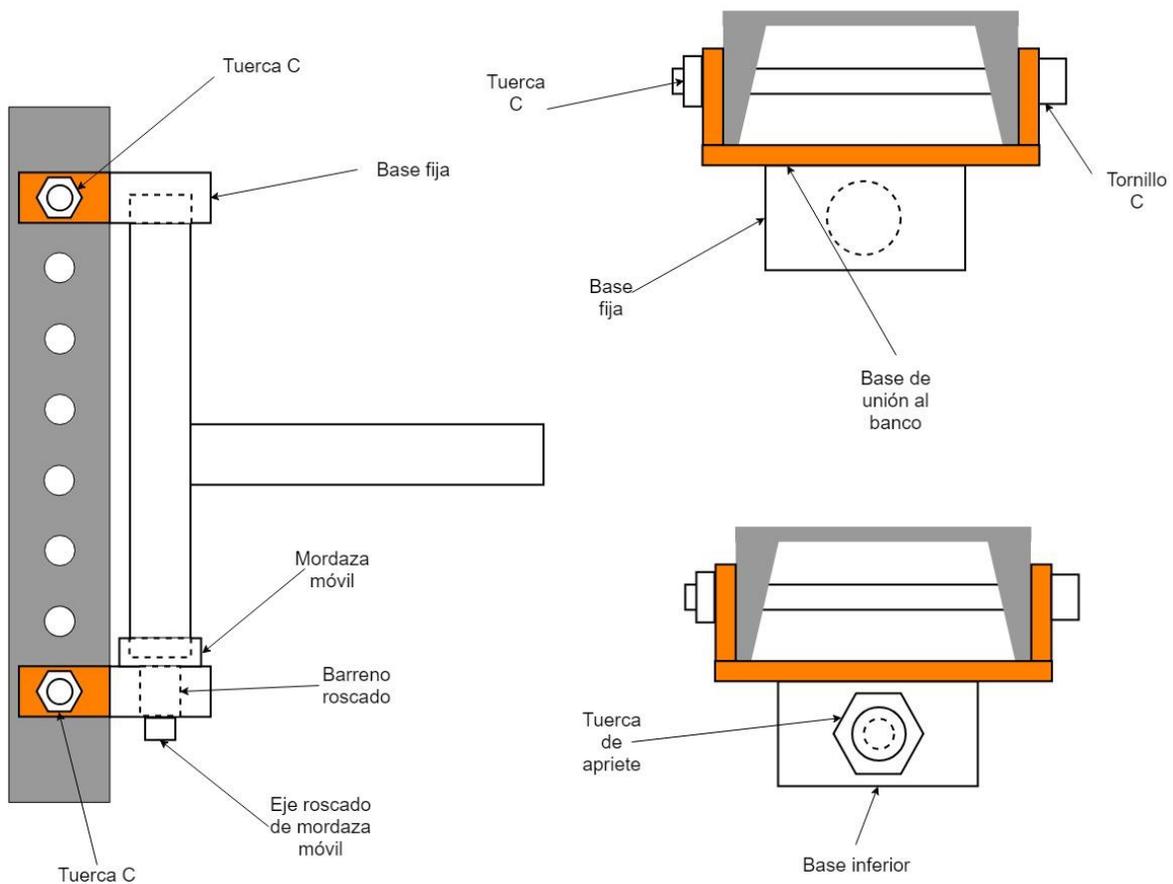


*Figura 30 Concepto A sujeción por medio de conos opresores.*

En la Figura 30 la base superior y el cono fijo son desmontables de la base de unión al banco (Figura 29), permitiendo insertar primero la probeta en el cono móvil y posteriormente el cono fijo, para después colocar la base superior y fijarla por medio

de tornillos y sus tuercas contra la cara posterior de la base de unión al banco (en color naranja), de modo que la base superior se convierte en un tope mecánico y el barreno, en guía para el eje del cono fijo, asegurando que se mantenga vertical el cono y por ende la probeta. Con la probeta colocada en los conos, el siguiente paso es llevar al cono móvil hacia el cono fijo para encapsular la unión, esto se logra girando la tuerca de apriete en el cono móvil; el giro, y por ende el ascenso del cono se da porque la base inferior (unida permanentemente a la base de unión al banco) posee un barreno roscado y el eje del cono móvil presenta un roscado externo a lo largo del mismo.

### Concepto B

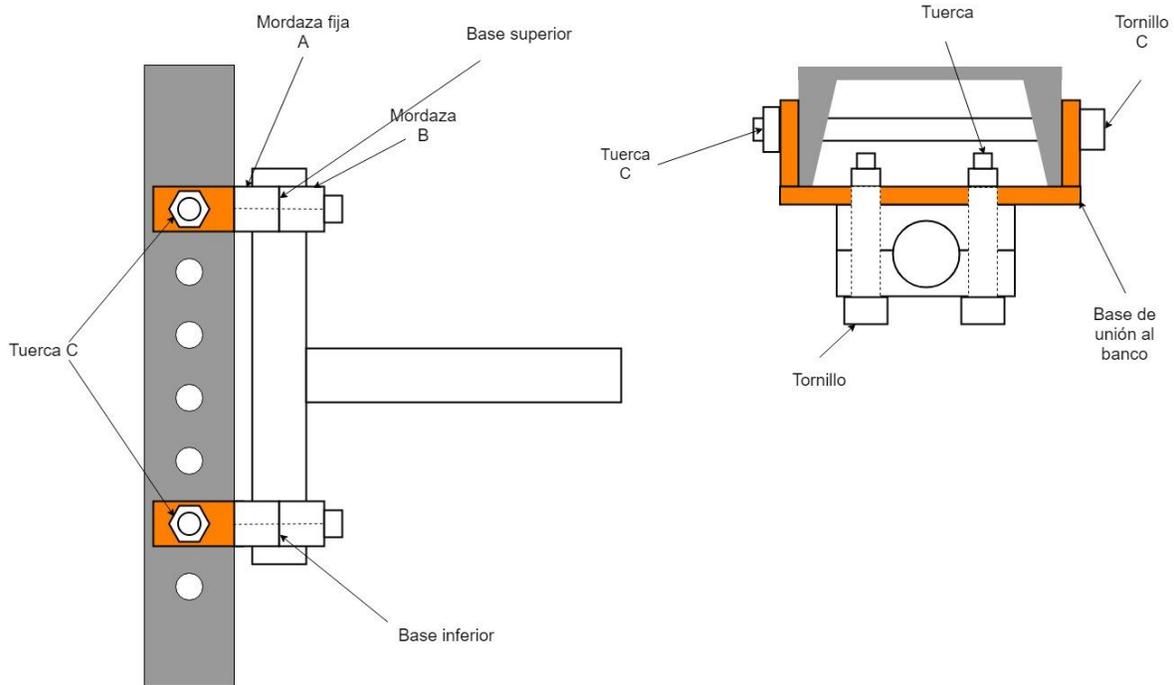


*Figura 31 Concepto B sujeción por medio de bases opresoras.*

En el concepto B, Figura 31, la base inferior se encuentra roscada y el eje de la mordaza móvil también, permitiendo su movimiento vertical ascendente o descendente. La probeta se introduce en la mordaza móvil (que tiene el maquinado del diámetro

exterior de la probeta) y se hace girar la tuerca de apriete de mordaza móvil, llevando la probeta hacia la base fija en la parte superior del arreglo (y que de igual forma tiene un maquinado circular con las dimensiones de la probeta) tratando de comprimir la probeta y lograr su inmovilización.

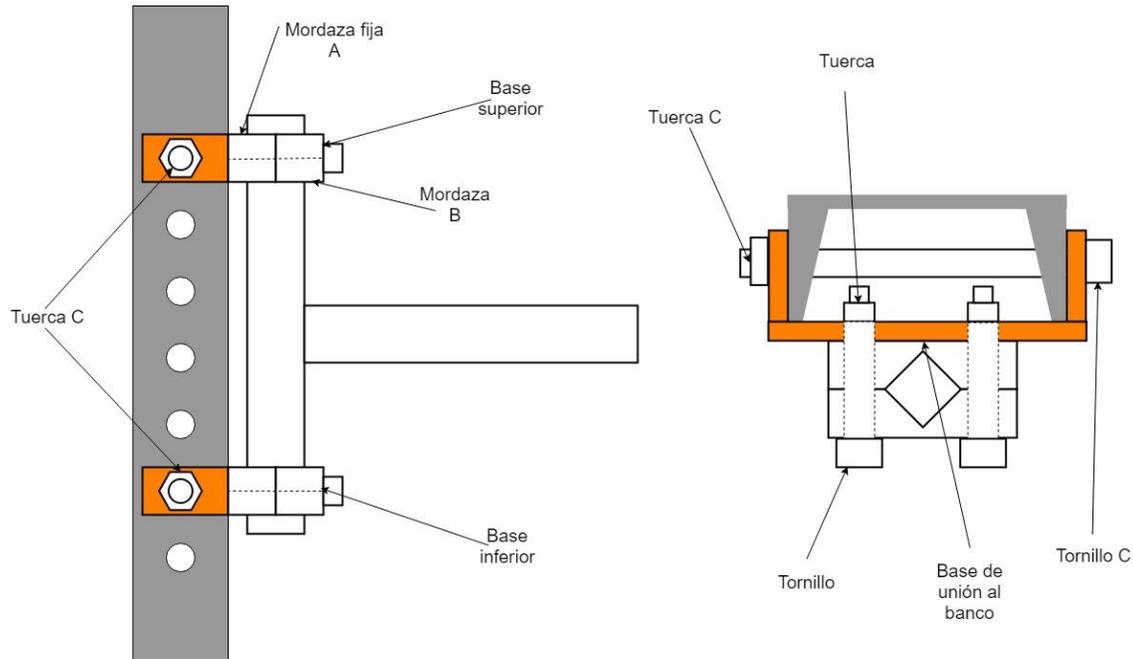
### Concepto C



*Figura 32 Concepto C sujeción por mordazas circulares.*

Para el concepto C, detallado en la Figura 32, la sujeción se da horizontalmente por medio de pares de mordazas (mordaza fija A y mordaza B) tanto en la base superior como en la base inferior (siendo bases iguales). Cada mordaza tiene maquinada la mitad de la circunferencia correspondiente al diámetro exterior de la probeta, de modo que, para colocar la probeta en su posición, se tiene que retirar una mordaza B de cualquier base y aflojar los tornillos de la base contraria. La probeta se introduce en la mordaza sin apretar y se verifica que quede en contacto con las dos mordazas fijas A, ya en contacto, se asegura la base sin apretar con sus respectivos tornillos y se coloca la mordaza B faltante apretándola con su contra, finalizando con el procedimiento.

## Concepto D



*Figura 33 Concepto D sujeción por mordazas en "V".*

El concepto final señalado en la Figura 33, se basa en el principio del concepto C (pares de mordazas, una fija y otra desmontable unidas por tornillos y tuercas). La diferencia radica en la forma del maquinado presente en las mordazas. En el concepto C el maquinado corresponde al diámetro exterior de la probeta, teniendo que haber más de un solo sistema de sujeción (uno para cada diámetro de aprobar), mientras que la forma en "V" permite la adaptación a más de un solo diámetro con un único sistema.

### **Selección del concepto para la función: Fijar la probeta en el banco de pruebas**

Para la selección del concepto se utilizaron criterios de selección, basados en las características y especificaciones planteadas en la sección 2.4. Los criterios seleccionados fueron:

- **Montaje fácil:** Se refiere a complejidad y al número de operaciones necesarias para montar la probeta.
- **Adaptabilidad:** Tener la posibilidad de colocar diversos diámetros de tubo, sin la necesidad de realizar un cambio mayor en el sistema de sujeción.

- **Facilidad de manufactura:** Se refiere a la fabricación de los componentes con máquinas herramientas convencionales y procesos manuales tales como (cortar, soldar, barrenar, etc.), en la medida de lo posible.
- **Tiempo de manufactura:** Es el tiempo estimado que abarca el maquinado y ensamble de los elementos que integran el concepto.
- **Sujeción:** Se evalúa la capacidad de sujetar la probeta y mantenerla en la posición requerida durante la prueba.

Los conceptos se evaluaron con valores del 1 al 5 (siendo 1 lo peor y 5 lo mejor) para cada criterio de selección se le dio una ponderación basada en la jerarquía de las necesidades informada en la Tabla 3. De modo que la suma de las ponderaciones daba la unidad.

*Tabla 7 Evaluación de los conceptos para la función: Fijar la probeta al banco de pruebas.*

| Parámetros   |                           | Conceptos |   |     |     |
|--------------|---------------------------|-----------|---|-----|-----|
| Ponderación  | Criterios de selección    | A         | B | C   | D   |
| 0.2          | Montaje fácil.            | 3         | 3 | 4   | 4   |
| 0.3          | Adaptabilidad.            | 5         | 2 | 2   | 5   |
| 0.1          | Facilidad de manufactura. | 3         | 4 | 3   | 3   |
| 0.1          | Tiempo de manufactura.    | 3         | 2 | 2   | 3   |
| 0.3          | Sujeción.                 | 4         | 4 | 4   | 4   |
| <b>Total</b> |                           | 3.9       | 3 | 3.2 | 4.1 |

El total de puntos para cada concepto de la Tabla 7, se obtuvo de la suma de las evaluaciones obtenidas en cada criterio, multiplicadas por su respectiva ponderación. Los conceptos con mejor evaluación resultaron dos; el *Concepto D: Sujeción por mordazas en "V"* y el *concepto A: Sujeción por medio de conos opresores*, ambos por su capacidad de adaptación a diversos diámetros de tubo y por la forma de sujeción, que comparados con los conceptos B y C no requieren de una mordaza específica para cada diámetro de tubo, agilizando el proceso de montaje de probeta en la prueba. Aunque el concepto D obtuvo una evaluación ligeramente mejor, se decidió desarrollar ambos

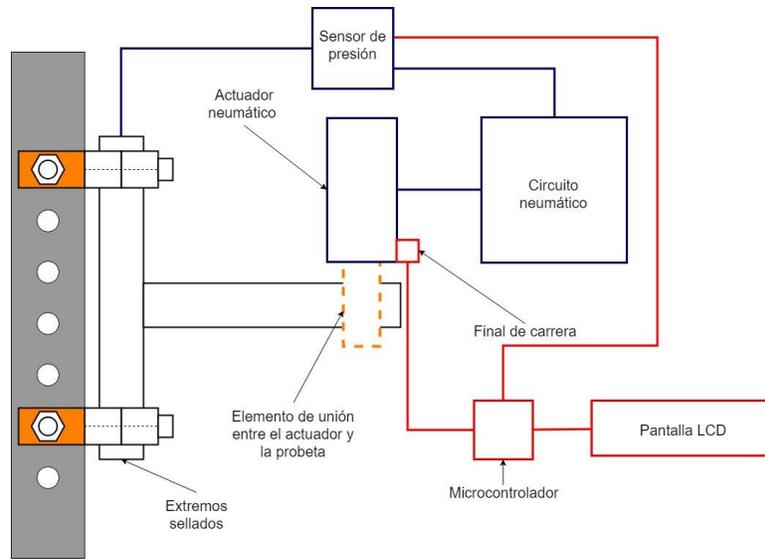
conceptos de sujeción, pensando en que, al tener más opciones se podían complementar en cierto punto.

## 3.2 Distintos conceptos para generar el banco de pruebas

De la combinación de soluciones, se crearon los siete conceptos mostrados en la Tabla 6, cada uno es resultado de la combinación de soluciones dadas a los problemas del banco y pensadas para que existiera sinergia entre ellas, y tratando de integrarlas dentro de los sistemas que se plantearon para conformar el banco (sección 2.5.1). El concepto de sujeción con el que se generaron los conceptos fue el *Concepto D: Sujeción por mordazas en "V"*, pero pudiendo ser aplicado de igual forma el *Concepto A: Sujeción por medio de conos opresores*. A continuación, se explican con mayor detalle los conceptos propuestos de solución para el banco.

### Concepto 1

El primer concepto tiene un actuador neumático de doble efecto que se encarga de aplicar la carga cíclica, controlado por un circuito puramente neumático. La detección de la fractura se da por medio de un cambio de presión dentro de la probeta (la probeta se encuentra sellada por los extremos), un sensor de presión conectado al microcontrolador manda información sobre la presión interna de la probeta, mientras que el conteo de ciclos se da con un final de carrera activado con el movimiento del cilindro conectado al microcontrolador, que puede almacenar la información en su propia memoria interna (EEPROM) o por medio de memoria SD o micro SD. La información es desplegada por medio de una pantalla LCD.



*Figura 34 Concepto 1.*

## Concepto 2

El concepto se basa en el uso de un microcontrolador, como el centro de desarrollo de la prueba. La frecuencia de aplicación de carga (cilindro de doble efecto) está dictada por el microcontrolador; que por medio de relevadores y una electroválvula 5/2 activan el actuador neumático (unido por un elemento mecánico a la probeta), conformando un circuito electroneumático. La información de la prueba se puede almacenar dentro de la memoria interna del microcontrolador o por medio memorias externas (SD o microSD) y es mostrada al usuario por medio de la pantalla LCD. Para la detección de la fractura se usa un acelerómetro midiendo la variación del ángulo omega mostrado en la Figura 35. El ángulo se forma entre la línea perpendicular al brazo sujeto al marco y la línea paralela al brazo fatigado, de modo que, al sobrepasar un umbral establecido (de ángulo), la probeta se identifique como fracturada y se guarde la información requerida, a través de los métodos propuestos.

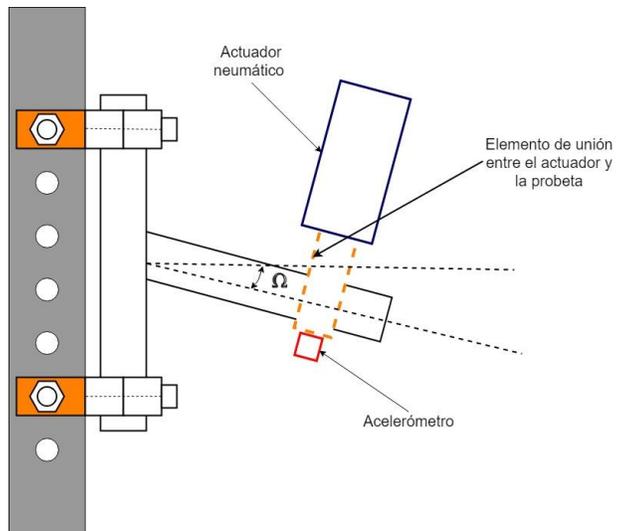


Figura 35 Variación del ángulo  $\Omega$ .

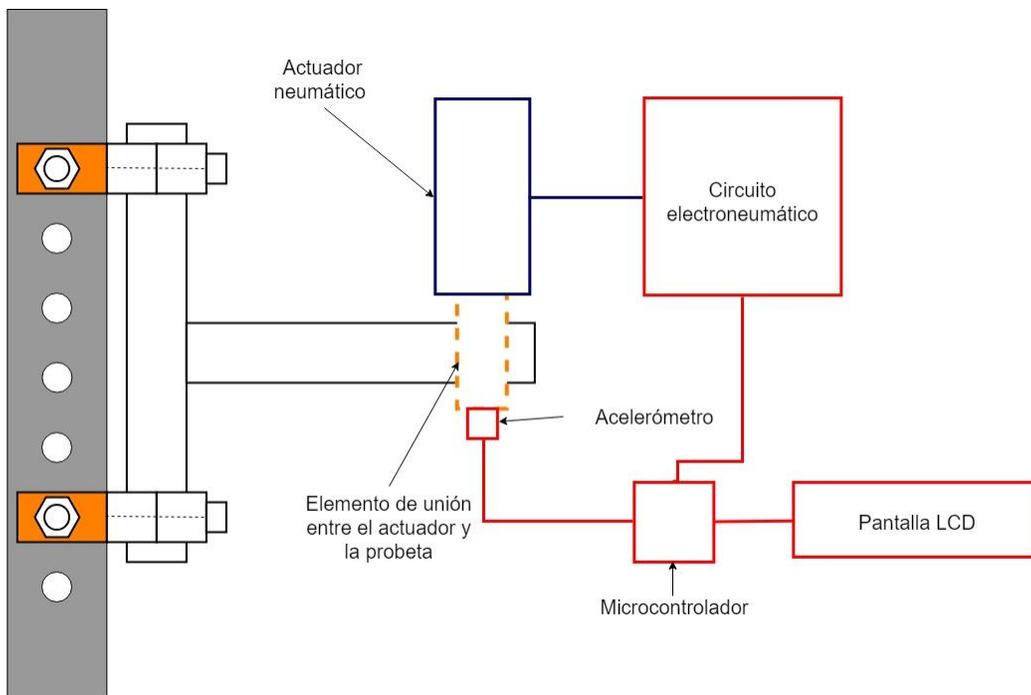


Figura 36 Concepto 2.

