



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

---

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
DEPARTAMENTO ACÁDEMICO ING. CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN  
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”  
ZACATENCO

**“CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE MUESTREO AUTOMÁTICO  
PARA UN ESPECTRÓMETRO DE MASAS DE ULTRA ALTA  
RESOLUCIÓN”**

## PROYECTO TERMINAL

PRESENTAN

**GUTIÉRREZ POTRERO ZELTZIN YAMILETH**

**HERNÁNDEZ CHÁVEZ EMANUEL**

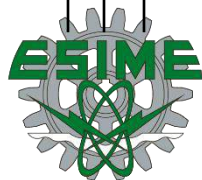
**PÉREZ ESTRADA DAVID**

ASESORES

**M. en C. DAVID CORREA COYAC**

**Dr. YAIR CRUZ NARVÁEZ**

**M. en C. ERIKA VIRGINIA DE LUCIO RODRÍGUEZ**



## RESUMEN

En el presente proyecto se realizó la optimización del proceso de inyección y manejo de muestras del espectrómetro de masas de ultra alta resolución del Laboratorio de Posgrado e Investigación de Operaciones Unitarias mediante la implementación de un sistema de muestreo automático.

En una primera etapa del proyecto se realiza un análisis del sistema manual con el fin de presentar una propuesta que cumpla con los requerimientos del proceso de manejo e inyección de muestras y las necesidades del espectrómetro de masas. En la segunda etapa, se diseñó la propuesta para posteriormente construir el mecanismo que permita realizar las trayectorias necesarias para cumplir el ciclo de inyección y toma de muestras, en el cual, se toman las muestras de forma automática y se realiza un enjuague al finalizar cada inyección. Además, se cuenta con una estación fija de inyección que permite tener un proceso continuo, asegurando la velocidad estándar de inyección para este proceso que es de  $120 \frac{\mu L}{hr}$ .

En la tercera etapa del proyecto se describe el funcionamiento de la interfaz de usuario, que permite la operación y monitoreo del proceso de toma e inyección de muestras hacia el espectrómetro de masas de ultra alta resolución. Así mismo, se detallan las pruebas de desempeño realizadas al sistema de muestreo automático.

Finalmente, el documento concluye con un análisis del costo total del sistema, los resultados obtenidos y el impacto del proyecto dentro del laboratorio.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo se desarrolló gracias a los proyectos apoyados por CONACYT: 302670 en la convocatoria 2019 apoyos para adquisición y mantenimiento de infraestructura en instituciones y laboratorios de investigación especializada, CF-2019/6669 en la convocatoria ciencia de fronteras; y a los proyectos SIP 20220296, 20230349 y 1533-2021, y al proyecto de innovación y desarrollo de la convocatoria de proyectos de desarrollo tecnológico o innovación en el IPN 2022

# ÍNDICE

RESUMEN.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
GLOSARIO DE TÉRMINOS .....	xi
SIGLAS/ABREVIATURAS .....	xv
INTRODUCCIÓN.....	xvi
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	xviii
JUSTIFICACIÓN .....	xix
OBJETIVO GENERAL .....	xx
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	xx
ALCANCE DEL PROYECTO.....	xx
CAPÍTULO I.....	1
MARCO CONTEXTUAL Y CONCEPTUAL DE LA TÉCNICA DE ESPECTROMETRÍA DE MASAS Y LOS EQUIPOS QUE SE EMPLEAN EN ELLA. ....	1
1.1    Antecedentes de la espectrometría de masas .....	2
1.2 Antecedentes de los muestreadores automáticos .....	4
1.3 Antecedentes del control numérico por computadora .....	5
1.4 Espectrometría de masas .....	6
1.4.1    Principios básicos y funcionamiento .....	6
1.5    Sistema de muestreo en espectrometría de masas .....	9
1.5.1    Tipos y características de sistemas de muestreo en espectrometría de masas .....	9
1.5.2    Técnicas de inyección .....	10
1.5.3    Componentes del sistema de muestreo automático propuesto. ....	11
1.5.4    Interfaz para el monitoreo y operación del sistema de muestreo automático propuesto	15
CAPÍTULO II.....	22
ANÁLISIS, EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA MANUAL DE MANEJO E INYECCIÓN DE MUESTRAS.....	22
2.1 Ubicación del Laboratorio de Posgrado e Investigación de Operaciones Unitarias .....	23
2.2    Conocimiento del medio ambiente de trabajo .....	23
2.3    Evaluación y diagnóstico del sistema manual de manejo e inyección de muestras ...	24
2.4    Descripción del sistema manual de manejo e inyección de muestras .....	26
2.5    Propuesta de solución.....	26

<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>27</b>
<b>MARCO METODOLÓGICO Y DISEÑO DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1    Filosofía de operación .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2    Diseño conceptual del sistema de muestreo.....</b>	<b>29</b>
3.2.1    Diagrama de bloques y flujo de trabajo.....	29
3.2.2    Diseño de los componentes del sistema de muestreo y análisis de esfuerzos .....	31
3.2.3    Trayectorias de movimiento .....	40
<b>3.3    Selección de materiales y componentes .....</b>	<b>45</b>
3.3.1    Consideraciones y criterios de selección.....	45
3.3.2    Materiales seleccionados.....	45
<b>3.4    Diagramas de conexión .....</b>	<b>64</b>
<b>3.5    Construcción y ensamblaje del sistema de muestreo .....</b>	<b>68</b>
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>72</b>
<b>DESARROLLO DEL ALGORITMO COMPUTACIONAL Y LA INTERFAZ DE MONITOREO Y OPERACIÓN .....</b>	<b>72</b>
<b>4.1    Elección de la plataforma y las herramientas de desarrollo.....</b>	<b>73</b>
<b>4.2    Diseño de la interfaz gráfica de usuario .....</b>	<b>74</b>
<b>4.3    Diseño de la arquitectura del algoritmo computacional .....</b>	<b>79</b>
<b>CAPÍTULO V. ....</b>	<b>82</b>
<b>ARRANQUE Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE MUESTREO AUTOMÁTICO IMPLEMENTADO CON LA INTERFAZ GRÁFICA DE MONITOREO Y OPERACIÓN ..</b>	<b>82</b>
<b>5.1 Implementación de la interfaz con el sistema .....</b>	<b>83</b>
<b>5.2 Puesta en marcha del sistema.....</b>	<b>83</b>
<b>5.3 Evaluación de la precisión y exactitud de recorridos lineales en los ejes .....</b>	<b>85</b>
<b>5.4 Evaluación de la toma e inyección de muestras.....</b>	<b>101</b>
<b>5.5 Estudio de factibilidad del proyecto .....</b>	<b>109</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>112</b>
<b>PROPUESTA PARA TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>113</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....</b>	<b>114</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>118</b>
<b>PATENTE .....</b>	<b>119</b>
<b>HOJAS DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....</b>	<b>139</b>
<b>APENDÍCE.....</b>	<b>151</b>
<b>1.    PLANOS.....</b>	<b>152</b>
<b>2.    CALCULOS.....</b>	<b>155</b>

<b>3. CALIBRACIÓN .....</b>	<b>160</b>
<b>4. CÓDIGOS.....</b>	<b>164</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Antecedentes de la espectrometría de masas.....	3
Figura 2. Componentes principales de un espectrómetro de masas . ....	7
Figura 3. Esquema del analizador de tiempo de vuelo . ....	8
Figura 4. Esquema analizador de cuadrupolo.....	8
Figura 5. Esquema del analizador por resonancia de ciclotrón de iones.....	9
Figura 6. Vista transversal de un motor a pasos de imán permanente.....	11
Figura 7. Pines del microcontrolador ESP32 .....	12
Figura 8. Conexión ánodo común .....	13
Figura 9. Conexión de cátodo común .....	14
Figura 10. Modelo de estados de procesamiento de información humano .....	16
Figura 11. . Representación del modelo del diseñador: el look-and-feel iceberg.....	17
Figura 12. Procesamiento de señales para un DAS .....	20
Figura 13. Ubicación del Laboratorio .....	23
Figura 14. Proceso manual de enjuague, manejo e inyección de muestras.....	23
Figura 15. Elementos necesarios para llevar a cabo la inyección. ....	24
Figura 16. Diagrama de la filosofía de operación. ....	29
Figura 17. Diagrama de bloques del proceso. ....	29
Figura 18. Creación de la cama inferior. ....	31
Figura 19. Análisis de esfuerzos de la guía lineal del eje "X"......	32
Figura 20. Análisis de esfuerzos del perfil de aluminio del eje "X"......	32
Figura 21. Ensamblaje del eje Y.....	33
Figura 22. Análisis de esfuerzos del perfil de aluminio del eje "Y"......	33
Figura 23. Análisis de esfuerzos de las tapas laterales del eje "Y". ....	34
Figura 24. Ensamblaje del eje Z. ....	34
Figura 25. Análisis de esfuerzos de la pieza de acrílico del eje "Z"......	35
Figura 26. Estación de inyección fija. ....	35
Figura 27. Análisis de esfuerzos de la plataforma de inyección.....	36
Figura 28. Estación de inyección móvil. ....	36
Figura 29. Análisis del esfuerzo al expandir el embolo de la jeringa.....	37
Figura 30. Análisis del esfuerzo al contraer el embolo de la jeringa.....	37
Figura 31. Descripción .....	38
Figura 32. Descripción .....	38
Figura 33. Vista frontal del sistema de automuestreo.....	39
Figura 34. Vista trasera del sistema. ....	39
Figura 35. Vista del automuestreador con todos los sistemas integrados.....	39
Figura 36. Definición de zonas de trabajo.....	40
Figura 37. Puntos base para el seguimiento de trayectorias .....	41
Figura 38. Trayectoria con la primera jeringa. ....	43
Figura 39. Trayectoria con la segunda jeringa.....	44
Figura 40. Trayectoria de cambio de jeringa .....	44
Figura 41. Desplazamiento horizontal.....	46

Figura 42. Desplazamiento vertical. ....	48
Figura 43. Grafica de coeficiente de fricción. ....	51
Figura 44. Tabla de especificaciones del husillo de bolas. ....	51
Figura 45. Especificación de un husillo de bolas. ....	55
Figura 46. Análisis de la carga en el husillo de bolas. ....	55
Figura 47. Análisis para subir y bajar carga. ....	55
Figura 48. Rosca tipo ACME. ....	57
Figura 49. Conexión del motor eje X. ....	64
Figura 50. Conexión del motor eje Y. ....	65
Figura 51. Conexión del motor eje Z. ....	65
Figura 52. Conexión del motor de inyección. ....	66
Figura 53. Conexión del motor de toma de muestra y enjuague. ....	66
Figura 54. Circuito de fuerza. ....	67
Figura 55. Circuito de Control. ....	67
Figura 56. Corte de piezas en MDF. ....	68
Figura 57. Perfiles de aluminio. ....	68
Figura 58. Base de automuestreador. ....	68
Figura 59. Integración de eje X e Y. ....	68
Figura 60. Integración de eje X, Y, Z. ....	68
Figura 61. Integración de la estación de Inyección. ....	69
Figura 62. Acabado final del sistema. ....	69
Figura 63. Integración de la estación de inyección. ....	69
Figura 64. Colocación de la gradilla de muestras. ....	69
Figura 65. Integración de la estación de jeringas y la zona de deshecho y enjuague. ....	69
Figura 66. Integración del sistema de muestreo automático con la interfaz de usuario. ....	70
Figura 67. Distribución de los elementos en la placa del tablero. ....	71
Figura 68. Montaje y cableado de los elementos. ....	71
Figura 69. Montaje de la placa con gabinete. ....	71
Figura 70. Gabinete con botones de control y lámparas piloto. ....	71
Figura 71. Interfaz de usuario. ....	76
Figura 72. Configuración de velocidad de inyección. ....	77
Figura 73. Advertencia de posición de muestras. ....	77
Figura 74. Advertencia de sólidos en suspensión. ....	78
Figura 75. Botones habilitados para posible modificación. ....	78
Figura 76. Indicadores de operaciones. ....	79
Figura 77. Diseño del algoritmo computacional del sistema de muestreo automático. ....	80
Figura 78. Conexión al puerto Micro B del ESP32. ....	83
Figura 79. Conexión al puerto USB para establecer comunicación con la interfaz de monitoreo. ....	83
Figura 80. Sistema encendido. ....	83
Figura 81. Encendido de la interfaz. ....	83
Figura 82. Conexión con el sistema y establecimiento de parámetros. ....	84
Figura 83. Posicionamiento de viales en la matriz de muestras. ....	84



Figura 84. Botones de Inicio, Paro y configuración. ....	84
Figura 85. Acople del vernier al sistema. ....	85
Figura 86. Ajuste del vernier al eje y. ....	85
Figura 87. Ajuste del vernier al eje x. ....	85
Figura 88. Ajuste del Vernier al eje z. ....	85
Figura 89. Comportamiento del eje X (30 mm). ....	92
Figura 90. Comportamiento del eje X (30 mm). ....	92
Figura 91. Comportamiento del eje Y (30 mm). ....	93
Figura 92. Comportamiento del eje Y (150 mm). ....	93
Figura 93. Comportamiento del eje Z (30 mm). ....	94
Figura 94. Comportamiento del eje Z (150 mm). ....	94
Figura 95. Comportamiento del eje T (50 mm). ....	95
Figura 96. Comportamiento del eje T (100 mm). ....	95
Figura 97. Comportamiento del eje I (50 mm). ....	96
Figura 98. Comportamiento del eje I (100 mm). ....	96
Figura 99. Tiempos de ejecución de las tareas de forma manual y de forma automática ....	99
Figura 100. Comparativa de tiempos de ejecución. ....	100
Figura 101. Líneas de aviso y de control en un gráfico de control (parte derecha), y su relación con la distribución de la muestra de control. ....	101
Figura 102. Gráfico de control de toma de muestra de 100 $\mu\text{L}$ . ....	103
Figura 103. Gráfico de control de toma de muestra de 75 $\mu\text{L}$ . ....	105
Figura 104. Gráfico de control de toma de muestra de 50 $\mu\text{L}$ . ....	107
Figura 105. Gráfico de control de inyección de muestra de 2 $\mu\text{L}/\text{min}$ . ....	108

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Secuencia de control de un motor a pasos bipolar. ....	12
Tabla 2. Comparación de sistemas de inyección. ....	25
Tabla 3. Requerimientos de usuario. ....	28
Tabla 4. Datos para el cálculo de torque y carga axial en el eje “X”.....	52
Tabla 5. Resultados de cálculos para el eje “X” (Ver Apéndice 2).....	52
Tabla 6. Datos para el cálculo de torque y carga axial en el eje “Y”.....	53
Tabla 7. Resultados de cálculos para el eje “Y” (Ver Apéndice 2).....	53
Tabla 8. Datos para el cálculo de torque y carga axial en el eje “Z”.....	53
Tabla 9. Resultados de cálculos para el eje “Z” (Ver Apéndice 2). ....	54
Tabla 10. Datos para el cálculo de torque y carga axial en el eje “Toma de muestra” y “inyección”. ....	59
Tabla 11. Resultados de los cálculos eje "Toma de muestra" (Apéndice 2). ....	59
Tabla 12. Resultados de los cálculos eje "inyección" (Apéndice 2).....	59
Tabla 13. Consumo total de los elementos del sistema. ....	63
Tabla 14. Registro de datos del eje “X”.....	87
Tabla 15. Registro de datos del eje “Y”.....	88
Tabla 16. Registro de datos del eje “Z”.....	89
Tabla 17. Registro de datos del eje de “toma de muestra”.....	90
Tabla 18. Registro de datos del eje de “inyección”. ....	91
Tabla 19. Tiempos registrados para poder completar una ejecución con el sistema actual..	98
Tabla 20. Tiempos registrados para completar una ejecución con el sistema propuesto.....	98
Tabla 21. Tiempos de ejecución del proceso completo.....	100
Tabla 22. Tabla de datos para la toma de muestra (100 $\mu$ L).....	102
Tabla 23. Tabla de datos para la toma de muestra (75 $\mu$ L).....	104
Tabla 24. Tabla de datos para la toma de muestra (50 $\mu$ L).....	106
Tabla 25. Tabla de datos para la inyección de muestra (2 $\mu$ L/min).....	108
Tabla 26. Costos de los componentes y herramientas empleados. ....	109
Tabla 27. Desarrollo de ingeniería conceptual y de detalle. ....	111
Tabla 28. Costo total del proyecto.....	111
Tabla 29. Comparativa de precios.....	111

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Ácido carboxílico:** molécula orgánica con un  $-(C=O)-OH$  grupo. El grupo está también escrito como  $-COOH$  y se denomina grupo carboxilo.

**Acoplamiento:** unión de los extremos de dos ejes u otros elementos mecánicos.

**Acrónimo:** sigla cuya configuración permite su pronunciación como una palabra; p. ej., TIC, tecnologías de la información y la comunicación.

**Aminoácido:** sustancia química orgánica en cuya composición molecular entran un grupo amino y otro carboxilo.

**Amplificador:** dispositivo que sirve para aumentar la amplitud o intensidad de un fenómeno físico.

**Análisis:** distinción y separación de las partes de algo para conocer su composición.

**Analito:** sustancia química presente en un material o sistema, que es objeto de identificación y cuantificación en el análisis químico de una muestra.

**Analógico:** aparato o sistema que presenta información, especialmente una medida, mediante una magnitud física continua proporcional al valor de dicha información.

**Automático:** mecanismo o aparato que funciona en todo o en parte por sí solo.

**Automatización:** aplicación de máquinas o de procedimientos automáticos en la realización de un proceso.

**Bombardeo de iones:** técnica empleada para modificar la superficie de un material, disparando sobre él un haz de iones.

**Campo eléctrico:** campo de fuerza creado por la atracción y repulsión de cargas eléctricas.

**Campo magnético:** representación matemática del modo en que las fuerzas magnéticas se distribuyen en el espacio que circunda a una fuente magnética.

**Campos paralelos:** son aquellos que tienen derivada nula.

**Carga cognitiva:** es el "peso" cognitivo de la información o tarea, determinada por la complejidad del material que se procesa.

**Catión:** ion con carga positiva.

**Cátodo:** electrodo negativo.

**Colisión:** rozadura o herida hecha a consecuencia de ludir y rozarse una cosa con otra.

**Cromatógrafo:** método que permite la separación, identificación y determinación de los componentes químicos en mezclas complejas.

**Deflexión:** desviación de la dirección de un fluido o de una corriente.

**Deformar:** hacer que algo pierda su forma regular o natural.

**Descarga eléctrica:** fenómeno electrostático que hace que circule una corriente eléctrica repentina y momentáneamente entre dos objetos de distinto potencial eléctrico.

**Desorción:** emisión de un fluido previamente adsorbido por un material.

**Diferencia de potencial:** cambio de energía entre dos puntos por unidad de carga. También llamado voltaje.

**Dinodo:** nombre que reciben cada uno de los electrodos de un tubo fotomultiplicador.

**Diseño:** proyecto, plan que configura algo.

**Distorsión:** deformación de imágenes, sonidos, señales, etc., producida en su transmisión o reproducción.

**Electro pulverización:** técnica de ionización suave.

**Electrón:** partícula elemental con carga eléctrica negativa.

**Electrospray:** técnica utilizada en espectrometría de masas para producir iones (ESI-MS).

**Emisor:** aparato productor de ondas electromagnéticas.

**Energía:** capacidad que tiene un sistema para realizar un trabajo.

**Especie molecular:** grupo de entidades químicas que son moléculas idénticas representadas por fórmulas idénticas.

**Espectro:** distribución de la intensidad de una radiación en función de una magnitud característica, como la longitud de onda, la energía o la temperatura.

**Esquema:** representación gráfica o simbólica de cosas materiales o inmateriales.

**Estandarizar:** ajustar a un tipo o norma.

**Hardware:** elementos físicos o materiales que constituyen una computadora o un sistema informático.

**Hidroxiácido:** Conjunto de derivados de ácidos orgánicos, en los cuales uno o más átomos H del resto alifático o aromático, han sido sustituidos por grupos -OH.

**Incandescente:** dicho generalmente de un metal: Enrojecido o blanqueado por la acción del calor.

**Interfaz:** conexión, física o lógica, entre una computadora y el usuario, un dispositivo periférico o un enlace de comunicaciones.

**Ion:** átomo o agrupación de átomos que por pérdida o ganancia de uno o más electrones adquiere carga eléctrica.

**Ionización:** proceso físico o químico mediante el cual se obtienen iones.

**Isotopo:** cada uno de los átomos de un mismo elemento químico, cuyo núcleo tiene el mismo número de protones, pero distinto número de neutrones.

**Lenguaje de programación:** métodos empleados para diseñar e implementar programas encargados de definir y administrar el comportamiento de los dispositivos.

**Matriz:** conjunto bidimensional de elementos distribuidos de forma rectangular, en líneas verticales y horizontales.

**Mecanismo:** conjunto de las partes de una máquina en su disposición adecuada.

**Método:** modo ordenado y sistemático de proceder para llegar a un resultado o fin determinado.

**Monitoreo:** proceso continuo y sistemático mediante el cual se verifica la eficiencia y la eficacia de un proyecto.

**Muestra:** parte o porción extraída de un conjunto por métodos que permiten considerarla como representativa de él.

**Parábola:** curva abierta cuyos puntos son equidistantes de una recta y un punto fijos, formada por dos ramas simétricas respecto de un eje, y que resulta de cortar un cono circular recto por un plano paralelo a una generatriz.

**Partícula:** objeto localizado que, generalmente, tiene propiedades físicas como masa, carga, volumen y densidad.

**PCI:** componente de hardware que permite expandir las capacidades de una computadora.

**Péptido:** molécula formada por la unión covalente de dos o más aminoácidos.

**Peso atómico:** masa promedio de todos los isótopos de un elemento que ocurren naturalmente.

**Peso molecular:** peso de un mol de moléculas.

**Polaridad:** propiedad que tienen los agentes físicos de acumularse en los polos de un cuerpo y de polarizarse.

**Polialcoholes:** sustancias cuya estructura consiste en una cadena carbonada con un grupo OH sobre cada uno de los carbonos.

**Polímero:** compuesto químico, natural o sintético, formado por polimerización y que consiste esencialmente en unidades estructurales repetidas.

**Proteína:** sustancia constitutiva de la materia viva, formada por una o varias cadenas de aminoácidos; p. ej., las enzimas, las hormonas, los anticuerpos, etc.

**Radical:** fundamental o esencial.

**Rayos catódicos:** corrientes de electrones detectadas en tubos de descarga (tubos de vacío).

**Ruido:** señal no deseada que se mezcla con una señal útil en cualquier sistema de comunicación o proceso.

**Sensor:** dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmite adecuadamente.

**Software:** Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora.

**Sonda:** instrumento que se introduce en un cuerpo para explorar alguna de sus partes o extraer o introducir sustancias.

**Substancia:** Materia caracterizada por un conjunto específico y estable de propiedades.

**Traza:** Elemento que presenta una concentración de menos de cien partes por millón en una muestra, pero que es de gran interés por sus efectos nocivos.

**Tensión de vapor:** presión ejercida por el vapor de agua contenido en un volumen de aire húmedo.

**Transductor:** dispositivo que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, la dilatación, la humedad, etc., en otro tipo de señal, normalmente eléctrica.

**Vacío:** ausencia total de materia en un determinado espacio o lugar, o la falta de contenido en el interior de un recipiente.

**Volátil:** compuesto orgánico (que contiene carbón) que se evapora con facilidad hacia la atmósfera a temperatura ambiente.

## **SIGLAS/ABREVIATURAS**

<b>μL</b>	Microlitros
<b>Ar</b>	Argón
<b>Cl</b>	Cloro
<b>CNC</b>	Control numérico por computadora
<b>CO</b>	Monóxido de carbono
<b>DAS</b>	Data analityc system
<b>EM</b>	Espectrometría de masas
<b>Ev</b>	Electronvoltio
<b>FIA</b>	Flow Injection Analysis
<b>Kr</b>	Kriptón.
<b>m/z</b>	Relación masa carga
<b>MISO</b>	Master Input Slave Output
<b>MOSI</b>	Master Output Slave Input
<b>N</b>	Nitrógeno
<b>O</b>	Oxígeno
<b>PC</b>	Computadora personal
<b>SCK</b>	Serial Clock
<b>SCLK</b>	Standard Serial Clock
<b>SD</b>	Data Line
<b>SS</b>	Slave Select
<b>USB</b>	Universal serial bus
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity
<b>WS</b>	Word Select
<b>Xe</b>	Xenon

## INTRODUCCIÓN

La espectrometría de masas es una herramienta de análisis químico fundamental en el ámbito científico. Esta técnica, que se basa en la identificación y cuantificación precisa de moléculas en múltiples muestras, ha revolucionado la forma en que los científicos abordan los problemas de investigación. La espectrometría de masas tiene la capacidad de distinguir las relaciones entre la masa y la carga de partículas, lo que ha permitido su aplicación en una variedad de campos, desde la evaluación de impurezas hasta el análisis de las secuencias aminoacídicas. Estas aplicaciones han encontrado su lugar en disciplinas tan diversas como la química y la biología, demostrando la versatilidad y la utilidad de esta técnica.

A pesar de sus indiscutibles ventajas y su relevancia incuestionable, la espectrometría de masas aún enfrenta desafíos que, de ser superados, potenciarían aún más su valor. Uno de estos desafíos radica en el proceso de toma e inyección de muestras. En este aspecto, la precisión y la repetibilidad son vitales para asegurar resultados confiables. Cualquier variación en la toma o inyección de muestras puede generar errores en los resultados, lo que lleva a conclusiones erróneas. Por lo tanto, al mejorar este aspecto del sistema, se busca minimizar el tiempo de obtención de resultados e incrementar el número de ensayos realizados en el laboratorio.

Para diseñar la propuesta de solución se analizó el ambiente de trabajo y los requerimientos de usuario y se ponderaron de acuerdo con el nivel de importancia para la operación del sistema. Esta metodología de trabajo se utilizó con el fin de observar y atender todas las necesidades. Así mismo, bajo este esquema, se identificaron y seleccionaron los materiales con mayor ventaja en costo y calidad.

Mediante el análisis se coadyuva a la mejora del manejo e inyección de muestras automático y se favorece la integración de un sistema que permite no solo la inyección de las muestras, si no el manejo integral del analito.

Para cumplir con los criterios estructurales del sistema de manejo e inyección de muestras automático, se desarrolló el diseño con el software SolidWorks con base en los requerimientos identificados en el análisis.

Para la construcción del sistema se integraron los materiales adquiridos y se fabricaron piezas en 3D para realizar las tareas de manejo e inyección de muestras. También se desarrolló una interfaz gráfica de usuario en el software Visual Studio, para facilitar el monitoreo y operación en tiempo real. Esta interfaz gráfica garantiza la transmisión de datos por medio de comunicación serial, entre la PC y el sistema.

Se calibraron y ajustaron los sistemas de movimiento lineal, para asegurar que cada componente opere con precisión. Este paso es crucial para garantizar que el sistema de muestreo automático funcione de manera confiable.



Finalmente, se evaluó el desempeño para verificar la correcta interacción del sistema de muestreo automático con la interfaz gráfica de usuario. Estas pruebas permitieron identificar y corregir posibles fallos en la ejecución de las tareas antes de que el sistema de muestreo automático sea implementado con el espectrómetro de masas.

A través de este proyecto, se logró una reducción de 54.45% en los tiempos de ejecución de las tareas de manejo e inyección de muestras para el espectrómetro de masas de ultra alta resolución SOLARIX XR de la marca BRUKER.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Actualmente el Laboratorio de Posgrado e Investigación de Operaciones Unitarias de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE) cuenta con un espectrómetro de masas de ultra alta resolución de la marca BRUKER equipado con lo necesario para su funcionamiento. Sin embargo, el proceso de inyección y toma de muestras se realiza de forma manual, lo que puede afectar los siguientes aspectos:

- El proceso de inyección al no ajustar correctamente la jeringa.
- El tiempo total de obtención de resultados de una matriz de muestras.
- La precisión de la toma de muestra al cambiar de operador continuamente.
- La integridad de las muestras al no realizar un enjuague adecuado.

## **JUSTIFICACIÓN**

El espectrómetro de masas de ultra alta resolución de la marca BRUKER modelo SOLARIX XR, es un equipo de especial relevancia debido a que permite determinar el peso molecular de una muestra analizada, cuya medida se basa en la relación masa/carga de especies moleculares. Sin embargo, el fabricante no ha desarrollado un sistema de muestreo automático que sea compatible con este equipo, por lo que el manejo e inyección de muestras se realiza de forma manual, aunque el proceso no es complejo, durante los largos periodos de trabajo que se requieren al analizar un gran número de muestras, es frecuente que se presenten errores humanos , ya sea por fatiga, cansancio, cambio de operador o por simple descuido, lo que compromete la precisión, fiabilidad y eficiencia de la toma e inyección de muestras ocasionando que el laboratorio disminuya su productividad al realizar un menor número de ensayos por día, afectando con ello el trabajo de investigadores y estudiantes al tener que atrasar el análisis de sus muestras.

## **OBJETIVO GENERAL**

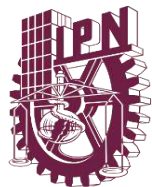
Construir un sistema de muestreo automático basado en el funcionamiento de una máquina CNC, para el proceso de toma e inyección de muestras de un espectrómetro de masas de ultra alta resolución con el fin de reducir tiempos y errores humanos.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Describir el sistema actual de toma e inyección de muestras del espectrómetro de masas de ultra alta resolución
- Diseñar un sistema de muestreo automático que cumpla los requerimientos necesarios para asegurar la precisión de la toma e inyección de muestras.
- Construir el sistema de muestreo automático empleando los materiales seleccionados y desarrollar una interfaz de usuario que permita el monitoreo y operación de las tareas.
- Comprobar el desempeño y compatibilidad para verificar el funcionamiento del sistema de muestreo automático al integrarlo con la interfaz de usuario.

## **ALCANCE DEL PROYECTO**

El presente proyecto incluye el diseño y construcción de un sistema de toma e inyección de muestras automático. Así como el desarrollo del algoritmo computacional y una interfaz de monitoreo y operación que sea compatible con el sistema automatizado, cumpliendo con los requerimientos de usuario establecidos para el espectrómetro de masas de ultra alta resolución de la marca BRUKER del laboratorio de Posgrado e Investigación de Operaciones Unitarias de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas.



# **CAPÍTULO I**

## **MARCO CONTEXTUAL Y CONCEPTUAL DE LA TÉCNICA DE ESPECTROMETRÍA DE MASAS Y LOS EQUIPOS QUE SE EMPLEAN EN ELLA.**

El capítulo I proporciona una visión integral de la espectrometría de masas. Se detalla la técnica, sus principios fundamentales y los sistemas de muestreo utilizados. Además, se presenta un marco contextual que traza la evolución histórica de esta técnica y de los sistemas que intervienen en el proceso de manejo e inyección de muestras, proporcionando una perspectiva enriquecedora sobre su desarrollo y aplicaciones a lo largo del tiempo.

## **1.1 Antecedentes de la espectrometría de masas**

La técnica que antecede y sienta las bases para el desarrollo de la espectrometría de masas es la espectroscopia. La espectroscopia, en sus diversas formas, como la espectroscopia de absorción, emisión, infrarroja (IR), ultravioleta-visible (UV-Vis) y resonancia magnética nuclear (RMN), fue ampliamente utilizada para el análisis de sustancias antes de la aparición de la espectrometría de masas [1].

Estas técnicas espectroscópicas permitían a los científicos estudiar la interacción de la materia con la radiación electromagnética y obtener información sobre la estructura y composición de las sustancias. Por ejemplo, la espectroscopia IR se utilizaba para identificar grupos funcionales en moléculas orgánicas, mientras que la espectroscopia UV-Vis era útil para estudiar compuestos que absorbían luz en el rango ultravioleta o visible [1].

Además, la cromatografía, especialmente la cromatografía de gases (GC) y la cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC), también precedió a la espectrometría de masas. Estos métodos cromatográficos se utilizaban para separar los componentes de una mezcla y, a menudo, se combinaban con técnicas espectroscópicas para el análisis detallado de las sustancias [1].

Estos métodos, aunque efectivos, a menudo requerían más tiempo y no proporcionaban la misma precisión y capacidad de análisis de trazas que la espectrometría de masas. Con la llegada de la espectrometría de masas, los científicos obtuvieron una herramienta poderosa que permitía una identificación y cuantificación más rápidas y precisas de los componentes de una muestra [2].

La espectrometría de masas ha experimentado una evolución desde el descubrimiento de los iones positivos en 1886, se ha convertido en una técnica espectroscópica con posibilidades nunca imaginadas [2]. A continuación, se muestran de manera sintetizada los antecedentes de la espectrometría de masas (Figura 1).

# ANTECEDENTES

de la espectrometría de masas

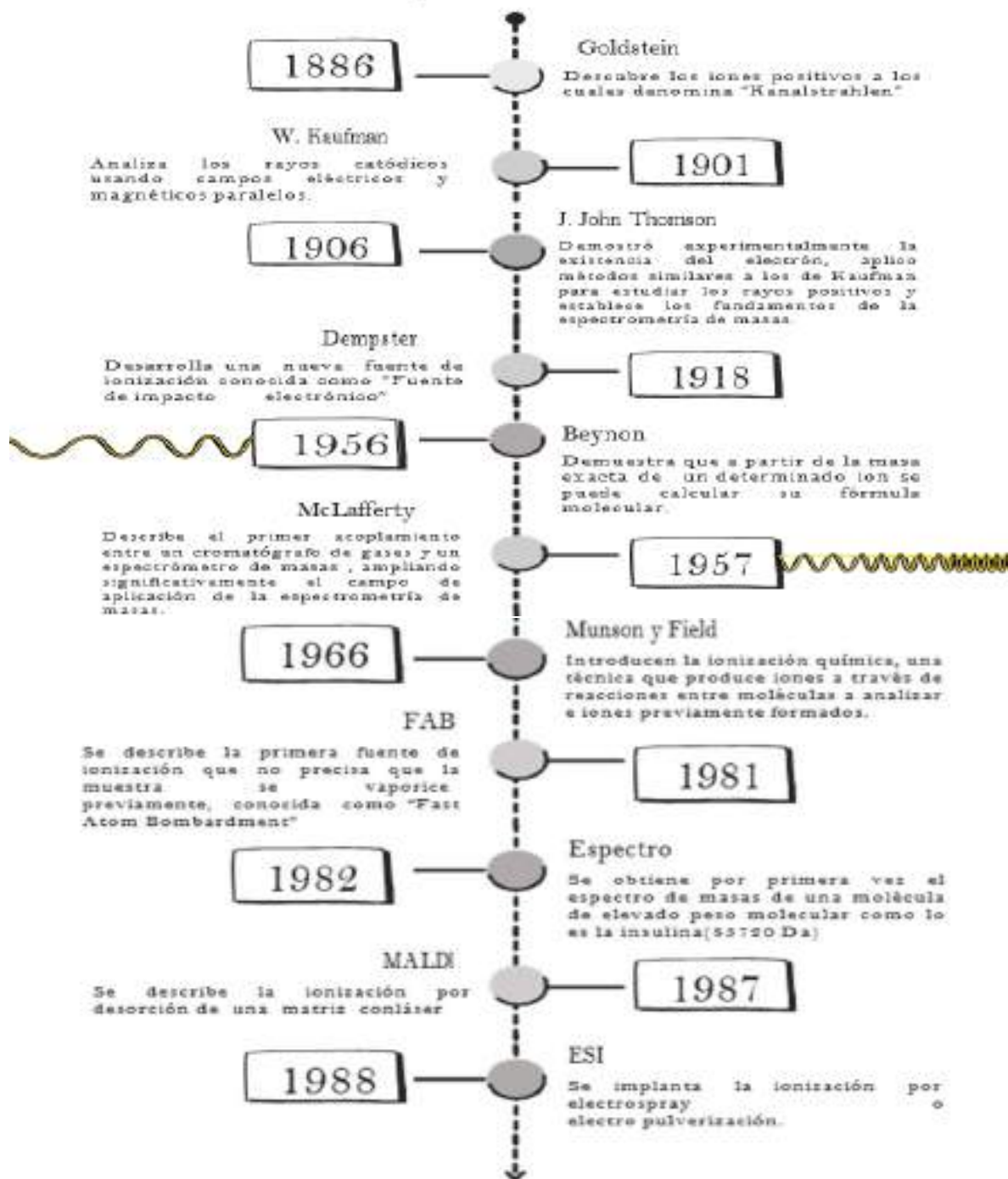


Figura 1. Antecedentes de la espectrometría de masas.

La EM se ha empezado a aplicar de forma rutinaria en la última década en los laboratorios clínicos asistenciales. Esto ha sido posible gracias a los sistemas de medición MALDI-TOF que han supuesto un cambio muy importante dentro de esta disciplina, algunos de los campos en los que más se ha empleado son los siguientes [3]:

- *Monitorización de fármacos:* los sistemas LC/MS/MS con analizador triple cuadrupolo son los más habituales en la práctica clínica.
- *Toxicología:* se aplica en el análisis de anfetaminas, benzodiacepinas, barbitúricos, cocaína, cannabis y opiáceos para la confirmación de los resultados positivos obtenidos mediante inmunoanálisis siendo el método más utilizado y aceptado con una alta especificidad y sensibilidad analítica.
- *Endocrinología:* se aplica para el análisis en suero de testosterona, androstenediona, dehidroepiandrosterona (DHEA), vitamina D, estrógenos, 17-hidroxiprogesterona por GC/MS y LC/MS/MS, además de cortisol en plasma y orina.
- *Pediatría:* para el diagnóstico de las enfermedades metabólicas hereditarias y su detección temprana a través de los programas de cribado neonatal.

## 1.2 Antecedentes de los muestreadores automáticos

Antes de la década de 1970, las inyecciones se realizaban manualmente, utilizando una micro jeringa con una aguja afilada a través de un tabique, similar al proceso de inyección en cromatografía de gases. El proceso de inyección no era fiable debido a las frecuentes fugas de los septos perforados bajo altas presiones [4].

El primer inyector manual confiable fue un inyector modelo U6K basado en bucle sin tabique introducido por Waters Corporation en 1973. El U6K utiliza un conjunto de válvulas de conmutación manual, un bucle de muestra y un puerto de aguja, donde las muestras se introducen en el bucle en condiciones sin flujo [4].

El inyector de muestras manual Modelo 7125 introducido por Rheodyne Corporation (adquirida por IDEX en 2002) rápidamente se convirtió en el inyector estándar de la industria a finales de los años 1970. El inyector compacto consta de una válvula de seis puertos y dos posiciones con un rotor, un bucle de muestra intercambiable (6  $\mu$ L a 2 ml) y un puerto de aguja de carga frontal [5].

El desarrollo de un inyector rotativo confiable condujo a la implementación de muchos de los primeros muestreadores automáticos. Los primeros fueron dispositivos simples que utilizaban una plataforma giratoria que contenía viales de muestra llenos y presión de nitrógeno para llenar en exceso el circuito de muestra de una válvula inyectora accionada de forma remota. Otros muestreadores automáticos tempranos, como el inyector automático PerkinElmer Serie 200, introducido en la década de 1990, imitan el proceso de inyección manual con una aguja de muestreo móvil, que puede acceder a hasta 100 viales de muestra en una bandeja y entregar la alícuota de muestra en una válvula inyectora 7125 de posición fija que se acciona remotamente mediante un cierre de contacto [6].



Los muestreadores automáticos se pueden clasificar según configuraciones de muestreo, como el enfoque "vial a aguja" o "aguja a vial", con consideraciones adicionales para la capacidad de manejar microplacas, entre estos se encuentran [7]:

- Muestreador automático vial a aguja
- Muestreador automático aguja a vial con bandeja de muestra estática
- Muestreador automático de aguja a vial con carruseles de muestras

### 1.3 Antecedentes del control numérico por computadora

CNC Significa "Control Numérico Computarizado". El CNC tuvo su origen a principio de los años 50 en el Instituto Tecnológico de Massachusets (*MIT*), en donde se automatizó por primera vez una gran fresadora. En esta época, las computadoras estaban en sus inicios y eran tan grandes que el espacio ocupado por la computadora era mayor que el de la máquina [8].

Hoy día las computadoras son cada vez más pequeñas y económicas, con lo que el uso del CNC se ha extendido a todo tipo de maquinaria: Tornos, rectificadoras, electroerosionadoras, máquinas de coser, etc.

En una máquina CNC, a diferencia de una máquina convencional o manual, una computadora controla la posición y velocidad de los motores que accionan los ejes de la máquina. Gracias a esto puede hacer movimientos que no se pueden lograr manualmente como círculos, líneas diagonales y figuras complejas tridimensionales. Las máquinas CNC son capaces de mover la herramienta al mismo tiempo en los 3 ejes para ejecutar trayectorias tridimensionales [8].

El término "Control Numérico" se debe a que las órdenes dadas a la máquina son indicadas mediante códigos numéricos.

Dándole las órdenes o instrucciones adecuadas a la máquina, esta es capaz de maquinar una simple ranura, una cavidad irregular, la cara de una persona en autorrelieve o bajorrelieve, un grabado artístico, un molde de inyección de una cuchara o el de una botella, entre otras acciones.

Los sistemas CNC cuentan con las siguientes características [9]:

- *Control preciso:* Las máquinas CNC ofrecen un control de movimiento automático, preciso y consistente. Todos los equipos CNC tienen dos o más direcciones de movimiento, llamados ejes, que pueden posicionarse de forma precisa y automática a lo largo de sus recorridos. Este control de CNC recibe instrucciones del programa de piezas, que guía y coordina cada detalle del proceso de fabricación.

- *Elementos principales:* Una máquina CNC consta de seis elementos principales: Dispositivo de entrada, Unidad de control o controlador, Máquina herramienta, Sistema de accionamiento, Dispositivos de realimentación (sólo en sistemas con servomotores), y Monitor.
- *Aumento de la productividad:* Las máquinas CNC pueden mejorar significativamente la productividad de una tarea específica. Esto se debe a que permiten la automatización de los procesos, lo que reduce el tiempo necesario para el cambio de series y mejora la eficiencia de la producción.
- *Interpretación de diseños:* Las máquinas CNC tienen la capacidad de interpretar diseños realizados por computadora. Este proceso se lleva a cabo mediante un microcontrolador que convierte las instrucciones del diseño en señales eléctricas. Estas señales son las que activan los motores de la máquina, permitiendo el movimiento preciso de los ejes.

## 1.4 Espectrometría de masas

La espectrometría de masas es una técnica analítica poderosa que se utiliza para identificar y cuantificar compuestos desconocidos, así como para determinar la estructura y propiedades químicas de las moléculas. Esta técnica se basa en la separación de iones en función de su relación entre masa y carga ( $m/z$ ). Esta separación permite identificar y cuantificar los componentes de la muestra para obtener un análisis detallado y preciso de compuestos desconocidos, proporcionando información valiosa sobre su estructura y propiedades químicas [10].

### 1.4.1 Principios básicos y funcionamiento

El análisis de compuestos se lleva a cabo por medio de un espectrómetro de masas que se encarga de que las moléculas de la muestra de interés se transformen en iones suministrándoles un poco de energía. Los iones obtenidos se dividen a partir de su relación  $m/z$ , un transductor se encarga de convertir la abundancia de iones a una señal eléctrica. Los iones de diferentes relaciones  $m/z$  son dirigidos al transductor por medio de un proceso de barrido, el número de iones que se gráfica contra la razón de masa se conoce como espectro de masas [11].

Un espectrómetro de masas se conforma de los siguientes componentes como se muestra en la Figura 2.

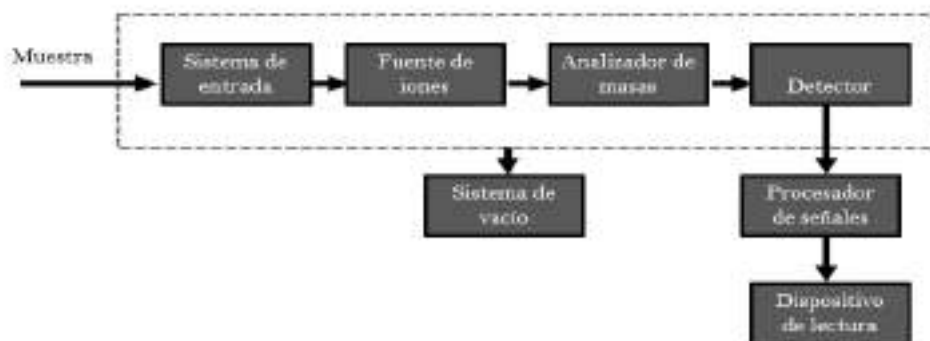


Figura 2. Componentes principales de un espectrómetro de masas [11].

- Sistema de inyección de muestras. (sistema de entrada)

El sistema de introducción de muestras o sistema de entrada se utiliza para que un micro volumen de muestra de análisis se introduzca dentro de la fuente de iones para que sus componentes sean transformados en iones gaseosos [11].

- Fuente de iones.

La fuente de iones varía de acuerdo con el tipo de espectrometría de masas que se realice, por ejemplo, en la espectrometría de masas molecular la fuente de iones se encarga de transformar los componentes de una muestra a iones gaseosos con ayuda de un bombardeo de electrones, fotones, iones o moléculas. Mientras que, en la espectrometría de masas atómica la ionización de la muestra se lleva a cabo aplicando energía térmica o eléctrica, para que la fuente de iones genere una corriente de iones gaseosos con carga positiva en su mayoría y la menor parte con carga negativa [12].

Dependiendo del estado de fase de muestra, la ionización se puede llevar a cabo a través de distintas técnicas, por ejemplo:

Si la ionización es en fase gaseosa, se utiliza:

- Impacto eléctrico
- Ionización química
- Ionización de campo

Si la ionización es en fase líquida, se utiliza:

- Desorción de campo
- Bombardeos con átomos rápidos
- Espectrometría de masas de iones secundarios
- Ionización por termo nebulización
- Ionización por electro vaporización
- Ionización química a presión atmosférica
- Desorción de matriz asistida por láser

## ▪ Analizador

El analizador se encarga de la separación de iones con diferente relación  $m/z$  por lo que idealmente este debe ser capaz de percibir variaciones muy pequeñas de masa y al mismo tiempo debe permitir el paso de un número suficiente de iones para producir corrientes iónicas fáciles de medir [13].

Existen diferentes tipos de analizadores:

- Analizador de sector magnético
- Analizador de tiempo de vuelo (Figura 3)
- Analizador de cuadrupolo (Figura 4)
- Analizador de trampa de iones
- Analizador por resonancia de ciclotrón de iones (Figura 5)



Figura 3. Esquema del analizador de tiempo de vuelo [13].

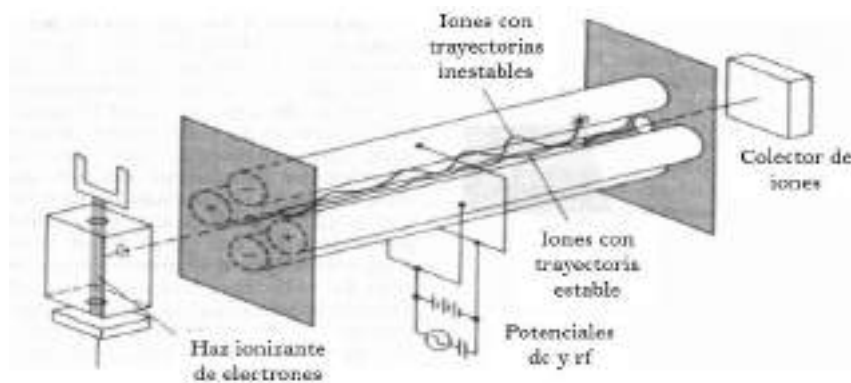


Figura 4. Esquema analizador de cuadrupolo [13].

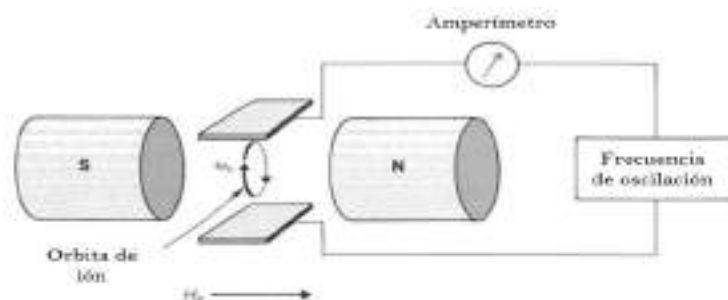


Figura 5. Esquema del analizador por resonancia de ciclotrón de iones [13].

El detector se conforma por un componente principal llamado cátodo emisor que al recibir el impacto por parte de iones que provienen del acelerador, produce electrones que nuevamente son acelerados y dirigidos hacia un dinodo para que se impacten en él y se produzcan más electrones. Este proceso se lleva a cabo varias veces, para acumular un gran número de electrones y generar una corriente eléctrica, la cual puede amplificarse por medio de electrónica de potencia para ser captada por un sistema registrador que se encarga de manejar e interpretar dicha señal [14].

- Sistema de vacío

Es necesario generar un vacío dentro del espectrómetro de masas para garantizar que el recorrido y longitud de trayectoria de las moléculas y iones formados, coincidan hasta llegar al detector para evitar colisiones innecesarias durante su recorrido [15].

## 1.5 Sistema de muestreo en espectrometría de masas

Una de las principales metas de tomar una muestra, es obtener información sobre aspectos físicos, químicos y biológicos del analito, por lo que uno de los aspectos importantes en la espectrometría de masas es el de muestreo, encargado de tomar un volumen específico de una muestra e inyectarlo al espectrómetro de masas para identificar sus características [16].

A continuación, se describe que es un sistema de muestreo manual y automático, mencionando cada una de sus ventajas y desventajas, además de su clasificación.

### 1.5.1 Tipos y características de sistemas de muestreo en espectrometría de masas

La recolección de muestras puede ser un proceso manual o automático, cada uno con sus propias ventajas y desventajas. El método manual puede ser propenso a errores humanos y puede requerir un tiempo considerable para completar todas las muestras. Sin embargo, un sistema de muestreo automático, o automuestreador, es un dispositivo inteligente que puede simplificar este proceso. El automuestreador permite la inyección automática de muestras en el sistema. Los usuarios simplemente establecen los parámetros de inyección y colocan la muestra para analizar en el dispositivo. A partir de ahí, el automuestreador maneja el proceso de inyección de manera autónoma, eliminando la posibilidad de errores humanos y ahorrando tiempo. No obstante, los sistemas automáticos también tienen sus desventajas. Por ejemplo, pueden ser costosos de adquirir y mantener, y pueden requerir una formación

especializada para su uso correcto. Además, si el sistema automático falla, puede causar retrasos significativos y potencialmente comprometer la integridad de las muestras. Por lo tanto, la elección entre un sistema manual y uno automático dependerá de las necesidades específicas y los recursos disponibles. Ambos métodos tienen su lugar en la ciencia y la investigación, y la elección entre uno y otro dependerá de la situación específica. [17].

Los tipos de automuestreadores que existen son:

- Automuestreador automático de inhalación
- Automuestreador automático de empuje
- Automuestreador de anillo integral
- Automuestreador de cinta transportadora

### 1.5.2 Técnicas de inyección

#### ▪ Técnica de análisis por inyección de flujo (FIA)

La técnica de análisis de inyección de flujo implica la introducción de una muestra líquida en un flujo constante y no segmentado de un líquido adecuado a través de un tubo capilar utilizando un sistema de inyección. La muestra que se inyecta crea una zona que luego se transporta hacia un detector. Este detector registra continuamente ciertos parámetros físicos, como la absorbancia o el potencial del electrodo, que cambian constantemente a medida que el material de la muestra pasa por la celda de flujo [18].

#### ▪ Técnica de inyección para sistemas indirectos de entrada

En la técnica de inyección para sistemas indirectos de entrada la muestra se transforma de un estado líquido o sólido a vapor o gas de manera externa y es introducida en la zona de ionización para llevar a cabo el proceso, cabe mencionar que esta zona de ionización se encuentra a baja presión y que el sistema de entrada generalmente se fabrica de vidrio para evitar pérdidas por adsorción [19].

#### ▪ Técnica de inyección para sistemas por sonda directa

La técnica de inyección para sistemas de entrada por sonda directa se implementa cuando la cantidad de muestra es limitada por diferentes aspectos como alto costo monetario o difícil de producir. Por lo tanto, con una cantidad de muestra muy pequeña se pueden obtener los espectros de masas, para esta técnica se utiliza una cámara intermedia que se encarga de introducir a la zona de ionización las muestras no volátiles en estado líquido o sólido. [19].

#### ▪ Técnica de inyección para sistemas de entrada cromatográficos

En la técnica de inyección para sistemas de entrada cromatográficos, los dispositivos de análisis químico como los espectrómetros de masas, generalmente están acoplados con sistemas cromatográficos de gases o de líquidos con una alta resolución que permiten la separación e identificación de los elementos de mezclas complejas. El acoplamiento de una columna cromatográfica a un espectrómetro de masas requiere la utilización de sistemas de

entradas especiales para poder llevar a cabo la introducción de la muestra y que el proceso se lleve a cabo de manera adecuada, y obtener el espectro de masas correcto [20].

### 1.5.3 Componentes del sistema de muestreo automático propuesto.

#### 1.5.3.1 Motor a pasos

Los motores a pasos son motores de corriente continua sin escobillas en el que la rotación se divide en un cierto número de pasos resultantes de la estructura del motor. Normalmente, una revolución completa del eje de  $360^\circ$  se divide en 200 pasos, lo que significa que se realiza una sola carrera del eje cada  $1.8^\circ$ . También existen motores donde la carrera del eje se realiza cada 2; 2.5; 5, 15 o  $30^\circ$  [21].

Los motores a pasos se clasifican según el tipo de rotor, en este sentido se habla de motores de reluctancia variable (VR), motores híbridos y motores de imanes permanentes (PM). Estos últimos a diferencia de los otros tipos de motores, no presenta dientes en el rotor y en su lugar se encuentra alternado con polos Norte-Sur magnéticos situados en línea paralela con el eje Figura 6. Estos polos magnéticos proveen un incremento en la intensidad de flujo magnético, por lo que se mejora el desempeño del torque [22].