### Concepto 3

El concepto presenta las mismas características que el concepto dos Figura 36, la única diferencia radica en la implementación de galgas extensiométricas como medio para la

detección de la fractura. Su uso está fundamentado en dos posibles comportamientos dentro de la prueba. El primero consiste en la caracterización de las deformaciones sufridas por las galgas, colocadas en ciertas zonas de la probeta que se deforman por acción de la carga recibida; con su caracterización se puede determinar a partir de qué momento se considera que la probeta se ha fracturado y registrar esa información en el microcontrolador. El segundo comportamiento consiste en el desgarre de la galga, es decir, el componente se colocó sobre un punto donde el material (la probeta) se fracturó, rompiendo la continuidad eléctrica del patrón de material conductivo dentro de la galga, que se traduce en una pérdida en su lectura por parte del microcontrolador, pudiendo ser indicador para el microcontrolador del comienzo o propagación de la fractura en la probeta.

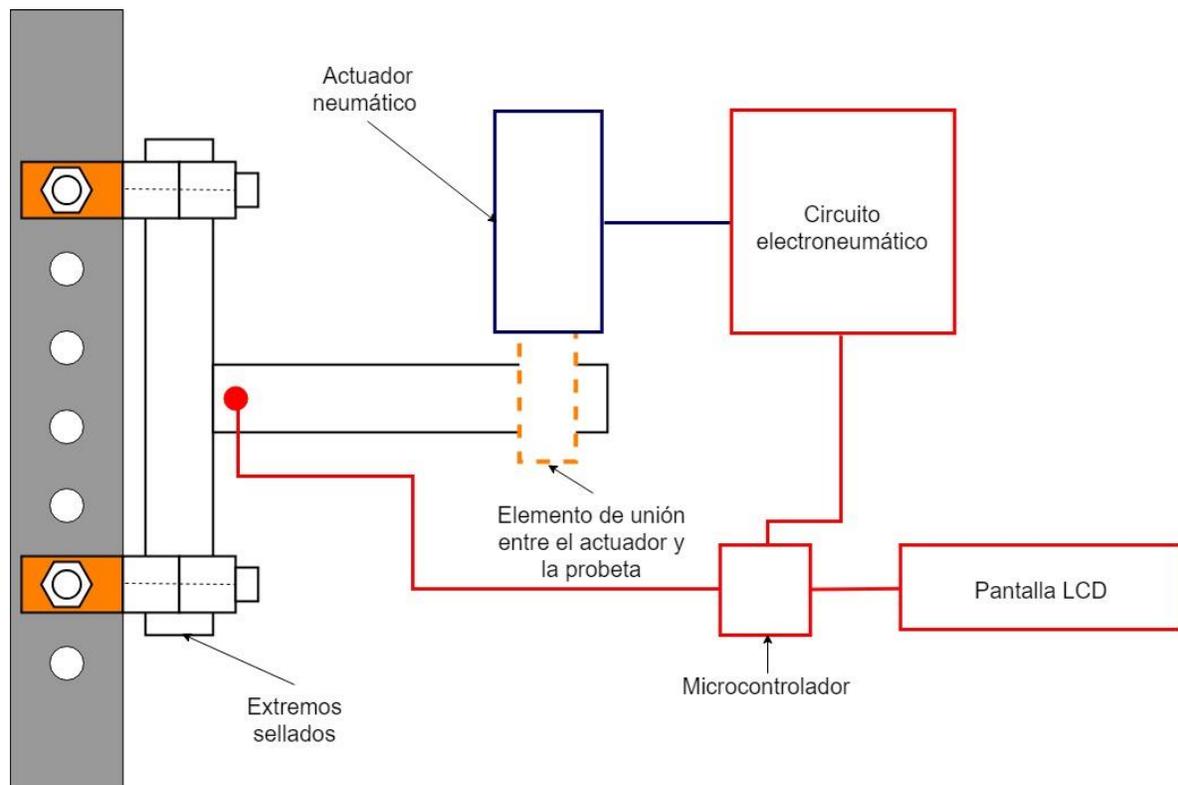


Figura 37 Concepto 3.

#### Concepto 4

El cuarto concepto integra elementos e ideas de los conceptos previos y los conjunta de manera más específica. Nuevamente se emplea un cilindro neumático de doble efecto

junto con un circuito electroneumático conformado por una electroválvula 5/2 y relevadores para su activación. El punto medular del concepto recae en la implementación de una computadora y la forma de detección de la fractura. La computadora es la encargada de mandar las señales para ejecutar los ciclos de carga, la información es recibida por el microcontrolador que está conectado al circuito electroneumático y es mostrada a través de una interfaz en la misma computadora al usuario. Para la detección de la fractura se usa un material conductor (tintas a base de grafito), que bajo la premisa de que al desagarrarse la probeta también lo hará el material aplicado, el fenómeno se puede usar como interruptor eléctrico conectado al microcontrolador para que por medio de programación se mande la información obtenida a la computadora siendo almacenada y desplegada en la interfaz propuesta.

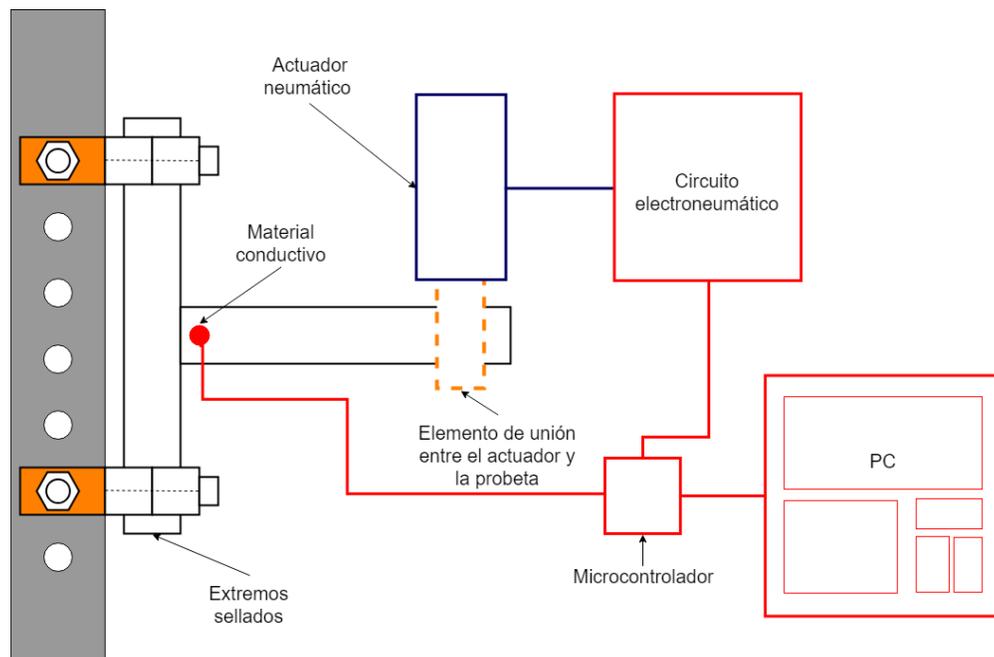


Figura 38 Concepto 4.

## Concepto 5

El concepto tiene como punto de partida el registro manual de toda la información de la prueba. El actuador neumático es un cilindro de doble efecto accionado por un circuito puramente neumático que está conectado en serie con la probeta sellada, según la Figura 41, de modo que cuando la probeta se fracture habrá una caída en la presión

dentro del sistema neumático, inhabilitándolo y permitiendo tomar este evento como evidencia de la aparición de la fractura. El conteo de ciclos lo hace un contador mecánico como el de la Figura 39, unido mecánicamente al cilindro permitiendo su incremento cada que entra y sale el vástago del cilindro.



Figura 39 Contador mecánico.

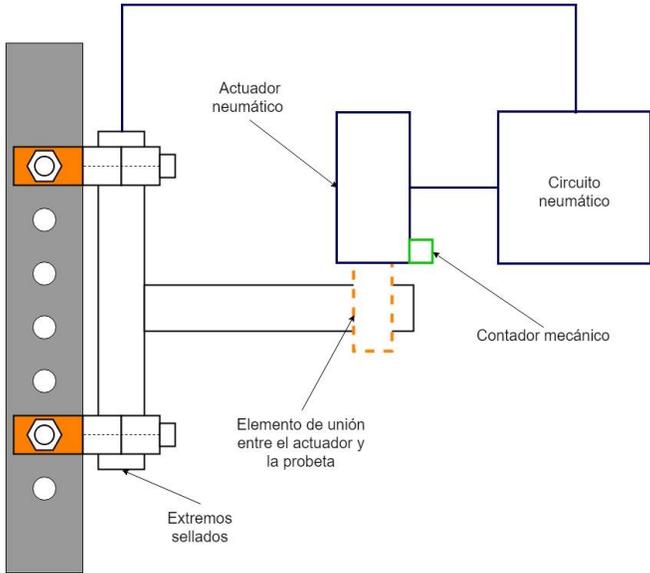
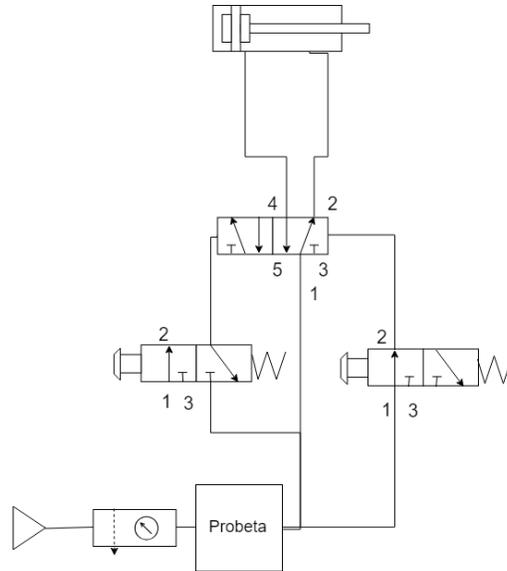


Figura 40 Concepto 5.



*Figura 41 Circuito neumático para el concepto 5.*

## Concepto 6

El concepto cuenta con los mismos componentes y premisas que el concepto cinco; diferenciados por el método de detección de la fractura, para este concepto se usan algoritmos de visión artificial que identifican cuando la fractura ha aparecido, su uso se basa en el método de líquidos penetrantes donde a la pieza a probar se le aplican una serie de líquidos que revelan los puntos donde se presentan discontinuidades en la pieza, por medio de la visión artificial y la caracterización de la fractura se puede crear un método capaz de reconocer la aparición de la grieta en la probeta para este caso de estudio. Una cámara web se encarga de capturar el vídeo de la zona de interés y la computadora por medio de software especializado lo analiza para determinar si ha aparecido la fractura.

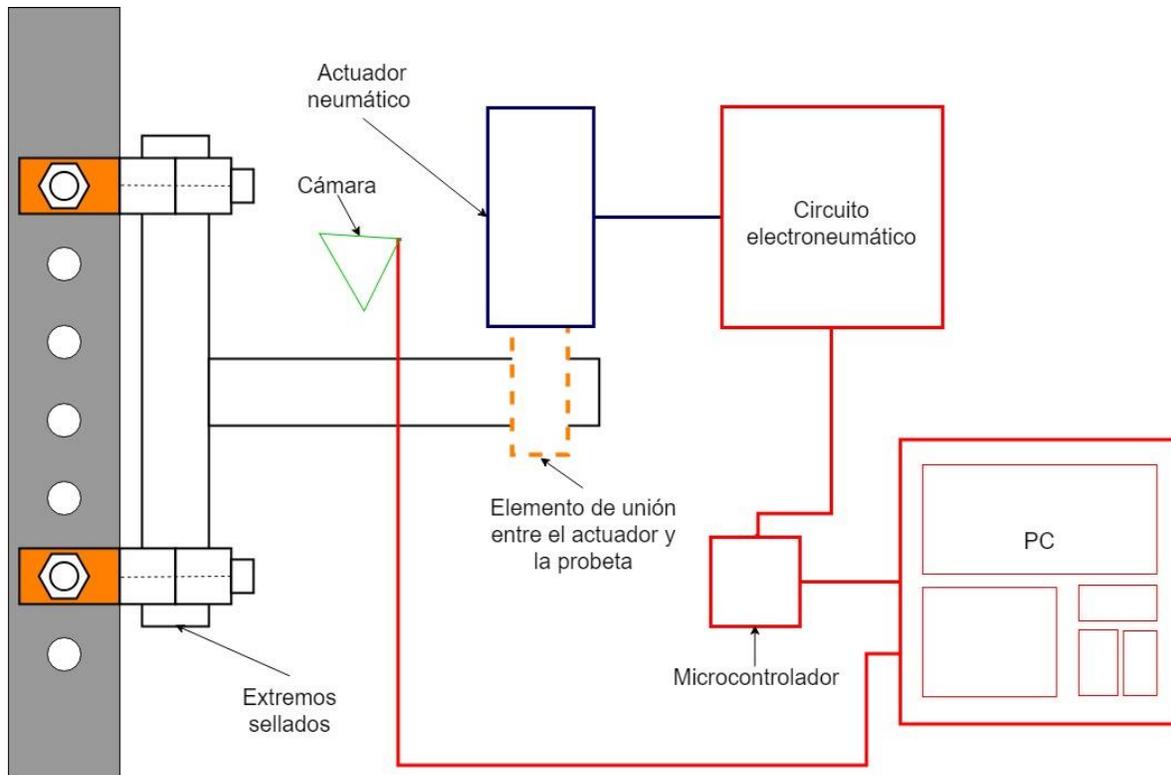


Figura 42 Concepto 6.

### Concepto 7

El último concepto consta de un cilindro neumático de simple efecto que se encarga de aplicar la carga cíclica, controlado por un circuito puramente neumático. La detección de la fractura se da por medio de un cambio de presión dentro de la probeta sellada. Un sensor de presión conectado al microcontrolador manda información sobre la presión interna de la probeta, mientras que el conteo de ciclos se logra con un final de carrera activado con la entrada y salida del vástago, el final de carrera conectado al microcontrolador que almacena la información en su memoria interna (EEPROM) o por medio de memoria SD o microSD mientras que la información es desplegada por medio de una pantalla LCD.

El principal inconveniente de usar un cilindro de simple efecto es que la fuerza de regreso a la posición de reposo depende de la constante de deformación del resorte que

controla el retorno y no de la magnitud de la presión dentro de la cámara; disminuyendo su magnitud conforme se llega a la posición de reposo.

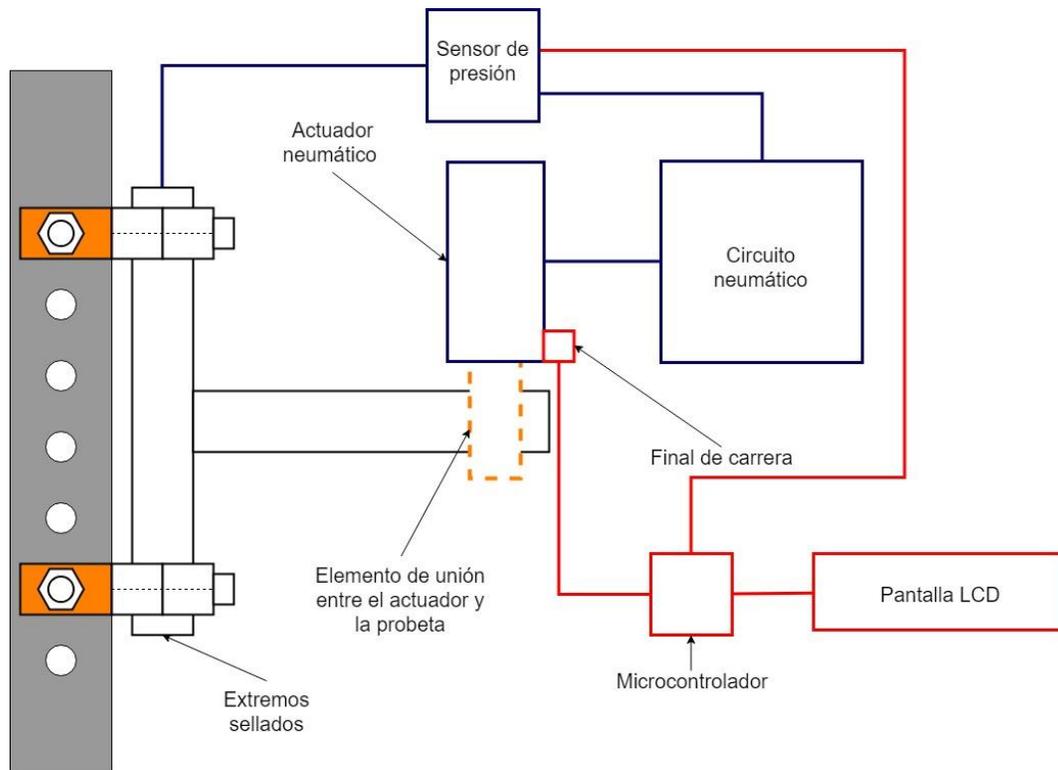


Figura 43 Concepto 7.

## 3.3 Selección del concepto

Los diversos conceptos generados y explicados en la sección 3.2, compartían características a la par que poseían características únicas. Para poder evaluar qué tan buenas o malas eran estas características y obtener el concepto a probar, se concibieron criterios de evaluación basados en las necesidades recopiladas y las especificaciones planteadas para el banco tal como se hizo en la selección del método de sujeción. Los criterios planteados para la evaluación fueron:

- Grado de compatibilidad. Se refiere a qué tan fácil se da la interconexión de los diversos sistemas y componentes involucrados en el concepto.

- Autonomía. Qué tan capaz es el concepto de ejecutar las tareas prioritarias (guardar número de ciclos, contar el número de ciclos y detectar la fractura) por sí mismo una vez iniciada la prueba, es decir, minimizar las interacciones entre el usuario y el banco.
- Viabilidad y confiabilidad. Con las características presentes en el concepto se evalúa a criterio del diseñador y bajo sus conocimientos, qué concepto parece el más adecuado a desarrollar.
- Facilidad de interacción. Se refiere a qué tan fácil resulta para el usuario las tareas, que van desde colocar la probeta, preparar el método de detección (en caso de ser necesario), hasta accionar la prueba y retirar la probeta una vez concluida la prueba.
- Detección de la fractura. El concepto en cuestión tiene un sistema que “puede” detectar de forma veraz el surgimiento de la grieta.
- Capacidad de almacenamiento. El método de almacenamiento permite guardar toda la información generada durante la prueba.
- Despliegue de información. Los datos son visibles y se aprecian de forma clara y ordenada.
- Formato de almacenamiento. Los datos se guardan de acuerdo con el mismo formato único en todas las pruebas.
- Aplicación de carga. Se refiere a la capacidad del sistema para aplicar la carga cíclica descrita en la Figura 14.
- Disponibilidad de recursos. Se evalúa la disponibilidad de los recursos para desarrollar ese concepto, que comprenden desde el recurso humano hasta el recurso económico (material o capital), involucrando también la disponibilidad de literatura sobre los temas que comprende el concepto.
- Programación. En casi todos los conceptos se mencionan sistemas que necesitan de programación para su funcionamiento, siendo un punto importante para evaluar.
- Facilidad de manufactura. En esta parte, *facilidad de manufactura* se traduce a que tan rápido se puede implementar el concepto en cuestión de tiempo.

Los conceptos se evaluaron del 1 al 5, siendo 1 la menor evaluación y 5 la máxima evaluación posible a obtener en cada criterio. La ponderación de los criterios se dio por medio de la Tabla 3. Las evaluaciones de los conceptos se muestran en las tablas a continuación.

Tabla 8 Evaluación del concepto para el banco de pruebas

| Criterios de evaluación            | Ponderación | Concepto 1   |            | Concepto 2   |            | Concepto 3   |            |
|------------------------------------|-------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                                    |             | Calificación | Evaluación | Calificación | Evaluación | Calificación | Evaluación |
| <i>Grado de compatibilidad</i>     | 0.12        | 3            | 0.36       | 3            | 0.36       | 3            | 0.36       |
| <i>Autonomía</i>                   | 0.12        | 3            | 0.36       | 3            | 0.36       | 3            | 0.36       |
| <i>viabilidad y Confiabilidad</i>  | 0.08        | 3            | 0.24       | 3            | 0.24       | 2            | 0.16       |
| <i>Facilidad de interacción</i>    | 0.04        | 3            | 0.12       | 3            | 0.12       | 3            | 0.12       |
| <i>Detección de la fractura</i>    | 0.12        | 4            | 0.48       | 2            | 0.24       | 4            | 0.48       |
| <i>Capacidad de almacenamiento</i> | 0.06        | 3            | 0.18       | 3            | 0.18       | 3            | 0.18       |
| <i>Despliegue de información</i>   | 0.06        | 4            | 0.24       | 4            | 0.24       | 4            | 0.24       |
| <i>Formato de almacenamiento</i>   | 0.04        | 3            | 0.12       | 3            | 0.12       | 3            | 0.12       |
| <i>Aplicación de la carga</i>      | 0.12        | 4            | 0.48       | 4            | 0.48       | 4            | 0.48       |
| <i>Disponibilidad de recursos</i>  | 0.12        | 3            | 0.36       | 4            | 0.48       | 2            | 0.24       |
| <i>Programación</i>                | 0.04        | 3            | 0.12       | 3            | 0.12       | 3            | 0.12       |
| <i>Facilidad de manufactura</i>    | 0.08        | 2            | 0.16       | 3            | 0.24       | 3            | 0.24       |
| <b>Total</b>                       |             |              | 3.22       |              | 3.18       |              | 3.10       |

Tabla 9 Continuación de la evaluación del concepto para el banco de pruebas.

| Criterios de evaluación            | Ponderación | Concepto 4   |             | Concepto 5   |            | Concepto 6   |            | Concepto 7   |            |
|------------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                                    |             | Calificación | Evaluación  | Calificación | Evaluación | Calificación | Evaluación | Calificación | Evaluación |
| <i>Grado de compatibilidad</i>     | 0.12        | 4            | 0.48        | 2            | 0.24       | 4            | 0.48       | 3            | 0.36       |
| <i>Autonomía</i>                   | 0.12        | 5            | 0.60        | 2            | 0.24       | 5            | 0.60       | 3            | 0.36       |
| <i>viabilidad y Confiabilidad</i>  | 0.08        | 4            | 0.32        | 4            | 0.32       | 3            | 0.24       | 3            | 0.24       |
| <i>Facilidad de interacción</i>    | 0.04        | 4            | 0.16        | 2            | 0.08       | 3            | 0.12       | 3            | 0.12       |
| <i>Detección de la fractura</i>    | 0.12        | 4*           | 0.48        | 4            | 0.48       | 4            | 0.48       | 4            | 0.48       |
| <i>Capacidad de almacenamiento</i> | 0.06        | 5            | 0.30        | 2            | 0.12       | 5            | 0.30       | 3            | 0.18       |
| <i>Despliegue de información</i>   | 0.06        | 5            | 0.30        | 2            | 0.12       | 5            | 0.30       | 3            | 0.18       |
| <i>Formato de almacenamiento</i>   | 0.04        | 5            | 0.20        | 2            | 0.08       | 5            | 0.20       | 3            | 0.12       |
| <i>Aplicación de la carga</i>      | 0.12        | 5            | 0.60        | 4            | 0.48       | 4            | 0.48       | 2            | 0.24       |
| <i>Disponibilidad de recursos</i>  | 0.12        | 4            | 0.48        | 4            | 0.48       | 4            | 0.48       | 4            | 0.48       |
| <i>Programación</i>                | 0.04        | 4            | 0.16        | 5            | 0.20       | 3            | 0.12       | 3            | 0.12       |
| <i>Facilidad de manufactura</i>    | 0.08        | 4            | 0.32        | 2            | 0.16       | 3            | 0.24       | 4            | 0.32       |
| <b>Total</b>                       |             |              | <b>4.40</b> |              | 3.00       |              | 4.04       |              | 3.20       |

\* Se necesita validar el concepto.

El concepto mejor evaluado resultó ser el Concepto 4, que por la compatibilidad entre los sistemas y el método de detección de la fractura sobresalía con respecto a los demás. Seguido del concepto 6 que también presentaba puntos fuertes; el uso de visión artificial podía brindar una rama alternativa a explorar.

Es importante mencionar que el comportamiento de la probeta bajo carga aún no estaba caracterizado y se desconocía el comportamiento de la posible fractura, por lo que, no se descartó el posible uso de uno (o más ) de los métodos de detección de la fractura propuestos (sección 2.5.2), ni se cerró el desarrollo y búsqueda de posibles soluciones a lo largo del trabajo.

Finalmente, con el concepto seleccionado, el siguiente paso fue organizar y depurar el concepto para llevarlo a su implementación, todo esto sujeto a validaciones constantes mediante pruebas.

### 3.3.1 Organización del concepto

De acuerdo con las características del concepto seleccionado, sus diversos componentes se agruparon en los sistemas propuestos para dar una idea de general y organizada del concepto a probar.

#### **Sistema de sujeción de la probeta**

Este sistema se basó completamente en el uso de los conceptos propuestos en la sección 3.1.1, siendo el concepto de sujeción por mordazas en “V” el principal arreglo, sin dejar de lado al concepto de la sujeción por medio de conos opresores.

#### **Sistema de aplicación de carga**

Se integró el cilindro neumático de doble efecto, junto con el elemento de unión entre la probeta y el actuador. El uso de un actuador neumático implicó la integración de elementos propios de un circuito neumático, (que para este punto del diseño resultaban bastante claros), como fueron: mangueras de conexión, válvulas de estrangulamiento

(racores), una electroválvula 5/2 y para el acondicionamiento del aire comprimido, una unidad de mantenimiento.

La inversión de carga (aplicación cíclica) fue la parte complementaria al circuito neumático y contemplaba el uso de relevadores, que junto con la electroválvula y el microcontrolador ejecutaba las acciones provenientes de la PC.

### **Sistema de instrumentación**

En este sistema se integraron, la PC junto con el modo que el usuario interactuaría con ella, para iniciar la prueba y visualizar la información; los recursos digitales que se pretendían generar en la PC. y en el microcontrolador también formaban parte de este sistema. El método propuesto para la detección de la fractura también se incluyó en este sistema (material conductivo “flexible”), junto con su circuito de adaptación (en caso de ser necesario), y demás elementos que se requirieran para su desarrollo, validación, depuración y finalmente su implementación.

### **Sistema de almacenamiento de información de la prueba**

La PC también formaba parte de este grupo, recopilando y guardando la información de la prueba para su futuro análisis. Se pretendía que, por medio de un programa unificado se tuviera el control de la aplicación de los ciclos de carga, la lectura de información de la prueba, el despliegue de dicha información y su respectivo almacenamiento, conforme lo establecido en las especificaciones.

## **3.4 Pruebas de validación**

Uno de los puntos medulares de este trabajo reside en la detección de la fractura. El entendimiento del comportamiento de este fenómeno resultaba crucial para validar el método propuesto y en caso de ser necesario, modificarlo o cambiarlo completamente. Con eso en mente se creó un prototipo rápido del banco para analizar el comportamiento de la probeta y la interacción de los sistemas.

### 3.4.1 Funciones implementadas

El prototipo se desarrolló muy básico en cuanto a funciones; contando con un método de sujeción para fijar la probeta y un sistema de aplicación de carga encargado de fatigar la probeta, como principales puntos en la construcción del prototipo. El conteo de ciclos, su visualización y el almacenamiento de información se mantuvieron en segundo plano en este prototipo.

#### **Sistema de sujeción para el prototipo**

El método de sujeción seleccionado fue, el *concepto A: sujeción por medio de conos opresores* que, si bien no había sido el mejor evaluado, estaba casi a la par del concepto ganador en cuanto a evaluación, por lo que se decidió implementarlo en este prototipo y observar su comportamiento.

#### **Sistema de aplicación de carga para el prototipo**

El sistema de aplicación de carga requirió un poco más de detalle que la sujeción de la probeta. Dado que el cilindro neumático de doble efecto restringía las soluciones para otras funciones y además agregaba problemas no contemplados hasta este punto (su adaptación al marco), se analizó entre los cilindros de doble efecto disponibles (brindados por el laboratorio de Automatización Industrial de la FI) cual era la mejor opción. Los cilindros de doble efecto disponibles eran dos, mostrados en las Figura 44 y Figura 45.



*Figura 44 Cilindro X.*

El cilindro de la Figura 44, tenía una sección rectangular de 63 [mm] x 64 [mm] y una longitud de 194 [mm], contando con racores en las entradas a la cámara interna, pudiendo regular la velocidad de entrada y salida del vástago; sus conexiones neumáticas eran para manguera de 4 [mm] (integradas en los racores). El vástago por su parte contaba con una carrera de 2 [pulg] y un roscado M16 x 1.5 en el extremo, permitiendo el acoplamiento de elementos mecánicos al cilindro. Mecánicamente contaba con un patrón de cuatro barrenos roscados en la parte superior de la camisa para su fijación a una superficie de trabajo.



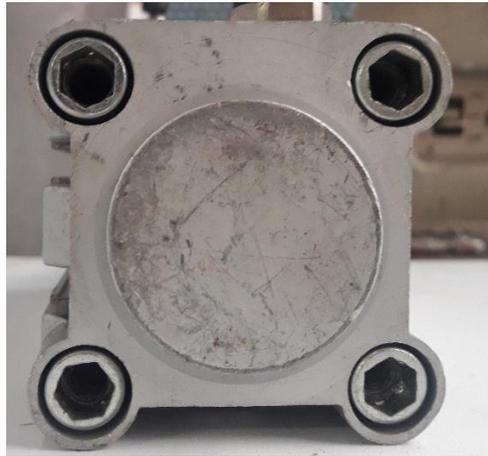
*Figura 45 Cilindro Y.*

El cilindro Y tenía un vástago con una carrera de 150 [mm]; las conexiones de aire eran niples de  $\frac{3}{4}$  [pulg] sin ningún tipo de válvula de estrangulamiento para regular la velocidad del vástago. Físicamente era muy voluminoso y pesado (dificultando su maniobrabilidad), de aproximadamente 120 [mm] de radio y 320 [mm] de longitud (sin contar la longitud del vástago).

Con base en las características de cada cilindro y su comparación, se seleccionó el cilindro X como el actuador para aplicar la carga cíclica (que frente a su competencia tenía muchos puntos a favor). La posibilidad de adaptar elementos mecánicos al cilindro cobró importancia en su selección, puesto que, aún faltaba desarrollar la manera en que el cilindro se acoplaría a la probeta y como se uniría al marco.

El concepto de adaptación al marco consistió en usar el patrón de barrenos (presente en el cilindro) de la Figura 46, y unirlo a otro elemento mediante tornillos, para después barrenar este elemento y finalmente unirlo con la placa movable en la parte superior

del marco, señalada por la flecha verde en la Figura 47 (que funciona como una corredera). Quedando en posición vertical, como el pistón hidráulico mostrado.



*Figura 46 Patrón de barrenos.*



*Figura 47 Base superior movable.*

El elemento de unión entre el cilindro neumático y la probeta dependía de las características del material para manufacturar la probeta y de las características del vástago. El tubo propuesto para la manufactura de la probeta fue de 1 ½ [pulg] de diámetro exterior calibre 18 (por la construcción del deportivo utilitario) y el elemento clave en el vástago resultaba ser su roscado, que permitía la unión de otro elemento. Teniendo presente que la probeta debía estar inmovilizada en todo momento manteniendo fijo el ángulo referente al yaw, mostrado en la Figura 22.

Basado en los puntos clave descritos, se creó el siguiente concepto de unión:

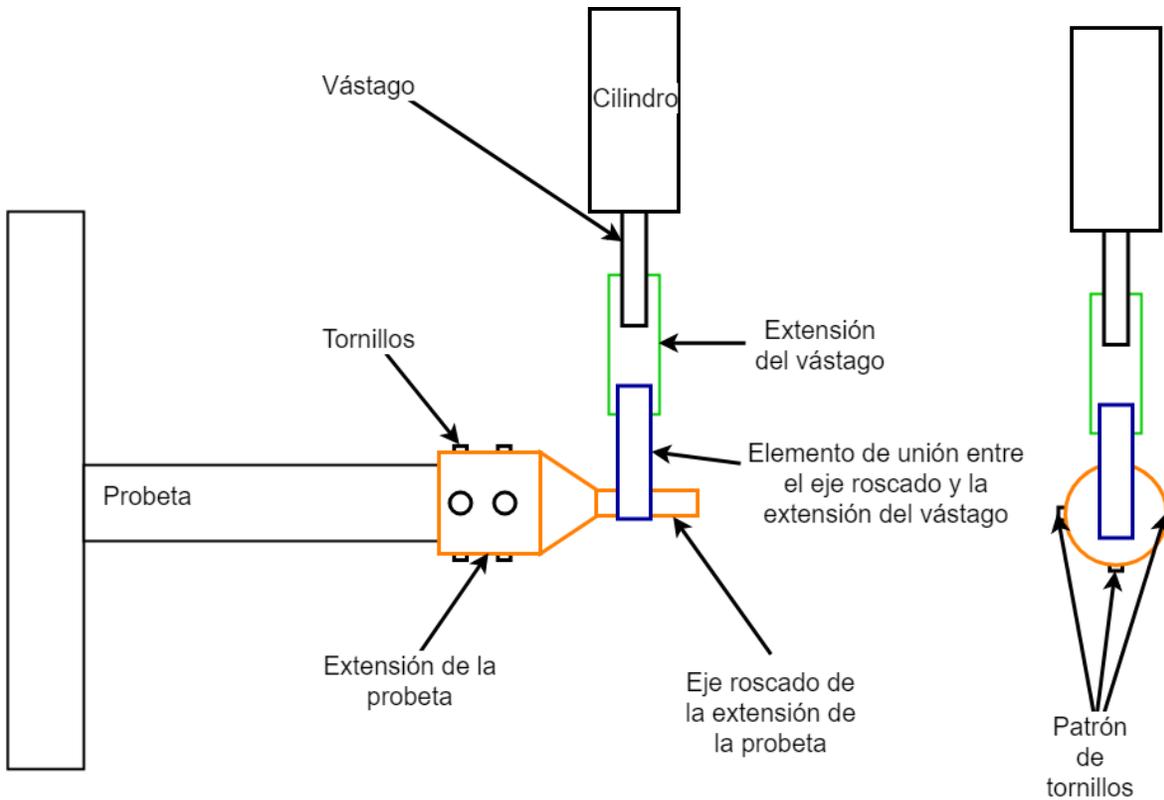


Figura 48 Concepto de unión entre la probeta y el actuador.

En el concepto, el vástago se une a una extensión roscada, mostrada en color verde (Figura 48), que asegura el posicionamiento del ángulo perteneciente al *yaw*. El extremo opuesto de la extensión se une a un elemento (en azul), cuya función es acoplarse a la extensión de la probeta (a través de su eje roscado) y compensar posibles desviaciones en el brazo de la probeta en caso de que la unión soldada no resultara con una configuración a 90°. La extensión de la probeta tiene un barreno del tamaño del diámetro de la probeta (con un ajuste por apriete), donde se inserta la probeta y por medio de pares de tornillos dispuestos cada 90 ° se asegura la unión.

Como elemento de unión entre el eje roscado y la extensión del vástago se planteó el uso de un *rod end*, capaz de compensar las desviaciones de la construcción de la probeta. El *rod end* disponible correspondía al modelo MW-8 de Aurora Bearing

Company. Las dimensiones se pueden consultar en el catálogo de la compañía (Aurora Bearing Company, 2017).

### **Circuito electroneumático y control de aplicación de la carga**

El circuito en cuestión tenía como elemento principal una electroválvula 5/2 que, mediante dos pilotajes de CA permitían el paso o la obstrucción del aire hacia la cámara del pistón. El control de los pilotajes se desarrolló a través de un microcontrolador que por medio de la activación de relevadores (conectados al circuito de CA de la electroválvula) conmutaba los pilotajes permitiendo la salida y entrada del vástago. Los componentes seleccionados para el prototipo fueron:

- Un microcontrolador ATmega328 en la tarjeta de desarrollo Arduino UNO (por ser una herramienta de bosquejo rápido en proyectos de electrónica).
- Un módulo de relevadores de 4 canales optoacoplados.
- Electroválvula 5/2 modelo P2E-KV31C de Parker.
- Una unidad de mantenimiento.

Ya con una idea bastante clara de cada elemento del prototipo y como se involucra con el resto de los elementos, el paso siguiente fue llevar el concepto a su manufactura.

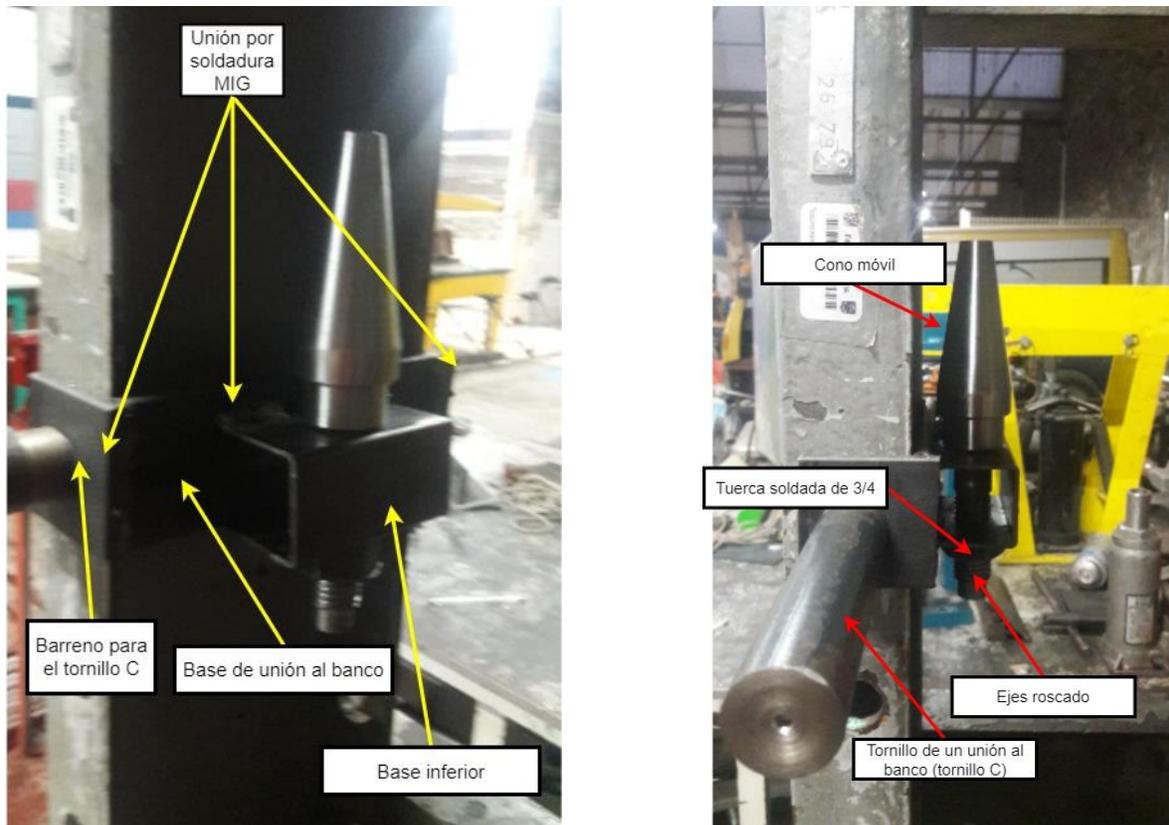
## **3.4.2 Manufactura del prototipo**

En primer lugar, se manufacturaron todos los elementos mecánicos, comenzando por el sistema de sujeción de la probeta y terminado con los elementos del sistema de aplicación de carga, dejando el montaje del circuito electroneumático para el final.

### **Sistema de sujeción por conos opresores**

Las dos bases de unión al banco de pruebas se maquinaron con solera de 2 [pulg] y  $\frac{1}{4}$  [pulg] de espesor; los laterales se barrenaron a  $\frac{3}{4}$  [pulg] de diámetro y por medio de soldadura MIG se unieron con otra sección de solera, creando un solo elemento en forma de "C" correspondiente a la Figura 49; sujeto por medio de tornillos de  $\frac{3}{4}$  [pulg] en los laterales de los elementos. La base fija (inferior) se manufacturó con una sección

de aproximadamente 600 [mm] longitud de PTR de 1 ½ [pulg] y antes de ser soldada (a una de las bases de unión creadas), se maquinó un barreno pasado de ¾ [pulg] en el centro de la sección, añadiéndose también una tuerca soldada (¾-10 UNC), en la parte inferior permitiendo el ascenso y descenso del cono móvil.



*Figura 49 Base inferior.*

El cono móvil de la Figura 50 junto con el cono fijo de la Figura 51, se manufacturaron en torno a partir de un tocho de acero; considerando que el diámetro exterior del tubo debía estar comprendido entre el diámetro máximo de 38.1 [mm] y el mínimo de 15 [mm]. Sobre el eje del cono móvil se torneó una rosca ¾-10 UNC con una longitud aproximada de 100 [mm], permitiendo el ensamble con la base inferior a través de la tuerca soldada.



*Figura 50 Cono móvil.*



*Figura 51 Cono fijo.*

La base superior del sistema de fijación se manufacturó del mismo material (PTR de 1 ½ [pulg]) y con la misma configuración de barrenos que la base fija inferior, diferenciándose por un par de barrenos extra de ½ [pulg] de diámetro en la cara frontal. El mismo patrón de barrenos se maquinó sobre la base de unión al banco conforme la Figura 53, para poder unir y desmontar la base superior de la base de unión al banco.



*Figura 52 Base superior dcha. Vista superior izq. Vista frontal.*



*Figura 53 Base de unión al banco con barrenos para la unión de la base superior del concepto.*



*Figura 54 Barras paralelas para aumentar la rigidez.*

Finalmente, para dar rigidez a las bases, se agregaron al concepto dos secciones de solera de perfil en “L”; soldadas de acuerdo con la disposición mostrada en la Figura 54. Con el sistema de fijación terminado se prosiguió a la manufactura de los elementos mecánicos involucrados con el cilindro de doble efecto.

### **Placa de adaptación al cilindro**

El cilindro tenía que ser fijado al marco, por lo que de una placa de aluminio de 50.8 [mm] de espesor, se cortó un rectángulo de aluminio (170 [mm] por 90 [mm]) con ayuda de una sierra cinta tal cual se muestra en las imágenes de la Figura 55.