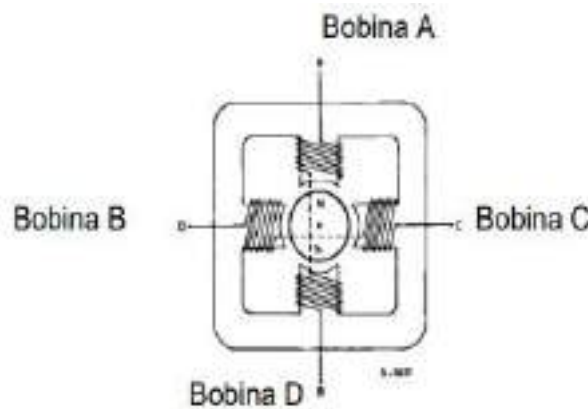


Figura 6. Vista transversal de un motor a pasos de imán permanente [22].

Los motores de imán permanente se clasifican de la siguiente manera [23]:

- Unipolares: Estos motores suelen tener 6 o 5 cables de salida dependiendo de su conexión interna, comúnmente por 4 de los cables se reciben los pulsos que indican al motor la secuencia y duración de los pasos y los restantes sirven como alimentación al motor. Los motores unipolares son llamados así, porque al tener un doble arrollamiento en sus bobinas, no es necesario invertir la polaridad de la alimentación.
- Bipolares: Los motores bipolares cuentan con 4 hilos, son llamados así, porque para hacer girar el eje, deben invertir la polaridad de la alimentación de sus bobinas, según una secuencia precisa. Cada inversión de la polaridad provoca el movimiento del eje en un paso, cuyo sentido de giro está determinado por la secuencia seguida, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Secuencia de control de un motor a pasos bipolar.

PASO	BOBINA			
	A	B	C	D
1	+V	-V	+V	-V
2	+V	-V	-V	+V
3	-V	+V	-V	+V
4	-V	+V	+V	-V

### 1.5.3.2 Microcontrolador ESP32

El microcontrolador ESP32 es un SoC (*System on Chip*) que integra un procesador Tensilica Xtensa de doble núcleo de 32 bits a 160 MHz (potencialmente hasta 240 MHz) con conectividad Wi-Fi y Bluetooth. [24]. El ESP32 está integrado con un interruptor de antena, un amplificador de potencia, un amplificador de recepción con bajo nivel de ruido, filtros y módulos de administración de energía. El ESP32 está diseñado para dispositivos móviles, tanto en las aplicaciones de electrónica como en las de IoT (Internet de las cosas). Además, logra un consumo de energía bajo a través de funciones de ahorro de energía, incluyendo la sintonización de reloj con una resolución fina, modos de potencia múltiple y escalado de potencia dinámica. [25]

Entre sus características principales se encuentran:

- Procesador principal: Tensilica Xtensa LX6 de 32 bits.
- Wi-Fi: 802.11 b / g / n / e / i (802.11n @ 2.4 GHz hasta 150 Mbit / s).
- Bluetooth: v4.2 BR / EDR y Bluetooth Low Energy (BLE).
- Frecuencia de reloj: Programable, hasta 240MHz.
- ROM: 448KB, para arranque y funciones básicas.



Figura 7. Pines del microcontrolador ESP32 [25].



### 1.5.3.3 Driver TB6600

Un driver es un controlador de movimiento de un circuito electrónico, el cual ajusta la dirección y velocidad de rotación del motor. El driver TB6600 es un controlador profesional para motores a pasos bipolares basado en el IC TB6600HG. Es compatible con microcontroladores como Arduino y otros que puedan generar señales de pulsos de 5V.

Soporta una gran variedad de voltajes de entrada (de 9 a 42 VDC). Es capaz de proporcionar hasta 3.5 A de corriente de forma continua y 4 A de pico por cortos periodos de tiempo. Este controlador puede configurar su micropaso y corriente de salida mediante 6 interruptores DIP switch incluidos. Hay 7 valores posibles: 1, 2 / A, 2 / B, 4, 8, 16 y 32 además de 8 posiciones para el ajuste de corriente: 0.5 A, 1 A, 1.5 A, 2 A, 2.5 A, 2.8 A, 3.0 A y 3.5 A. Todas las señales están protegidas internamente mediante optoacopladores de alta velocidad para evitar interferencias y mejorar el aislamiento del circuito de control [26].

En total el TB6600 cuenta con tres señales de entrada:

1. Señal de impulso escalonado PUL +, PUL-
2. Señal de dirección DIR +, DIR-
3. Señal fuera de línea EN +, EN-

El controlador admite las siguientes conexiones [27]:

- Ánodo común: este tipo de conexión se emplea cuando el microcontrolador tiene como referencia un voltaje positivo, por lo que proporciona pulsos en estado bajo para poder controlar el optoacoplador interno, el cual, podrá ser controlado de manera directa siempre y cuando la señal del microcontrolador sea de +5V, ya que de ser menor a +5V, será necesario agregar una etapa de potencia para garantizar que el pin del controlador pueda generar una corriente de 8 ~ 15 mA.

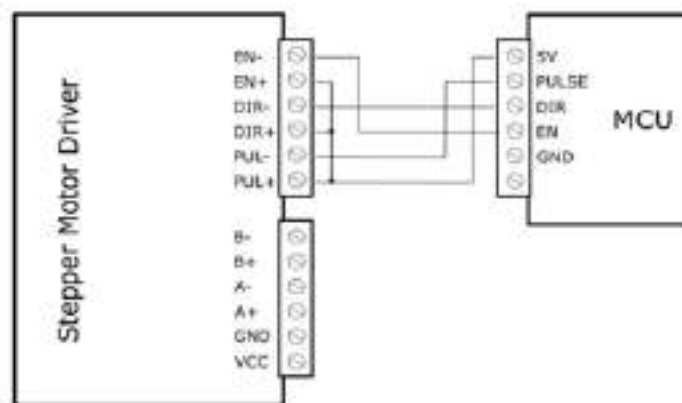


Figura 8. Conexión ánodo común [27].

- Cátodo común: este tipo de conexión se emplea cuando el microcontrolador tiene como referencia GND, por lo que se proporcionan pulsos en estado alto para poder controlar el optoacoplador interno.

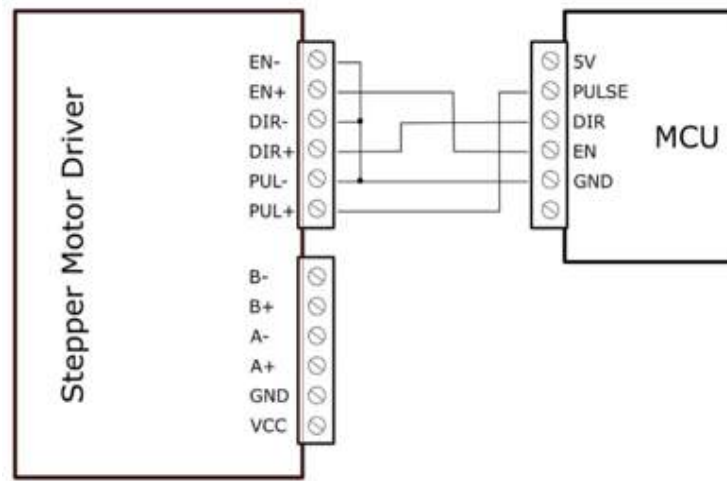


Figura 9. Conexión de cátodo común [27].

Se debe considerar que cuando "EN" está en el estado válido, el motor está en estado libre (modo fuera de línea). En este modo, se puede ajustar la posición del eje del motor manualmente. Cuando "EN" está en estado no válido, el motor estará en modo de control automático.

#### 1.5.3.4 Husillo de bolas SFU2005

El husillo de bolas es un elemento mecánico que convierte el movimiento de rotación de eje de un servomecanismo en movimiento lineal a lo largo de un eje. El husillo de bolas consta de un eje, una tuerca en la que se integran las bolas y el sistema de recirculación de bolas. Los husillos de bolas son del tipo de eje roscado más utilizado en la maquinaria industrial ya que ofrecen una gran precisión y alta eficiencia [28].

Existen diversos sistemas de recirculación para las bolas de los husillos, entre los más empleados se encuentran:

- *Recirculación externa:* se compone de los canales de retorno y la placa de sujeción. Las bolas se insertan en los carriles entre el husillo y la tuerca, y son guiadas de vuelta al principio mediante los canales de retorno, ubicados al final de la tuerca. Dichos canales se encuentran fuera de la tuerca, por esto se conoce como recirculación externa.
- *Recirculación interna:* las bolas vuelven al principio de cada vuelta de rosca gracias a las piezas deflectoras, realizando un solo circuito alrededor del eje. Por lo tanto, es un circuito cerrado por las piezas deflectoras, las cuales se encuentran en la parte posterior dentro de la tuerca.

- *Recirculación end-cap*: las bolas vuelven al principio a través de un canal de retorno en la tuerca realizando un recorrido completo. Este sistema también se conoce como “recirculación total interna”.

#### 1.5.3.5 Guía lineal SRB12

Una guía lineal es un sistema que permite la traslación entre piezas con la mínima pérdida por fricción posible, al mismo tiempo permite resistir las fuerzas actuantes en dirección perpendicular a la trayectoria y los momentos en las tres direcciones del espacio.

El sistema de guías lineales ejecuta, concretamente, un par cinemático de tipo prismático. El par cinemático se refiere a la unión entre dos cuerpos sólidos rígidos que permite ciertos movimientos relativos y restringe otros. El par prismático se refiere al contacto entre dos sólidos mediante el deslizamiento a lo largo de un eje. En tal caso, el deslizamiento es el movimiento permitido y el giro en torno a dicho eje es el restringido. Así, el movimiento relativo es una traslación y la velocidad en todos los puntos está dada por la dirección fijada mediante el vínculo [29].

#### 1.5.3.6 Perfiles de aluminio

Los perfiles de aluminio son piezas con una forma determinada que se utilizan para construir estructuras y elementos diversos. Estos perfiles se fabrican a través de un proceso de extrusión en el que se toma un bloque de aluminio y se empuja dentro de una matriz para obtener la forma deseada [30].

### 1.5.4 Interfaz para el monitoreo y operación del sistema de muestreo automático propuesto

Los humanos y las computadoras son muy diferentes en la forma en que se comunican y realizan tareas, la interfaz permite una comunicación de manera efectiva para lograr interacciones exitosas. Las interfaces para el monitoreo y operación de procesos industriales tienen características distintivas y críticas que afectan la comunicación. La incorporación de nuevas tecnologías ha cambiado la forma en que los operadores interactúan con los sistemas de monitoreo y operación [31].

El programador de la interfaz gráfica determina la mejor manera de utilizar los recursos y cómo afectan a la comunicación entre el hombre y la máquina. Esto incluye tomar decisiones sobre la cantidad y el tipo de control que se le asigna al operador. En este sentido, el programador debe determinar cuánta información puede procesar y manejar un operador en una situación problemática y diseñar el sistema de monitoreo y alarmas para reducir la carga cognitiva a niveles seguros o aceptables. Desde el punto de vista del diseño de interfaces, un problema es, mostrar el estado del proceso de manera efectiva y proporcionar interacciones para completar la tarea con éxito [32].

El factor humano en los sistemas de monitoreo y operación es un elemento clave dentro de los sistemas interactivos, ya que este tipo de sistemas deben asistir al humano a poder

concretar sus tareas. El factor de diseño debe tomar en cuenta sus capacidades y limitaciones [33].

A lo largo del tiempo se han propuesto diversos modelos para el diseño de interfaces, uno de los más útiles es el propuesto por Card, Moran y Newell en 1983 llamado “Modelo de Estados de Procesamiento de Información Humano” (Figura 10). El modelo consta de tres subsistemas que se comunican entre sí. Se procesan los estímulos detectados en el entorno por el sistema perceptivo, el sistema motor es el que controla el movimiento y las funciones cognitivas, y proporciona suficiente procesamiento para conectar los otros dos sistemas. En cada etapa hay acceso a la información almacenada en la memoria y todo el proceso se ve afectado por la indicación del usuario [33].

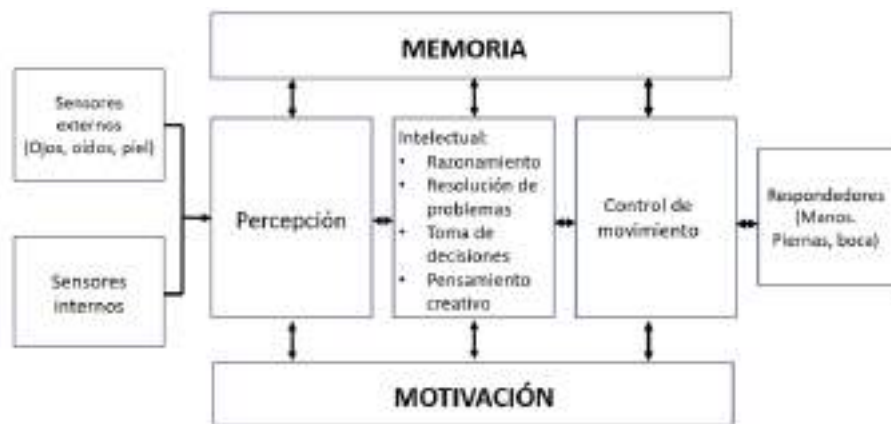


Figura 10. Modelo de estados de procesamiento de información humano [33].

### Diseño de las interfases

Las interfaces van más allá de simples textos y pueden ser examinadas como tales. De igual manera, la interacción se puede ver como un acto de generación de significado e interpretación. Estos procesos integran modelos de distintas áreas; la ergonomía busca que las interfaces sean accesibles para el mayor número de usuarios, adaptándose a diversos dispositivos y contextos, y transfiriendo elementos semióticos de una interfaz a otra, lo que incluye la inteligencia artificial y varias ramas de las ciencias cognitivas. Por otro lado, el diseño impulsa y sugiere nuevas formas de interacción ante la creciente diversidad de pantallas y sus variados usos. La función del diseño se puede describir a través del modelo que IBM introdujo en 1992 (Figura 11) [33].



Figura 11. . Representación del modelo del diseñador: el look-and-feel iceberg. [33]

La Figura 11 muestra la cima del Iceberg, marcando un 10% que simboliza la primera impresión que los usuarios tienen de las interfaces, percibiendo el diseño de forma instintiva. Luego, un 30% representa la importancia de la interacción en la experiencia del usuario, que puede resultar en satisfacción o frustración al navegar en entornos digitales. Esta sección subraya la necesidad de que las interfaces se adapten a diferentes dispositivos. Finalmente, el 60% restante en la base del Iceberg es crucial, pues aquí es donde se definen las metáforas que resonarán con los modelos mentales de los usuarios y las conexiones entre ellas, proporcionando estructura a la arquitectura de la información. Aunque es la parte más significativa del diseño, los usuarios suelen notarla menos, ya que implica un trabajo más detallado en la lógica del diseño y la programación [32].

Se han propuesto algunos principios relevantes del diseño para interfaces gráficas, los cuales se resumen de la siguiente manera:

- Anticipación (a todas las necesidades del usuario).
- Autonomía (los entornos deben ser flexibles y estar disponibles todo el tiempo)
- Percepción del color (homogeneización).
- Valores por defecto (términos estándar que describan lo que está sucediendo).
- Consistencia (aplicada en varios niveles como el diseño de las estructuras visibles, la claridad de las tareas a realizar de la interfaz).
- Eficiencia de los usuarios (evitar que el sistema tarde en responder las solicitudes de los usuarios).
- Ley de Fitt (funcionamiento óptimo de la distancia y el tamaño de los objetos de la interfaz durante su ejecución).
- Uso de metáforas (figuras mentales fáciles de recordar asociados con objetos de formas conceptuales, pueden ser visuales o auditivas).

El Pensamiento de Diseño es utilizado para crear ideas innovadoras que centran su eficacia en entender y plantear soluciones a las necesidades reales de los usuarios. En términos

sencillos, es una disciplina que usa la sensibilidad y los métodos del diseñador para hacer coincidir las necesidades de las personas con lo que es tecnológicamente factible. Los procesos de diseño varían, y deben considerar el ambiente en el cual se desarrollan, así como la adaptación en múltiples plataformas y dispositivos. Las nuevas metodologías que tienen enfoques de diseño centrado en los usuarios permiten estudiar y generar mejores experiencias durante el uso, y consideran el diseño de interfaces de formas más holísticas, desde etapas tempranas [32].

#### 1.5.4.1 Software y herramientas de comunicación

El término software se refiere al conjunto de programas informáticos que se desarrollan en el entorno de una computadora y normalmente se clasifican en 3 tipos:

- *Programas de control:* Se refiere a que controlan y supervisan la ejecución de todas las tareas y procesos que tienen lugar en una computadora.
- *Programas de proceso:* Se refiere a que sirven para que el usuario cree sus propios programas. (ej.: compiladores, intérpretes, montadores de enlace, etc.).
- *Programas de aplicación:* Se refiere a que son los desarrollados por y para el usuario de la computadora para resolverle problemas específicos.

Los 2 primeros tipos de programas informáticos reciben el nombre de software del sistema porque son programas desarrollados para el correcto funcionamiento de la computadora, mientras que el tercer tipo de programa se denomina software de aplicación porque son los programas desarrollados para resolver por computadora los problemas de los usuarios, denominados aplicaciones informáticas [37].

Cuando se habla del desarrollo de software de programas o, en términos genéricos desarrollo de software, se refiere normalmente al software de aplicación dado que el software del sistema ya viene desarrollado por la propia computadora [38].

Para establecer la comunicación entre el ordenador y el microcontrolador se emplean protocolos de comunicación, algunos de ellos son los siguientes [38]:

- *SPI:* protocolo de comunicación síncrona utilizado para transferir datos entre un microcontrolador y otros dispositivos, como sensores, pantallas, memorias y periféricos a través de las líneas SCLK, MOSI, MISO y SS o SC.
- *I2C:* protocolo de comunicación síncrona que permite la interacción entre el microcontrolador y varios dispositivos a través de las líneas SDA y SCL.
- *I2S:* protocolo de comunicación serial síncrono utilizado para transmitir datos de audio digital entre dispositivos en tiempo real, a través de las líneas SCK, WS y SD.
- *UART:* protocolo de comunicación que permite la transmisión y recepción de datos de forma asíncrona entre dispositivos sin señal de reloj adicional.

#### 1.5.4.2 Sistemas de adquisición de datos

Un sistema de adquisición de datos (DAS) se conforma por un dispositivo de medición que permite que los datos experimentales obtenidos con sensores de diversas magnitudes físicas sean leídos automáticamente, almacenados y analizados por un software computacional. El software, permite procesar y monitorear las variables del sistema físico en tiempo real, mientras que los sensores son dispositivos con características internas, directamente afectados por un fenómeno externo. Por lo tanto, hay una relación directa entre ellos. El fenómeno externo puede ser temperatura, humedad, presión, etc. Por otro lado, la característica interna puede ser, la resistencia o la capacitancia.

Entonces, a través de los sensores se transforma la magnitud que se desea medir, en una señal eléctrica, dicha señal se envía a un circuito llamado interfaz, que lo transforma en una secuencia de valores digitales de voltaje o tensión eléctrica, que son leídos, procesados y almacenados por la computadora. Todo sistema de adquisición de datos requiere convertir alguna cantidad física tal como la temperatura, la fuerza o la presión, en una señal eléctrica que se suministra a continuación a la computadora para la recolección y análisis de datos, lo anterior se logra al emplear un sensor. [39].

En general, los tipos de DAS se pueden dividir en tres componentes: los sensores utilizados para recopilar datos de los sistemas físicos, los circuitos utilizados para pasar estos datos a una computadora y el sistema informático en el que se pueden ver y analizar.

##### ▪ Sensores

Un sensor es un aparato que se encarga de detectar estímulos del ambiente y convertirlos en información útil. Esta información se traduce generalmente en una señal eléctrica que es procesada por circuitos para generar una acción específica en un dispositivo, sistema o máquina. Los sensores tienen la capacidad de convertir magnitudes físicas o químicas en magnitudes eléctricas. En el ámbito industrial, un sensor es un elemento que puede alterar una propiedad en respuesta a magnitudes físicas o químicas, conocidas como variables de instrumentación, y transformarlas mediante un transductor en variables eléctricas [39].

El diseño de cualquier DAS debe comenzar con el sistema físico que se está midiendo. Con la gama de sensores disponibles en la actualidad, es posible medir casi cualquier propiedad física del sistema que le interese. Por lo tanto, se debe considerar cuidadosamente el tipo de datos que se necesita recopilar.

Los fenómenos que comúnmente se miden por DAS son la temperatura, la intensidad de la luz, la presión del gas, el flujo de fluido y la fuerza. Por esta razón, es importante reconocer que no es posible medir todas las variables que se desean sin afectar el sistema en sí. Esto se debe a que cualquier sensor afectará el sistema para el que está diseñado y eliminará energía de este. Esto es especialmente importante si el sistema que se mide funciona con tolerancias pequeñas, ya que la adición de incluso un sensor pequeño a estos sistemas puede drenar demasiada energía de ellos para un funcionamiento efectivo [39].

- Procesamiento de señales

Generalmente se emplea un hardware dedicado para pasar señales de los sensores a los sistemas informáticos que recopilarán y analizarán los datos. Convertir una señal desordenada, a veces ruidosa, de un sistema físico en un formato que se pueda usar y manipular en una computadora puede ser una tarea complicada (Figura 12).

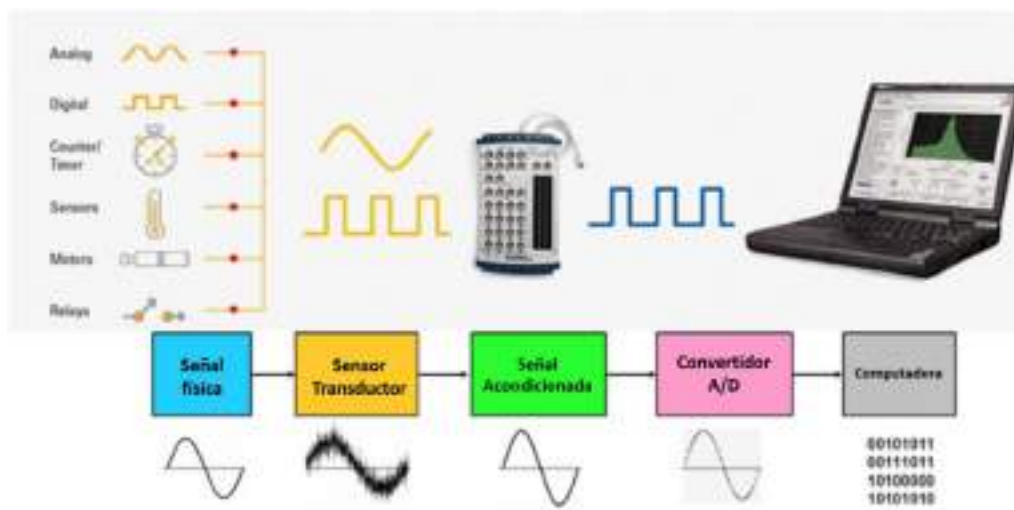


Figura 12. Procesamiento de señales para un DAS [39].

Uno de los desafíos principales en el uso de sensores es la debilidad de la señal que emiten. Los sensores están diseñados para consumir la menor cantidad de energía posible, resultando en una señal de baja intensidad que necesita ser amplificada para ser útil. En este proceso, el amplificador juega un papel crucial. Su función es aumentar la intensidad de la señal sin distorsionarla. Sin embargo, un amplificador de mala calidad puede introducir ruido en la señal, lo que puede deformar los datos recopilados y, en algunos casos, hacerlos inútiles. [39].

Al diseñar un DAS, se debe tomar en cuenta el tipo de señal que utilizará para pasar datos entre las diversas partes de su sistema. La mayoría de los sensores emitirán una señal analógica de un solo extremo. Si bien, este tipo de señal es buena para capturar el estado bruto del sistema que se está midiendo, también es susceptible al ruido y la distorsión. Una solución común para este problema es convertir la señal proveniente de los sensores en una señal diferencial, que es mucho más estable y fácil de trabajar [39].

- Procesamiento de señales en sistema DAS

Una vez que la señal ha sido amplificada y limpiada, debe ser enviada a un sistema computarizado para su recolección y análisis. Hoy en día, la mayoría de los DAS utilizan hardware de PC estándar, lo que significa que, si los componentes del sistema fallan, pueden reemplazarse fácilmente.



En primer lugar, la señal debe convertirse a un formato digital que la computadora entienda, por lo general, esto se hace utilizando los puertos preexistentes en una PC, como los puertos paralelos, USB, Tipo C, entre otros. Otro enfoque es usar tarjetas conectadas a ranuras en la placa base. Con este segundo enfoque, un problema común es que el número de puertos en una tarjeta PCI es demasiado pequeño para aceptar todas las entradas necesarias. Para evitar este problema, se utiliza un cuadro de conexión para combinar varias señales en una sola entrada [39].

Las tarjetas DAS a menudo contienen múltiples componentes que pueden realizar el procesamiento de la señal antes de pasar la señal al software. En las tarjetas más avanzadas, estas funciones son accesibles a través de un bus por un microcontrolador, aunque algunos sistemas más baratos utilizan lógica cableada. Para ambos tipos de tarjetas, a menudo se necesitan controladores de dispositivos propietarios.

La siguiente etapa en el procesamiento de la señal es enviarla al software. En la actualidad se cuenta con una gran variedad de soluciones de software para su uso con DAS, la elección de cuál utilizar depende del tipo de datos que se recopilan y cómo deben procesarse. Normalmente, estos sistemas se basan en lenguajes de programación comúnmente entendidos como C++ o MATLAB, proporcionando un gran margen para la personalización [39].



## **CAPÍTULO II.**

# **ANÁLISIS, EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA MANUAL DE MANEJO E INYECCIÓN DE MUESTRAS.**

El capítulo II brinda un diagnóstico del sistema actual con el que cuenta el laboratorio. Se evaluaron sus limitaciones y se identificaron áreas clave de mejora, para establecer el escenario para la solución propuesta.

## 2.1 Ubicación del Laboratorio de Posgrado e Investigación de Operaciones Unitarias

El espectrómetro de masas de ultra alta resolución se encuentra dentro del laboratorio de posgrado ubicado en los laboratorios pesados 3 de ESIQIE, Unidad Profesional Adolfo López Mateos con dirección en la Av. Instituto Politécnico Nacional S/N, Colonia Lindavista, Delegación Gustavo A. Madero, Ciudad de México.



Figura 13. Ubicación del Laboratorio [40].

## 2.2 Conocimiento del medio ambiente de trabajo

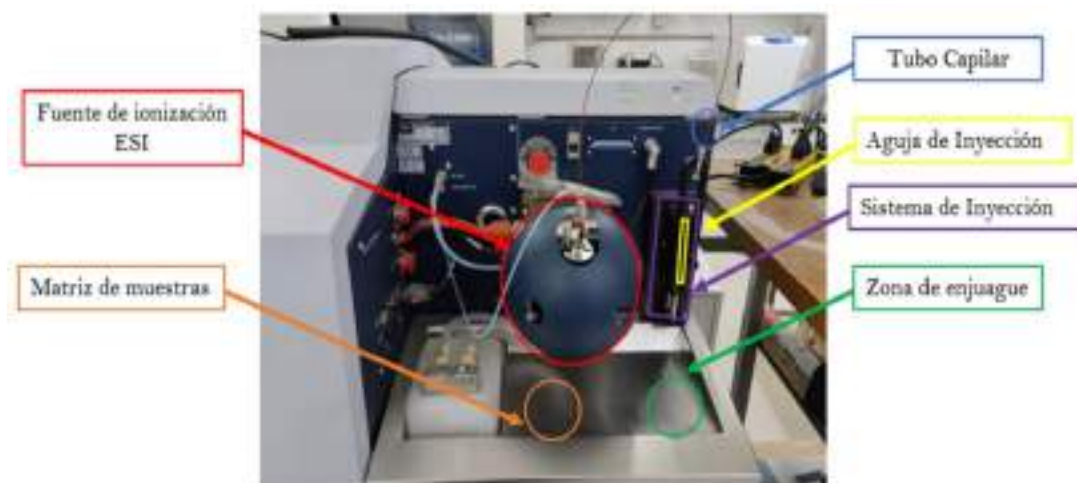
La Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE), cuenta con un Departamento de Posgrado e Investigación de Operaciones Unitarias. Este departamento dispone de un espectrómetro de masas de ultra alta resolución, una herramienta esencial para la investigación y el análisis químico.

El departamento ha establecido un procedimiento sistemático para el manejo de muestras (Figura 14). El proceso inicia con el enjuague de la jeringa, para posteriormente tomar la muestra, colocar la jeringa en la estación, acoplarla con el tubo capilar, ajustar la plataforma que empuja el embolo de la jeringa y finalmente llevar a cabo la inyección de la muestra. Este proceso se repite sistemáticamente para el total de ensayos con los que se va a trabajar.



Figura 14. Proceso manual de enjuague, manejo e inyección de muestras.

Como se puede ver en la Figura 15, se muestra el espectrómetro de masas, así como los elementos necesarios para llevar a cabo el proceso antes mencionado. Esta ilustración proporciona una visión clara del equipo y de los elementos requeridos para el manejo e inyección de muestras.



*Figura 15. Elementos necesarios para llevar a cabo la inyección.*

### **2.3 Evaluación y diagnóstico del sistema manual de manejo e inyección de muestras**

La evaluación del manejo e inyección de muestras en el espectrómetro de masas se realizó con el objetivo de identificar posibles deficiencias en el proceso manual. Los usuarios encargados de esta tarea proporcionaron una descripción detallada de los pasos que se siguen para tomar e inyectar la muestra y enjuagar la jeringa empleada.

Se identificaron áreas de mejora en varios puntos del sistema. En particular, el sistema de inyección requiere no solo la colocación de la jeringa, sino también el ajuste de la plataforma de inyección para no alargar el proceso. En cuanto al manejo y enjuague de las muestras, se observó que no existen áreas destinadas para estas tareas, lo que puede aumentar el riesgo de accidentes y afectar la integridad de las muestras, aspecto crítico para considerar en la implementación de este proyecto.

Tras la preparación inicial de la matriz de muestras, comienza el proceso de inyección para la obtención de resultados. Sin embargo, si existen problemas en los puntos señalados anteriormente, estos resultados podrían demorarse más de lo esperado. Por lo tanto, es esencial abordar las deficiencias identificadas para garantizar un proceso eficiente y seguro.

La Tabla 2 muestra las ventajas y desventajas de varios sistemas de inyección de muestras, incluyendo el sistema que se encuentra actualmente en uso y el sistema propuesto.

Tabla 2. Comparación de sistemas de inyección.

SISTEMA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>SISTEMA ACTUAL</b>  Manejo de muestra manual con inyección automática	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Está integrado al instrumento</li> <li>• Se controla la velocidad de inyección a través del software del fabricante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesita capacitación</li> <li>• Necesita mucha intervención humana</li> <li>• Sin área específica de enjuague y toma de muestras</li> <li>• Los errores humanos se hacen presentes con mayor frecuencia</li> </ul>
<b>SISTEMA PROPUESTO</b>  Automuestreador con Sistema CNC para manejo e inyección de muestras	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de inyección por flujo directo a velocidad variable</li> <li>• Mayor número de muestras para poder analizar</li> <li>• Sistema de inyección independiente</li> <li>• Número de muestras por analizar a elección del usuario.</li> <li>• Cuenta con una interfaz para su operación</li> <li>• Bajo costo de mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabaja solo para una técnica de inyección en específico</li> <li>• Necesita una aplicación que no está integrada al software del fabricante</li> </ul>
<b>SISTEMA COMERCIAL 1</b>  Automuestreador giratorio A. KRÜSS AS80, AS90	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite inyecciones ultrarrápidas</li> <li>• Plataforma altamente sólida e integrada</li> <li>• Intercambio automático de herramientas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No cuenta con sistema de inyección por flujo directo</li> <li>• Alto costo (dólares)</li> <li>• Se necesita importar (USA)</li> <li>• Desperdicio de muestras</li> <li>• Alto costo de mantenimiento</li> </ul>
<b>SISTEMA COMERCIAL 2</b>  Dionex AS50 Automuestreador CNC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad de manejar un gran número de muestras</li> <li>• Bajo mantenimiento</li> <li>• Robustez</li> <li>• Panel de control fácil de usar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No cuenta con sistema de inyección de flujo directo</li> <li>• Alto costo (dólares)</li> <li>• Venta en el extranjero (USA)</li> <li>• Alto costo de mantenimiento</li> <li>• Inyecciones irregulares</li> </ul>

## 2.4 Descripción del sistema manual de manejo e inyección de muestras

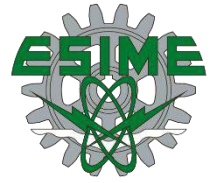
Con base en la evaluación del sistema, se establecieron los siguientes procedimientos para realizar la inyección de muestras de manera manual:

- *Enjuague de la jeringa:* Se realiza un enjuague de la jeringa con una solución específica. Este proceso consiste en tomar un poco de solución y desecharla, repitiendo este paso dos veces.
- *Toma de muestra:* Se utiliza la jeringa de inyección y los viales que contienen la muestra. Se toma una pequeña cantidad de muestra y se desecha para eliminar los restos de la solución de enjuague. Posteriormente, se toman 100 microlitros de la muestra.
- *Colocación de la jeringa:* Se inserta la jeringa en el sistema de inyección, se ajusta la plataforma y se coloca el tubo capilar en la aguja de la jeringa.
- *Inicio del proceso de inyección:* Se activa el sistema de inyección desde el software para obtener los espectros de masas, el proceso de inyección dura aproximadamente 5 minutos.
- *Finalización del proceso:* Una vez obtenido el espectro de masas, se detiene el proceso de inyección desde el software. Se retira el tubo capilar de la aguja de la jeringa y se extrae la jeringa del sistema de inyección.

## 2.5 Propuesta de solución

Para mejorar el manejo e inyección de muestras, se propone un sistema automático. Este sistema utiliza una máquina CNC de 3 ejes (X, Y, Z) para automatizar las tareas de toma de muestra, enjuague e inyección de muestras, las cuales se llevarán a cabo a través de dos subsistemas contruidos específicamente para su ejecución, uno de ellos será una estación móvil encargada de realizar el enjuague y toma de muestras mientras que el otro será una estación fija que realizará la inyección de la muestra. Esto ayuda a reducir los posibles errores identificados en el análisis de ejecución de tareas del sistema manual de manejo e inyección de muestras.

El sistema automático de toma de muestras incluye una interfaz gráfica que permite el monitoreo y operación del proceso. Los usuarios pueden modificar la velocidad de inyección y seleccionar el número de muestras con las que desea trabajar.



# **CAPÍTULO III**

## **MARCO METODOLÓGICO Y DISEÑO DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN**

En este capítulo se presenta el diseño metodológico de la solución propuesta. Se hablará sobre la filosofía de operación, la selección de materiales y la construcción del sistema de muestreo automático.

### 3.1 Filosofía de operación

Para poder establecer la filosofía de operación y el diseño de la propuesta de solución para el sistema automático de manejo e inyección de muestras se consideran los requerimientos de usuario (Tabla 3) establecidos por el Laboratorio de Posgrado e Investigación de Operaciones Unitarias.

Tabla 3. Requerimientos de usuario.

	Requerimientos de usuario		
	Usuario: Dr. Yair Cruz Mandujano Área: Laboratorio de Posgrado e Investigación de Operaciones Unitarias - CIOUQ		
Aspectos Indispensables	Descripción	Aspectos Recomendables	Descripción
Dimensiones		Dimensiones	
Medidas del prototipo	Dimensiones 66 x 17 x 82 (mm)		
Áreas de trabajo		Áreas de trabajo	
Área de derecho de muestra	Dimensiones 20 x 20 (mm)		
Área de enjuague y desecho de solución	Dimensiones 44 x 70 (mm)	Área de enjuague y desecho de solución	Contar con tres (3) zonas de enjuague, para tres (3) soluciones diferentes.
Área para gradilla	Dimensiones 66 x 508 (mm)	Área para gradilla	Utilizar diferentes tipos de gradillas.
Ejecución		Ejecución	
Velocidad de inyección	1.33 µl/hr constante	Modificación de velocidad de toma de muestra	Con base en la velocidad de otros tipos de muestras a las que se manejan actualmente.
Toma de muestra	Volumen de muestra 200 µl, con tolerancia 2 %		
Monitores		Monitores	
Desarrollo de interfaz gráfica	Interfaz gráfica intuitiva y amigable para el usuario.	Interfaz gráfica accesible en cualquier dispositivo	Monitoreo a través de cualquier dispositivo móvil o fijo que tenga acceso a la red Wi-Fi del laboratorio de posgrado e investigación de operaciones unitarias de escape.
Número de muestras	Determinado por el usuario desde la interfaz de usuario (10 min).		
Velocidad de inyección	Determinado por el usuario desde la interfaz gráfica.		
Compatibilidad		Compatibilidad	
Técnica de inyección	Flow Injection Analysis (FIA)	Conexión entre FIA y software del EMI	Standard cellulas entre interfaz gráfica y software del FIA.
Seguridad		Seguridad	
Pero de emergencia	Botón rojo de accionamiento permanente autobloqueante.		
Lamparas de señalización	Lampara de señalización verde, si el equipo está conectado y en estado de ejecución. Lampara de señalización rojo, si el equipo está conectado y en estado de reposo.		

El sistema propuesto se basa en la automatización del sistema actual de manejo e inyección de muestras. Se utiliza un sistema CNC encargado de ejecutar cada una de las tareas programadas en un microcontrolador ESP32. Este microcontrolador es configurado a través de una interfaz gráfica, por la cual se capturan parámetros específicos como velocidad de inyección de muestra y el número de ensayos a realizar por parte del usuario. Los datos adquiridos son procesados por el microcontrolador para ejecutar rutinas específicas.

Después del procesamiento de datos, el microcontrolador envía señales a los motores NEMA 14, 17 y 23 para ejecutar movimientos giratorios, mediante un acoplamiento a tornillos sin fin, la trayectoria giratoria se convierte en lineal, lo que permite el desplazamiento de los subsistemas para el manejo e inyección de muestras que conforman la máquina.



Finalmente, el microcontrolador envía datos a través del puerto serial hacia la interfaz gráfica, permitiendo al usuario monitorear el proceso en tiempo real.

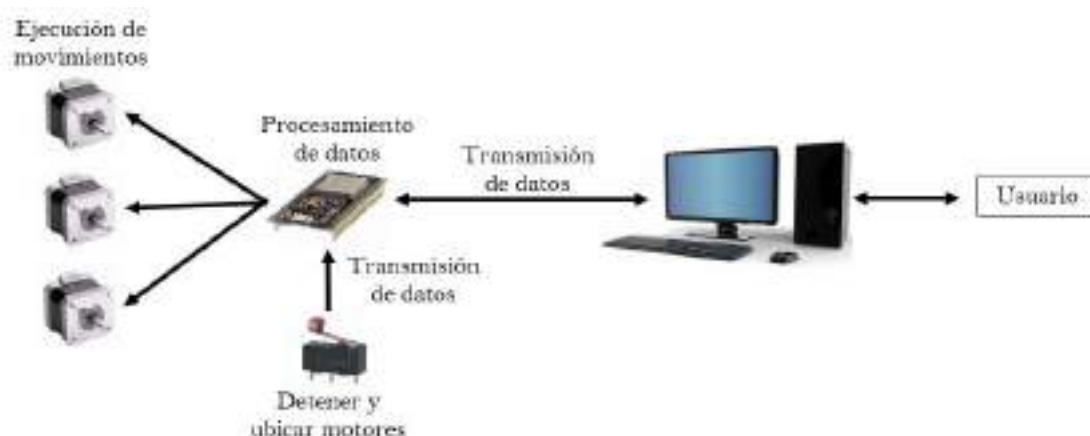


Figura 16. Diagrama de la filosofía de operación.

### 3.2 Diseño conceptual del sistema de muestreo

El diseño conceptual del sistema de muestreo es un elemento importante en cualquier proyecto. Esta etapa implica la identificación de los pasos requeridos y la toma de decisiones estratégicas sobre el proceso de muestreo, incluyendo la secuencia de las tareas a ejecutar. Este diseño asegura un flujo de trabajo continuo y un manejo e inyección adecuados de las muestras, lo que es importante para cumplir con los objetivos establecidos.

Una vez finalizado el diseño conceptual del sistema de muestreo, se procede a definir el diseño de los componentes. Esto facilita la ubicación de los elementos necesarios y permite establecer las trayectorias para realizar las tareas. Estas trayectorias siguen un recorrido general, que se determina por coordenadas específicas situadas en el área de trabajo.

#### 3.2.1 Diagrama de bloques y flujo de trabajo

Se presenta el diagrama de bloques del proceso de manejo e inyección de muestras (Figura 17) en el cual se visualiza cada una de las etapas que lo conforman.



Figura 17. Diagrama de bloques del proceso.

A continuación, se describe cada una de las tareas del proceso mencionando como se ejecuta por medio de los subsistemas que conforman el sistema de manejo e inyección de muestras.

▪ *Preparar la matriz de muestras*

Esta etapa consiste en colocar en la gradilla el número de muestras que se analizará.

▪ *Enjuague*

Para prevenir la contaminación entre diferentes muestras, se realiza un proceso de enjuague de la jeringa. Este proceso se lleva a cabo en una estación que tiene movimiento en los ejes “X”, “Y” y “Z”, lo que permite desplazarse a través del área de trabajo. La estación se encarga de extraer una cantidad determinada de la solución de enjuague. Esto se logra mediante la manipulación del émbolo de la jeringa, tanto como para el desecho y extracción de la solución de enjuague. De esta manera, el enjuague reduce al mínimo el riesgo de contaminación cruzada.

▪ *Toma de muestras*

El proceso de toma de muestras se realiza en la misma estación utilizada en la etapa de enjuague. La jeringa es capaz de extraer una cantidad específica de solución, en este caso, 100  $\mu\text{L}$  por muestra.

Una vez ejecutado el enjuague es posible que puedan quedar trazas de la solución en la jeringa, para evitar esto, se procede de la siguiente manera:

- Se toma una pequeña parte de la muestra
- Se desecha la cantidad de muestra tomada como método de purga
- Se toma el volumen total de muestra (100  $\mu\text{L}$ )

▪ *Inyección de muestras*

La estación responsable de la toma de muestras se dirige hacia una estación fija de inyección ubicada en el área de trabajo. La estación encargada del enjuague y toma de muestras coloca la jeringa en la estación de inyección. La estación de inyección se encarga de suministrar la muestra al espectrómetro de masas de ultra alta resolución a través del tubo capilar, utilizando un mecanismo similar al que maneja la estación de enjuague. Sin embargo, esta estación se distingue por la velocidad de inyección y la forma en que interactúa con el émbolo de la jeringa.

▪ *Obtener espectros de masas*

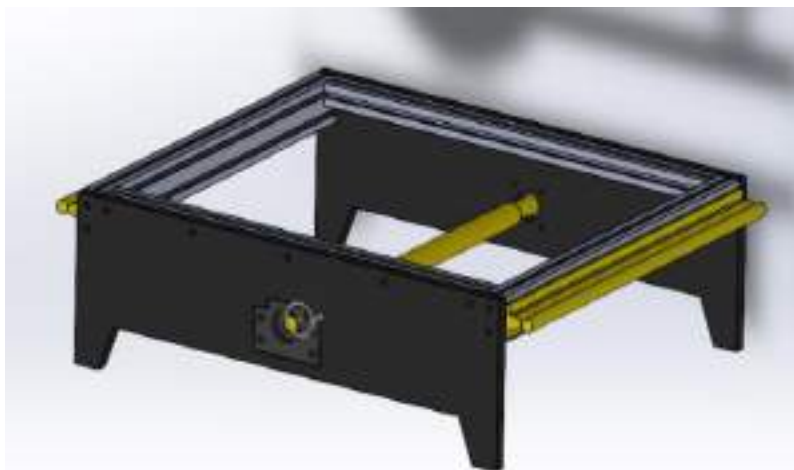
En esta etapa el usuario analiza el espectro de masas y lo guarda para continuar con la siguiente toma de muestra.

### 3.2.2 Diseño de los componentes del sistema de muestreo y análisis de esfuerzos

El Diseño Asistido por Computadora (CAD) es una herramienta utilizada para representar el diseño de un equipo antes de ser construido lo que ayuda a prevenir errores y facilitar el proceso de construcción.

Considerando que, en los requerimientos de usuario se establece el uso de una matriz con capacidad de 80 viales de muestras y que las dimensiones de la máquina deben comprender un área de 530mm x 400mm, se diseña la cama de trabajo. Es importante disponer de suficiente espacio para un buen funcionamiento.

Para la estructura principal de la cama de trabajo que contendrá al eje “X”, se propone utilizar perfiles de aluminio integrados con guías lineales y cubiertos por tapas de acrílico. Por su parte, la transmisión de movimiento del eje utilizará un husillo de bolas, como se muestra en la Figura 18.



*Figura 18. Creación de la cama inferior.*

Se realiza un análisis de esfuerzos en los elementos del eje “X”, que es donde se espera la mayor carga. Los elementos clave para analizar son el perfil de aluminio y las guías lineales. Se usará acero GCr15 para las guías y aluminio 6063 para los perfiles. El objetivo es ver cómo estos materiales manejan una carga de 10 kg. Las Figuras 19 y 20 ilustran la reacción de la guía lineal y el perfil de aluminio a la fuerza y los puntos de máxima deformación.

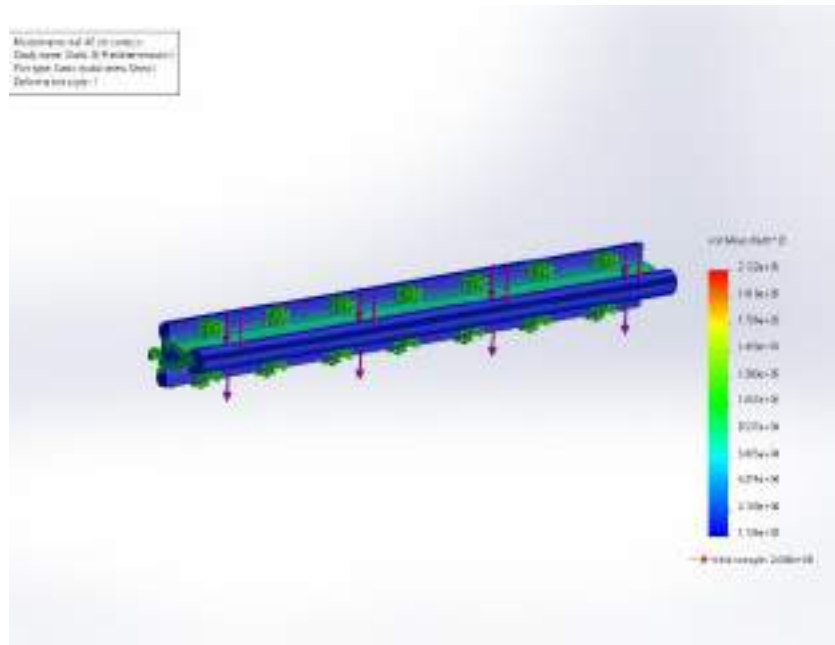


Figura 19. Análisis de esfuerzos de la guía lineal del eje "X".

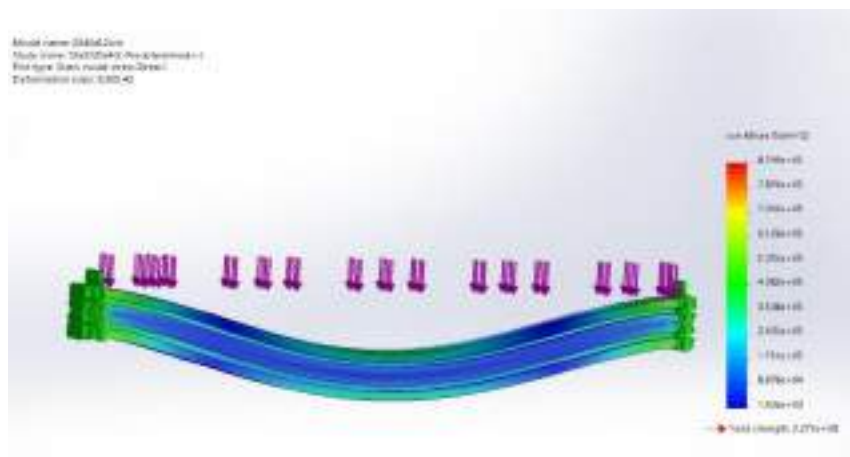


Figura 20. Análisis de esfuerzos del perfil de aluminio del eje "X".

La estructura del eje "Y" se conforma por perfiles de aluminio, guías lineales SRB12 y el husillo de bolas. Además, se incorpora el diseño de las tapas laterales para utilizar eficientemente el área de trabajo de la cama, como se ilustra en la Figura 21. Se lleva a cabo un análisis de esfuerzos sobre el perfil de aluminio para evaluar su comportamiento bajo la carga de 10 kg como se puede observar en la Figura 22.

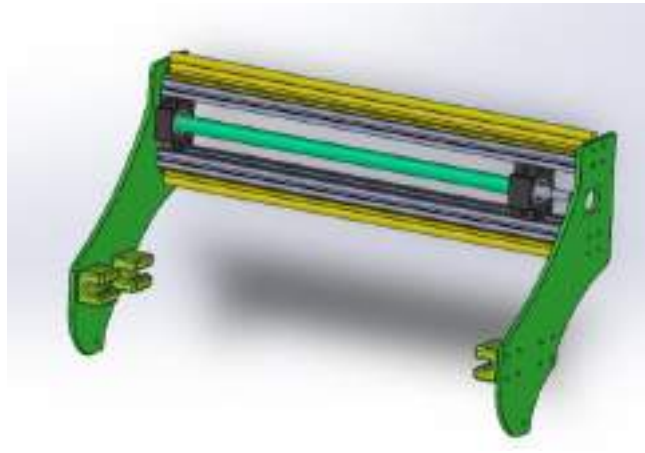


Figura 21. Ensamblaje del eje Y

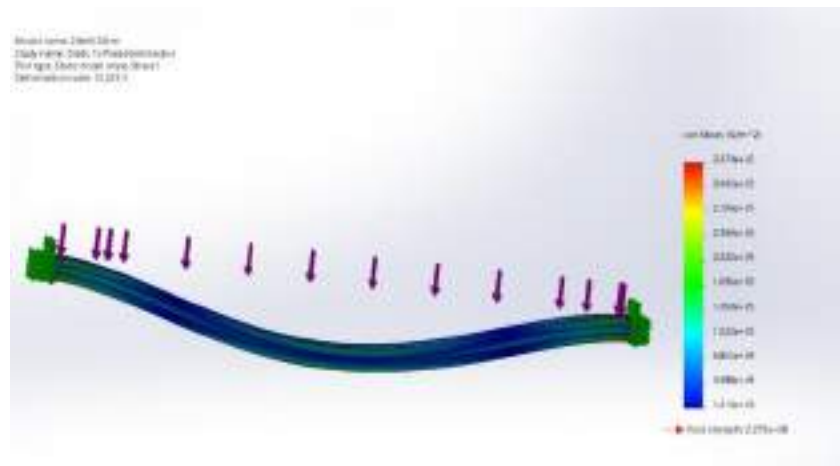


Figura 22. Análisis de esfuerzos del perfil de aluminio del eje "Y".

Se han fijado los elementos del eje "Y" a dos piezas de acrílico de 6mm de grosor, resultando en una estructura que, a pesar de ser ligera, es resistente por las propiedades estructurales de este material. Se ha llevado a cabo un análisis de esfuerzos en la pieza de acrílico para entender su comportamiento bajo las cargas aplicadas.

Para el análisis de las piezas de acrílico, se toma en cuenta una carga total de 6 kg. Esta carga se distribuye equitativamente entre las dos piezas, resultando en una carga aproximada de 3 kg que va a soportar cada pieza. Los resultados de deformación y máximo esfuerzo de este análisis se pueden ver en la Figura 23.

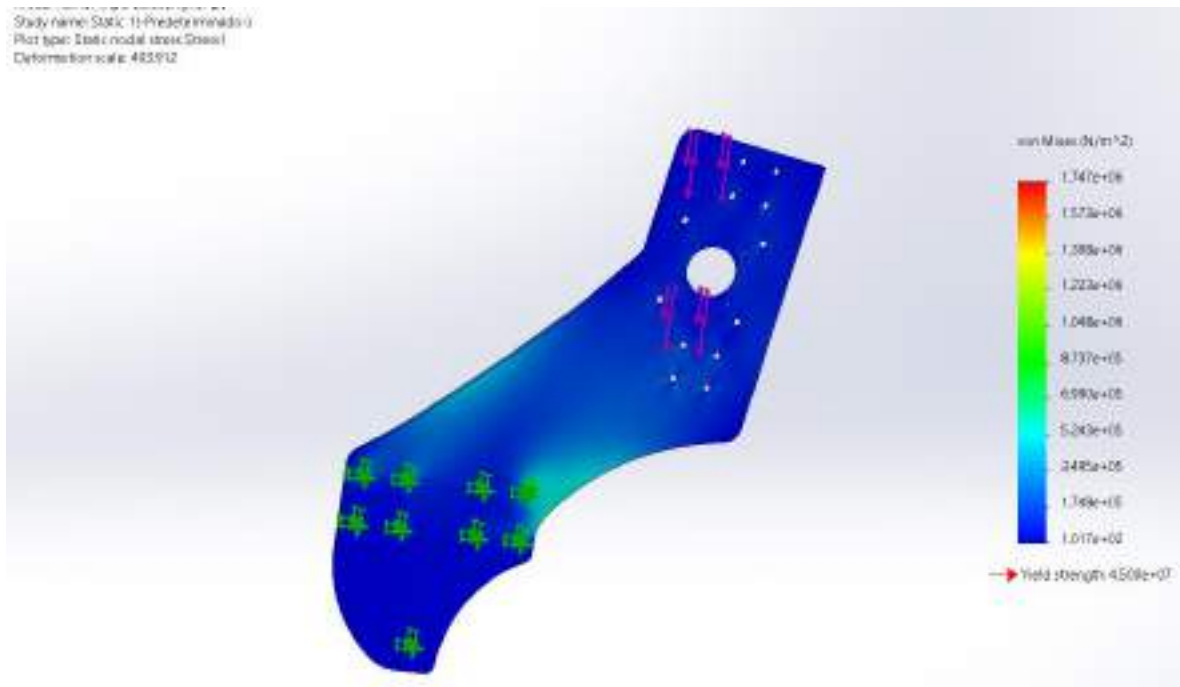


Figura 23. Análisis de esfuerzos de las tapas laterales del eje “Y”.