*Figura 55 Corte mediante sierra cinta de la adaptación del cilindro.*

Posteriormente se maquinaron seis barrenos sobre la placa; cuatro de ellos correspondientes al acoplamiento del cilindro con la placa y los dos restantes al acoplamiento de la placa con el marco.

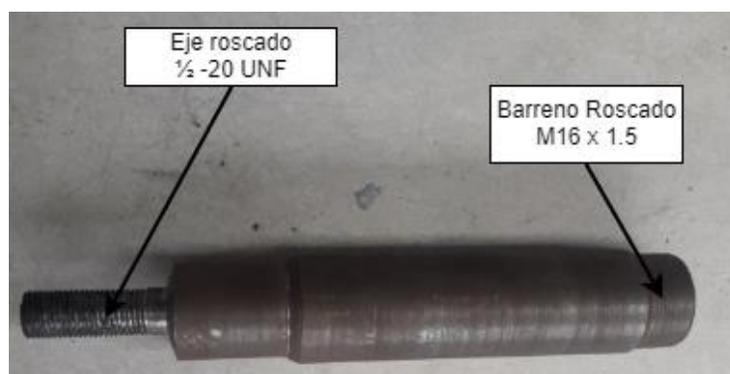


*Figura 56 Elemento de adaptación para el cilindro.*

Los cuatro barrenos centrales se maquinaron con un diámetro nominal de  $\frac{1}{4}$  [pulg] y se les realizó un avellanado. Por otra parte, los dos barrenos restantes se maquinaron pasados hasta un diámetro nominal de  $\frac{3}{4}$  [pulg], tal cual se muestra en la Figura 56.

### **Extensión para el vástago del cilindro**

El concepto de la Figura 48 para la unión del cilindro con la probeta, contemplaba una extensión del vástago; maquinada en torno, la extensión se manufacturó a partir de una barra de acero dulce, con una longitud total de 200 [mm] y un diámetro de 22 [mm]. En un extremo se maquinó una cuerda externa  $\frac{1}{2}$ -20 UNF de 30 [mm] de longitud (longitud aproximada de la rosca del *rod end*), mientras que en el otro extremo se maquinó un roscado interno M16 x 1.5 con la longitud de la rosca presente en el vástago del cilindro, tal cual se describen en la Figura 57.



*Figura 57 Extensión del vástago.*

## Extensión de la probeta

De un tocho de acero de 50 [mm] de diámetro se maquinó la extensión de la probeta (el material ya poseía el patrón de barrenos que se observan en la Figura 48). El primer paso (Figura 58), fue crear un barreno lo suficientemente grande con ayuda del torno para permitir la entrada y salida de una barra de interiores, encargada de abrir el diámetro del barreno hasta el diámetro requerido de 1 ½ [pulg].



*Figura 58 Maquinado del barreno de 1 1/2 [pulg].*

El siguiente paso fue maquinar el eje de la extensión (unión al *Rod end*), en el lado contrario al barreno maquinado. El eje de la Figura 59 se maquinó con un roscado externo ½-13 UNC para que, mediante una tuerca y la conicidad mostrada, el *Rod end* introducido en el eje, se quedara aprisionado entre ambos elementos.



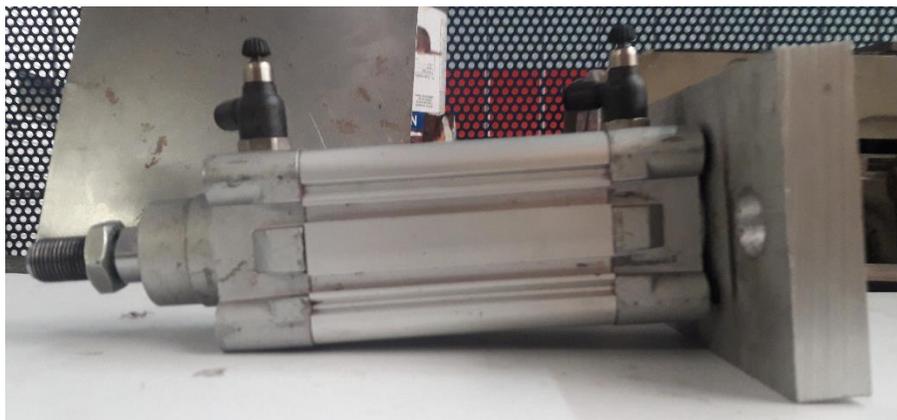
*Figura 59 Eje roscado en la extensión de la probeta.*

Finalmente, el patrón de barrenos se roscó con un machuelo de  $\frac{1}{4}$ -10 UNC, permitiendo el apriete de la probeta con tornillos de cabeza Allen, tal cual se aprecia en la Figura 59.

### 3.4.3 Ensamble del prototipo del banco de pruebas.

#### **Ensamble de elementos mecánicos**

El primer paso fue ensamblar todos los componentes mecánicos, comenzando con el cilindro neumático y el marco. La placa de adaptación al cilindro en la Figura 56, se unió con cuatro tornillos de  $\frac{1}{2}$  [pulg] a la base del cilindro mediante llaves Allen, creando un “único” elemento mostrado en la Figura 60.



*Figura 60 Adaptación del cilindro.*

La placa de adaptación al cilindro se unió por medio de dos tornillos de  $\frac{3}{4}$  [pulg] a la base móvil, según la disposición mostrada en las Figura 61 y Figura 62.



*Figura 61 Sujeción del cilindro al marco.*



*Figura 62 Vista lateral de la sujeción del cilindro al marco.*

La ventaja de esta unión estaba en la posibilidad de ajustar el brazo de palanca para fatigar la probeta (únicamente moviendo el conjunto cilindro-base), abriendo una amplia gama de escenarios para el análisis y estudio del comportamiento de la fatiga con la variación de este parámetro.



*Figura 63 Montaje del sistema de fijación por conos opresores, en el marco.*

El sistema correspondiente a la sujeción de la probeta, se unió únicamente por medio de dos tornillos de aprox. 8 [pulg] de largo y  $\frac{3}{4}$  [pulg] de diámetro con el marco. El montaje de este sistema de la Figura 63 resultó bastante sencillo dada la construcción y disposición del sistema.

### **Ensamble y montaje del sistema electroneumático**

Los elementos principales del circuito neumático (la unidad de mantenimiento y la electroválvula), se fijaron en un costado del perfil del marco (mediante tornillos), de acuerdo con las Figura 65 y Figura 64.



Figura 65 Montaje de la unidad mantenimiento.



Figura 64 Montaje de la electroválvula 5/2.

Posteriormente se realizaron las conexiones con manguera neumática, según el circuito mostrado en la Figura 66.

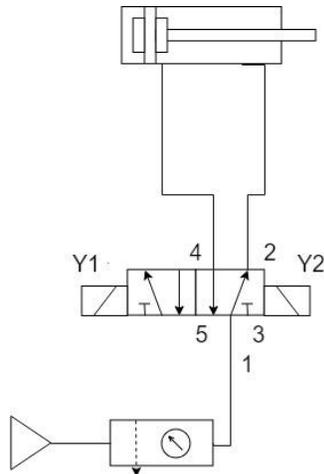


Figura 66 Circuito neumático.

La parte eléctrica, complementaria al circuito electroneumático previsto, se dividió en dos circuitos básicos; el circuito de potencia y el circuito de control (unidos por medio

del módulo de relevadores). El primero encargado de suministrar energía a los pilotajes de la electroválvula y el segundo controlando la entrega de esta energía (conmutación de los pilotajes).

## 3.4.4 Pruebas del prototipo

### Características y montaje de las probetas

Las probetas para probar en el banco se maquinaron bajo las siguientes características:

- Tubo de acero con costura de 1 ½ [pulg] de diámetro calibre 14.
- Longitud para los brazos de 400 [mm].
- Maquinado de “boca de pescado” en el brazo a fatigar (para el ensamble).
- Unión soldada con MIG.

Se trató de manufacturar, en la medida de lo posible, todas las probetas bajo las mismas condiciones, para tratar de encontrar un patrón de comportamiento en la fatiga de la probeta y en el desempeño del banco en general, minimizando la variación de los resultados a causa de la manufactura de la probeta.

El montaje de la probeta requería de una secuencia de pasos específicos para colocarla de manera correcta, por lo que, se generó una lista con los pasos a seguir. Comenzando con la fijación al marco (pasos del 1 al 8) y terminando con el montaje de los elementos para la aplicación de carga cíclica (del 9 al 13). La secuencia de pasos se describe a continuación:

1. Retirar la base superior (atornillada) del sistema de sujeción.
2. Enroscar el cono móvil hasta topar con la base inferior; es decir, se debe posicionar en su punto más bajo.
3. Colocar un extremo de la probeta sobre el cono móvil.
4. Se coloca el cono fijo dentro del extremo opuesto de la probeta.
5. La base superior se coloca en el cono (introducido en la probeta), asegurándose que el eje del cono esté dentro del barreno de la base.

6. La base superior se coloca en su posición inicial introduciendo los tornillos en los dos barrenos correspondientes.
7. Apretar los tonillos de la base superior.
8. Girar el cono móvil mediante su tuerca de apriete (generando un desplazamiento ascendente), hasta que la probeta quede firme entre los dos conos.
9. Montar la extensión de la probeta, introduciendo el lado maquinado a 1 ½ [pulg] dentro de la probeta.
10. Apretar los tornillos de la extensión.
11. Ajustar la altura de la extensión del vástago, hasta que el *rod end* y el eje de la extensión de la probeta queden coaxiales.
12. Desplazar toda la unión cilindro-marco hasta que el *rod end* tope con la conicidad del eje, cuidando mantener siempre la verticalidad del vástago.
13. Se asegura la unión enroscando una tuerca sobre el eje de la extensión de la probeta.
14. El cono móvil se aprieta hasta que la probeta lo permita.
15. Verificar que las uniones no estén flojas y, en caso de estarlo, se aprietan nuevamente.

### **Parámetros de la prueba**

La Tabla 10 muestra los parámetros empleados en el desarrollo de las pruebas.

*Tabla 10 Parámetros de la prueba.*

| <b>Parámetros</b>              | <b>Magnitud</b> | <b>Unidad</b> |
|--------------------------------|-----------------|---------------|
| <i>Presión</i>                 | 588.4           | kPa           |
| <i>Fuerza de empuje</i>        | 739.404         | N             |
| <i>Fuerza de retorno</i>       | 554.553         | N             |
| <i>Brazo de palanca</i>        | 350             | Mm            |
| <i>Intervalo en los ciclos</i> | 5               | s             |

La presión se manejó a esa magnitud, siendo la máxima presión entregable por la línea de aire. La magnitud de la fuerza de empuje y la fuerza de retorno, dependían principalmente de la presión y de la dimensión del vástago junto con el diámetro de la cámara interna del pistón. Los valores se determinaron por medio de las fórmulas (5) y (6).

$$F_E = P * A_c \quad (5)$$

$$F_R = P * (A_c - A_v) \quad (6)$$

Donde:

$F_E \equiv$  fuerza de empuje.

$F_R \equiv$  fuerza de retorno.

$P \equiv$  presión de la línea.

$A_c \equiv$  área de la sección transversal de la camisa interna.

$A_v \equiv$  área de la sección transversal del vástago.

La Figura 67 muestra la distancia del brazo de palanca; considerada desde la línea de acción de la fuerza (línea amarilla punteada), hasta la línea amarilla (paralela al brazo sujeto de la probeta).

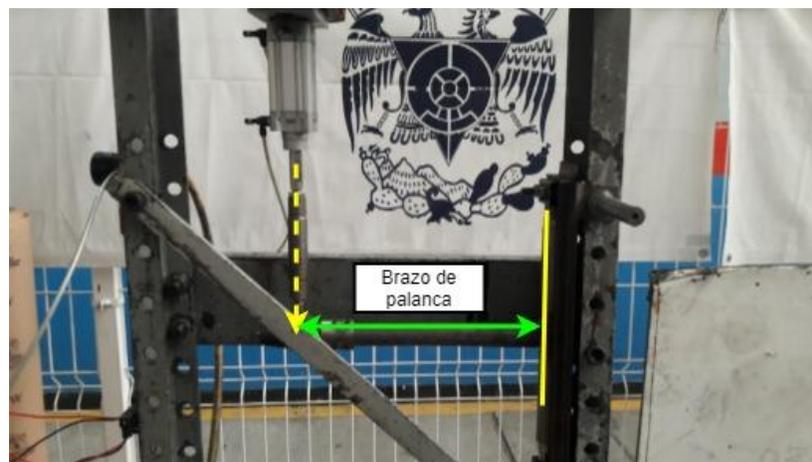


Figura 67 Brazo de palanca.

Con respecto a la aplicación de carga, se definió a intervalos de 5 segundos (en el código cargado en el microcontrolador). Iniciando la secuencia (salida del vástago) partiendo de la posición de reposo hasta la máxima carrera permitida por la resistencia ofrecida

en la probeta; pasados 5 segundos desde la actuación de la electroválvula, el vástago retornaba a su posición de reposo (fatigando en el sentido contrario), esperando 5 segundos nuevamente para comenzar de nuevo la secuencia.

El intervalo se definió de esta manera para dar suficiente tiempo al vástago de ejercer la magnitud de carga completa (sobre la probeta) en cada recorrido; además de que conociendo la hora de inicio y la hora de término de la prueba se podía calcular el número de ciclos realizados a lo largo de la prueba.

### 3.4.5 Resultados y observaciones

Antes de comenzar la prueba las principales interrogantes eran ¿qué cantidad de ciclos de carga soportaría la probeta? Bajo las condiciones propuestas, ¿existiría la fractura? Y en caso de aparecer ¿dónde y cómo se presentaría? Basado en los estudios realizados se esperaba que la fractura surgiera en la periferia del cordón de soldadura, siendo un concentrador de esfuerzos creado por la misma soldadura y la configuración de los tubos.

#### **Comportamiento de la probeta.**

Las pruebas efectuadas con los parámetros de la Tabla 10, mostraron que la probeta sufría una flexión cada que se aplicaban la fuerza de empuje y la fuerza de retorno, aumentando conforme transcurría el tiempo de la prueba; observable también por medio de un incremento en la carrera del pistón.

Eventualmente, con el transcurrir de los ciclos de carga, se notó como la probeta comenzó a desgarrarse en pequeñas secciones (comienzo de la fractura) en la parte superior del cordón de soldadura en la Figura 68. Conforme se acumulaban los ciclos de carga esas pequeñas fracturas se unieron y se propagaron sobre la periferia del cordón rodeando el cordón de soldadura en ambas direcciones hasta encontrarse en un punto de la parte inferior del cordón (Figura 69).



*Figura 68 Pequeños desgarres sobre la periferia del cordón de soldadura.*



*Figura 69 Direcciones de propagación de la fractura.*

La fractura avanzaba siguiendo las dos direcciones señaladas en la Figura 69; recorriendo una curva cerrada (una circunferencia), donde, eventualmente las “fracturas” se encontrarán (en un punto) y el brazo fatigado será desprendido del resto de la probeta. Concluyendo en este momento con la prueba.



*Figura 70 Probeta fracturada.*

La Figura 70 muestra el estado final de la probeta después de haber sido sometida a la prueba. Se observa como la fractura siguió la periferia del cordón, y desprendió el material del brazo fijo (de la probeta) creando un hueco en éste. Un comportamiento esperado a la par que revelador, en cuanto al comportamiento esperado se refiere.

Se realizaron dos pruebas más tratando de mantener los mismos parámetros en todas ellas. Los resultados se resumen en la Tabla 11.

*Tabla 11 Resultados de las pruebas sobre la probeta.*

| <b>Prueba</b> | <b>Brazo de palanca [mm]</b> | <b>comienzo de la fractura [# de ciclos]</b> | <b>Desprendimiento total de la probeta [# de ciclos]</b> |
|---------------|------------------------------|--|--|
| 1             | 350                          | 69192  | 79452  |
| 2             | 350                          | 60430  | 62650  |

El comienzo de la fractura se consideró a partir de las características de la grieta reportada en la Figura 68. La inspección de la probeta en busca de la grieta se realizó de manera periódica visualmente.

### **Desempeño de los sistemas del banco**

A pesar de haber cumplido con el objetivo de fracturar la probeta, el banco presentó diversos inconvenientes en varios de sus sistemas, que para la pequeña muestra de

pruebas no representaban mayor problema. Sin embargo, para un mayor volumen de pruebas sí que representaban un serio problema.

El principal problema se dio con el sistema de fijación por conos opresores. El apriete del cono con la probeta generaba que los dos elementos se desgastaran por la fricción constante en el apriete, creando deformaciones sobre el cono y la probeta. Otro fenómeno que se observó fue que, con la aplicación de los ciclos de carga, las secciones de la probeta en contacto con los conos se comenzaron a deformar, perdiendo fuerza en la unión por tal deformación, lo cual hacía que todo el marco se moviera distribuyendo la fuerza fuera del punto de interés, además la base móvil del marco tenía cierta holgura contribuyendo al agravamiento de los problemas mencionados.

Respecto al pistón neumático, se notó que su vástago se estaba fatigando de forma excesiva contra sus empaques. Esto debido a que el brazo de palanca era una distancia fija al inicio de la prueba, pero conforme pasaban los ciclos se modificaba poco a poco y el cilindro no tenía la posibilidad de adaptarse a este cambio produciendo que, el vástago saliera con una inclinación cada vez mayor conforme a la deformación del brazo de la probeta.

La extensión de la probeta funcionó bastante bien, aunque tenía el gran defecto de no ser adaptable a más de un diámetro de probeta, por lo que se tuvo que mejorar ese aspecto.

Dentro del prototipo se implementó un pequeño sistema para la visualización de los ciclos, donde, por medio del monitor serial de Arduino UNO, se mostraba el conteo de los ciclos en la computadora. Sin embargo, esta actividad no se logró puesto que, la desactivación de los solenoides (pilotajes de la electroválvula), inducía una corriente en la bobina del relevador que variaba el voltaje con la tierra y hacía que la comunicación serial perdiera su referencia, dejando de mostrar la información solicitada.

## 3.5 Depuración del concepto

Las pruebas del concepto sirvieron para entender el comportamiento de la probeta y para encontrar los puntos donde se podía mejorar el banco. Basado en las pruebas y los resultados obtenidos se creó una lista con los puntos a mejorar.

- Usar el sistema por mordazas en “V” (siendo el concepto mejor evaluado) en lugar del sistema por conos opresores.
- Crear un nuevo elemento (adaptable a los diámetros requeridos) para el acoplamiento del *rod end* y la probeta.
- Asegurar la unión de la base movable y el marco.
- Agregar un grado de libertad extra al pistón para evitar el desgaste excesivo del vástago.
- Cambiar los relevadores mecánicos por relevadores de estado sólido.

Con base en las pruebas y en los puntos mencionados, se trabajó en el refinamiento del concepto de la sección 3.3.1, a través de sus sistemas.

- Sistema de sujeción de la probeta
- Sistema de aplicación de carga (parte mecánica).
- Sistema de aplicación de carga (parte electroneumática)
- Sistema de instrumentación
- Sistema de almacenamiento de información de la prueba

La depuración y el diseño del sistema de ampliación de carga (parte electroneumática) junto con los sistemas de instrumentación y de almacenamiento de información de la prueba se explican en el Capítulo 4.

### 3.5.1 Sistema de sujeción de la probeta

El método de sujeción seleccionado fue el *concepto D: sujeción por medio de mordazas en "V"* (siendo el concepto mejor evaluado) y que, con base en las pruebas, se presentaba como un excelente candidato para solucionar los problemas detectados en el prototipo.