El diseño del eje “Z” incluye guías lineales y un husillo de bolas, ambos de 20 cm. Se ha diseñado una tapa que conecta el movimiento del husillo de bolas del eje “Y” con el eje “Z”. Se han colocado componentes como rodamientos lineales y chumaceras. Además, se ha diseñado una tapa adicional para fijar los componentes de la etapa de toma de muestras, tal como se muestra en la Figura 24. Se ha realizado un análisis de esfuerzos en la tapa que une el eje “Z” con el “Y”.

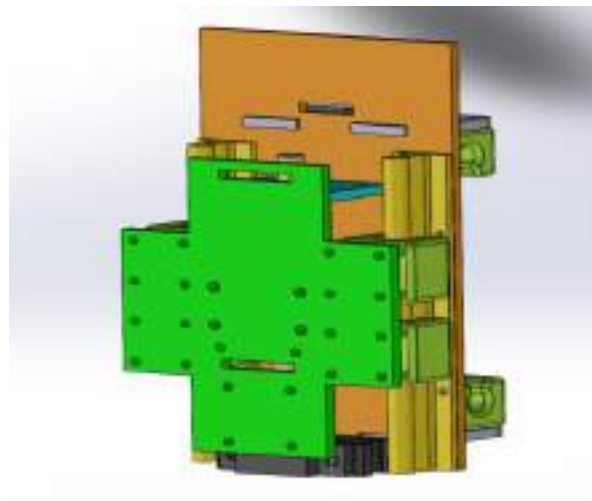


Figura 24. Ensamblaje del eje Z.

El eje “Z” se encarga de manipular la estación móvil de toma de muestra y enjuague de jeringa. Se ha realizado un análisis de esfuerzos en la pieza de acrílico donde se fija la estación, considerando una carga de 2.5 kg. Los resultados de esfuerzo y deformación de este análisis se pueden observar en la Figura 25.

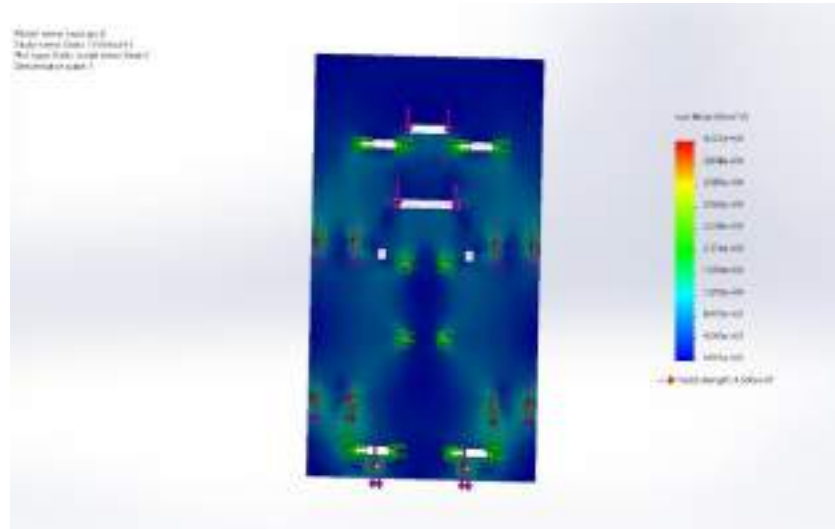


Figura 25. Análisis de esfuerzos de la pieza de acrílico del eje “Z”.

La estación de inyección fue diseñada considerando las medidas de la jeringa, incluyendo la longitud del émbolo. El objetivo era usar todo el espacio posible y asegurar que la plataforma pueda operar el émbolo sin dificultades, la Figura 26 muestra todos los materiales que integran la estación, los cuales son el motor a pasos, la plataforma de inyección, las guías lineales, el tornillo sin fin y la chumacera.



Figura 26. Estación de inyección fija.

Se realizó un análisis de esfuerzos en la plataforma de inyección. Este estudio permitió observar el comportamiento de la plataforma al presionar el émbolo. Los detalles de esfuerzo y deformación de este análisis se pueden observar en la Figura 27.

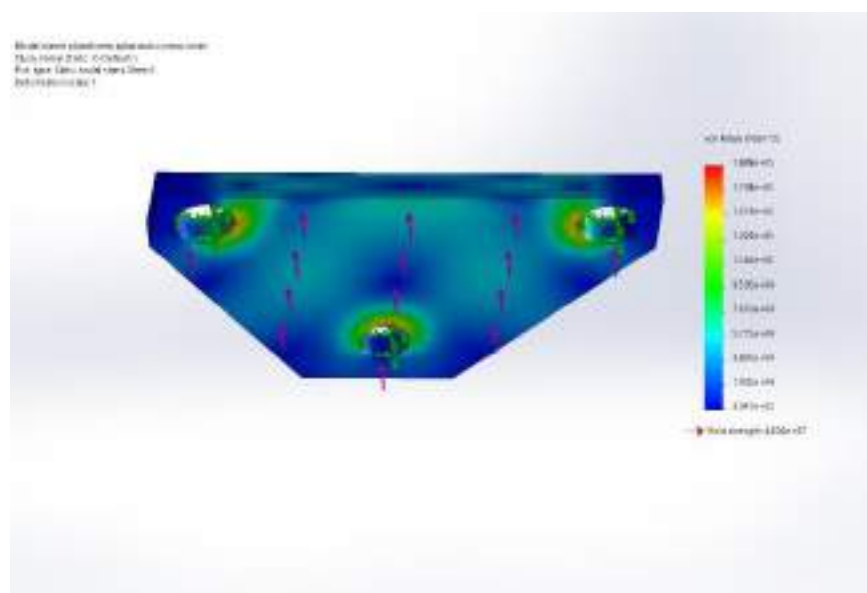


Figura 27. Análisis de esfuerzos de la plataforma de inyección

Se diseñó una estación para la toma de muestras y el enjuague de jeringas. Esta estación cuenta con un soporte para la jeringa y una pieza para la sujeción del émbolo, lo que facilita su movimiento. Además, se incorporó un motor a pasos y un tornillo sin fin, tal como se muestra en la Figura 28.



Figura 28. Estación de inyección móvil.



Se hace un análisis de esfuerzos para evaluar el comportamiento del sujetador del émbolo en dos situaciones: al expandirse, cuando se jala el émbolo como se ilustra en la Figura 29, y al comprimirse, cuando se empuja el émbolo como se observa en la Figura 30.

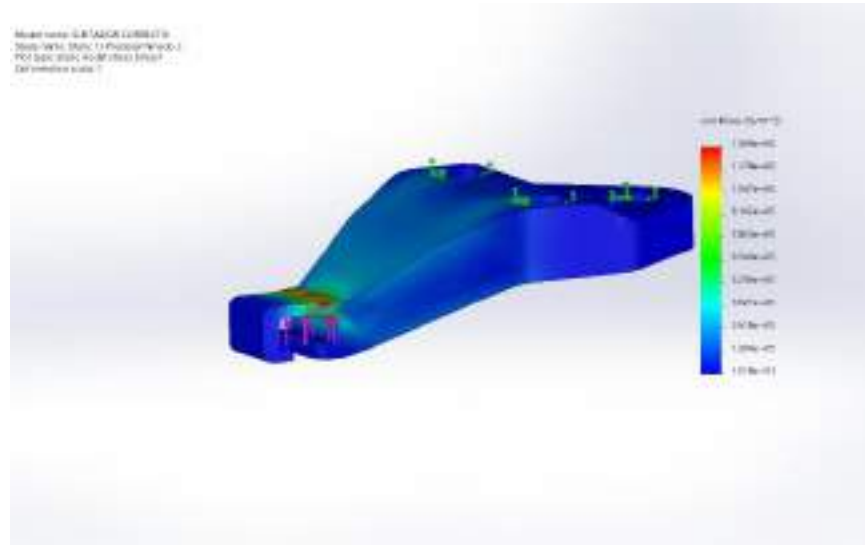


Figura 29. Análisis del esfuerzo al expandir el embolo de la jeringa

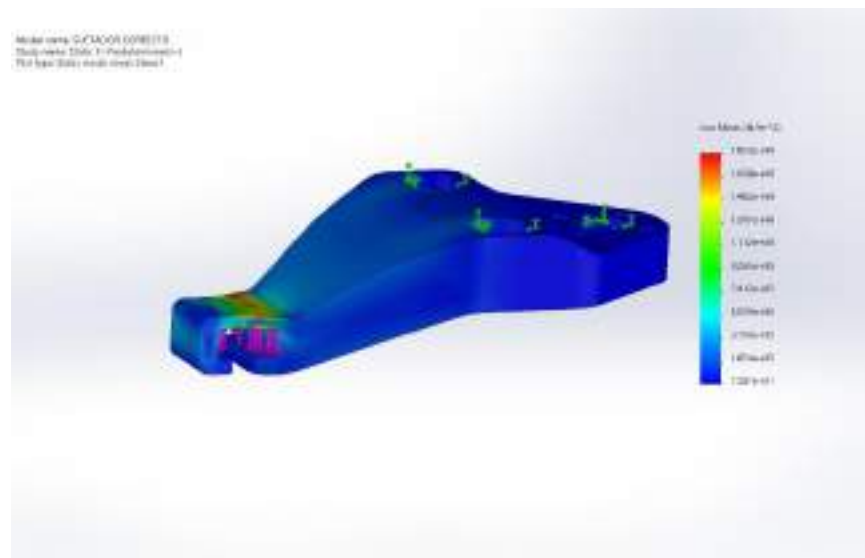


Figura 30. Análisis del esfuerzo al contraer el embolo de la jeringa

Otra pieza que es de relevancia para realizar un análisis de esfuerzos es el sujetador de la jeringa, se evalúa en dos situaciones: durante la expansión, cuando se jala la jeringa como se ilustra en la Figura 31, y durante la compresión, cuando se empuja la jeringa como se observa en la Figura 32.

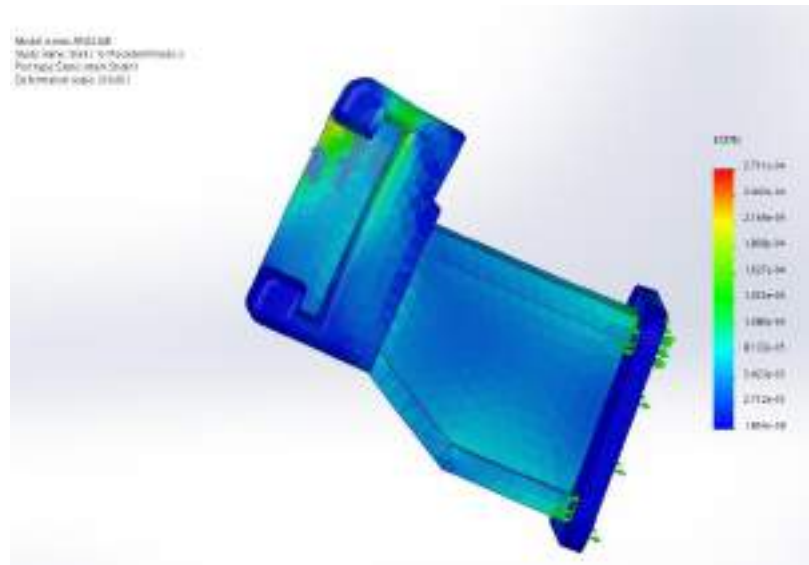


Figura 31. Descripción

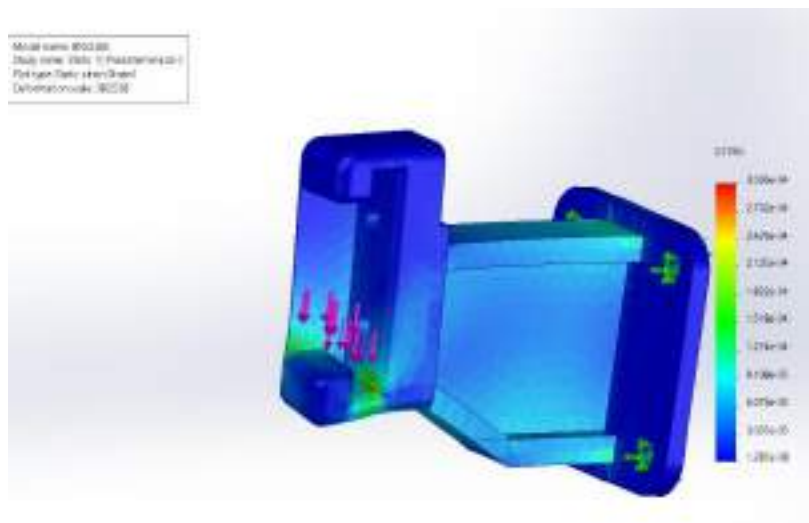
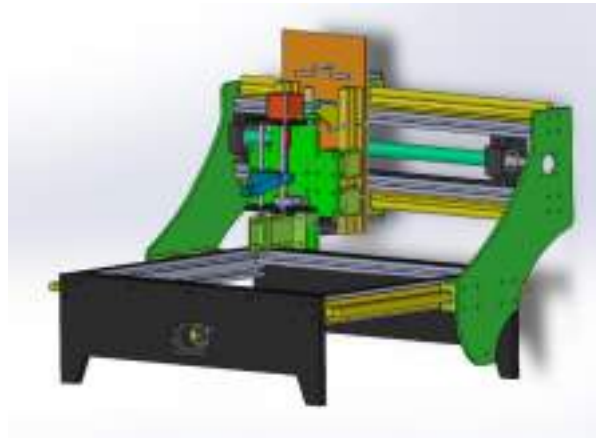
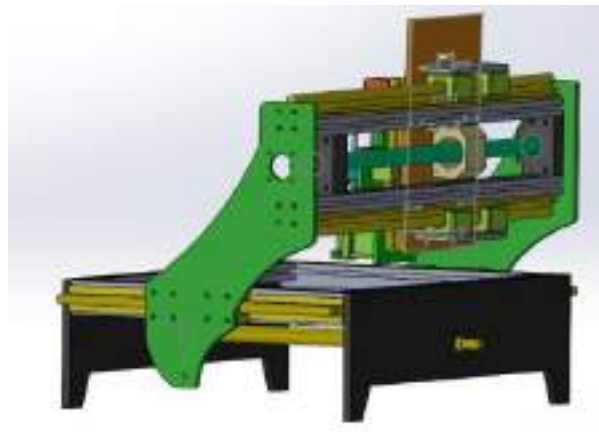


Figura 32. Descripción

Una vez diseñados todos los subsistemas, se unen para formar el sistema principal. Esto proporciona una visión completa del sistema y permite entender cómo interactúan sus componentes entre sí, como se muestra en las Figuras 33 y 34.

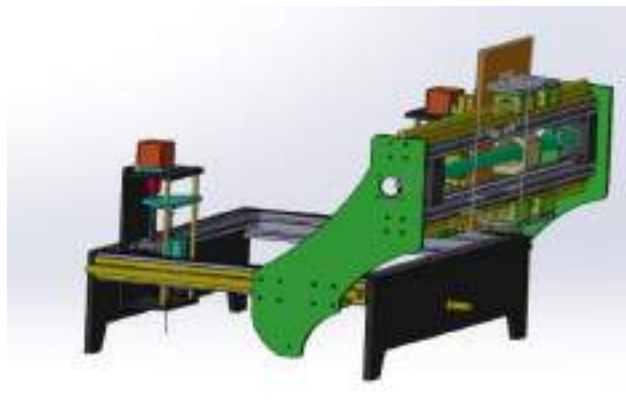


*Figura 33. Vista frontal del sistema de automuestreo.*



*Figura 34. Vista trasera del sistema.*

Para concluir con el diseño del sistema se integra la etapa de inyección dentro de la zona de trabajo como se muestra en la Figura 35.



*Figura 35. Vista del automuestreador con todos los sistemas integrados.*

### 3.2.3 Trayectorias de movimiento

La generación de trayectorias de movimiento del automuestreador, que son necesarias para las tareas de manejo e inyección de muestras, se basa en la descomposición de trayectorias tridimensionales y bidimensionales complejas en movimientos unidimensionales simples. En este sistema, los movimientos unidimensionales se realizan moviendo un solo eje de manera horizontal o vertical. Para una trayectoria bidimensional, se mueven dos ejes al mismo tiempo, mientras que, en una trayectoria tridimensional, se coordinan los movimientos de los tres ejes.

Para describir las diversas trayectorias que sigue la máquina, se ha dividido el área de trabajo en varias zonas, tal como se muestra en la Figura 36.

Se han definido cinco zonas principales:

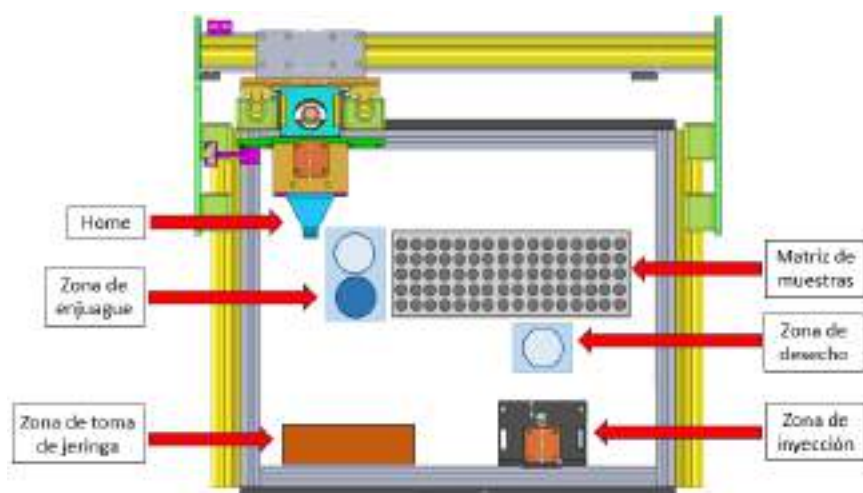


Figura 36. Definición de zonas de trabajo.

- *Home*: Es el punto de partida donde la máquina inicia su operación.
- *Módulo de jeringas*: Es un espacio designado para las jeringas, donde la máquina puede acoplarse y recoger cada una de ellas.
- *Zona de enjuague*: Aquí se desecha el residuo de la muestra y se asegura la limpieza de la jeringa para la siguiente muestra, consta de dos frascos pequeños, uno servirá para desechar los residuos y el otro para tomar la solución de enjuague.
- *Matriz de muestras*: Es el lugar donde se colocan los viales que contienen las muestras a analizar.

- *Zona de inyección:* Es el área donde se coloca la jeringa para inyectar la muestra recolectada y permitir que el espectrómetro de masas de ultra alta resolución comience con el análisis.

Para asegurar el funcionamiento correcto de la máquina, se propone un recorrido bidimensional en los ejes "X" y "Y". Este camino, que se realiza en la superficie de trabajo de la máquina se toma como base de todas las trayectorias y es útil para llevar a cabo las tareas de enjuague, muestreo y los acoples posteriores que se realizan con los subsistemas que conforman la máquina. Esta ruta está compuesta por cinco puntos específicos, como se ilustra en la Figura 37. Esto simplifica la correcta posición de la máquina y la ejecución ordenada y secuencial de las tareas.

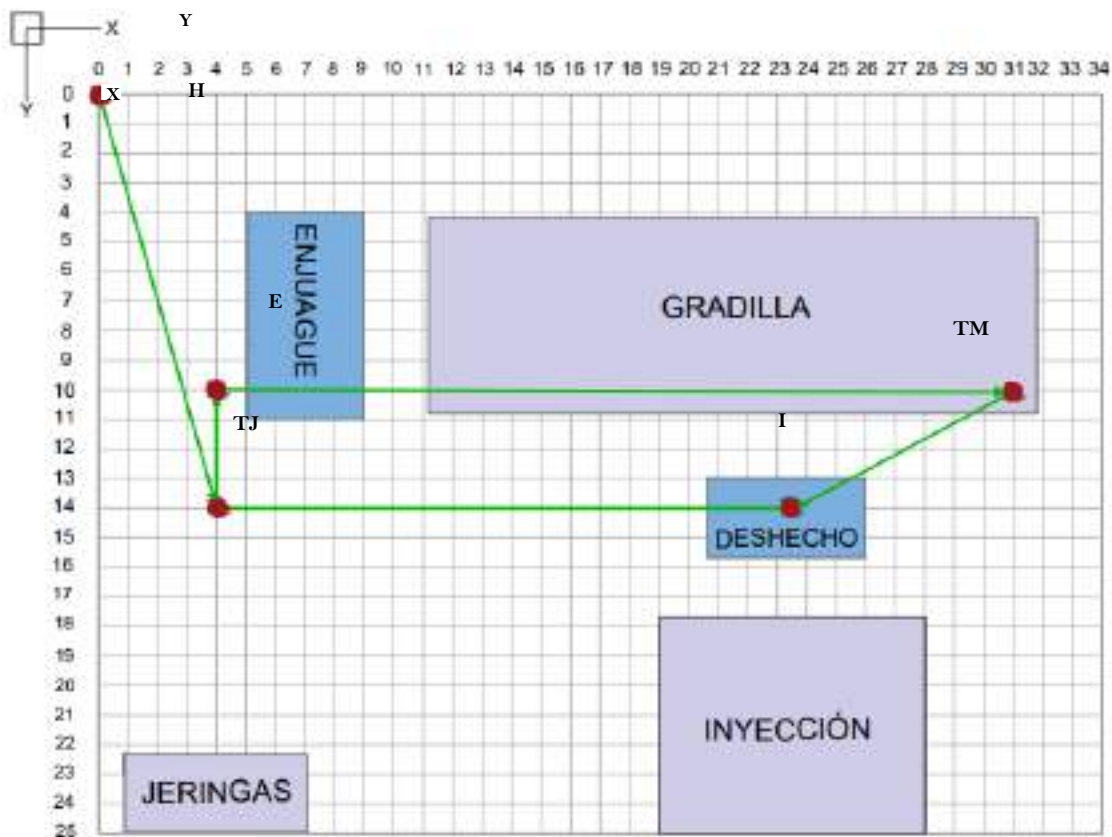


Figura 37. Puntos base para el seguimiento de trayectorias

La ubicación de estos puntos se determinó considerando la disposición de los elementos en el área de trabajo y las zonas específicas destinadas a la ejecución de las tareas (Figura 37).

El plano que se muestra en la Figura 37 se encuentra en centímetros, por lo que se tiene que realizar una conversión a pasos para poder mandar las coordenadas a los motores y ejecutar los movimientos en los ejes, como se muestra a continuación:

Número de pasos calculados utilizando el tornillo sin fin con paso de (5mm)

$$\text{Numero de pasos} = \text{Distancia} * \text{Resolucion}^1$$

$$\text{Numero de pasos} = n(\text{mm}) * 320 \left( \frac{\text{pulsos}}{\text{mm}} \right) \dots (1)$$

A continuación, se muestran las coordenadas que se obtuvieron y su conversión a pasos para cada uno de estos puntos representados de la siguiente forma:

$$(x, y) \rightarrow (x_{\text{pasos}}, y_{\text{pasos}})$$

Donde:

x representa la coordenada en el eje “X” (cm)

y representa la coordenada en el eje “Y” (cm)

→ Indica su equivalente en coordenada

xpasos representa la coordenada en el eje “X” (pasos)

ypasos representa la coordenada en el eje “Y” (pasos)

Las coordenadas de los 5 puntos seleccionados de la Figura 37 son las siguientes:

- Home (H): Es la coordenada del punto inicial de la máquina.  
 $(0,0) \rightarrow (0,0)$
- Tomar jeringa (TJ): Es la coordenada donde se posiciona la maquina tomando como punto de partida la coordenada (H) y posteriormente realiza la tarea de tomar o dejar una jeringa del módulo de jeringas.  
 $(14, 4) \rightarrow (56000, 16000)$
- Enjuagar (E): Es la coordenada donde se posiciona la máquina tomando como punto de partida la coordenada (TJ) y después realiza la tarea de enjuague de jeringa.  
 $(10, 4) \rightarrow (40000, 16000)$
- Tomar muestra (TM): Es la coordenada donde se posiciona la máquina tomando como punto de partida la coordenada (E), finalizado su posicionamiento realiza la toma de muestra.  
 $(10, 31) \rightarrow (40000, 124000)$

---

<sup>1</sup> Para consultar la resolución ir a el apéndice 2

- Inyectar (I): Es la coordenada donde se posiciona la máquina tomando como punto de partida la coordenada (TM) y finalmente deja la jeringa en la estación de inyección y comienza e inyectarse la muestra.

(14, 23.5) → (56000, 94000)

Una vez definidas las coordenadas base, se pueden describir las trayectorias completas que sigue el sistema durante su funcionamiento. Estas trayectorias están representadas por flechas. Como se muestra en la Figura 38 las flechas rojas describen las trayectorias para el manejo de la primera jeringa, la flecha 1 representa el primer desplazamiento que ejecuta el sistema desde el punto de home hasta el módulo de jeringas. La flecha 2 representa el siguiente recorrido de la máquina desde el módulo de jeringas hacia la zona de enjuague.

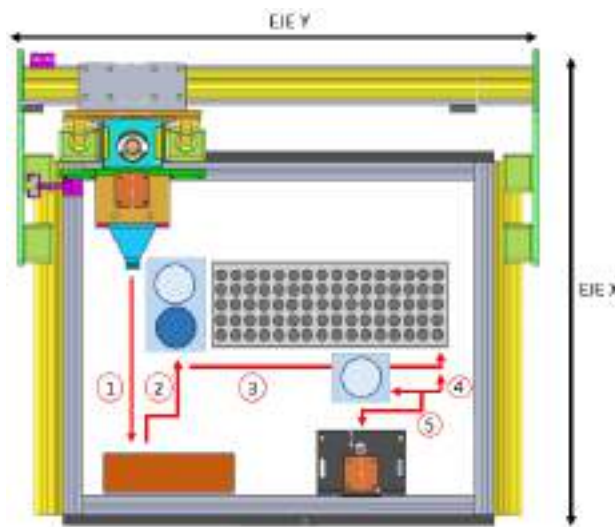


Figura 38. Trayectoria con la primera jeringa.

La flecha 3 representa el desplazamiento de la máquina desde la zona de enjuague hacia la matriz de muestras donde se extrae una pequeña cantidad de muestra con el fin de eliminar las trazas que puedan quedar de la solución de enjuague, la flecha 4 muestra el recorrido que se realiza la máquina desde la matriz de muestra hacia la zona de desecho, aquí se elimina el desecho de la traza de la solución de enjuague para pasar a tomar el volumen total de la muestra correspondiente a  $100 \mu L$  del primer vial. Finalmente, la flecha 5 representa el último movimiento que va desde la matriz de muestras hasta la zona de inyección.

Como se muestra en la Figura 39, las flechas azules describen las trayectorias para el manejo de la segunda jeringa. La flecha 6 describe el desplazamiento del sistema para tomar la segunda jeringa. Posteriormente, la flecha 7 muestra el desplazamiento hacia la zona de enjuague.

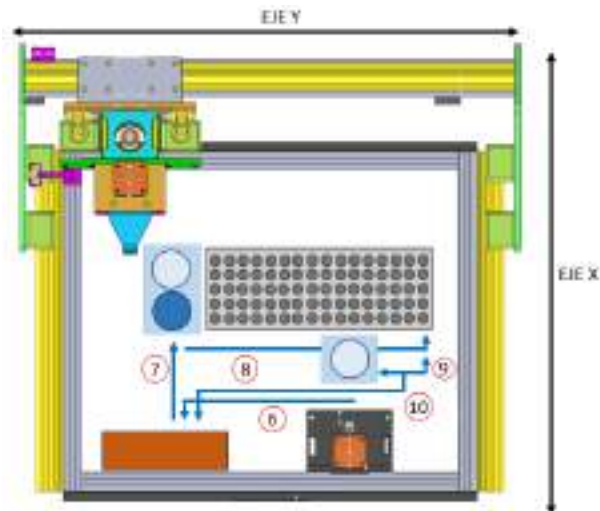


Figura 39. Trayectoria con la segunda jeringa.

La flecha 8 describe el movimiento que se realiza para la toma de la cantidad de muestra que permite eliminar las trazas que puedan quedar de la solución de enjuague, la flecha 9 describe el desplazamiento al desechar la solución de enjuague y se procede a tomar el volumen total de muestra. Finalmente, la flecha 10 muestra el desplazamiento del sistema para volver a colocar la jeringa en el módulo de jeringas y esperar a que se termine de inyectar la primera muestra.

La Figura 40 muestra el manejo de ambas jeringas tras terminar la inyección de la primera muestra. La flecha 11 muestra el desplazamiento que realiza el sistema para tomar la primera jeringa de la zona de inyección y la lleva al módulo de jeringas para dejarla y tomar la segunda jeringa. Luego, la flecha 12 muestra el desplazamiento del sistema para colocar la segunda jeringa en la estación de inyección y que comience la inyección de la segunda muestra.

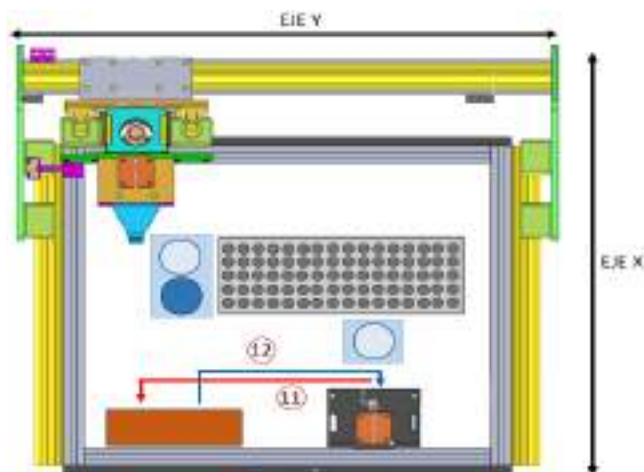


Figura 40. Trayectoria de cambio de jeringa



### 3.3 Selección de materiales y componentes

La selección de materiales es un aspecto fundamental en el proceso de diseño de cualquier producto, su objetivo principal es minimizar los costos a la vez que se cumple con las especificaciones de rendimiento de dicho producto, entre los métodos más empleados se encuentran [41]:

- Materiales de ingeniería de partes similares.
- Método gráfico
- Método asistido por computadora

#### 3.3.1 Consideraciones y criterios de selección

La selección de materiales para el sistema de muestreo automático se realizó por medio del método de materiales de ingeniería de partes similares, el cual, permite elegir el material que se considera más adecuado, con base en la experiencia al emplear materiales que tiene un funcionamiento similar y que han mostrado buenos resultados. Este método también es conocido como método tradicional, y contempla los siguientes criterios:

- *Propiedades:* el material a emplear debe tener el tamaño, forma y pesos requeridos para soportar las condiciones de uso que se le van a dar.
- *Duración:* el tiempo estimado de vida útil de los materiales debe corresponder e incluso supere al tiempo durante el cual van a desempeñar las funciones a las que han sido destinados y ambiente al que están expuestos.
- *Disponibilidad:* se toma en cuenta la disponibilidad del material, si se cuenta con proveedores dentro de la zona geográfica o si es requerida una importación y que tan tardado es dicho proceso.
- *Costo:* el precio del material no debe exceder cierto porcentaje del total del capital y se debe incluir cualquier costo extra de transporte, almacenaje o envío, ya que de no ser así se vería comprometida la factibilidad del proyecto.
- *Calidad:* el material elegido debe satisfacer los requerimientos especificados de manera adecuada, tanto de usabilidad como de durabilidad y resistencia.

#### 3.3.2 Materiales seleccionados

A continuación, se presentan los materiales y equipo esenciales para la construcción del sistema de muestreo automático y el desarrollo del algoritmo computacional, los cuales fueron seleccionados mediante los criterios que se indican en el método antes mencionado y los cálculos que indiquen las especificaciones técnicas requeridas para cada componente. De esta manera, se asegura que cada elemento pueda desempeñar adecuadamente sus funciones en el proceso al mismo tiempo que cumple con las necesidades del sistema.

### 3.3.2.1 Transmisión de movimiento

Se selecciono el husillo de bolas SFU2005 por las siguientes características:

- *Precisión:* el husillo permite una alta precisión en el movimiento lineal, lo cual es crucial en muchas aplicaciones, especialmente en la fabricación de piezas y componentes de precisión.
- *Control del avance:* el uso de un husillo proporciona la posibilidad de controlar el avance del movimiento lineal de manera precisa y ajustable, lo que resulta en una mayor flexibilidad y adaptabilidad a distintas necesidades y requerimientos.
- *Durabilidad y resistencia:* los husillos están diseñados para soportar cargas y esfuerzos elevados, lo que los hace altamente duraderos y resistentes. Esto contribuye a un menor mantenimiento y mayor vida útil de las máquinas y herramientas donde se utilizan.

Es necesario el cálculo del torque para mover el husillo, debido a que se necesita para la selección del motor, se realizó utilizando el catálogo **THK HUSILLOS DE BOLAS [49]**, donde existe una guía que permite realizar el cálculo de esta variable contemplando aspectos como la aceleración, velocidad máxima, momentos de inercia, velocidad máxima de rotación y la aceleración angular los cuales son necesarios para determinar el torque necesario para mover el husillo de bolas.

Para mover el husillo de bolas se realiza el cálculo de torque y fuerza considerando diversos aspectos como la masa que se desplaza, la orientación del eje y las características del husillo seleccionado. Por lo que se tienen dos casos de análisis, el primero cuando el montaje es horizontal y el segundo cuando el montaje es vertical.

La Figura 41 muestra el primer caso cuando se realiza un montaje horizontal, además ilustra las variables específicas que se toman en cuenta para el cálculo de la fuerza y el torque.

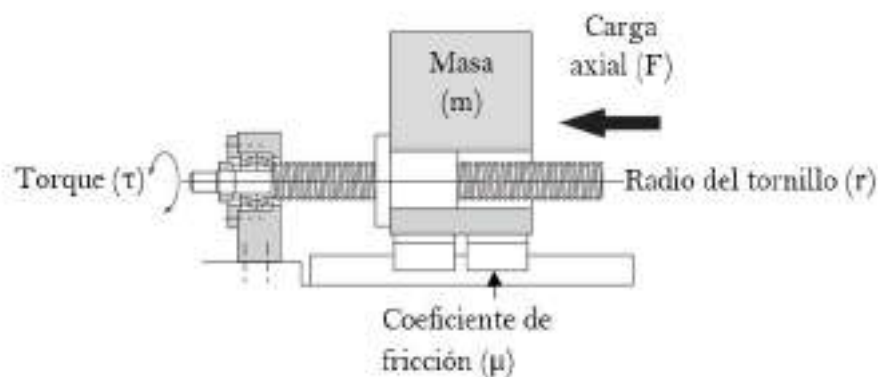


Figura 41. Desplazamiento horizontal.

Las Ecuaciones 1-6 se usan para realizar el cálculo de la carga axial (F) en distintos momentos del desplazamiento de la masa para un montaje horizontal.

$$F_1 = \mu * m * g + f + m * \alpha \quad (1)$$

$$F_2 = \mu * m * g + f \quad (2)$$

$$F_3 = \mu * m * g + f - m * \alpha \quad (3)$$

$$F_4 = -\mu * m * g - f - m * \alpha \quad (4)$$

$$F_5 = -\mu * m * g - f \quad (5)$$

$$F_6 = -\mu * m * g - f + m * \alpha \quad (6)$$

Donde:

$F_1$  = Carga axial durante la aceleración hacia adelante [N]

$F_2$  = Carga axial durante el movimiento uniforme hacia adelante [N]

$F_3$  = Carga axial durante la desaceleración hacia adelante [N]

$F_4$  = Carga axial durante la aceleración hacia atrás [N]

$F_5$  = Carga axial durante el movimiento uniforme hacia atrás [N]

$F_6$  = Carga axial durante la desaceleración hacia atrás [N]

$g$  = Aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$\mu$  = Coeficiente de fricción de la superficie de la guía

$m$  = Masa transferida [kg]

$f$  = Resistencia de la guía sin carga (N)

$\alpha$  = Aceleración [m/s<sup>2</sup>]

Si la carga a desplazar está por debajo del 10% de la carga máxima dinámica que puede soportar el husillo de bolas, la resistencia de la guía sin carga dependerá únicamente de la resistencia del sello del rodamiento lineal. La resistencia del sello depende de su estado, así como del estado del lubricante. Sin embargo, eso no cambia proporcionalmente con la carga aplicada, lo que comúnmente se expresa con un valor constante de 2 a 5 N **según el Catálogo general 172s de guías lineales [50]**, también influye el número de rodamientos que se utilicen y el número de sellos.

Para calcular la velocidad máxima se utiliza la Ecuación 7.

$$V_{max} = \frac{l}{t} \quad (7)$$

Donde:

$V_{max}$  = Velocidad máxima [m/s]

$l$  = Longitud del eje [m]

$t$  = tiempo total de avance [s]

Para calcular la aceleración se utiliza la Ecuación 8

$$\alpha = \frac{V_{max}}{t_a} \quad (8)$$

Donde:

$V_{max}$  = Velocidad máxima [m/s]

$t_a$  = Tiempo de aceleración [s]

La Figura 42 muestra el segundo caso cuando se tiene un montaje vertical, además ilustra las variables específicas que se toman en cuenta para el cálculo del torque.

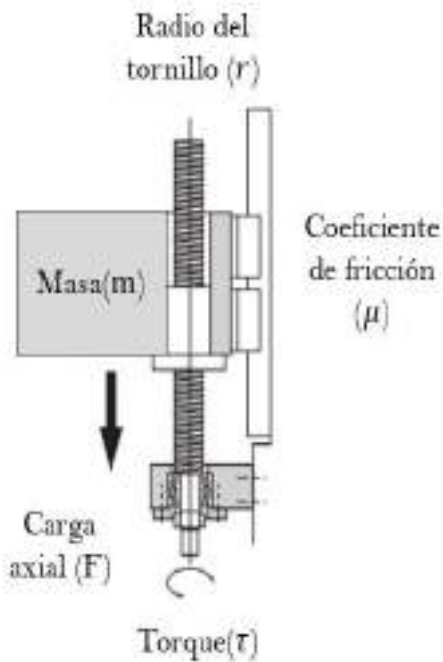


Figura 42. Desplazamiento vertical.

Las Ecuaciones 9-14 se usan para realizar el cálculo de la carga axial (F) en distintos momentos del desplazamiento de la masa para un montaje vertical.

$$F_1 = m * g + f + m * \alpha \quad (9)$$

$$F_2 = m * g + f \quad (10)$$

$$F_3 = m * g + f - m * \alpha \quad (11)$$

$$F_4 = -m * g - f - m * \alpha \quad (12)$$

$$F_5 = -m * g - f \quad (13)$$

$$F_6 = -m * g - f + m * \alpha \quad (14)$$

Donde:

$F_1$  = Carga axial durante la aceleración hacia arriba [N]

$F_2$  = Carga axial durante el movimiento uniforme hacia arriba [N]

$F_3$  = Carga axial durante la desaceleración hacia arriba [N]

$F_4$  = Carga axial durante la aceleración hacia abajo [N]

$F_5$  = Carga axial durante el movimiento uniforme hacia abajo [N]

$F_6$  = Carga axial durante la desaceleración hacia abajo [N]

$m$  = Masa transferida [kg]

$f$  = Resistencia de la guía sin carga [N]

El cálculo del torque requerido debido a una carga exterior ( $\tau_1$ ) utilizando la Ecuación 15.

$$\tau_1 = \frac{F * Ph}{2000 * \pi * n} \quad (15)$$

Donde:

$\tau_1$  = Par de torsión de fricción debido a una carga externa [Nm]

$F$  = Carga axial durante el movimiento uniforme [N]

$Ph$  = Paso del husillo de bolas [mm]

$n$  = Eficiencia del tornillo

También se considera el torque que se requiere en la aceleración ( $\tau_2$ ) y se calcula con la Ecuación 16.

$$\tau_2 = J * \omega \quad (16)$$

Donde:

$\tau_2$  = Par de torsión requerido para la aceleración [Nm]

$J$  = Momento de Inercia del sistema [kgm<sup>2</sup>]

$\omega$  = Aceleración angular [rad/s<sup>2</sup>]

El momento de inercia del sistema (J) se calcula contemplando el momento de inercia del eje del husillo de bolas ( $J_{rotacion}$ ) y el momento de inercia de la masa transportada ( $J_{traslacion}$ ). Por lo tanto, el momento de inercia total del sistema se calcula con la Ecuación 17.

$$J = (J_{rotacion} + J_{traslacion}) * A^2 \quad (17)$$

Donde:

$J$  = Momento de inercia [kgm<sup>2</sup>]

$J_{rotacion}$  = Momento de inercia del eje del husillo [ $kgm^2$ ]

$J_{traslacion}$  = Momento de inercia de la masa [ $kgm^2$ ]

$A$  = Proporción de reducción

Para calcular el momento de inercia del eje ( $J_{rotacion}$ ) se utiliza la Ecuación 18 y se consultan las tablas de especificaciones para conocer el momento de inercia por longitud de unidad ( $J_s$ ).

$$J_{rotacion} = J_s * l \quad (18)$$

Donde:

$J_{rotacion}$  = Momento de inercia del eje del husillo [ $kgm^2$ ]

$J_s$  = Momento de inercia del eje del husillo por longitud de unidad [ $kgm^2$ ]

$l$  = Longitud del eje [m]

El momento de inercia de traslación ( $J_{traslacion}$ ) se calcula con la Ecuación 19.

$$J_{traslacion} = m * \left( \frac{Ph}{2 * \pi} \right)^2 * 10^{-6} \quad (19)$$

Donde:

$J_{traslacion}$  = Momento de inercia de traslación [ $kgm^2$ ]

$m$  = Masa transferida [kg]

$Ph$  = Paso del husillo de bolas [mm]

La aceleración angular ( $\omega$ ) se calcula utilizando la Ecuación 20.

$$\omega = \frac{2 * \pi * N_{max}}{60 * t_a} \quad (20)$$

Donde:

$\omega$  = Aceleración angular [ $rad/s^2$ ]

$N_{max}$  = Velocidad máxima de rotación del husillo de bolas [ $min^{-1}$ ]

$t_a$  = Tiempo de aceleración [s]

La Velocidad máxima de rotación ( $N_{max}$ ) se calcula usando la Ecuación 21.

$$N_{max} = \frac{V_{max} * 60 * 10^3}{Ph} \quad (21)$$

Donde:

$N_{max}$  = Velocidad máxima de rotación [ $min^{-1}$ ]

$V_{max}$  = Velocidad máxima [m/s]

$Ph$  = Paso del husillo de bolas [mm]

Por lo tanto, para calcular el par de torsión de rotación requerido durante la aceleración ( $\tau_t$ ) se utiliza la Ecuación 22.

$$\tau_t = \tau_1 + \tau_2 \quad (22)$$

Donde:

$\tau_t$  = Par de rotación requerido durante la aceleración [Nm]

$\tau_1$  = Par de torsión de fricción debido a una carga externa [Nm]

$\tau_t$  = Par de torsión requerido para la aceleración [Nm]

La Figura 43 muestra la gráfica que permite determinar los coeficientes de fricción de los husillos de bolas conforme su eficiencia y su ángulo de paso.

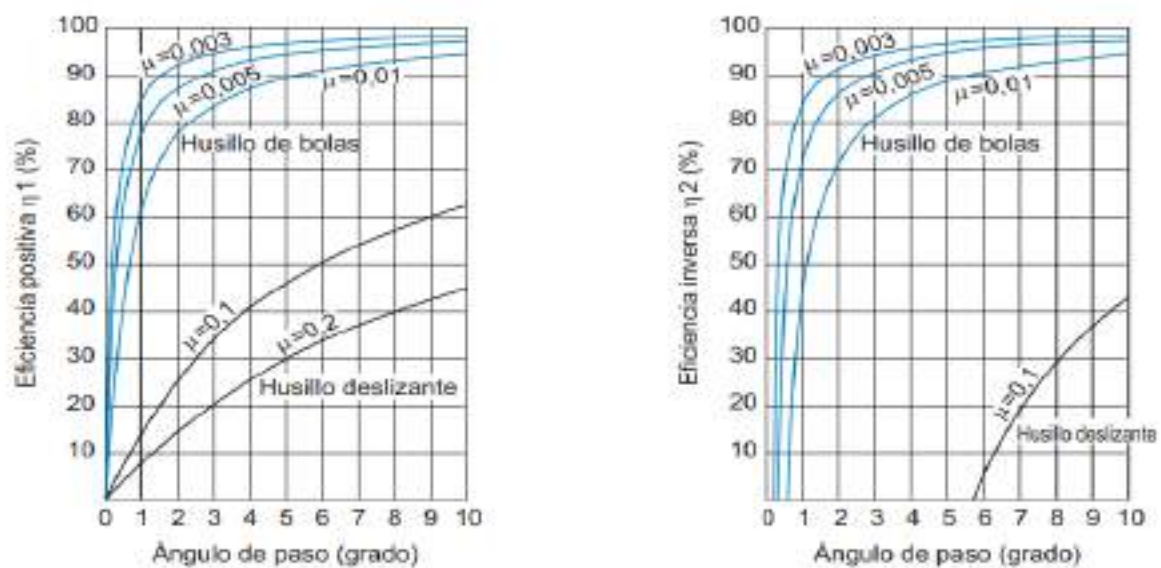


Figura 43. Grafica de coeficiente de fricción.

La inercia del eje se obtuvo de las tablas de especificaciones del husillo, el cual se eligió considerando las dimensiones de la tuerca como se muestra en la Figura 44.

Dimensiones de la tuerca						Momento de inercia del eje del husillo/mm kg·cm <sup>2</sup> /mm
Longitud total L <sub>1</sub>	H	B <sub>1</sub>	PCD	d <sub>1</sub> ×d <sub>2</sub> ×h	Orificio de engrasado A	
53	11	42	47	5,5×9,5×5,5	M6×1	8,08×10 <sup>-3</sup>
56	10	46	50	4,5×8×4,5	M6×1	8,08×10 <sup>-3</sup>
53	11	42	51	5,5×9,5×5,5	M6×1	1,29×10 <sup>-2</sup>
56	11	45	55	5,5×9,5×5,5	M6×1	1,29×10 <sup>-2</sup>
48	11	37	57	5,5×9,5×5,5	M6×1	1,29×10 <sup>-2</sup>
55	11	44	61	5,5×9,5×5,5	M6×1	1,97×10 <sup>-2</sup>

Figura 44. Tabla de especificaciones del husillo de bolas.

El cálculo del torque del husillo en el eje “X” se realizó utilizando los datos de Tabla 4. Los cálculos completos se encuentran en el **Apéndice 2 (cálculos)**, y los resultados se han resumido en la Tabla 5.

Tabla 4. Datos para el cálculo de torque y carga axial en el eje “X”.

Datos	Valor	Observaciones
Masa por mover ( $m$ )	15 kg	
Peso ( $m * g$ )	147.15 N	
Coeficiente de fricción ( $\mu$ )	0.01	
Eficiencia	0.8~0.9	
Longitud del husillo ( $l$ )	400 mm	
Tiempo de aceleración ( $t_a$ )	0.1 s	
Tiempo total de avance ( $t$ )	6.667 s	
Resistencia de la guía lineal ( $f$ )	32 N	Cada rodamiento lineal cuenta con 2 sellos y se cuenta con 4 rodamientos lineales cada sello se considera de (4N)
Paso ( $Ph$ )	5 mm	
Inercia del eje ( $J$ )	0.0197 kgcm <sup>2</sup>	Por milímetro de longitud
Proporción de reducción ( $A$ )	1	Acople directo
Desplazamiento horizontal		

Tabla 5. Resultados de cálculos para el eje “X” (Ver Apéndice 2).

Resultados eje “X”			
Velocidad máxima ( $V_{max}$ )	<b>0.0454</b> $\left[\frac{m}{s}\right]$	Momento de inercia de traslación ( $J_{traslacion}$ )	<b>9.4988 * 10<sup>-6</sup> kgm<sup>2</sup></b>
Aceleración ( $\alpha$ )	<b>0.454</b> $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Momento de inercia de rotación ( $J_{rotacion}$ )	<b>0.000788 kgm<sup>2</sup></b>
Carga axial ( $F_2$ )	<b>33.4715 N</b>	Momento de inercia del sistema ( $J$ )	<b>0.0007974 kgm<sup>2</sup></b>
Par por fricción debido a una carga exterior ( $\tau_1$ )	<b>0.0332 Nm</b>	Para requerido en la aceleración ( $\tau_2$ )	<b>0.4509 Nm</b>
Velocidad máxima de rotación ( $Nm$ )	<b>540 min<sup>-1</sup></b>	Par requerido durante la aceleración ( $\tau_t$ )	<b>0.4842 Nm</b>
Aceleración angular ( $\omega$ )	<b>565.488</b> $\left[\frac{m}{s^2}\right]$		

El cálculo del torque del husillo en el eje “Y” se realizó utilizando los datos de Tabla 6. Los cálculos completos se encuentran en el **Apéndice 2 (cálculos)**, y los resultados se han resumido en la Tabla 7.



Tabla 6. Datos para el cálculo de torque y carga axial en el eje “Y”.

Datos	Valor	Observaciones
Masa por mover ( $m$ )	15 kg	
Peso ( $m * g$ )	147.15 N	
Coefficiente de fricción ( $\mu$ )	0.01	
Eficiencia	0.8~0.9	
Longitud del husillo ( $l$ )	500 mm	
Tiempo de aceleración ( $t_a$ )	0.1 s	
Tiempo total de avance ( $t$ )	8.8 s	
Resistencia de la guía lineal( $f$ )	32 N	Cada rodamiento lineal cuenta con 2 sellos y se cuenta con 4 rodamientos lineales cada sello se considera de (4N)
Paso ( $Ph$ )	5 mm	
Inercia del eje ( $J$ )	0.0197kgcm <sup>2</sup>	Por milímetro de longitud
Proporción de reducción ( $A$ )	1	Acople directo
Desplazamiento horizontal		

Tabla 7. Resultados de cálculos para el eje “Y” (Ver Apéndice 2).

Resultados eje “Y”			
Velocidad máxima ( $V_{max}$ )	0.0454 $\left[\frac{m}{s}\right]$	Momento de inercia de traslación ( $J_{traslacion}$ )	9.4988 * 10 <sup>-6</sup> kgm <sup>2</sup>
Aceleración ( $\alpha$ )	0.454 $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Momento de inercia de rotación ( $J_{rotacion}$ )	0.000985kgm <sup>2</sup>
Carga axial ( $F_2$ )	33.4715N	Momento de inercia del sistema ( $J$ )	0.0009944kgm <sup>2</sup>
Par por fricción debido a una carga exterior ( $\tau_1$ )	0.0332Nm	Para requerido en la aceleración ( $\tau_2$ )	0.5623Nm
Velocidad máxima de rotación (Nm)	540 min <sup>-1</sup>	Par requerido durante la aceleración ( $\tau_t$ )	0.5956Nm
Aceleración angular ( $\omega$ )	565.488 $\left[\frac{m}{s^2}\right]$		

El cálculo del torque del husillo en el eje “Z” se realizó utilizando los datos de Tabla 8. Los cálculos completos se encuentran en el **Apéndice 2 (cálculos)**, y los resultados se han resumido en la Tabla 9.

Tabla 8. Datos para el cálculo de torque y carga axial en el eje “Z”.

Datos	Valor	Observaciones
Masa por mover ( $m$ )	4 kg	
Peso ( $m * g$ )	39.24 N	

Coeficiente de fricción ( $\mu$ )	0.01	
Eficiencia	0.8~0.9	
Longitud del husillo ( $l$ )	200 mm	
Tiempo de aceleración ( $t_a$ )	0.1 s	
Tiempo total de avance ( $t$ )	4.4 s	
Resistencia de la guía lineal( $f$ )	32 N	Cada rodamiento lineal cuenta con 2 sellos y se cuenta con 4 rodamientos lineales cada sello se considera de (4N)
Paso ( $Ph$ )	5 mm	
Inercia del eje ( $J$ )	0.0197kgcm <sup>2</sup>	Por milímetro de longitud
Proporción de reducción ( $A$ )	1	Acople directo
Desplazamiento vertical		

Tabla 9 .Resultados de cálculos para el eje “Z” (Ver Apéndice 2).

Resultados eje “Y”			
Velocidad máxima ( $V_{max}$ )	<b>0.0454</b> $\left[\frac{m}{s}\right]$	Momento de inercia de traslación ( $J_{traslacion}$ )	<b>25339 * 10<sup>-12</sup> kgm<sup>2</sup></b>
Aceleración ( $\alpha$ )	<b>0.454</b> $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Momento de inercia de rotación ( $J_{rotacion}$ )	<b>0.000394kgm<sup>2</sup></b>
Carga axial ( $F_1$ )	<b>71.24N</b>	Momento de inercia del sistema ( $J$ )	<b>0.000394kgm<sup>2</sup></b>
Par por fricción debido a una carga exterior ( $\tau_1$ )	<b>0.0708Nm</b>	Para requerido en la aceleración ( $\tau_2$ )	<b>0.2228Nm</b>
Velocidad máxima de rotación ( $Nm$ )	<b>540 min<sup>-1</sup></b>	Par requerido durante la aceleración ( $\tau_t$ )	<b>0.2936Nm</b>
Aceleración angular ( $\omega$ )	<b>565.488</b> $\left[\frac{m}{s^2}\right]$		

Para el cálculo del torque del eje de inyección y toma de muestra se realiza un análisis de las fuerzas que intervienen para desplazar una masa por medio de tornillos de potencia debido a que se utilizaron espárragos como transmisión de movimiento para estos ejes.

Los tornillos de potencia cuentan con distintas especificaciones que se toman en cuenta para el cálculo de la fuerza y el torque necesario para mover una carga como lo ilustra la Figura 45.

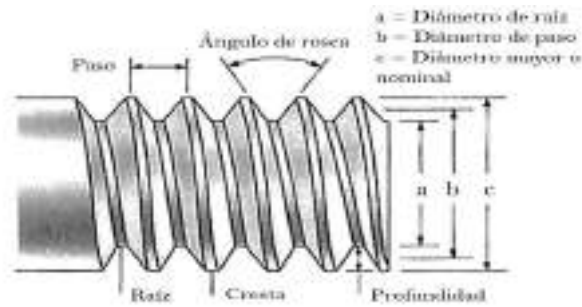


Figura 45. Especificación de un husillo de bolas.