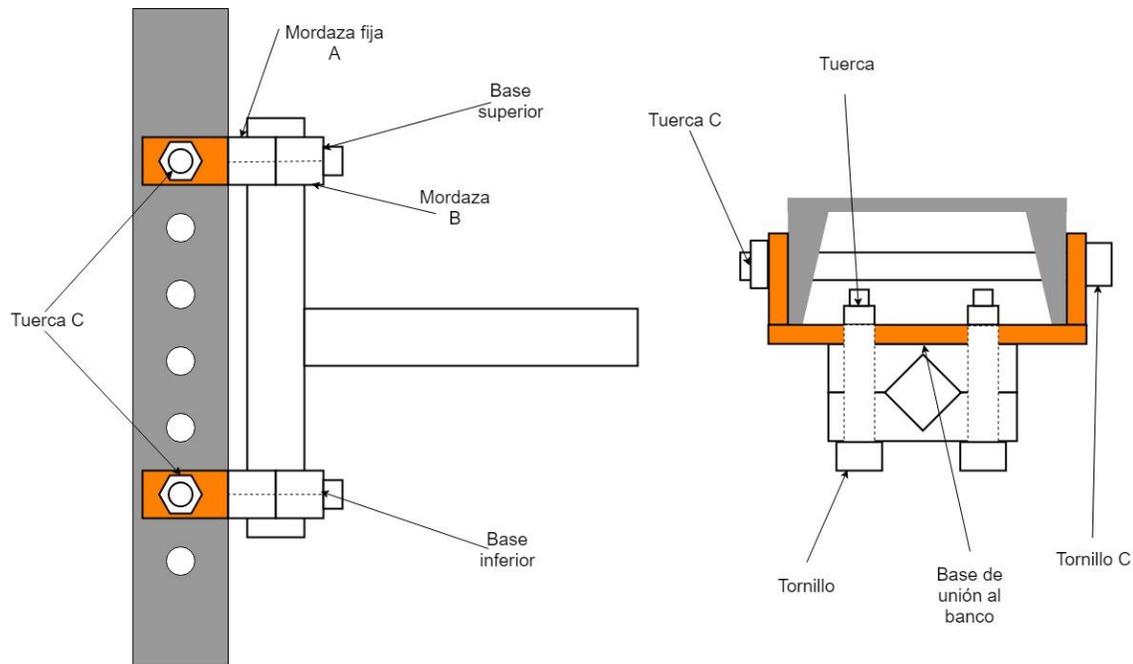
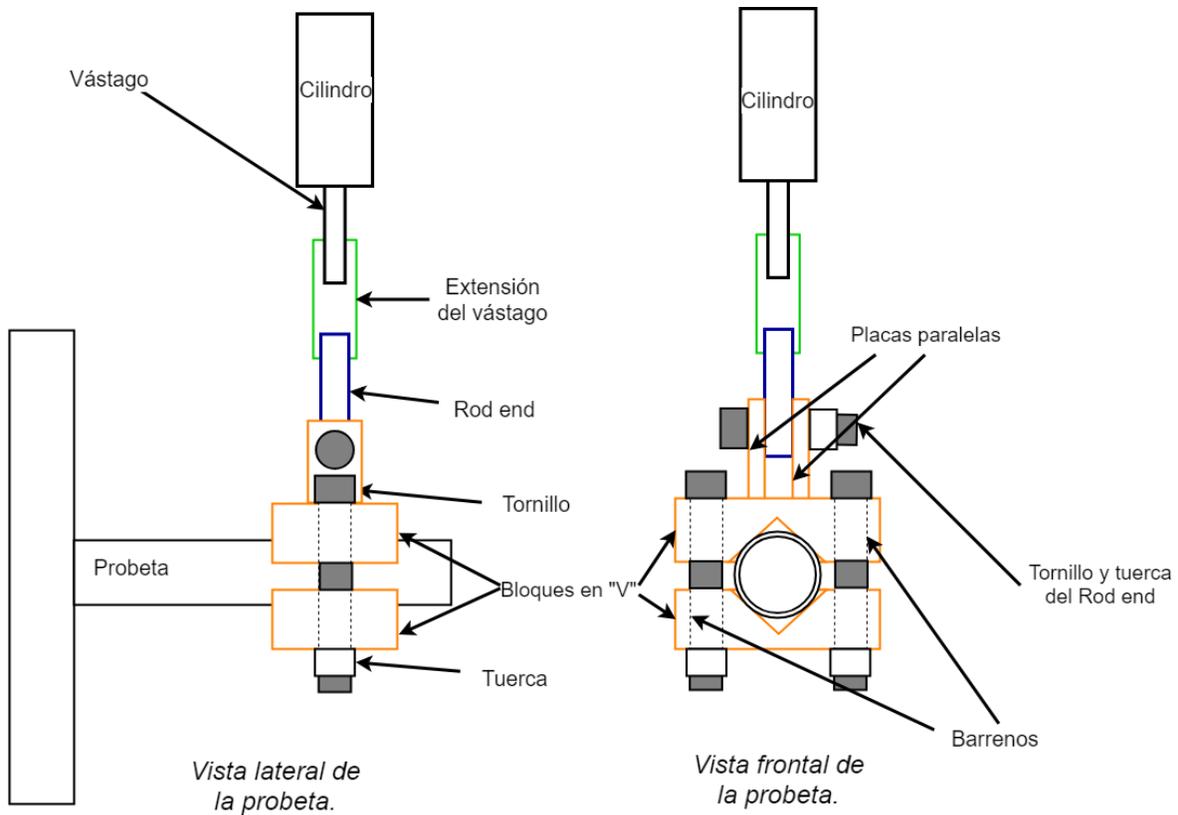


Figura 71 Concepto de sujeción.

### 3.5.2 Sistema de aplicación de carga (parte mecánica)

El principal inconveniente con la configuración de la Figura 48 radicaba en la imposibilidad de adaptarse a los diámetros de probeta requeridos, por lo que, se diseñó un nuevo concepto basado en el concepto de sujeción de la probeta (Figura 71).



*Figura 72 Nuevo concepto de unión entre la probeta y el actuador.*

La Figura 72 muestra la disposición de los elementos en el concepto. Dos bloques en “V” se encargan de aprisionar la probeta y por medio de tornillos se asegura la unión. Uno de los bloques tiene soldadas un par de placas barrenadas; el *rod end* se introduce dentro de estas placas y se aprieta la unión con un tornillo que pasa por las placas y el centro del *rod end*. El concepto de extensión se mantuvo porque, de acuerdo con lo visto en las pruebas se requería un elemento que extendiera el alcance del vástago hasta la probeta.

Otro inconveniente que se presentó en el prototipo fue el roce del vástago contra sus empaques, traducido a un desgaste y un futuro mal funcionamiento de ambos componentes. Como solución se planteó agregar un grado de libertad extra al actuador; permitiendo que el actuador rotara sobre el eje (en amarillo) en la Figura 73.



Figura 73 Eje de rotación (vista frontal).

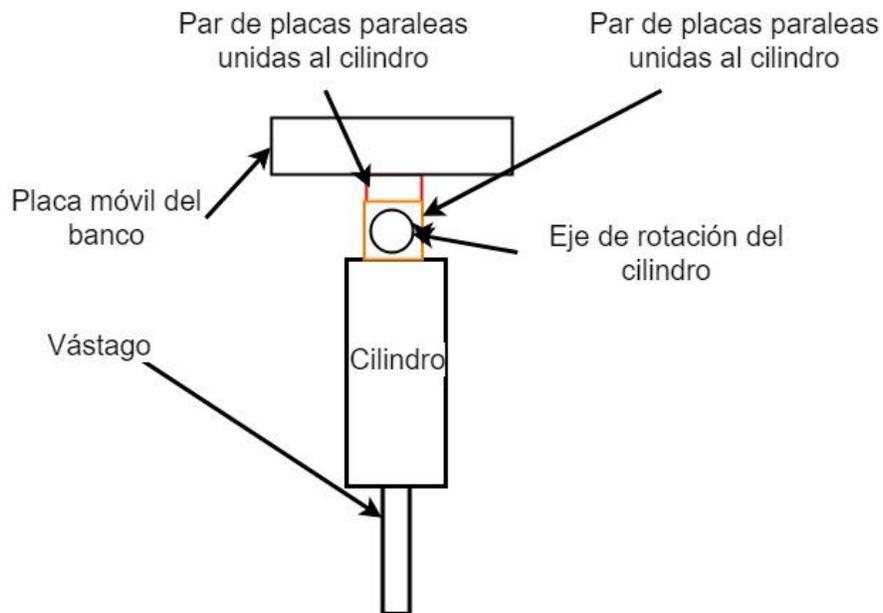


Figura 74 Concepto para agregar el grado de libertad extra (vista lateral).

El concepto de la Figura 74 ilustra como por medio de la adaptación de un par de placas paralelas (barrenadas) en la base móvil del banco y en el cilindro, se puede introducir un eje que permita la rotación del cilindro conforme el brazo de la probeta se lo demande.



*Figura 75 Inmovilización de la placa móvil.*

Finalmente, para solucionar el último inconveniente, referente a la inmovilización de la placa móvil (después de ajustar el cilindro y la probeta) en el marco, se utilizó un par de barrenos presentes en la pieza (a cada lado) para fijarla mediante tornillos. La Figura 75, muestra la disposición de uno de los tornillos.

Con los sistemas mecánicos corregidos y complementados con la información recabada en la prueba se prosiguió con el diseño de toda la parte electrónica y neumática que abarcaba desde el sistema de ampliación de carga (parte electroneumática) junto con los sistemas de instrumentación y de almacenamiento de información de la prueba.

# 4. Diseño de los sistemas de control e instrumentación

## 4.1 Sistema de aplicación de carga

### 4.1.1 Organización por niveles del circuito electroneumático

Dentro de un sistema neumático se cuenta con una organización para la identificación de componentes, de acuerdo con la función que desempeñan. Esta consta de cinco niveles.

1. Alimentación y preparación.
2. Señales de control.
3. Funciones lógicas.
4. Elementos de control.
5. Actuadores.

No todos los circuitos neumáticos tienen elementos individuales para cada nivel; existe la posibilidad de que un elemento desempeñe la tarea de más de un nivel. En el banco la aplicación de carga involucró elementos tanto electrónicos como neumáticos, generando así, un sistema electroneumático. Los elementos que conformaron el circuito fueron:

- Actuador neumático.
- Unidad de mantenimiento.
- Electroválvula 5/2.

- Relevadores de estado sólido.
- Microcontrolador.
- Fuente de CA.

El esquema del circuito neumático para la aplicación de carga respeta la configuración mostrada:

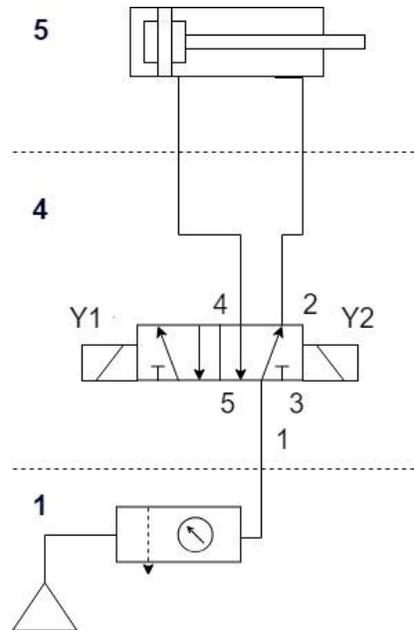


Figura 76 Niveles del circuito neumático.

En el primer nivel (*alimentación y preparación*) se encuentra el compresor y la unidad de mantenimiento, de ahí, el siguiente nivel en el sistema neumático es el cuarto (*elementos de control*), que comprende a la electroválvula 5/2 y finalmente en el quinto nivel (*actuadores*) se tiene el cilindro de doble efecto.

El segundo (*señales de control*) y tercer nivel (*funciones lógicas*) lo integran los elementos electrónicos, que cambian la posición de la válvula del reposo a su posición de trabajo. Los pilotajes **Y1** y **Y2** son solenoides que energizados con 24 [V] de CA (según las especificaciones de la electroválvula) permiten el paso del aire en la válvula, pudiendo alternar entre el estado de reposo o trabajo de la válvula dependiendo de cual de los pilotajes sea energizado.

## 4.1.2 Secuencia neumática

La secuencia requerida para fatigar la probeta era una secuencia bastante sencilla (entrada y salida del vástago), representada en la Figura 77 por el movimiento  $A+$  (salida del vástago) y  $A-$  (retorno del vástago), que, expresada de otra forma, no es más que la conmutación entre la posición de reposo y la posición de trabajo de la electroválvula, repitiéndose iterativa e indefinidamente.

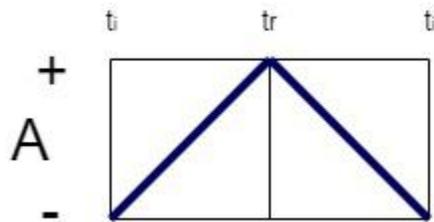


Figura 77 Secuencia neumática.

Donde:

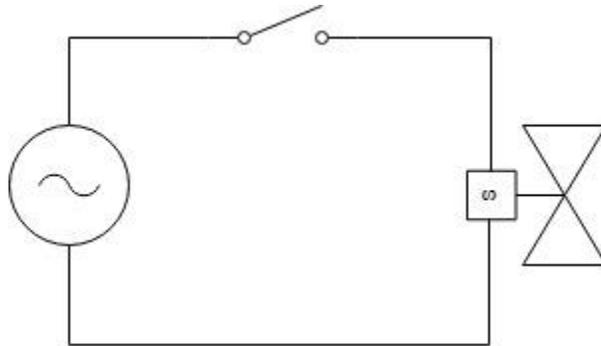
$t_i \equiv$  Señal de inicio para la activación de la secuencia.

$t_r \equiv$  Señal para la activación del retorno del vástago.

La programación de la secuencia se realizó mediante un control de tiempo; las señales de activación se generaban cada que se llegaba al tiempo establecido para cada intervalo. El intervalo de tiempo comprendido entre  $t_i$  pasando por  $t_r$  hasta llegar nuevamente a  $t_i$ , se definió como un ciclo completo de carga; dividido en la aplicación de carga en un sentido ( $t_i$  a  $t_r$ ) y el cambio de sentido en la aplicación ( $t_r$  a  $t_i$ ), ambos intervalos con la misma duración, dividiendo al ciclo de carga en dos intervalos de tiempo iguales.

## 4.1.3 Conmutación de la electroválvula

El circuito de la Figura 78 representa el comportamiento básico para recrear la secuencia descrita en la sección 4.1.1, mediante el cierre y la apertura de la electroválvula conectada una fuente de CA , un solenoide (pilotaje de la electroválvula) y a un interruptor.



*Figura 78 Esquema simplificado de la activación de la válvula.*

El interruptor de la Figura 78, se sustituyó por un relevador de estado sólido (uno para cada pilotaje de la electroválvula), que efectúa la misma función del interruptor, pero, la conmutación de circuito abierto a circuito cerrado se hace electrónicamente. Para evitar el problema de la pérdida de una referencia de voltaje (tierra), se cambió a relevadores de estado sólido en lugar de los relevadores mecánicos del prototipo; protegiendo así, la comunicación planteada entre la computadora y el microcontrolador.



*Figura 79 Relevador de estado sólido 4 canales G3MB-202P.*

Para facilitar el ensamble del circuito, se buscó un módulo de relevadores de estado sólido que se adecuara a las características del proyecto. El módulo GRMP-202P

reportaba características muy similares a un módulo de relevadores convencional, siendo la opción para implementar en el banco. A continuación, se enlistan algunas de sus características.

Tabla 12 Característica del módulo de relevadores de estado sólido.

| <b>Especificaciones técnicas</b> |   |
|----------------------------------|---|
| Tensión de alimentación          | 5 [V] de DC a 160 [mA]  |
| Tensión de control (estado bajo) | 0-2.5 [V]   |
| Tensión de control (estado alto) | 3.3-5 [V]   |
| Tiempo de subida (operación)     | La mitad del ciclo de trabajo de la fuente en la carga + 1 [ms] |
| Tiempo de bajada                 | La mitad del ciclo de trabajo de la fuente en la carga + 1 [ms] |
| máxima carga controlable         | 2 [A] de 100-240 [V] de AC                                      |
| <b>Interfaz</b>                  |   |
| DC+                              | Terminal de alimentación positiva.                              |
| DC-                              | Terminal de alimentación negativa.                              |
| CH                               | Canal de disparo en el Relé.                                    |

El circuito del prototipo contaba con un microcontrolador que activaba los relevadores por medio de dos de sus pines digitales (configurados como salidas), iniciando la secuencia de trabajo. Siguiendo esa misma idea, en la nueva iteración el microcontrolador se conectaría al módulo de relevadores de estado sólido (a su vez conectado con las electroválvulas y a una fuente de CA), de acuerdo con el esquema de la Figura 80. Cada pilotaje (Y1 y Y2) debía tener asociado una señal de control (P1 y P2) para activar o desactivar el pilotaje.

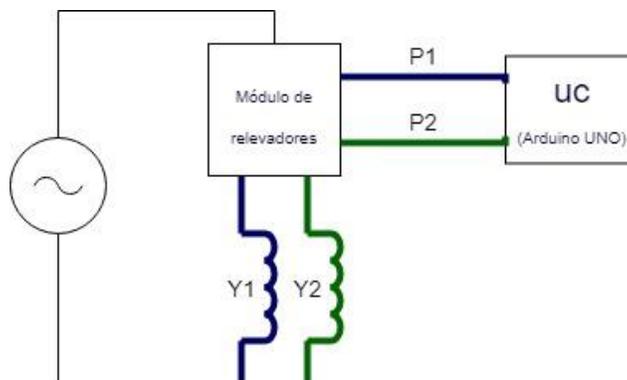


Figura 80 Esquema de circuito electrónico.

Para realizar la secuencia de la Figura 77, el microcontrolador debe poner en alto lógico (5 V) la salida P1 y en cero lógico (0 V) la salida contraria P2 (la negación del estado se hace para evitar que la electroválvula se quede enclavada en una posición intermedia), y para la inversión del ciclo, P1 cambia el estado a cero lógico y P2 al estado de alto lógico regresando al estado inicial para nuevamente repetir la secuencia.

## 4.2 Sistema de instrumentación

En el concepto se planteó el uso de una PC como elemento central, que por medio de un programa unificado sería la encargada de controlar todo lo referente al banco, desde la generación de señales para el inicio de la secuencia de carga hasta el almacenamiento y visualización del número total de los ciclos de carga.

### 4.2.1 Integración de la PC

Antes de generar cualquier código, se creó un diagrama de flujo con las tareas (y sus interacciones) que se pretendía realizaría el programa ejecutado por la computadora.

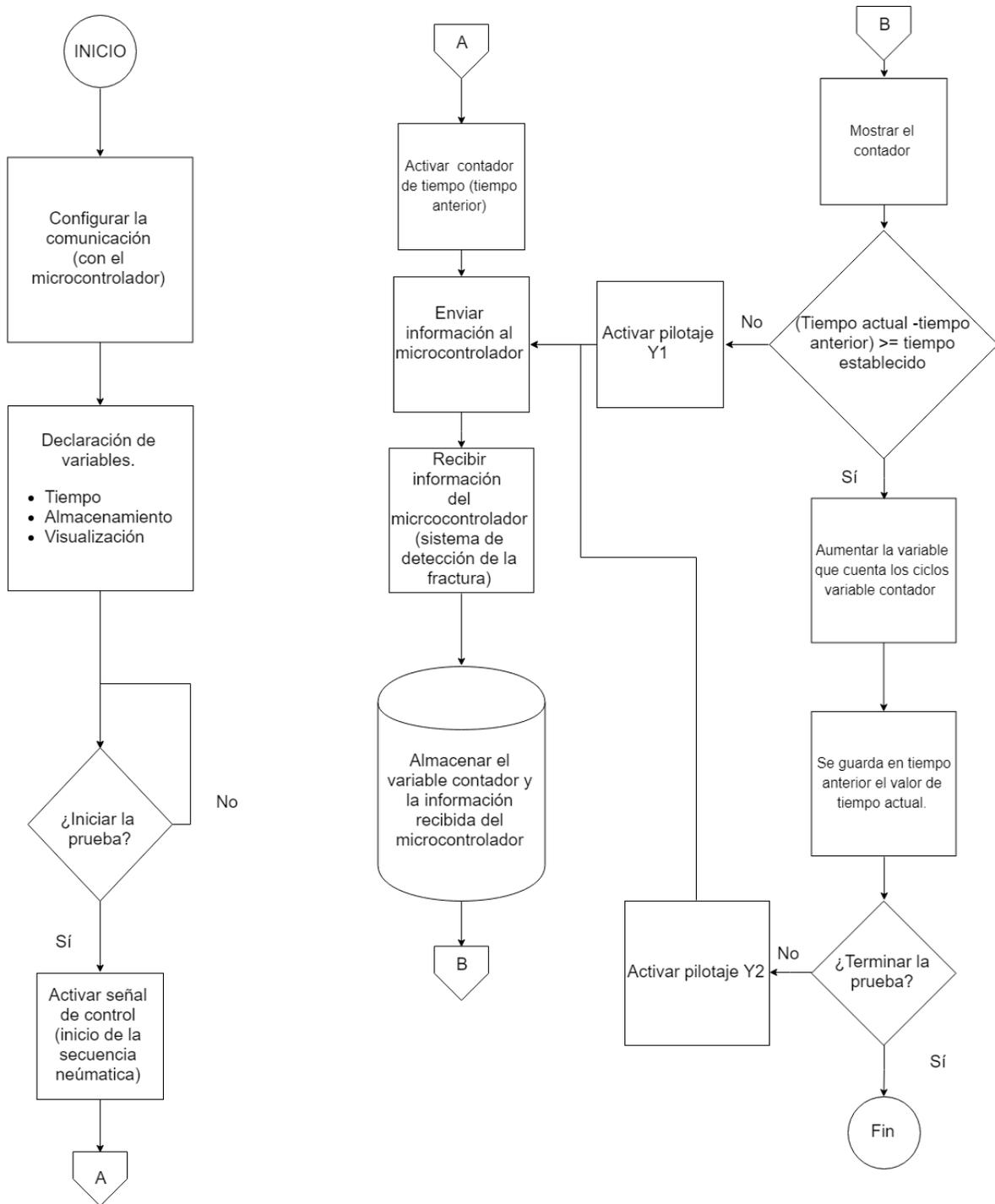


Figura 81 Diagrama de flujo del programa principal.

El programa principal necesitaba del microcontrolador (como una adaptación hacia los periféricos) para que ejecutara sus instrucciones. El microcontrolador debía recibir la información (convirtiéndose en un esclavo) proveniente del sensor en la probeta y

mandar una señal a la computadora con la información de la fractura, además debía conmutar los relevadores según la información recibida por la computadora (maestro).