Para facilitar el análisis se toma un solo filete del husillo de bolas y se le coloca la masa que se desea mover como se muestra en la Figura 46.

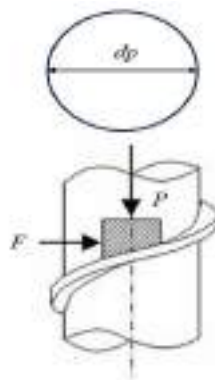


Figura 46. Análisis de la carga en el husillo de bolas.

Donde:

$P = \text{Carga}$

$F_e = \text{Fuerza de empuje}$

Para comprender de mejor manera el análisis de las fuerzas que intervienen en el husillo de bolas se descompone el filete de manera que forme un triángulo rectángulo. El análisis se lleva a cabo contemplando 2 casos como se muestra en la Figura 47 el primero cuando se quiere subir la carga (a) y el segundo cuando se desea bajar la carga (b)

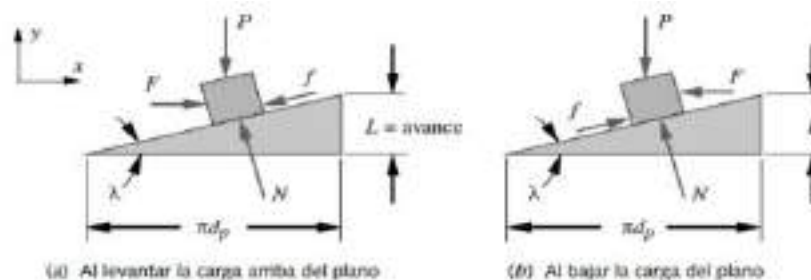


Figura 47. Análisis para subir y bajar carga

Donde:

$f = \text{Fuerza de fricción [N]}$

$N = \text{Normal [N]}$

$\lambda = \text{Angulo de avance}$

$d_p = \text{Diámetro de paso [m]}$

$\mu = \text{Coeficiente de fricción acero – acero}$

$L = \text{avance [m]}$

Tomar en cuenta que las Ecuaciones 23-24 se utilizan para la calcular el torque en variables que conocemos.

$$f = N\mu \quad (23)$$

$$Tg(\lambda) = \frac{L}{\pi d_p} \quad (24)$$

Análisis para subir una carga

Se realiza una sumatoria de fuerzas en el eje “X” y “Y” para poder obtener el valor de la fuerza de empuje ( $F_e$ ) se utiliza la Ecuación (25), para el cálculo de la normal (N) se utiliza la Ecuación (26).

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_x = F_e - f\cos(\lambda) - N\sin(\lambda)$$

$$F_e = f\cos(\lambda) + N\sin(\lambda)$$

$$F_e = N\mu\cos(\lambda) + N\sin(\lambda)$$

$$F_e = N * (\mu\cos(\lambda) + \sin(\lambda)) \quad (25)$$

$$\sum F_y = 0$$

$$\sum F_y = -P - f\sin(\lambda) + N\cos(\lambda)$$

$$P = -f\sin(\lambda) + N\cos(\lambda)$$

$$P = N * (-\mu\sin(\lambda) + \cos(\lambda))$$

$$N = \frac{P}{(\cos(\lambda) - \mu\sin(\lambda))} \quad (26)$$

Ahora se sustituye la Ecuación 26 en la Ecuación 25.

$$F_e = \frac{P * (\mu \cos(\lambda) + \operatorname{sen}(\lambda))}{(\cos(\lambda) - \mu \operatorname{sen}(\lambda))}$$

Se deja en términos de  $Tg(\lambda)$

$$F_e = \frac{P * (\mu + Tg(\lambda))}{(1 - \mu Tg(\lambda))} \quad (27)$$

Se sustituye la Ecuación 24 en la Ecuación 27 para tener la fuerza de empuje (F) en términos del avance y el diámetro de paso.

$$F_e = \frac{P * \left( \mu + \frac{L}{\pi dp} \right)}{\left( 1 - \mu \frac{L}{\pi dp} \right)}$$

La Ecuación 28 se utiliza para calcular la fuerza necesaria para mover la carga hacia arriba ( $F_e$ ).

$$F_e = \frac{P * (\mu \pi dp + L)}{(\pi dp - \mu L)} \quad (28)$$

Para mover la carga hacia abajo se utiliza la Ecuación 29.

$$F_e = \frac{P * (\mu \pi dp - L)}{(\pi dp + \mu L)} \quad (29)$$

Por último, se debe tener en cuenta el tipo de rosca que se tiene, si la rosca es de tipo cuadrada se utiliza la ecuación 28 y 29, si no es el caso se debe considerar el ángulo de rosca es decir que la formula sufrirá un pequeño cambio la Figura 48 muestra una rosca tipo ACME.

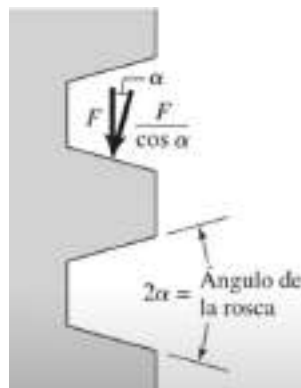


Figura 48. Rosca tipo ACME.

Por lo tanto, si la rosca no es de tipo cuadrada se utilizan las siguientes Ecuaciones:

Para mover una carga hacia arriba

$$F_e = \frac{P * (\mu * \pi * dp * \sec(\alpha) + L)}{(\pi * dp - \mu * L * \sec(\alpha))} \quad (30)$$

Para mover una carga hacia abajo

$$F_e = \frac{P * (\mu * \pi * dp * \sec(\alpha) - L)}{(\pi * dp + \mu * L * \sec(\alpha))} \quad (31)$$

Considerando que el torque se calcula utilizando la Ecuación 32.

$$\tau_{total} = F_e * D \quad (32)$$

Donde:

$\tau_{total}$  = Torque del tornillo [Nm]

$F_e$  = Fuerza de empuje [N]

$D$  = Distancia[m]

Se considera que la distancia es la mitad del diámetro de paso del tornillo, por lo que al sustituir en la Ecuación 31 en la Ecuación 32 tenemos los siguiente:

Torque necesario para mover una carga hacia arriba ( $\tau_{tu}$ )

$$\tau_{tu} = \frac{P * dp(\mu * \pi * dp * \sec(\alpha) + L)}{2 * (\pi * dp - \mu * L * \sec(\alpha))} \quad (33)$$

Torque necesario para mover una carga hacia abajo ( $\tau_t$ )

$$\tau_{td} = \frac{P * dp(\mu * \pi * dp * \sec(\alpha) - L)}{2 * (\pi * dp + \mu * L * \sec(\alpha))} \quad (34)$$

También se debe considerar el torque que se genera en la tuerca del husillo de bolas para esto se utiliza la Ecuación 35.

$$\tau_c = \frac{P * \mu * dc}{2} \quad (35)$$

Donde:

$\tau_c$  = Torque en el collarín [Nm]

$P$  = carga [N]

$\mu$  = Coeficiente de fricción acero – acero

$dc$  = diámetro del collarín [m]

Por lo tanto, el torque total ( $\tau_{TOTAL}$ ) para el esparrago se calcula utilizando la Ecuación (36) considerando si la masa se mueve hacia arriba o hacia abajo.

$$\tau_{TOTAL} = \tau_{t u o t d} + \tau_c \quad (36)$$

El cálculo del torque del husillo en el eje “Toma de muestra” y en el eje “Inyección” se realizó utilizando los datos de Tabla 10. Los cálculos completos se encuentran en el **Apéndice 2 (cálculos)**, y los resultados se han resumido en la Tabla 11 y Tabla 12.

Tabla 10. Datos para el cálculo de torque y carga axial en el eje “Toma de muestra” y “inyección”.

Datos	Valor
Masa para desplazar ( $m$ )	1kg
Peso ( $P$ )	9.81N
Coeficiente de fricción acero – acero ( $\mu$ )	0.51
Diámetro de paso ( $dp$ )	0.0075m
diámetro del collarín ( $dc$ )	0.007m
Angulo de rosca ( $\alpha$ )	15°
Avance ( $L$ )	0.001m

Tabla 11. Resultados de los cálculos eje "Toma de muestra" (Apéndice 2).

Resultados eje “Toma de muestra”	
Fuerza para mover una carga hacia arriba ( $F_e$ )	5.7227N
Fuerza para mover una carga hacia abajo ( $F_e$ )	4.6575 N
Torque necesario para mover una carga hacia arriba ( $\tau_{tu}$ )	0.0214 Nm
Torque necesario para mover una carga hacia abajo ( $\tau_{td}$ )	0.0174 Nm
Torque del collarín ( $\tau_c$ )	0.0175Nm
Torque total hacia arriba ( $\tau_{TOTAL}$ )	0.0389 Nm
Torque total hacia abajo ( $\tau_{TOTAL}$ )	0.0349 Nm

Tabla 12. Resultados de los cálculos eje "inyección" (Apéndice 2).

Resultados eje “Inyección”	
Fuerza para mover una carga hacia arriba ( $F_e$ )	5.7227N
Fuerza para mover una carga hacia abajo ( $F_e$ )	4.6575 N
Torque necesario para mover una carga hacia arriba ( $\tau_{tu}$ )	0.0214 Nm
Torque necesario para mover una carga hacia abajo ( $\tau_{td}$ )	0.0174 Nm
Torque del collarín ( $\tau_c$ )	0.0175Nm
Torque total hacia arriba ( $\tau_{TOTAL}$ )	0.0389 Nm
Torque total hacia abajo ( $\tau_{TOTAL}$ )	0.0349 Nm

### 3.3.2.2 Motor a pasos

Se seleccionaron motores a pasos ya que estos son comúnmente utilizados en la fabricación de máquinas CNC debido a que permiten realizar el desplazamiento de cada uno de los ejes de la máquina sin manipulación humana directa y proporcionan movimiento mecánico según la secuencia de energización entregada por su correspondiente controlador. Los motores normalmente usados tipo stepper son los motores unipolares, bipolares e híbridos.

- **Eje X**

Se optó por el motor NEMA 23 dado que su torque es mayor que el calculado para el husillo ( $1.2 \text{ Nm} > 0.4842 \text{ Nm}$ ), por lo que se puede concluir que es una elección adecuada para el eje “X” del sistema ya que cumple con el torque necesario para el requerimiento de carga asegurando un correcto funcionamiento de acuerdo con la recomendación del fabricante, que indica que el motor NEMA 23 debe operar entre el 80% y 100% de su capacidad total de torque.

- **Eje Y**

Se optó por el motor NEMA 23 dado que su torque es mayor que el calculado para el husillo ( $1.2 \text{ Nm} > 0.5956 \text{ Nm}$ ), por lo que se puede concluir que es una elección adecuada para el eje “Y” del sistema ya que cumple con el torque necesario para el requerimiento de carga asegurando un correcto funcionamiento de acuerdo con la recomendación del fabricante, que indica que el motor NEMA 23 debe operar entre el 80% y 100% de su capacidad total de torque.

- **Eje Z**

Se optó por el motor NEMA 17 dado que su torque es mayor que el calculado para el husillo ( $0.45 \text{ Nm} > 0.2936 \text{ Nm}$ ), por lo que se puede concluir que es una elección adecuada para el eje “Z” del sistema ya que cumple con el torque necesario para el requerimiento de carga asegurando un correcto funcionamiento de acuerdo con la recomendación del fabricante, que indica que el motor NEMA 17 debe operar entre el 80% y 100% de su capacidad total de torque.

- **Eje de Inyección**

Se optó por el motor NEMA 14 dado que su torque es mayor que el calculado para el husillo ( $0.018 \text{ Nm} > 0.0389 \text{ Nm}$ ), por lo que se puede concluir que es una elección adecuada para el eje de inyección del sistema ya que cumple con el torque necesario para el requerimiento de carga asegurando un correcto funcionamiento de acuerdo con la recomendación del fabricante, que indica que el motor NEMA 14 debe operar entre el 80% y 100% de su capacidad total de torque.



#### ▪ Eje de toma de muestra

Se optó por el motor NEMA 14 dado que su torque es mayor que el calculado para el husillo ( $0.018 \text{ Nm} > 0.0389 \text{ Nm}$ ), por lo que se puede concluir que es una elección adecuada para el eje de toma de muestra del sistema ya que cumple con el torque necesario para el requerimiento de carga asegurando un correcto funcionamiento de acuerdo con la recomendación del fabricante, que indica que el motor NEMA 14 debe operar entre el 80% y 100% de su capacidad total de torque.

#### 3.3.2.3 Driver TB6600

Los motores a pasos seleccionados requieren 200 pasos para ejecutar una revolución debido a que su ángulo de paso es de  $1.8^\circ$ . Un controlador de micropasos como el TB6600 brinda resoluciones más altas al permitir ubicaciones de pasos intermedios. Esto se consigue energizando las bobinas con niveles de corriente intermedios.

Por ejemplo, al conducir un motor en el modo de  $1/2$  paso, el motor de 200 pasos por revolución dará 400 micropasos por revolución.

La configuración de los micropasos del TB6600 se puede cambiar de acuerdo con la aplicación que se desea ejecutar, esto se realiza, activando o desactivando los interruptores DIP del controlador.

Además, el driver TB6600 tiene un voltaje de entrada con un rango que va desde 9V a 42V, y es capaz de soportar picos de corriente de 4 A, lo que es suficiente para la mayoría de los motores a pasos comerciales.

#### 3.3.2.4 Microcontrolador ESP 32

Al tratarse de un sistema multitarea es necesario considerar que el microcontrolador debe contar con doble núcleo y un amplio número de entradas y salidas para poder cubrir las conexiones necesarias. Tomando en cuenta estos aspectos se seleccionó el microcontrolador ESP32 el cual cuenta con las siguientes características:

- Modelo: ESP32 38 Pines
- Voltaje de Alimentación (USB): 5V DC
- Voltaje de Entradas/Salidas: 3.3V DC
- CPU principal: Tensilica Xtensa 32-bit LX6
- Frecuencia de Reloj: hasta 240Mhz

- Procesador secundario: Permite hacer operaciones básicas en modo de ultra bajo consumo
- Wifi: 802.11 b/g/n/e/i (802.11n @ 2.4 GHz hasta 150 Mbit/s)
- Bluetooth: 4.2 BR/EDR BLE Modo de control dual
- Memoria: 448 KByte ROM, 520 KByte SRAM, 6 KByte SRAM en RTC y QSPI admite múltiples chips flash /SRAM
- Chip USB-Serial: CP2102
- Antena en PCB
- Pines Digitales GPIO: 24 (Algunos pines solo como entrada)
- Conversor Analógico Digital: Dos ADC de 12bits tipo SAR, soporta mediciones en hasta 18 canales, algunos pines soportan un amplificador con ganancia programable
- Seguridad: IEEE 802.11, incluyendo WFA, WPA/WPA2 y WAPI
- Criptografía acelerada por hardware: AES, SHA-2, RSA, criptografía de curva elíptica (ECC), generador de números aleatorios (RNG).

### 3.3.2.5 Guía lineal SRB12

En el desarrollo de la máquina, se optó por utilizar las guías lineales SRB12 debido a sus características técnicas sobresalientes que las hacen ideales para este tipo de aplicaciones. Las guías lineales son reconocidas por su capacidad para permitir un movimiento de traslación con una pérdida por fricción mínima, lo que resulta en una mayor eficiencia en el funcionamiento de la máquina. Esta característica es crucial en máquinas que requieren una gran precisión en sus procesos, además de una capacidad de carga elevada, como es el caso de la máquina que se está desarrollando.

El material del que está construido es acero GCr15 el cual es un acero para rodamientos muy utilizado ya que destacan las siguientes características:

- Alta templabilidad: Permite que el acero alcance una alta dureza después del tratamiento térmico.
- Dureza alta y uniforme: Proporciona resistencia al desgaste.
- Alta resistencia a la fatiga por contacto: Permite que el acero soporte cargas repetitivas sin fallar.
- Buena estabilidad dimensional: Mantiene su forma y tamaño bajo diversas condiciones.

### 3.3.2.6 Perfiles de aluminio

Los perfiles de aluminio 2020 son una opción popular en la industria de la construcción y la fabricación de estructuras. Estos perfiles fueron seleccionados para la construcción del sistema automático del manejo e inyección de muestras debido a sus características, pues presentan alta resistencia a la corrosión, ligereza y versatilidad, lo que asegura la calidad del sistema.

Dentro de las propiedades que favorecen la elección de estos perfiles 2020 se destacan las siguientes:

- *Material:* El perfil está fabricado en aleación de aluminio 6063-T5.
- *Acabado:* El perfil tiene un acabado anodizado en color plata, que le da una apariencia lisa y moderna.
- *Peso:* El perfil pesa aproximadamente 2,5 kg por metro lineal.
- *Resistencia:* El perfil tiene una resistencia a la tracción de 240 MPa y una resistencia a la compresión de 220 MPa.
- *Dureza:* El perfil tiene una dureza Brinell de 75 HB.

### 3.3.2.7 Fuente de alimentación

Para la selección de la fuente de alimentación se considera el voltaje nominal más alto requerido, que en este caso es el del motor NEMA23 que trabaja a 24 VDC. Además, se considera el consumo total del sistema, como se muestra en la Tabla 13, donde se desglosa el consumo en amperes (A) de cada uno de los elementos seleccionados para la construcción del sistema.

Tabla 13. Consumo total de los elementos del sistema.

ELEMENTO	CANTIDAD	CONSUMO (A)
MOTOR NEMA 23	2	5.6
MOTOR NEMA 17	1	1.5
MOTOR NEMA 14	2	1.6
DRIVER TB6600	5	1.5
ESP32	1	0.08
CONSUMO TOTAL		10.28 A

Considerando los dos criterios anteriores y tomando en cuenta los picos de corriente manejados por los motores NEMA, se determina que la mejor opción para cumplir con la demanda de consumo del sistema es una fuente conmutada de 24V a 25A.

### 3.4 Diagramas de conexión

#### ▪ Diagramas de conexión de los motores NEMA

Las Figuras 34 a 38 ilustran el esquema de conexión para los motores a pasos NEMA 23, 17 y 14. Para la puesta en marcha de estos motores, se ha optado por una conexión de cátodo común, que implica la unión de la fuente de alimentación a las terminales GND y VCC del controlador TB6600. Los cables del motor se conectan a las terminales B+, B-, A+ y A- del driver TB6600. Para el microcontrolador ESP32, se utilizan tres pines configurados como salidas digitales que se conectan a las terminales PUL+, DIR+ y ENA+ del driver TB660. Además, se emplean 3 pines adicionales del microcontrolador ESP32, Uno configurado como entrada digital y los dos restantes son GND y 3.3 VCC los cuales se enlazan a un interruptor de límite en los pines COM y NO. Entre los pines GND y NO se conecta una resistencia de 1K ohm para limitar la corriente del pulso generado por el interruptor de limite al ser presionado y de esta forma proteger la entrada digital del microcontrolador ESP32.

Para conectar el motor NEMA 23 del eje “X” (Figura 49), se usaron los pines 21, 19 y 34 del ESP32, configurados como salidas digitales. Además, el pin 12 se utilizó como entrada digital. Esta configuración permite un control eficiente del motor.

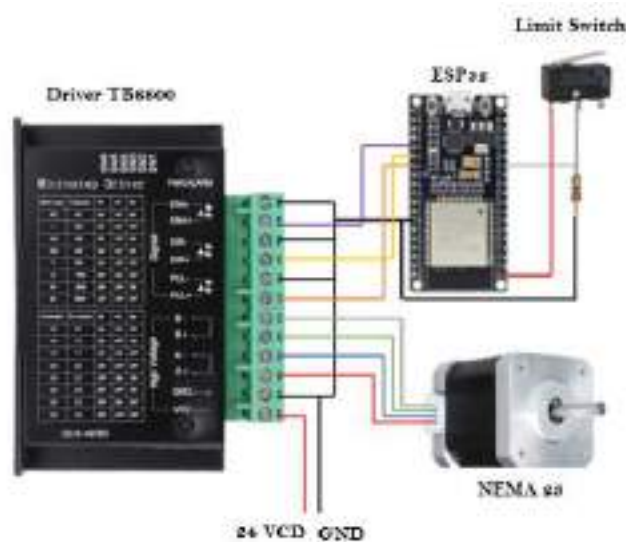


Figura 49. Conexión del motor eje X

El motor NEMA 23 del eje “Y” (Figura 50) se conectó usando los pines 23, 22 y 2 del ESP32, establecidos como salidas digitales. El pin 26 se configuró como entrada digital.

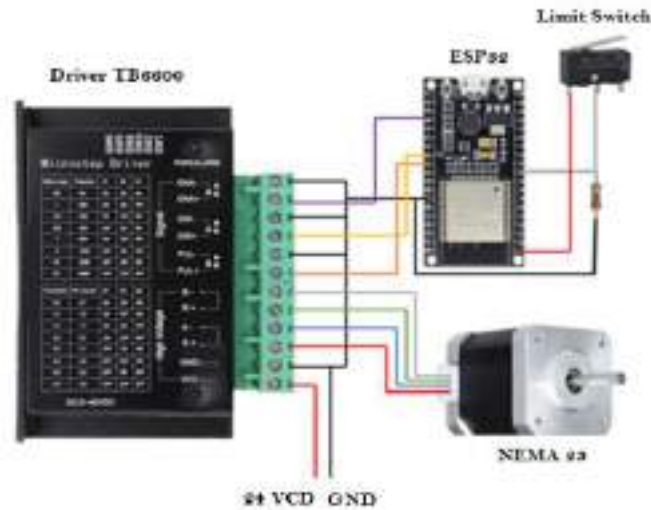


Figura 50. Conexión del motor eje Y

La conexión del motor NEMA 17 del eje “Z” (Figura 51) se realizó utilizando los pines 18, 5 y 3 del ESP32 como salidas digitales. El pin 25 se empleó como entrada digital.

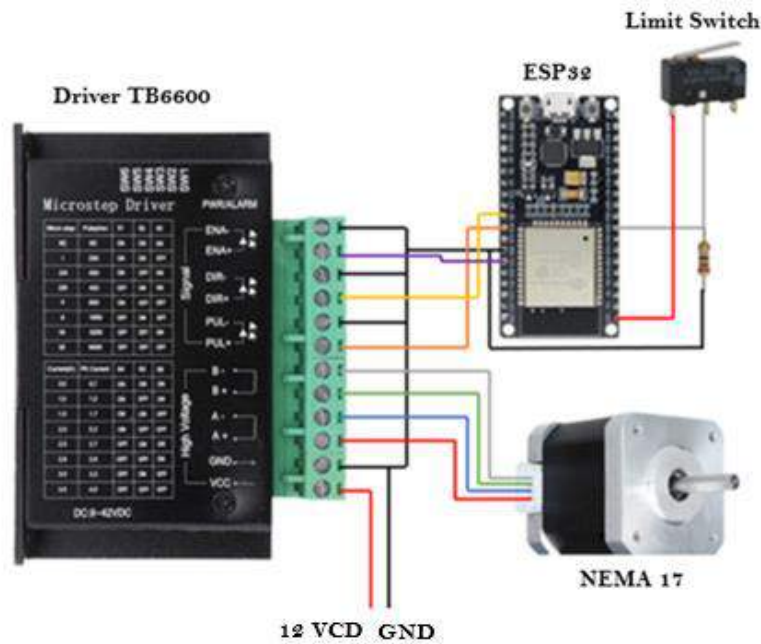


Figura 51. Conexión del motor eje Z.

El motor NEMA 14 del sistema de inyección (Figura 52) se conectó usando los pines 17, 16 y 34 del ESP32, establecidos como salidas digitales. El pin 33 se utiliza como entrada digital.



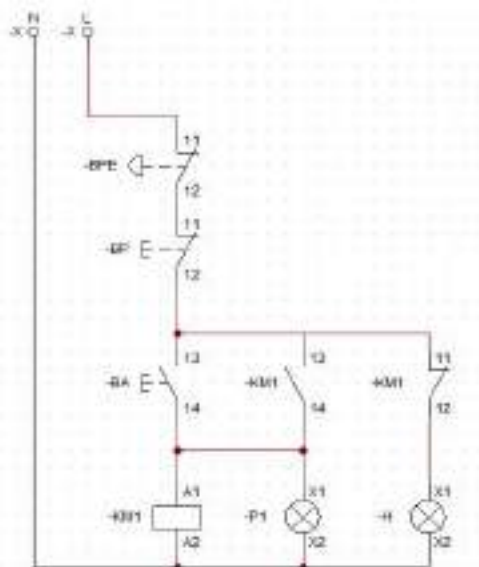


Figura 55. Circuito de Control.

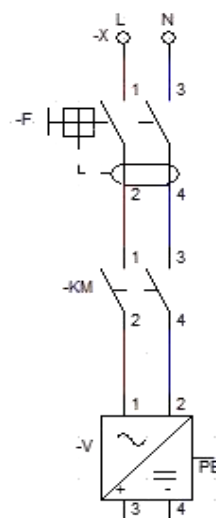


Figura 54. Circuito de fuerza.

El circuito de control se energiza con una fuente de alimentación monofásica, compuesta por una fase y un neutro, que suministra 127 volts a 60 Hz. Con base en los requerimientos de usuario, se incorporó un botón de arranque (BA), paro (BP) y paro de emergencia (BPE). Además, se añadieron lámparas de señalización para indicar el estado del sistema de manejo e inyección de muestras.

Cuando el circuito está energizado, una lámpara de señalización de color rojo (H) se enciende. Al presionar el botón de arranque, la lámpara roja se apaga y se enciende una lámpara de señalización de color verde (P1), indicando que el sistema está energizado.

El circuito de fuerza, también conocido como circuito de potencia, tiene la función principal de energizar la fuente de alimentación (PE) de 24 VCD que se utiliza en el sistema de manejo e inyección de muestras. Este circuito cuenta con un interruptor termomagnético (F) que sirve para protección en caso de presentarse un corto circuito. Para iniciar se presiona el botón de arranque (BA), lo cual activa la bobina del contactor (KM1). La activación de esta bobina provoca el cierre de sus contactos (KM), lo que a su vez permite que la fuente de VCD reciba alimentación.

### 3.5 Construcción y ensamblaje del sistema de muestreo

Se comienza por diseñar la estructura de la máquina, con el propósito de realizar pruebas y poder identificar posibles modificaciones, en esta primera etapa se trabajó con MDF.



*Figura 56. Corte de piezas en MDF.*

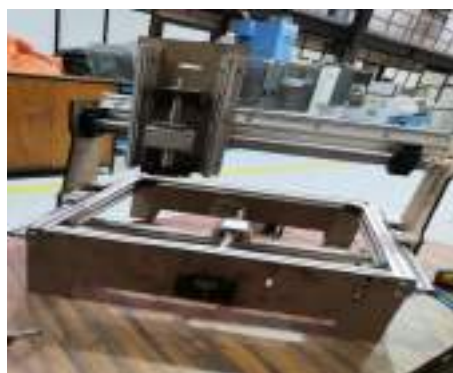


*Figura 57. Perfiles de aluminio.*

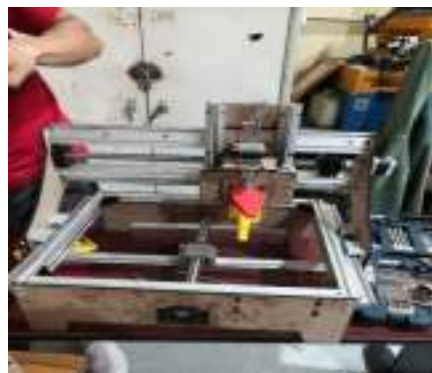


*Figura 58. Base de automuestreador.*

Las estaciones de toma e inyección de muestras se ensamblaron por separado con el fin de facilitar su integración en la estructura principal.