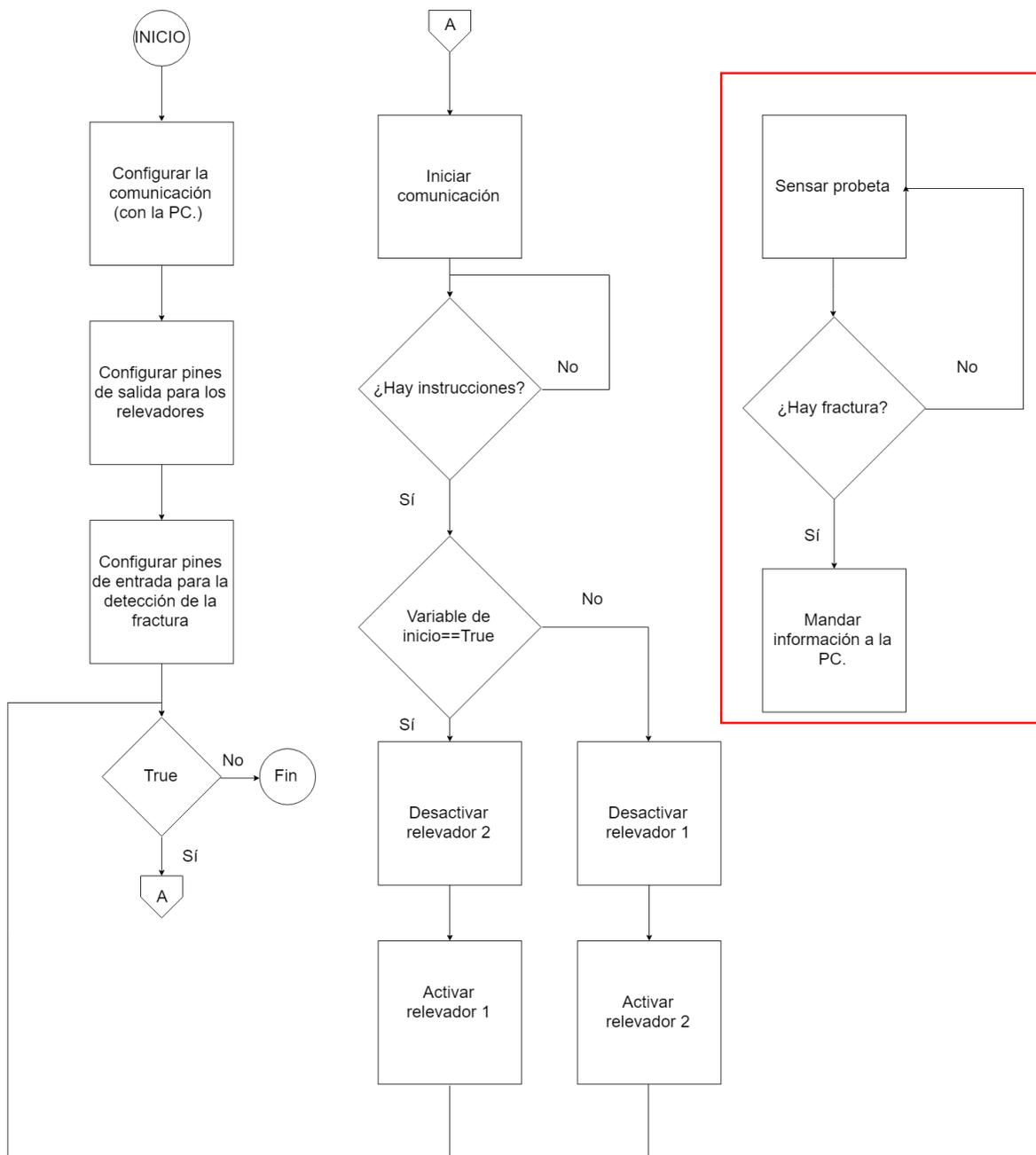
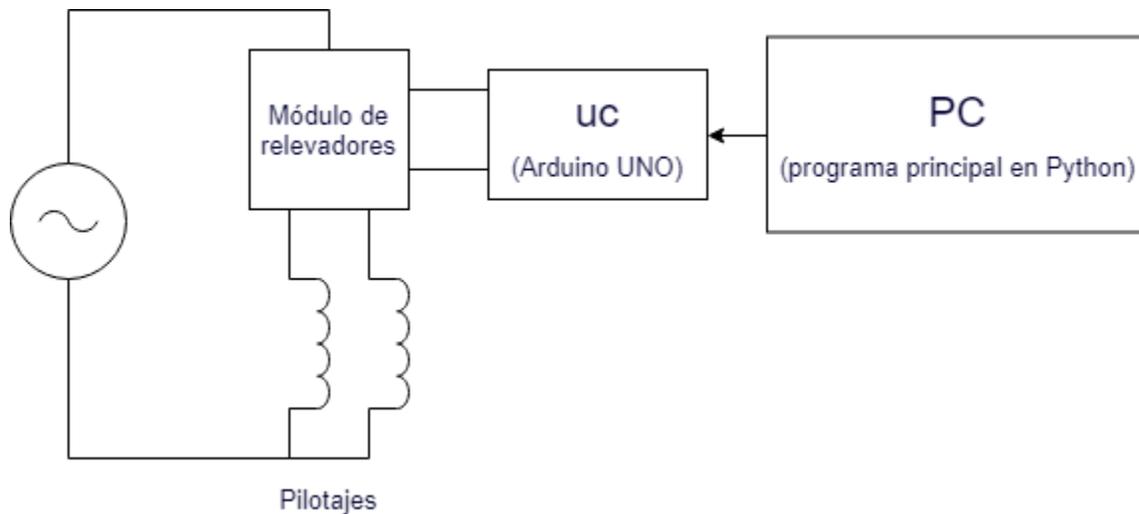


Figura 82 Diagrama de flujo del microcontrolador.

Como el control de la secuencia estaba dado por tiempos, la relación maestro-esclavo (entre la computadora y el microcontrolador), requería la eliminación de tareas que sobrepasaran el tiempo establecido en la conmutación de los pilotajes. Es por eso que

para la secuencia de detección de la fractura (cuadro rojo de la Figura 82) se buscó la manera de implementar la secuencia mediante interrupciones, librando al microcontrolador de quedarse estancado en una parte de la ejecución del código.

El esquema de la Figura 83 muestra el esquema de conexiones con la integración de la PC.



*Figura 83 Esquema de conexiones eléctricas.*

El programa principal se desarrolló en Python, ejecutado desde la terminal de la PC (el sistema operativo de la PC era UBUNTU). La señal de inicio de la secuencia se proporciona por el usuario (ingresando por teclado un comando), recibido por el programa principal que pone en marcha el sistema de detección de la fractura (en el microcontrolador). Para detener la prueba el proceso es similar al protocolo de inicio, se ingresa por teclado el comando adecuado y la prueba se detiene.

## 4.2.2 Método para la detección de la fractura

Las pruebas en el prototipo mostraron que conforme se incrementaban los ciclos de carga, la probeta se fracturaba a lo largo del cordón de soldadura, separando la probeta nuevamente en dos secciones, que físicamente ya no estaban en contacto. De modo que, si un elemento se adhiere a la probeta, éste también se romperá (en el punto donde lo alcance la fractura). Si este elemento teórico fuera un cable y este cable “formará” parte

de la probeta (cruzando el cordón de soldadura perpendicularmente), al inicio de la prueba se tendría que hay continuidad en el cable, pero, una vez que la fractura haya alcanzado el punto donde el cable cruza el cordón, dejaría de haber continuidad entre los extremos del cable.

Bajo esta hipótesis se sustituyó el cable por una tinta conductiva, que como su nombre lo indica conduce electricidad (carga eléctrica), permite conexiones “flexibles” y adaptables a la forma de la superficie donde se aplica. La tinta implementada *Bare Paint* de la marca *Bare conductive* presenta las siguientes características informadas por el fabricante en su hoja de datos (Bare Conductive, 2018).

*Tabla 13 Características de la tinta implementada.*

| <b>Propiedades típicas</b>            |   |
|---------------------------------------|---|
| <i>Color</i>                          | Negro   |
| <i>Viscosidad</i>                     | Altamente viscosa (tixotrópico)                     |
| <i>Densidad</i>                       | 1.16 [g/ml]   |
| <i>Temperatura y tiempo de secado</i> | De 5 [min] a 15 [min] a una temperatura de 24 [°C]. |

El valor de resistividad eléctrica depende de las dimensiones (largo y ancho) del patrón de tinta aplicado, de acuerdo con la fórmula:

$$Resistencia = \left[ \frac{19.77 * Largo}{Ancho} + 12 \right] [ohms] \quad (7)$$

Si se aplica una línea recta de tinta y se mide resistencia eléctrica entre los extremos (Figura 84), se obtendrá una medición proporcional a la ecuación (7) . Sí la línea se “rompe” y se repite la medición, el valor obtenido en resistencia eléctrica será alta impedancia, lo que implica que el circuito se encuentra abierto.

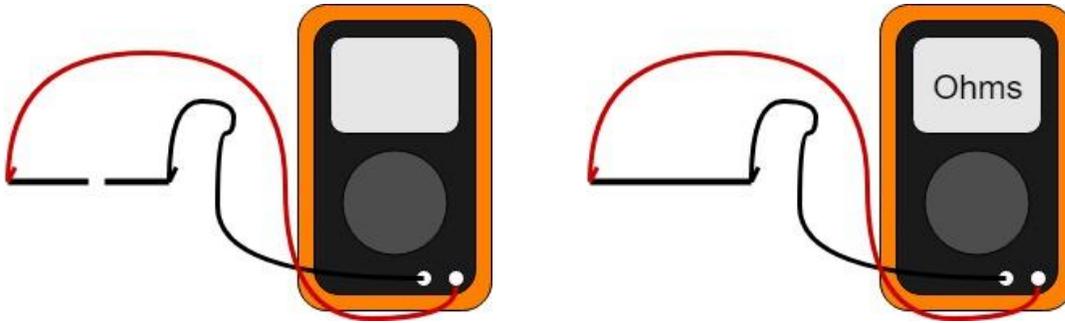


Figura 84 Mediciones de resistencia eléctrica.

Aplicando un patrón de tinta sobre la probeta en la zona de interés, cuando la probeta se fracture, la tinta se “fracturará” de la misma forma que lo hace la probeta, pudiendo detectar el momento exacto de la fractura, por medio de lo que se asemeja a un interruptor.

### 4.2.3 Circuito de adaptación para la tinta

Teniendo en cuenta que el funcionamiento de la tinta sobre la probeta se asemejaba al de un interruptor y un resistor conectados en serie, se diseñó un circuito para la detección de la conmutación (cuando la tinta conduce y cuando está fracturada) con la ayuda de un transistor y una fuente de alimentación. De acuerdo con el diagrama siguiente:

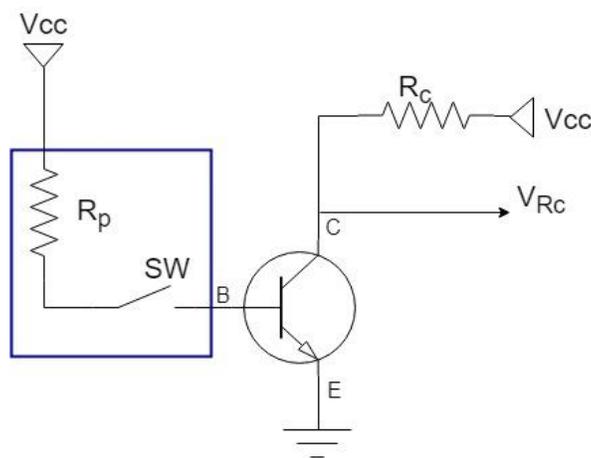


Figura 85 Adaptación de la señal obtenida de la tinta.

Donde:

$R_p \equiv$  Representa el valor de resistencia asociada a la tinta.

$SW \equiv$  Representa el interruptor asociado a la fractura de la tinta.

$R_c \equiv$  Resistencia de colector del transistor.

$V_{CC} \equiv$  Voltaje de alimentación.

$V_{RC} \equiv$  Voltaje en el colector del transistor

$B, C$  y  $E$  son base colector y emisor respectivamente.

Cuando el interruptor se encuentra abierto (fractura en la tinta) el transistor está en su zona de corte, haciendo que:

$$I_B = 0$$

$\therefore$

$$V_{CE} = V_{CC} = V_{RC}$$

Ahora, cuando el interruptor está cerrado (la tinta “conduce”) el transistor entra en su zona de saturación:

$$I_C = I_E$$

$\therefore$

$$V_{CE} = V_{RC} = 0$$

Con estos dos estados de operación en el transistor,  $V_{RC}$  tienen dos valores posibles (0 [V] y 5 [V]), que dependen de la ruptura de la línea de tinta, inherentemente ligada a la aparición de la grieta en la fractura, haciendo que la fractura sea detectable por medio del cambio de voltaje.

Las dimensiones previstas para las líneas de tinta eran 100 [mm] (de ancho) por 2 [mm] (de largo), sustituyendo estos valores en la ecuación (7), se obtiene un valor de aproximadamente 1 [k $\Omega$ ] para cada línea de tinta.

El transistor seleccionado fue el 2N2222A (NPN) que con una resistencia de colector de 10 [k $\Omega$ ] y la resistencia de la tinta de 1 [k $\Omega$ ] (resistencia de base), permiten el correcto funcionamiento del transistor en sus zonas de corte y saturación.

## 4.2.4 Detección del cambio de estado en el circuito de acondicionamiento

La forma de trabajar con el cambio de estado de  $V_{RC}$ , se hizo por medio de interrupciones en el microcontrolador; que como su nombre lo indica interrumpen o paran el flujo del programa para ejecutar acciones previamente establecidas (únicamente cuando se presenta la interrupción), liberando al microcontrolador de verificar constantemente el estado de  $V_{RC}$ .

Para poder ejecutar una interrupción se necesita:

- Un pin del microcontrolador que detecte la señal de activación.
- Una condición de disparo.
- Una función que ejecutar.

La tarjeta de desarrollo Arduino UNO cuenta únicamente con dos pines configurables para ejecutar interrupciones (pines 2 y 3).

Existen diversas condiciones de disparo para la interrupción:

- LOW, la interrupción se dispara cuando el pin está en estado bajo, es decir, 0 [V].
- CHANGE, se dispara cuando ocurre un cambio de estado, de 0 [V] a 5 [V] o viceversa.
- FALLING, ocurre cuando pasa de 5 [V] a 0 [V].
- RISING, ocurre cuando pasa de 0 [V] a 5 [V].

Siendo esta última la implementada como condición de disparo para la interrupción, por el comportamiento de  $V_{RC}$ , que se encuentra en 0 [V] cuando la tinta (resistencia de base) está conduciendo y cambiando a 5[V] en el momento que la tinta se fractura.

## 4.2.5 Pruebas del método para la detección de la fractura

Antes de pasar a implementar el método en la probeta, se simuló el comportamiento de la probeta y su interacción con la tinta (en el momento de la fractura). Sobre un pedazo de madera se introdujeron tres pijas colineales. A las pijas de los extremos se les soldó un cable (para poder conectarse a una *proto-board*).

Se aplicó una línea de pintura de modo que los tres barrenos estuvieran conectados entre sí. La ruptura de la probeta se simuló mediante el destornillamiento de la pija central y para visualizar el comportamiento del circuito de la Figura 85, se conectó un diodo (led) al colector del transistor junto con su respectiva resistencia. Cuando se energizó el circuito se observó que el led estaba encendido y al momento de quitar la pija central este led se apagó, corroborando el comportamiento esperado del circuito.

Dada la dirección de propagación y la forma en que se fractura la probeta, el patrón que se aplica es una línea “perpendicular” a la forma de propagación de la grieta señalada en la Figura 69; la línea cruza las dos fronteras del cordón y en sus extremos se hace la conexión a voltaje y la base del transistor. Para evitar que la misma probeta (hecha de un material conductor) interfiriera en las conexiones propuestas se aplicó una capa de anticorrosivo (*primer*) y posteriormente una capa de pintura, creando una capa aislante entre la tinta y la probeta.

Sabiendo que el microcontrolador cuenta con dos interrupciones y que existe una zona de predominancia para la aparición de la grieta en la probeta, se aplicaron dos líneas según el patrón en la Figura 86 ; una sobre la parte superior de la probeta (zona de predominancia) y otra sobre un costado. Con la fractura de la primera línea se asegura el comienzo de la grieta y con la fractura de la segunda línea se tiene un estimado de la velocidad de corrimiento de la grieta hasta el punto donde ya se considera que la estructura se encuentra comprometida. Si bien, no se asegura que la grieta surgiría sobre los patrones aplicados, sí se podía detectar el momento exacto en el que pasa sobre los patrones aplicados.



Figura 86 Patrón de líneas.

La aplicación de la tinta con las medidas establecidas (2 [mm] de ancho y 100 [mm] de largo) en la práctica tenía valores de resistencia eléctrica que rondaba entre 1 [k $\Omega$ ] y 10 [k $\Omega$ ].

## 4.3 Sistema de almacenamiento de la información de la prueba

El almacenamiento de la información de la prueba se da mediante el manejo de archivos por el programa principal. El programa principal de la Figura 81 también contemplaba ya este manejo de la información.

El lenguaje de programación del programa principal (Python), permite a través de *métodos* crear y manejar archivos de texto (.txt). Los métodos para el manejo de archivos en Python son *open*, *write*, *read* y *close*.

El método *open* sirve para crear un nuevo archivo y escribir en él, leer un archivo (previamente creado) o anexas texto a un archivo ya existente. La selección entre estas funciones se hace mediante la declaración de los parámetros que recibe el método; el método recibe dos parámetros el nombre del archivo de texto y una 'w', 'r' o 'a' para indicar si se quiere abrir y escribir, leer la información o anexas información al archivo, respectivamente.

*W = open('nombre del archivo.txt', 'modo')*

Con el método *write* escribe información en el texto, para que el método funcione la información debe de ser del tipo “string”.

*W.write('cadena a escribir')*

El método *read* almacena en una variable toda la información contenida en el archivo solicitado, la información leída se guarda en una sola cadena de caracteres del tipo “string”.

*Variable = W.read()*

Finalmente, el método *close* cierra el archivo, evitando que se pierda información en el archivo con el que se trabajó.

*W.close()*

La información que se tenía que almacenar era el número de ciclos y el ciclo en que ocurría la fractura, por lo que cada que se aumentara un ciclo (o se detectara la fractura) esta información se debía guardar.

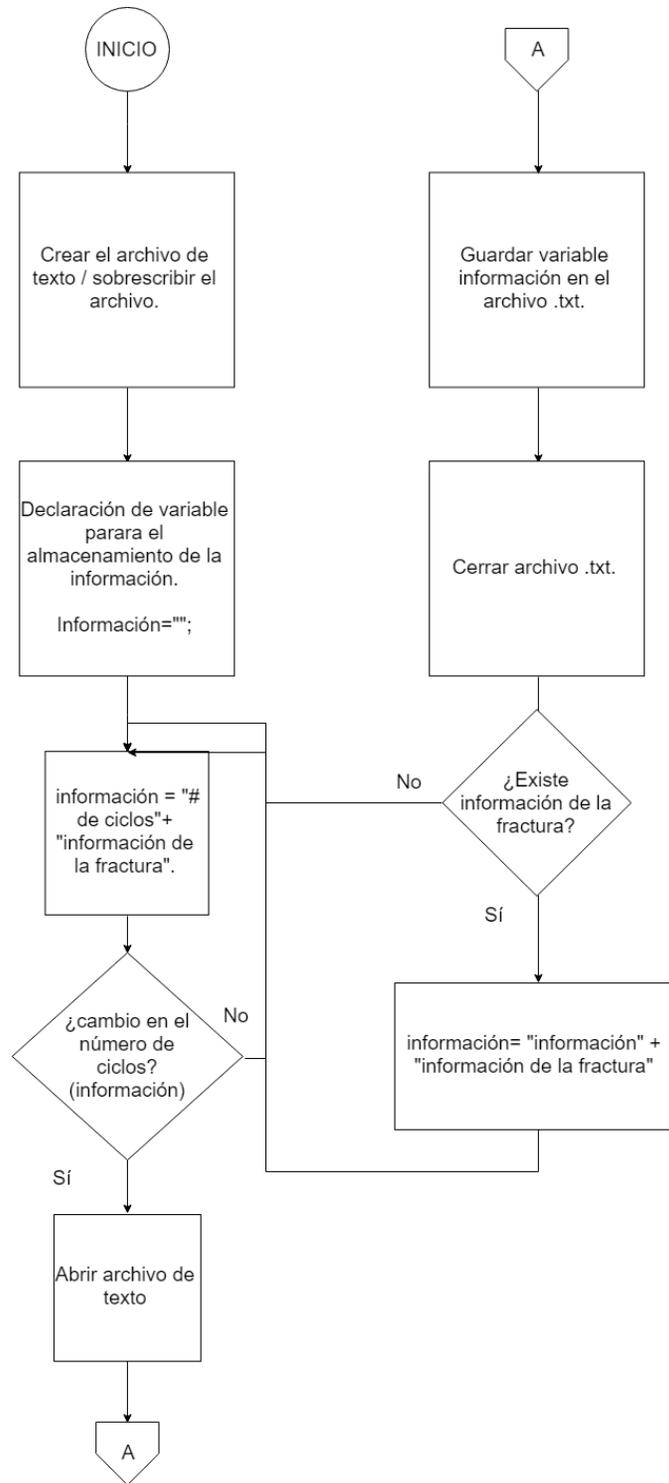


Figura 87 Diagrama de flujo para el almacenamiento de información en la prueba.

Con esas consideraciones y los métodos para el manejo de archivos se generó el diagrama de flujo de la Figura 87 para crear la parte correspondiente al almacenamiento de información dentro del programa principal.

# 5. Fabricación y pruebas del banco

## 5.1 Manufactura y ensamble de sistemas mecánicos

La manufactura del concepto se siguió de acuerdo con los planos generados para el sistema de sujeción por mordazas en “V” y para las modificaciones realizadas al sistema de aplicación de carga.

### 5.1.1 Sistema de sujeción por mordazas en “V”

Los elementos en “C” se maquinaron con solera de 2 [pulg] con un espesor de  $\frac{1}{4}$  [pulg], cortando tres secciones, dos de 55 [mm] de longitud (los extremos) y una de 152.4 [mm] de longitud. A las dos secciones pequeñas se les hizo un barreno de 19.05 [mm] para fijar el elemento en “C” al marco.

El concepto requería de una sección con la forma de una “V” para apretar la probeta, con un perfil en “L” (L4.5x25) colocado conforme la disposición mostrada en la Figura 88, se creó la “V” (mordaza fija) necesaria para la sujeción.



*Figura 88 Posicionamiento del perfil en "L" para crear la "V" del concepto.*

Las tres secciones de solera de 2 [pulg] y el perfil en "L" se puntearon con soldadura MIG, cuidando que la mordaza fija (el perfil en "L") quedara completamente vertical y en el centro de la sección, el proceso se realizó para crear las dos bases del concepto (superior e inferior). Antes de seguir con el proceso de manufactura se colocaron las bases en su posición y se corroboró que fueran colineales (Figura 89), montando un tubo y viendo que estuviera en contacto con ambas mordazas fijas.



*Figura 89 Prueba de colinealidad entre las bases.*

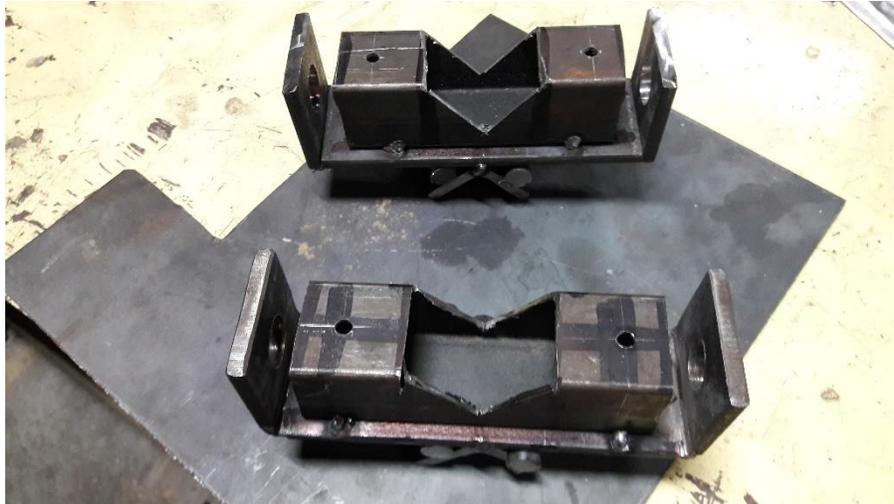
Como las mordazas están sometidas a cargas de compresión cuando se aprietan contra su contra, la disposición de la Figura 88 se podía fatigar y eventualmente deformar; causando el desajuste de la probeta. Para evitar este problema se agregó un cartabón (Figura 90) en cada costado del perfil en “L”, colocando redondo de ½ [pulg].



*Figura 90 Cartabones en la mordaza fija.*

La mordaza *B* se manufacturó con PTR de 1 ½ [pulg] x 1 ½ [pulg] y con perfil L6x38. En la mitad (sobre una cara) de una sección de 600 [mm] de PTR se maquinó la forma del contorno externo del perfil en “L”, creando un “bocado” con esta forma en el PTR, donde se soldaría una sección de perfil en “L”.

El modo de sujeción entre la mordaza fija *A* y la mordaza *B* estaba previsto que se diera por medio de tornillos, y para asegurar que los barrenos fueran concéntricos entre las dos mordazas; se unió con puntos de soldadura a ambas mordazas según la disposición en la Figura 91 y se maquinaron los barrenos.



*Figura 91 Unión entre la mordaza A y la mordaza B para la manufactura de los barrenos.*

Terminados los barrenos, se desoldaron ambas piezas y sobre el “bocado” en el PTR (de ambas mordazas), se punteó una pieza de perfil L6x38 con las dimensiones del “bocado”, y en los barrenos de las mordazas A se soldaron dos tuercas de  $\frac{1}{2}$ -13 UNC para poder crear el apriete con su respectiva contra. La Figura 92 muestra el montaje de las piezas (con los procesos mencionados) sobre el marco.



*Figura 92 Montaje y disposición de apriete en las mordazas.*

Para terminar, se soldaron todas las uniones punteadas y a las mordazas B, se les agregó un inserto concéntrico a los barrenos ya hechos, para evitar que el PTR colapsara por acción del apriete de las mordazas.

## 5.1.2 Sistema de aplicación de carga

El sistema contemplaba dos grandes rubros. En primer lugar, la unión del cilindro al marco y, en segundo lugar, su adaptación para sujetar la probeta y aplicar la carga.

La unión del cilindro y el marco requirió la manufactura de un nuevo conjunto de elementos, que dotaran de un grado de libertad extra al cilindro, para evitar la fatiga del vástago (vista durante las pruebas del prototipo). La Figura 93 muestra el arreglo creado, que consta de dos bases, donde, una base se atornilla al patrón de barrenos en el pistón y la otra a la placa de unión al marco. La base inferior tiene un inserto de latón, donde se introduce un eje (el tornillo) que une ambas bases y permite la rotación sobre el eje incrustado.



*Figura 93 Adaptación para la rotación del cilindro.*



*Figura 94 Montaje del cilindro y su articulación en el banco.*

La adaptación para unir la probeta y el vástago incluyó la reutilización de la extensión del vástago y la manufactura de un nuevo elemento, adaptable a los diámetros de tubo propuestos y con las características creadas en el concepto de la Figura 72 .



a)



b)

*Figura 95 Vista frontal a) y lateral b) del ensamble del elemento para aplicación de la carga.*

Los bloques en “V” del concepto, se manufacturaron de la misma forma que las mordazas B del sistema de sujeción (Figura 91). Se creó un bocado con la forma externa del perfil en “L” L4.5x25 y se soldó una sección del perfil sobre los “bocados”. Las bases se unieron para crear los barrenos en un “solo” proceso y asegurar la concentricidad. A una de las bases se le soldó un par de “orejas” (con un barreno previamente maquinado)

para acoplar el *rod end* entre ellas y con unos espaciadores se aseguró que el *rod end* se mantuviera en el centro del elemento y de la misma forma que a las mordazas en B a los barrenos se les agregó un inserto para evitar que el perfil colapsara a causa del apriete.

## 5.2 Ensamble y montaje de circuitos eléctricos

En el banco básicamente hay dos circuitos, un circuito es de CA y otro circuito de CD. El primero corresponde a la energización de la electroválvula en sus pilotajes y el segundo abarca desde el circuito de adaptación para la tinta, el microcontrolador, el módulo de relevadores hasta la conexión con la PC.

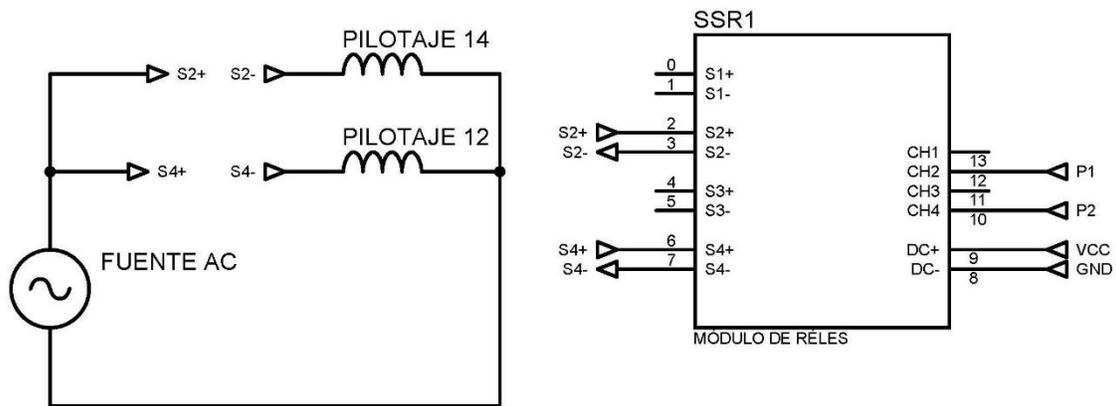


Figura 96 Circuito de corriente alterna.

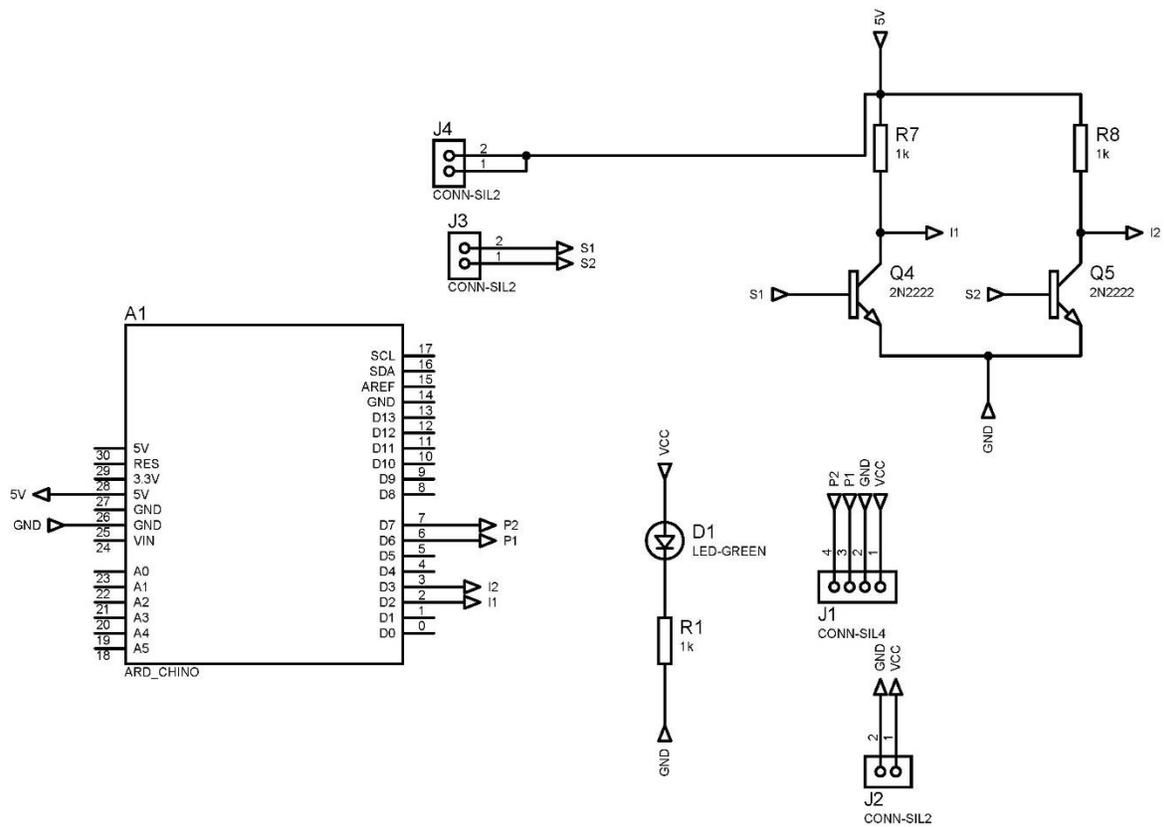
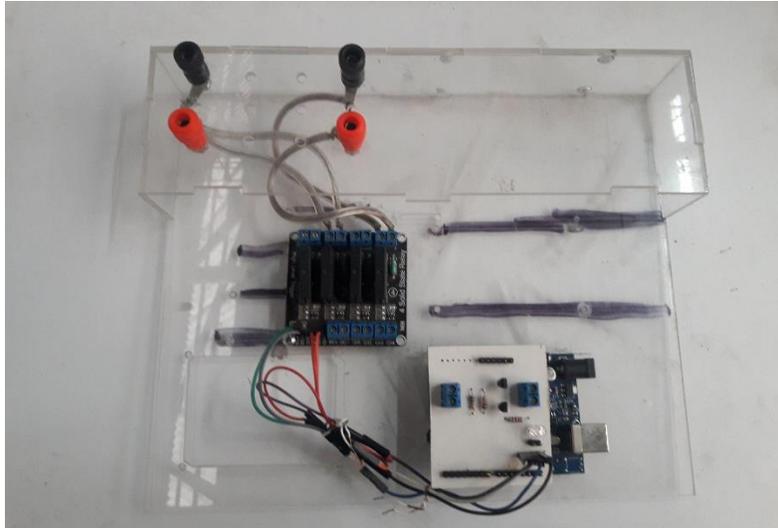


Figura 97 Diagrama de conexiones.

La PC y el microcontrolador se conectan a través de un cable USB Tipo A-B encargado de alimentar al microcontrolador con la batería de la computadora y de comunicar ambos dispositivos.

Se trató de compactar los dos circuitos en la medida de lo posible en un panel de control, donde todo estuviera al alcance del usuario.



*Figura 98 Panel de conexiones.*

La Figura 98 muestra el panel de control, con borneras para conectar los pilotajes de la electroválvula y la fuente de alimentación de 24 [V] de CA. El módulo de relevadores y el microcontrolador se fijaron por medio de tornillos al acrílico, mientras que, las conexiones entre estos dos elementos se hicieron mediante cables.

Para el circuito de adaptación para la tinta, se manufacturó una placa PCB (montable en el Arduino), con base en el diagrama de la Figura 97 se generaron (mediante software) los archivos de código G necesarios para maquinar la placa en CNC.

## 5.3 Pruebas del banco

### 5.3.1 Tratamiento a la probeta

Para implementar el método de detección, es necesario aplicar una capa de anticorrosivo (*primer*) sobre la probeta y una capa posterior de pintura; que “aislan” la base de la probeta (conductiva) de la tinta conductiva. Enseguida de que se seca la pintura se aplica la tinta conductiva en la probeta.

La forma del patrón se crea con cinta, cubriendo las partes donde no se necesita la tinta y dejando al descubierto la forma de la línea deseada. Posteriormente, se aplica con un

hisopo la tinta y se deja secar por aprox. 15 [min]. Pasado el tiempo de secado se debe verificar el valor de resistencia entre los extremos de cada línea y entre los extremos opuestos de cada línea, para verificar que las líneas sean independientes (eléctricamente) una de otra.

La conexión entre la tinta y el circuito de adaptación se hace con dos cables calibre 18 (con las puntas peladas y estañadas). Se posicionan las puntas sobre los extremos del patrón de tinta y se agrega un poco más de tinta; la unión se cubre con cinta y nuevamente se verifica en el valor de resistencia eléctrica, para asegurarse de que la tinta esté haciendo contacto con el cable.

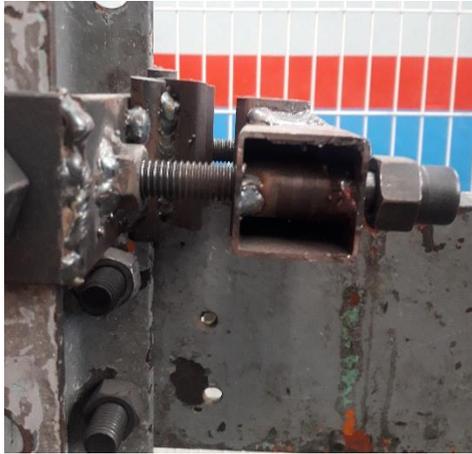
## 5.3.2 Protocolo

Pensando en la experimentación futura prevista para el banco, se desarrolló un protocolo para la prueba basado en las características de la probeta y el método de detección de la grieta.

El punto más importante es la manufactura de la probeta, siguiendo la línea de la experimentación que busca la reproductibilidad y recopilación de información. Para motivos de este trabajo la manufactura no siguió un protocolo de manufactura (soldadura). Cuidando únicamente que la probeta se soldara en una configuración en T. Algunos de los protocolos de manufactura referentes a uniones soldadas se establecen en el AWS Structure Welding Code y por el *IIW* (International Institute of Welding).

El siguiente paso después de la manufactura es dar el tratamiento explicado en la 5.3.1 referente a la aplicación de la tinta.

Para el montaje de la probeta en el banco se coloca primero el brazo donde no se va a aplicar la carga (retirando una mordaza móvil), dejando espacio para insertar la probeta en la mordaza contraria, enseguida se aprieta esta mordaza y se coloca la mordaza retirada que ya se puede apretar (por medio de los tornillos), teniendo cuidado de colocar el brazo a fatigar colineal con el marco.



*Figura 99 Muestra del espacio requerido para insertar la probeta.*

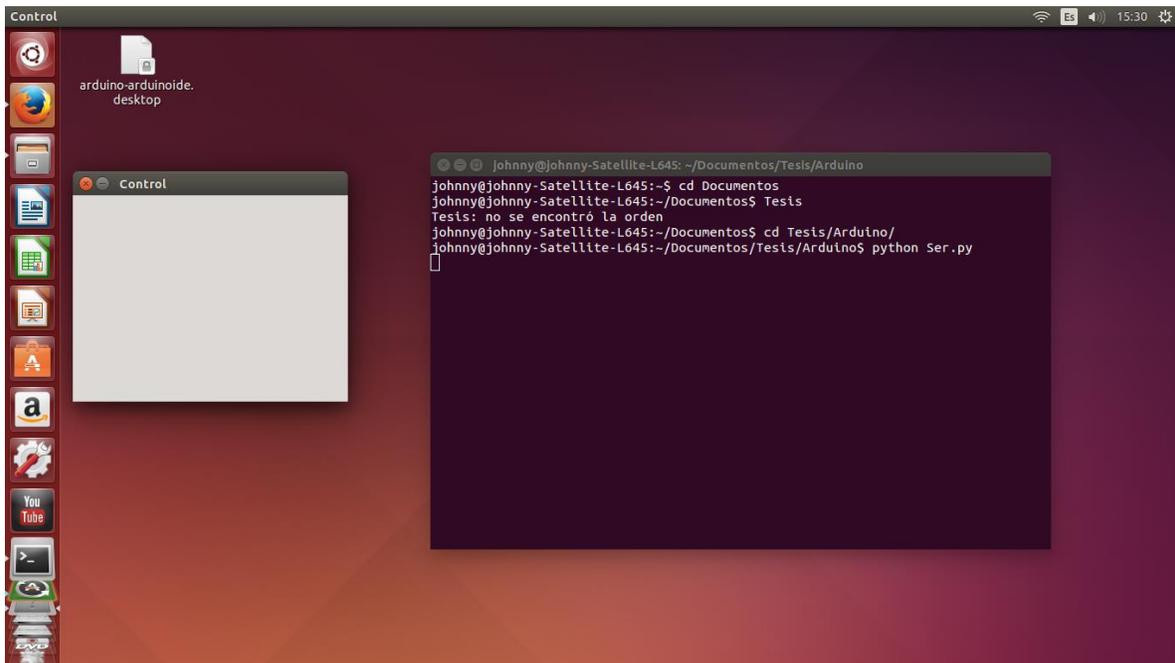
Posteriormente se ajusta la altura de la extensión del vástago hasta topar con la probeta, se retira el bloque inferior y se ajusta la longitud del brazo de palanca moviendo la corredera de la parte superior, se asegura la corredera apretando los tornillos presentes en la parte superior y finalmente se coloca el bloque inferior apretando contra su contra (con la probeta en medio de los dos elementos, según la Figura 100).



*Figura 100 Unión entre la extensión del vástago y la probeta.*

Después del montaje de la probeta, se conectan los extremos de los cables (extensiones de la tinta) a las borneras de la PCB y se energizan los circuitos (CA y CD). En la PC se abre la terminal de UBUNTU y se debe navegar hasta la carpeta donde se encuentra el programa principal, una vez ahí, se escribe y ejecuta el comando *Python Ser.py* (en la

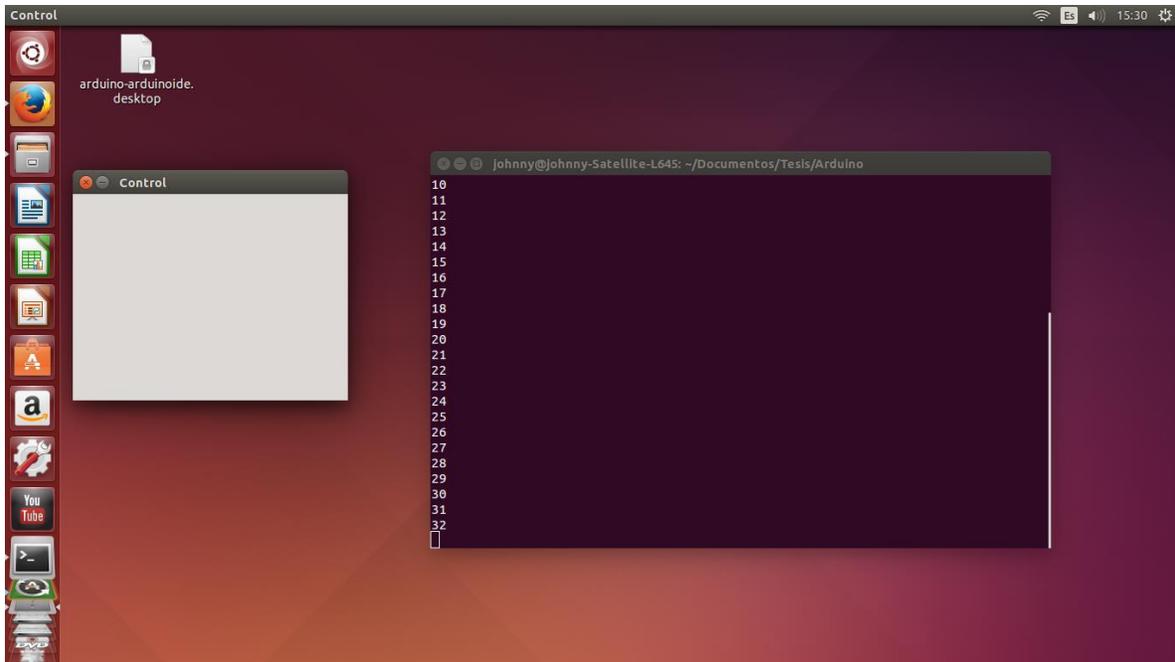
misma terminal), como se muestra en la Figura 101, para iniciar el intérprete de Python y ejecutar el programa principal.



*Figura 101 Navegación dentro de la terminal para iniciar la prueba.*

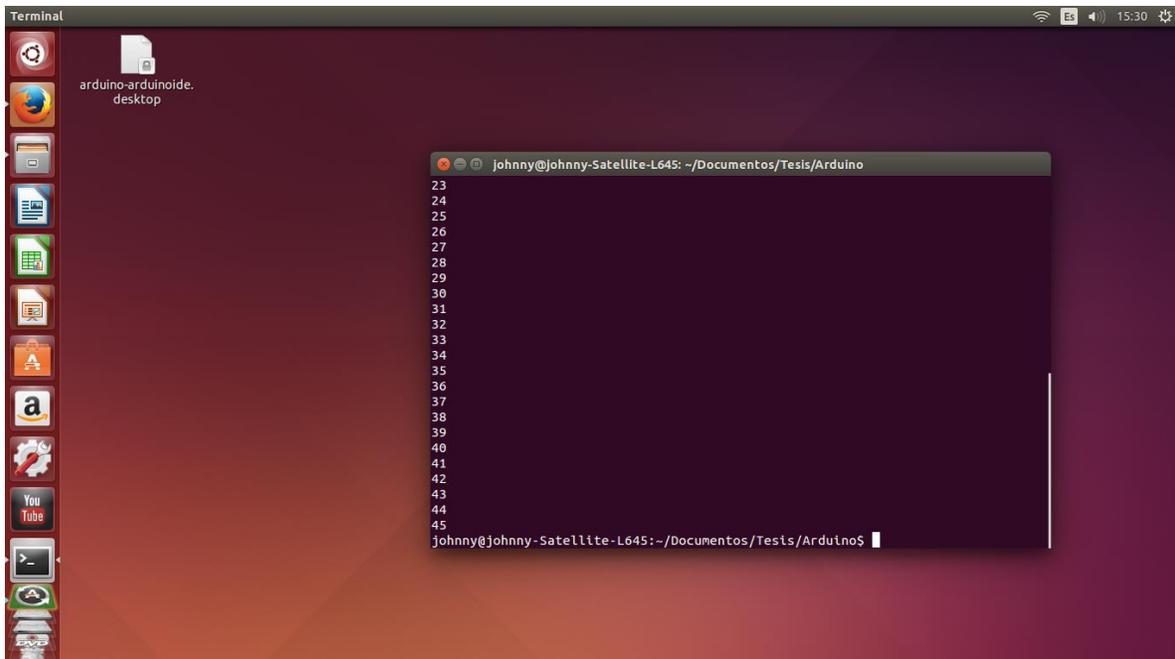
Después de correr el programa principal se abre una ventana con el nombre “Control”, indicando al usuario que la prueba está lista para empezar. Antes de comenzar, se conecta la línea de aire al circuito neumático y se verifica en el manómetro la presión, en caso de ser necesario se regula mediante la unidad de mantenimiento hasta llegar a la presión requerida.

Para iniciar la prueba se debe abrir la ventana “Control” y presionar la tecla “c”. El número de ciclos se muestra en la terminal (previamente abierta) que se actualiza conforme avanza cada ciclo de carga, según la Figura 102. Los datos son almacenados en un archivo de texto en la misma carpeta donde se encuentra guardado el programa principal.



*Figura 102 Despliegue del aumento de ciclos sobre la terminal.*

Para detener la prueba se abre la ventana “Control” y se presiona la tecla “Esc”, terminando con la ejecución del programa, de acuerdo con la Figura 103.



*Figura 103 Cierre del programa principal.*

Cada que se ejecuta el programa principal del banco, el archivo de texto se reescribe por lo que, se debe tener cuidado de extraer la información previa antes de reiniciar o comenzar otra prueba, de lo contrario ésta se perderá.

### 5.3.3 Pruebas y resultados

Se realizaron cuatro pruebas en el banco, donde, dos pruebas se llevaron a cabo en probetas soldadas con MIG y dos más en probetas soldadas con TIG, con la finalidad de empezar a obtener datos relevantes sobre la unión y su resistencia ante la carga aplicada durante la prueba. Excepto por el tipo de soldadura las probetas se manufacturaron bajo las mismas características.

- Tubo con costura de  $\frac{3}{4}$  [pulg] calibre 14.
- Longitud de los brazos de 300 [mm].
- Maquinado de “boca de pescado” en el brazo a fatigar (para el ensamble).

Los parámetros que cambiaron respecto a los parámetros propuestos en las pruebas del prototipo, fueron el brazo de palanca y la frecuencia de los ciclos, dejando la presión en su magnitud máxima, la fuerza de retorno y empuje también se mantuvieron.

*Tabla 14 Parámetros de las pruebas para pruebas sobre probetas de  $\frac{3}{4}$  [pulg] calibre 14..*

| <b>Parámetros</b>             | <b>Magnitud</b> | <b>Unidad</b> |
|-------------------------------|-----------------|---------------|
| <i>Presión</i>                | 588.4           | kPa           |
| <i>Fuerza de empuje</i>       | 739.404         | N             |
| <i>Fuerza de retorno</i>      | 554.553         | N             |
| <i>Brazo de palanca</i>       | 300             | mm            |
| <i>Intervalo entre ciclos</i> | 1               | s             |

De acuerdo con los parámetros propuestos, los resultados de las pruebas se informan en la Tabla 15.

Tabla 15 Resultados de las pruebas sobre probetas de  $\frac{3}{4}$  [pulg] calibre 14.

| Prueba | Brazo de palanca [mm] | Tipo de soldadura | comienzo de la fractura hasta alcanzar la línea superior de tinta [# de ciclos] | Desprendimiento total de la probeta [# de ciclos] |
|--------|-----------------------|-------------------|---|---|
| 1      | 350                   | MIG               | 31599.5   | 39178   |
| 2      | 350                   | MIG               | 79299   | 83431   |
| 3      | 350                   | TIG               | 26531   | 27409.5   |
| 4      | 350                   | TIG               | 4519  | 6194.5  |

Es importante mencionar que las pruebas no se mantenían continuas (desde el inicio hasta la fractura de la probeta). Se realizaban en intervalos y estos intervalos no eran constantes debido a la extensa duración de la prueba que, combinada con los tiempos y actividades del centro de trabajo donde se desarrolló el proyecto, dificultaban dejar correr una prueba desde el inicio hasta su fractura.

### **Del banco**

Los sistemas mecánicos (sistema de sujeción de la probeta y sistema de aplicación de carga) mostraron un desempeño adecuado, manteniendo fija la probeta y sujetándola firmemente durante toda la prueba.

La articulación creada para el pistón disminuyó en gran medida el desgaste entre el vástago y sus empaques. Conforme el brazo de palanca crecía, por acción del desprendimiento de la probeta, la articulación permitía que el conjunto de elementos unidos a la articulación (cilindro, extensión del vástago y la sujeción de la probeta para la aplicación de carga) rotaran y aplicaran una carga siempre perpendicular al brazo de la probeta.

El punto principal, y sobre el que se invirtió el mayor tiempo de trabajo fue el método de detección de la fractura, que en las pruebas mostró el desempeño esperado. Cuando la fractura de la probeta alcanzaba una línea de tinta, ésta se fracturaba con ella, activando el interruptor por corriente que detenía la rutina del microcontrolador y mandaba la información de la fractura a la PC, para almacenarla en el archivo de texto creado.

La sujeción hecha para conectar los cables a la probeta, en algunos casos se despegaban creando una lectura “falsa” de fractura. Se observó que este inconveniente se presenta por el movimiento de los cables y la poca adherencia de la cinta usada y la probeta.

La interfaz era la conjunción de la ventana “panel de control” y la terminal de UBUNTU, que mostraba en secuencia el número de conmutaciones del pistón (cada dos conmutaciones se consideraba un ciclo).

### **De las probetas**

El comportamiento de la probeta en las cuatro pruebas fue similar al visto en las pruebas del prototipo; la fractura se presentó sobre la zona prevista, siguiendo el mismo recorrido hasta el desprendimiento del brazo de la probeta.

En los casos de la soldadura TIG las probetas se fracturaron sobre el cordón, como se indica en la Figura 104, y no sobre la periferia del cordón, a una magnitud de ciclos mucho menor que a la que lo hicieron las probetas soldadas con MIG.



*Figura 104 Fractura de una probeta soldada mediante TIG.*

En primera instancia podría parecer que la resistencia de la soldadura MIG es mayor a la TIG, sin embargo, se deben considerar también los parámetros individuales de cada soldadura (método de aplicación) e integrar al factor humano como un criterio de evaluación en la prueba.



*Figura 105 Fractura de probeta soldada con MIG.*

Las diferencias en cuanto a número de ciclos de carga soportados, abre las puertas a toda una gama de experimentación posible.

# Conclusiones

Se buscó que el esfuerzo aplicado a la probeta fuera totalmente invertido (que el esfuerzo medio fuera igual a 0), sin embargo, por la construcción del actuador, la fuerza de retorno era menor a la fuerza de empuje causando una aplicación de un esfuerzo fluctuante sobre la probeta. Si bien no era el esfuerzo que se requería, sirvió para “forzar” a que la grieta surgiera en la parte superior del cordón de soldadura, ayudando a la detección de la misma.

El punto más sobresaliente por destacar es el sistema de instrumentación, y más específicamente, el método de detección de la grieta, que en comparación con los métodos usados convencionalmente (*strain gauges*, LVDT, etc.) brinda una opción más factible y sencilla de implementar. La aplicación de la tinta mostró una gran efectividad al momento de “detectar” el desgarramiento de la probeta y conocer otro parámetro que no estaba previsto: la *velocidad de crecimiento de la grieta*. La aplicación de las dos líneas en diferentes puntos del cordón de soldadura mostró que se puede determinar la velocidad (a través del número de ciclos) con la que la grieta se propaga de un punto a otro, dando un nuevo parámetro para el análisis y la generación de curvas s-n en las futuras pruebas previstas para la validación de las uniones soldadas (con más configuraciones de uniones, no solo en T). El método también se puede aplicar a todo el chasis de un vehículo tubular para detectar fracturas en ciertos puntos de interés, al igual que la caracterización de la flexión que pudiera sufrir el chasis.

El método de aplicación de carga se puede usar para determinar el comportamiento de suspensiones, que no se abarcó en este trabajo, pero los métodos implementados (método de detección de la fractura, aplicación de carga cíclica, método de sujeción, etc.), se pueden usar para determinar el comportamiento de una suspensión.

En cuanto al diseño, ya sea de un producto o en este caso, un banco para la experimentación se requiere de la aplicación de una secuencia ordenada de actividades para lograr su desarrollo (desde el diseño conceptual hasta un producto terminado) en concordancia con un objetivo esperado. La metodología seguida a lo largo de este

trabajo se centra en el desarrollo de productos, que en primera instancia podría parecer que chocan con la esencia del banco de pruebas (la experimentación y la generación de conocimiento), no obstante, el banco se abordó como un producto, que tenía que cumplir con ciertas especificaciones y requerimientos, y que por medio de la secuencia de actividades sugerida por la metodología, llevaron a la generación de un prototipo de banco capaz de fatigar la unión especificada.

El objetivo de la experimentación sobre el banco era registrar el momento en el que comenzaba la grieta sobre la probeta. De modo que, los sistemas que intervenían directamente en el cumplimiento de esta tarea eran el sistema de almacenamiento de información y el sistema de instrumentación. El primero se desarrolló con el manejo de archivos que ofrece el lenguaje programación Python, creando un archivo de texto (.txt) y guardando de manera “automática” la información requerida (en la PC) cada que el usuario iniciaba una prueba. La ventaja de este tipo de archivo radicaba en que se podía exportar a otro tipo de formato y diversidad de programas para su tratamiento e interpretación.

El banco en sí es resultado de la integración de diversos sistemas (cada uno con tareas sencillas), que interactúan entre sí. por lo que la adaptabilidad entre ellos desempeñó un papel muy importante al momento de tomar decisiones sobre el diseño. Un ejemplo de ello es la generación de más de un concepto para la adaptación de la probeta al banco de pruebas. La restricción en cuanto a recursos también fue determinante en el diseño, algunos de los elementos y funciones del banco diseñado se pensaron en la adaptación o la propia utilización de elementos presentes en el centro de trabajo (CDMIT).

# Trabajo a futuro

La implementación de la tinta mostró ser un método factible y barato para la detección de grietas, se deja como trabajo a futuro mejorar los siguientes puntos:

*Realizar más pruebas para obtener una validación del método.* Se debe incrementar la muestra de pruebas, aplicando el método de detección propuesto con la posibilidad de probar diversas marcas de tinta conductiva.

*Mejorar aplicación de la tinta.* La aplicación irregular y defectuosa hacía que los valores de resistencia variaran con respecto a lo esperado teóricamente y que se “midiera” el surgimiento de la grieta en zonas no deseadas. Una mejora en la aplicación de la tinta brindaría más certeza, sobre la efectividad del método para detectar la grieta.

*Complementar el método.* Por sí solo, el método de la tinta detecta únicamente cuando la grieta cruza por el patrón colocado. Si se colocan otros elementos, como: *strain gauges*, placas foto-elásticas (sobre el cordón), se puede determinar el esfuerzo en la unión, y encontrar la zona del esfuerzo máximo que aunado a la aplicación de tinta reducen la incertidumbre en el surgimiento de la grieta. El objetivo de complementar el método radica en poder asegurar la zona donde se puede presentar la grieta y detectarla.

*Probar diversos patrones de aplicación de la tinta.* La validación del método puede implicar la aplicación de diversos patrones de tinta y/o cambiar el microcontrolador para poder utilizar más interrupciones (forma de detección). Las formas del patrón de tinta pueden ser muy variadas, desde patrones matriciales (en forma de red) hasta líneas con diferente separación y disposición entre ellas.

*Mejorar la conexión entre la tinta y el circuito eléctrico.* La conexión entre la tinta (sobre la probeta) y el circuito de adaptación requiere más que una unión con cinta adhesiva, requiere de un sistema que permita apretar los cables del circuito de adaptación contra la tinta, y los mantenga en contacto durante toda la prueba.

En la prueba se recomienda crear una interfaz gráfica que permita al usuario interactuar con el banco (accionar la prueba, ver información de la prueba, etc.), todo en un panel de control. Se propone el uso de una Raspberry Pi junto con el lenguaje de programación Python en sustitución de la PC, para el desarrollo de la interfaz y el panel de control, con esto se asegura tener solo lo fundamental de una PC para la prueba.

El siguiente paso lógico para el banco es la experimentación. Ésta requiere de la reproductibilidad en las pruebas, que se asegura mediante la aplicación de pruebas bajo las mismas características hasta obtener una desviación mínima en los resultados. Junto con la mejora de la aplicación del método de soldadura en la unión. Una vez asegurada la reproductibilidad, se puede comenzar a variar parámetros dentro de la prueba, con la finalidad de obtener mayor información. Algunas de las variables con las que se recomienda probar son:

- Diferentes diámetros y calibres de tubo.
- Usar diversos micro alambres en la soldadura.
- Variar la carga aplicada en diversos especímenes construidos bajo las mismas características.
- Dar algún tipo de tratamiento a la probeta, para eliminar los esfuerzos residuales.

Finalmente, respecto a la estructura del banco, se debe crear una estructura especialmente para la aplicación de la fatiga. La estructura usada en este trabajo requirió de diversas adaptaciones y pasó a formar parte de las restricciones en el diseño del banco. Con los problemas detectados sobre esta estructura se puede diseñar una nueva estructura específica y mucho más compacta para la aplicación de la fatiga.

# Referencias

- Ahmadi, H., Lotfollahi-Yaghin, M. A., & Yong-Bo, S. (2013). Chord-side SCF distribution of central brace in internally ring-stiffened tubular KT-joints: A geometrically parametric study. *Thin-Walled Structures* 70 , 93-105.
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2012). *Ciencia e ingeniería de materiales*. México: Cengage Learning.
- Aurora Bearing Company*. (9 de Noviembre de 2017). Obtenido de [www.aurorabearing.com/pdf/aurora-bearing-610-catalog.pdf](http://www.aurorabearing.com/pdf/aurora-bearing-610-catalog.pdf)
- Bare Conductive*. (31 de Marzo de 2018). Obtenido de [https://www.bareconductive.com/wp-content/uploads/2017/04/ElectricPaint\\_TechnicalDataSheet.pdf](https://www.bareconductive.com/wp-content/uploads/2017/04/ElectricPaint_TechnicalDataSheet.pdf)
- Beer, F., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2013). *Mecánica de materiales*. México: McGraw-Hill.
- Bertini, L., Cera, A., & Frenzo, F. (2014). Experimental investigation of the fatigueresistence of pipe-to-plate welded connections under bending, torsion and mixed mode loading. *International Journal of Fatigue* 68, 178-185.
- Cheng, C., Yongbo, S., & Jie, Y. (2013). Experimental and numerical study on fire resistance of circular tubular T-joints. *Journal of Constructional Steel Research* 85, 24-39.
- Esderts, A., Willen, J., & Kassner, M. (2011). Fatigue strenght analysis of welded joints in closed steel sections in rail vehicles. *International Journal of Fatigue* 34, 112-121.
- Gao, F. (2006). Stress and strain concentrations of completely overlapped tubular joints under lap brace OPB load. *Thin-Walled Structures* 44, 861-871.

- Gillespie, T. D. (s.f.). *Fundamentals of vehicle dynamics*. Society of automotive engineers, Inc.
- Goover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas*. México: McGraw Hill/Interamericana editores.
- Happian-Simth, J. (2001). *An Introduction to Modern Vehicle Design*. Great Britain: Butterworth-Heinemann.
- Koh, S. K. (2009). Fatigue analysis of an automotive steering link. *Engineering Failure Analysis*, 914-922.
- Norton, R. L. (2011). *DISEÑO DE MÁQUINAS Un enfoque integrado*. México: Pearson Educación.
- Saleh, A., Mirghaderi, S. R., & Zahrai, S. M. (2016). Cyclic testing of web tubular web RBS connections in deep beams. *Journal of Constructional Steel Research* 117, 214-6.
- Schijve, J. (2012). Fatigue predictions of welded joints and the effective notch stress concept. *International Journal of Fatigue* 45, 31-38.
- Sonsino, C. M., Fricke, W., de Bruyne, F., Hoppe, A., Ahmadi, A., & Zhang, G. (2012). Notch stress concepts for the fatigue assessment of welded joints - Background and applications. *International Journal of Fatigue* 34, 2-16.
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. México: McGraw-Hill/Interamericana editores.
- Xu, B., Cheng, M., Yang, H., Zhang, J., Mao, Z., Wang, D., & Yue, Y. (2004). An automatic three-dimensional loading apparatus for static test of truss joints. *Automation in Construction* 48, 11-17.
- Yong-Bo, S. (2007). Geometrical effect on the stress distribution along weld toe for tubular T- and K-joints under axial loading. *Journal of Constructional Steel Research* 63, 1351-1360.