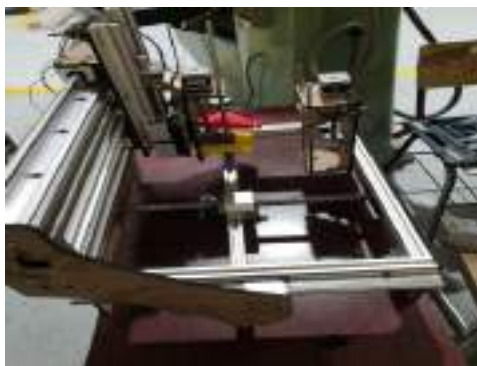


*Figura 59. Integración de eje X e Y.*



*Figura 60. Integración de eje X, Y, Z.*





*Figura 61. Integración de la estación de Inyección.*

Una vez que se comprobó que el sistema funciona de manera adecuada se sustituyeron las piezas de MDF por acrílico, ya que este material conforma el acabo final de la máquina. Así mismo, se integro la estación de inyección, la estación de jeringas, la gradilla de muestras y los recipientes correspondientes al desecho y solución de enjuague.



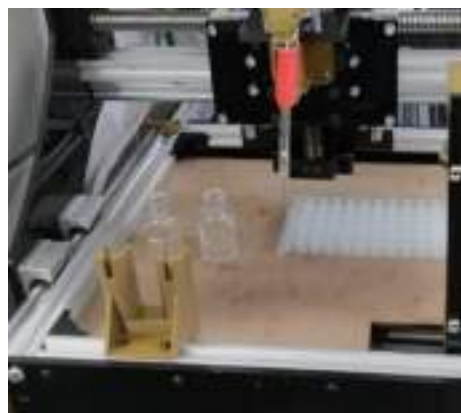
*Figura 62. Acabado final del sistema.*



*Figura 63. Integración de la estación de inyección*

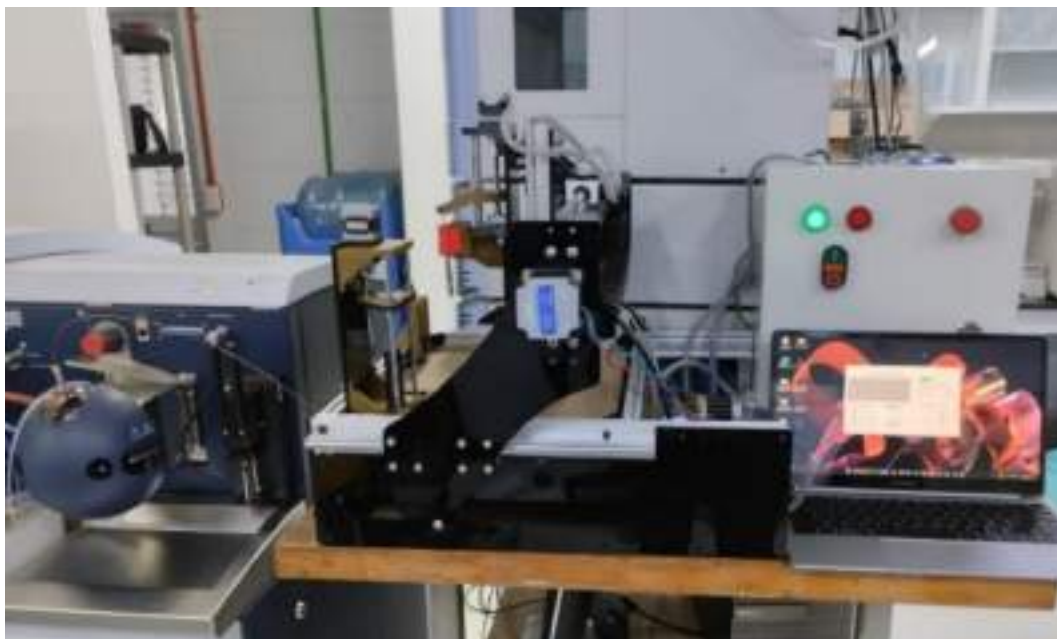


*Figura 65. Integración de la estación de jeringas y la zona de deshecho y enjuague.*



*Figura 64. Colocación de la gradilla de muestras.*

Finalmente se realiza la conexión del sistema con la interfaz de usuario y se ubican en el área que les fue asignada dentro del laboratorio.



*Figura 66. Integración del sistema de muestreo automático con la interfaz de usuario.*

Por otra parte, el sistema de automuestreo requiere de un gabinete que cumple con la función de resguardar tanto la fuente de alimentación como los elementos que permiten el gobierno de los motores por medio de algoritmos de programación, y permite el arranque, paro y paro de emergencia del sistema de manejo e inyección de muestras.

Considerando las dimensiones del gabinete y de los componentes electrónicos que integran el sistema de manejo e inyección de muestras, se destinó la ubicación de cada componente. Como se ilustra en la Figura 67. Este arreglo de distribución asegura una conexión física nítida y eficiente entre los componentes, como se ilustra en la Figura 68 y 69.

En la parte frontal del gabinete, se perforaron cuatro espacios. Dos de ellos están destinados para lámparas de señalización, uno para el botón de arranque y paro, y el último para el botón de paro general. Como se muestra en la figura 70.



Figura 67. Distribución de los elementos en la placa del tablero.



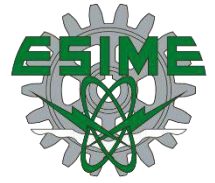
Figura 68. Montaje y cableado de los elementos



Figura 69. Montaje de la placa con gabinete.



Figura 70. Gabinete con botones de control y lámparas piloto.



## **CAPÍTULO IV.**

# **DESARROLLO DEL ALGORITMO COMPUTACIONAL Y LA INTERFAZ DE MONITOREO Y OPERACIÓN**

## 4.1 Elección de la plataforma y las herramientas de desarrollo

Una plataforma de desarrollo es un marco de trabajo en software que ofrece a los programadores un conjunto de herramientas y servicios esenciales para construir, verificar y lanzar aplicaciones. Puede abarcar un entorno de desarrollo integrado (IDE), librerías de software, un sistema para administrar bases de datos (DBMS), herramientas para pruebas y otras utilidades [42].

Algunos ejemplos de plataformas de desarrollo son [42]:

- Android
- iOS
- Web
- Escritorio

Las herramientas de desarrollo facilitan a los programadores la creación de software. Estas herramientas ayudan a los programadores a escribir, probar y depurar el código, lo que acelera el proceso de desarrollo de software.

Algunos ejemplos de herramientas de desarrollo son [43]:

- *IDEs*: Es un entorno de desarrollo integrado que proporciona características útiles para la codificación, como resaltado de sintaxis, autocompletado de código y depuración.
- *GIT*: Es un sistema de control de versiones que permite rastrear los cambios en el código del proyecto a lo largo del tiempo y facilitan la colaboración.
- *JUNIT*: Es un conjunto de librerías y herramientas que facilita al usuario el uso de clases y métodos que permiten realizar pruebas de funcionalidad al código para asegurar el correcto funcionamiento.

Para la programación del microcontrolador ESP32, se seleccionó Visual Studio Code y PlatformIO. Estas herramientas, en conjunto, proporcionan un entorno de desarrollo de software sólido y adaptable para una variedad de proyectos.

Los aspectos primordiales que se consideraron para la elección de estas herramientas de desarrollo (Visual Studio Code y PlatformIO) son los siguientes:

- *Compatibilidad con múltiples microcontroladores*: Las herramientas son compatibles con ESP32, ESP8266, Arduino Uno, Arduino Mega, Arduino BT, entre otros.
- *Uso de librerías*: Permiten el uso de librerías desde los repositorios originales de Arduino y ESP32.
- *Facilidad de uso*: Gracias a su interfaz intuitiva, las herramientas son fáciles de usar.
- *Comunicación serial*: Permiten la apertura y lectura de puertos serie para la comunicación serial, además de la depuración y diagnóstico.

- *Ligereza y multiplataforma:* Son IDEs ligeros y multiplataforma, lo que provoca que el sistema consuma menos recursos en comparación con otros IDEs.
- *Extensibilidad:* Esta propiedad permite descargar complementos para generar un mejor ambiente de desarrollo de software.
- *Integración de control de versiones:* Permiten la integración de control de versiones que facilita la generación de repositorios para facilitar la colaboración en equipo.

Para la programación de la interfaz, se seleccionó Visual Studio y .Net. Estas herramientas permiten desarrollar aplicaciones para web, escritorio, juegos y más en diferentes lenguajes de programación.

Los aspectos primordiales que se consideraron para la elección de estas herramientas de desarrollo son los siguientes:

- *Entorno de desarrollo completo:* Permiten escribir, depurar, editar el código para finalmente generar la aplicación.
- *Compatibilidad con múltiples lenguajes de programación:* Son compatibles con C++, C#, JavaScript, Python y TypeScript, entre otros.
- *Desarrollo multiplataforma:* Permiten la compilación de la aplicación generada en cualquier plataforma como Windows, Linux y MacOS.
- *Integración de control de versiones:* Facilitan la generación de repositorios para colaboración en equipo.
- *Organización de código a través de clases:* Permite una comprensión más clara del código gracias a la distribución de sus ventanas auxiliares.
- *Sugerencias y trucos:* El propio software ofrece sugerencias y trucos para optimizar el código.

## 4.2 Diseño de la interfaz gráfica de usuario

La interfaz gráfica es un elemento esencial en los sistemas actuales de monitoreo y adquisición de datos. De acuerdo con la norma ANSI/ISA-101.01-2015, el diseño de la interfaz debe seguir las pautas especificadas en la norma, asegurando que la interfaz supere su función primaria de visualización de datos para convertirse en un componente activo y crucial en el proceso de recolección y visualización de información.

En nuestra era digital, una interfaz gráfica de usuario actúa como un enlace entre el usuario y el sistema, proporcionando un ambiente de comunicación intuitivo y eficaz para interactuar con los sistemas automáticos. La interfaz gráfica no solo facilita la interacción del usuario con el sistema, sino que también mejora la eficiencia operativa, la seguridad y la productividad.

La norma ANSI/ISA-101.01-2015 ofrece un marco para el diseño de una interfaz que se enfoca en la facilidad de uso, la coherencia y la efectividad de la comunicación. Siguiendo estas pautas, podemos asegurar que la interfaz no solo cumple con su función primaria de

visualización de datos, sino que también se convierte en una herramienta integral para la gestión efectiva de los sistemas automáticos.

Para el diseño de la interfaz se consideraron los siguientes criterios que maneja la norma ANSI/ISA-101.01-2015 [44]:

- *Convenciones de color:* Las convenciones de color implican el uso coherente de colores para simbolizar ciertos estados o condiciones en la interfaz. Por ejemplo, el color rojo se utiliza para señalar una situación de alarma, mientras que el verde podría indicar que todo está funcionando correctamente.
- *Animación:* La animación debe ser utilizada de manera moderada y sólo cuando aporte un valor significativo. Por ejemplo, una animación puede ser útil para indicar un cambio de estado o para llamar la atención del operador sobre una condición específica.
- *Visibilidad:* Los elementos de la interfaz deben ser claramente visibles y legibles. Esto implica el uso de tamaños de fuente adecuados, suficientes contrastes de color y evitar la saturación de información en la pantalla.
- *Representación de líneas:* Las líneas deben ser utilizadas de manera coherente y significativa. Por ejemplo, las líneas pueden ser utilizadas para representar conexiones físicas entre equipos o para separar visualmente diferentes áreas de la pantalla.
- *Caja de agrupación:* Los elementos relacionados deben ser agrupados visualmente. Esto puede ayudar a los operadores a entender rápidamente las relaciones entre diferentes elementos de la Interfaz gráfica.
- *Representación de equipos de proceso:* Los equipos de proceso deben ser representados de manera coherente y realista. Esto puede ayudar a los operadores a entender rápidamente el estado y la función de los equipos.
- *Objetos de proceso dinámico:* Los objetos que cambian en tiempo real deben ser diseñados de manera que sean fácilmente comprensibles. Esto puede incluir elementos como gráficos de tendencias, indicadores de estado y valores de proceso.
- *Objetos de proceso estático:* Los objetos que no cambian deben ser claramente distinguibles de los objetos dinámicos. Esto puede ayudar a los operadores a entender rápidamente qué información es estática y cuál es dinámica.
- *Tipos y tamaños de fuente:* Las fuentes deben ser legibles y consistentes en toda la interfaz gráfica. Esto puede implicar la elección de tipos de fuente legibles, el uso de tamaños de fuente adecuados y la consistencia en el uso de estilos de fuente.
- *Alineación de datos:* Los datos deben ser presentados de manera ordenada y coherente. Esto puede implicar la alineación de los datos en columnas y filas, y la agrupación de datos relacionados.



- *Texto estático:* El texto que no cambia debe ser claramente distinguible del texto dinámico. Esto ayuda a los operadores a entender qué información es estática y cuál es dinámica.
- *Datos dinámicos:* Los datos que cambian en tiempo real deben ser fácilmente comprensibles. Esto puede incluir elementos como valores de proceso, estados de alarma y gráficos de tendencias.

Una vez considerados estos aspectos fundamentales que marca la norma ANSI/ISA-101.01-2015 y la naturaleza del sistema, se desarrolló la interfaz de usuario. A continuación, se muestra la Figura 71 que ilustra la interfaz desarrollada para configurar los parámetros del automuestreador y supervisar el proceso de manejo e inyección de muestras. Al abrir la interfaz, se muestra un botón de conexión en la esquina superior derecha, que estará en verde. Este botón permite establecer la comunicación entre la PC y el microcontrolador.



Figura 71. Interfaz de usuario.

Una vez establecida la conexión, se habilita el botón de desconexión para cerrar la comunicación si es necesario. Si no es así, se habilita el cuadro de configuración del automuestreador (Figura 72). Aquí, el usuario seleccionará la velocidad de inyección a través de un menú desplegable que contiene una lista con las velocidades más comunes de inyección. Después de seleccionar la velocidad de inyección, se procede a ingresar el número de muestras, que debe estar entre 0 y 80. Si se excede este rango o se comete un error, aparecerá un mensaje indicando “número inválido” y será necesario ingresar nuevamente el número.





Figura 72. Configuración de velocidad de inyección.

Una vez configurado los parámetros del automuestreador, aparecerán algunas advertencias (Figura 73 y 74) que son indispensables para evitar daños al espectrómetro de masas y garantizar el correcto funcionamiento del proceso. Después de leer y aceptar estas advertencias, se habilita el botón de inicio para comenzar el proceso.

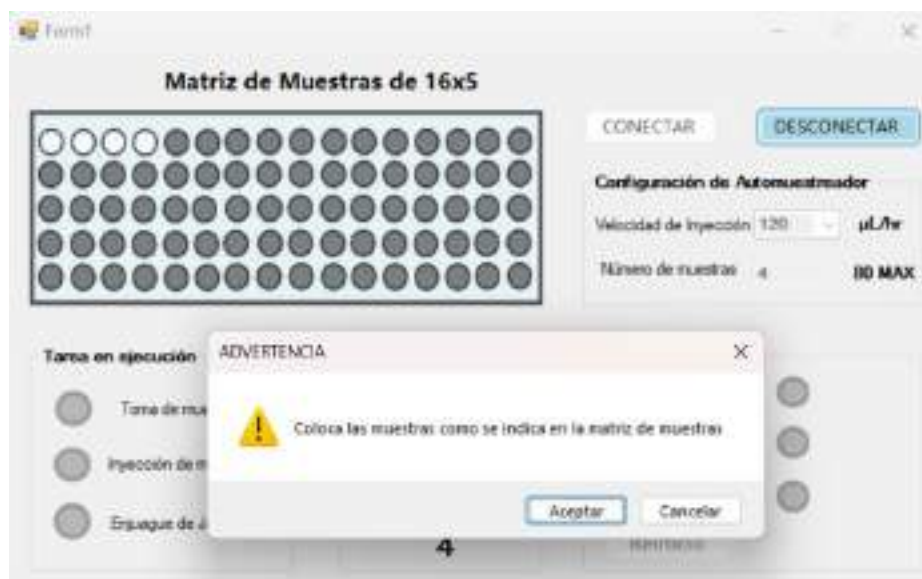


Figura 73. Advertencia de posición de muestras.

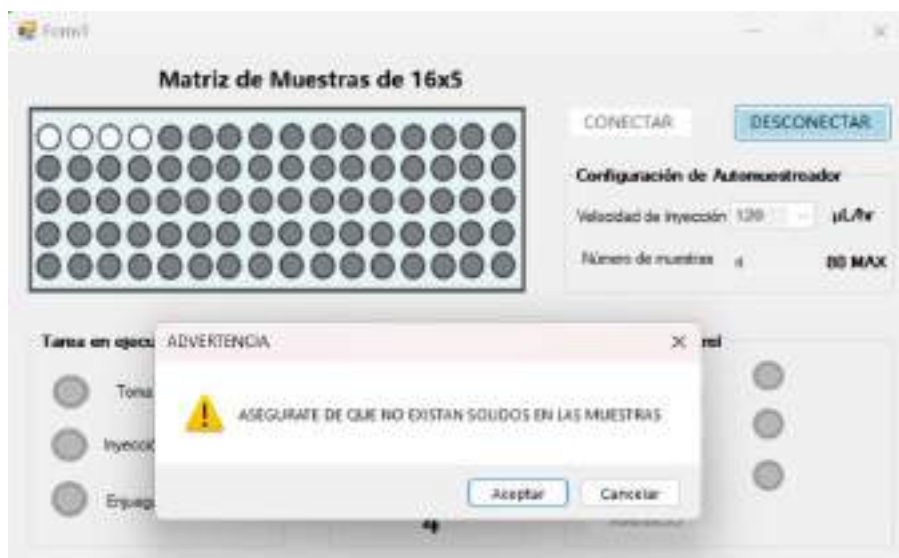


Figura 74. Advertencia de solidos en suspensión.

Al presionar el botón de inicio, comienza el proceso y su monitoreo. Hay varios botones disponibles para complementar la operación del proceso, como: paro, reinicio, continuar y uno para modificar la configuración del automuestreador. Cada uno tiene un indicador que muestra en qué acción se encuentra.



Figura 75. Botones habilitados para posible modificación.



Figura 76. Indicadores de operaciones.

Se dispone de una matriz que indica qué muestras han sido tomadas, así como un cuadro con indicadores que muestran la tarea en ejecución. Una vez finalizado el proceso, aparece un mensaje indicando que el proceso ha terminado y se habilitan los botones para modificar o reiniciar.

#### 4.3 Diseño de la arquitectura del algoritmo computacional

La Figura 77 ilustra la arquitectura del algoritmo computacional diseñado para el manejo e inyección de muestras. Esta arquitectura de algoritmo computacional se estructura de manera que cada uno de estos procesos se realiza de manera eficiente y precisa.

Variables que se evalúan para ejecutar una tarea

dato1: Variable tipo entero que son enviados desde HMI con el fin de determinar la velocidad de inyección de cada una de las muestras.

dato2: Variable de tipo entero para determinar el número de muestras con las que se va a trabajar, dicho valor se encuentra entre 1 y 80.

dato3: variable tipo entero que modifica su valor al presionar el botón de inicio en la HMI

ejecutarloop2: Variable tipo booleano que se utiliza dentro de la programación para habilitar y deshabilitar el proceso de inyección.

motor\_inyeccion: Método que almacena el número de pasos que le faltan por recorrer al motor de inyección de muestras.

continuar: Variable tipo booleana que permite continuar con la siguiente muestra una vez que se presiona el botón desde la HMI

Serial.available(): método que determina si el puerto de comunicación serial está disponible.

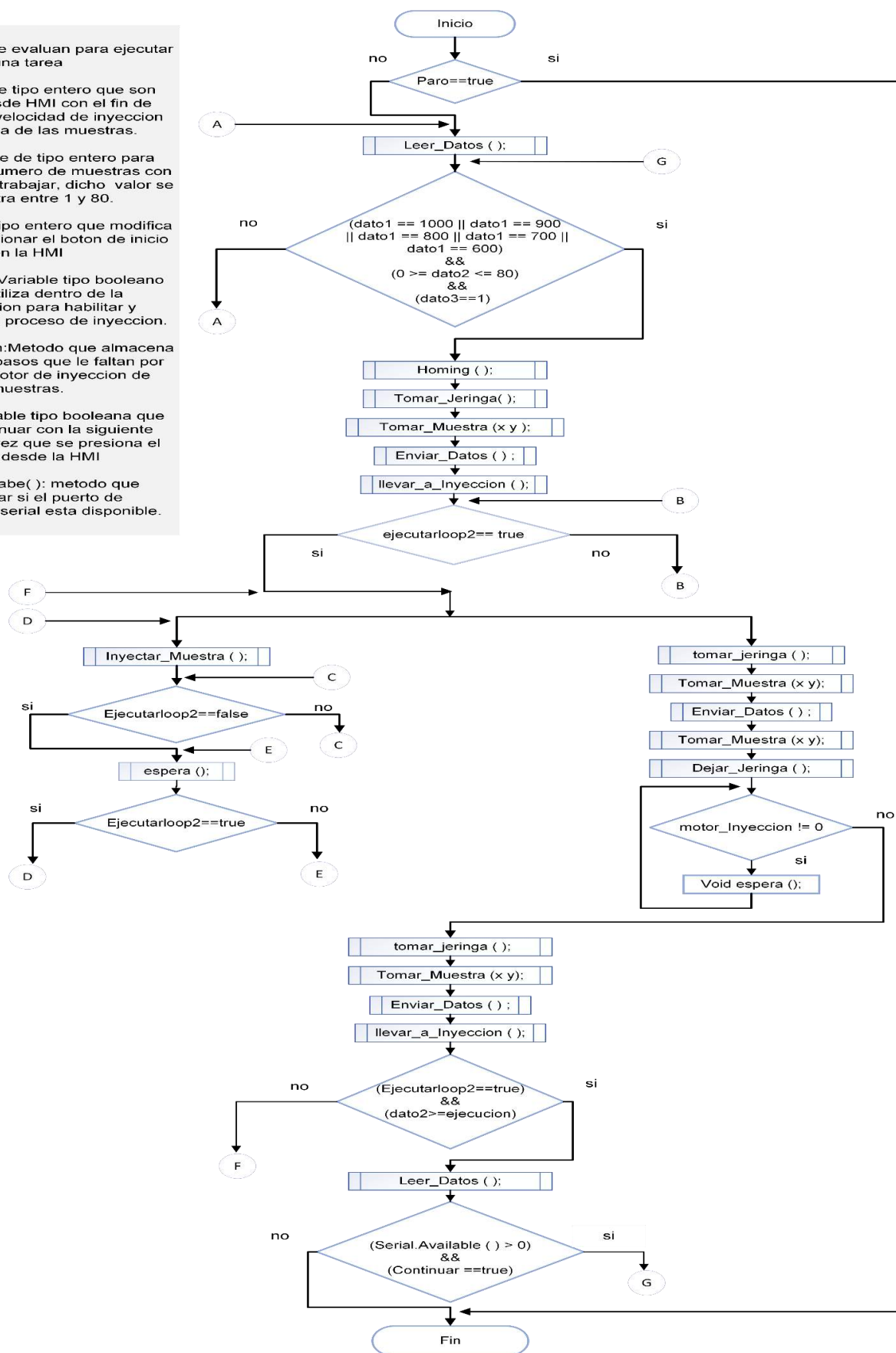


Figura 77. Diseño del algoritmo computacional del sistema de muestro automático.

A continuación, se describe cada uno de los métodos que conforman el diagrama de flujo y las variables que se evalúan para tomar decisiones y llevar a cabo ciertas actividades del proceso.

#### Métodos de la arquitectura del algoritmo

- Leer\_Datos( ): es responsable de recibir y almacenar datos que se han capturado desde la interfaz mediante comunicación serial. Estos datos se procesan para la ejecución de acciones posteriores.
- Homing( ): se encarga de ubicar las posiciones iniciales de los ejes. Esto se logra mediante el accionamiento de interruptores de límite, es decir, mueve los motores y los detiene cuando se activan los interruptores.
- Tomar\_Jeringa( ): se encarga de recoger las jeringas que se encuentran en el módulo especial dentro del automuestreador.
- Enviar\_Datos( ): se encarga de enviar el número de ejecución y otros datos de tipo booleano hacia la interfaz. Este proceso implica transformar estos datos en una cadena y enviarla a través del puerto serial.
- Tomar\_Muestra (int, int): se encarga de recoger cada una de las muestras de una matriz que contiene los analitos. Este proceso se lleva a cabo al recibir dos coordenadas específicas dentro de sus parámetros. Estas coordenadas se utilizan para mover la estación de toma de muestras hacia las posiciones correspondientes y tomar 100 microlitros del analito.
- llevar\_a\_inyeccion( ): se encarga de transportar la jeringa que contiene el analito hacia el sistema de inyección. Este proceso se realiza a través del movimiento del sistema de manejo e inyección de muestras.
- Inyectar\_Muestra( ): se encarga de inyectar la muestra al espectrómetro de masas de ultra alta resolución a través del tubo capilar. Esta función se ejecuta de manera simultánea a otros métodos.
- Dejar\_Jeringa( ): se encarga de transportar la jeringa al módulo de jeringas después de que se ha tomado una muestra o después de haberse inyectado.



# **CAPÍTULO V.**

## **ARRANQUE Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE MUESTREO AUTOMÁTICO IMPLEMENTADO CON LA INTERFAZ GRÁFICA DE MONITOREO Y OPERACIÓN**



## 5.1 Implementación de la interfaz con el sistema

La implementación de la interfaz se realiza estableciendo una conexión entre el sistema y el software mediante comunicación serial, para ello se conecta el puerto del ESP32 a la computadora mediante un cable USB – Micro B, permitiendo la transferencia de datos como se muestra en las Figuras 78 y 79.



Figura 78. Conexión al puerto Micro B del ESP32.



Figura 79. Conexión al puerto USB para establecer comunicación con la interfaz de monitoreo.

## 5.2 Puesta en marcha del sistema

Una vez que se ha ejecutado la interfaz y se establece la comunicación con el sistema, se procede a energizar mediante el botón de arranque (verde) ubicado en el gabinete como se muestra en las Figuras 80 y 81.



Figura 80. Sistema encendido.



Figura 81. Encendido de la interfaz

Además de establecer una conexión física a través del cable, la interfaz también crea una conexión digital por medio del puerto serie al presionar el botón de CONECTAR. Lo que permite establecer los parámetros de velocidad y número de muestras con los que se desea trabajar como se muestra en la Figura 82. Los viales de las muestras se deben colocar en la matriz como se indica en la interfaz (Figura 83).



Figura 82. Conexión con el sistema y establecimiento de parámetros.

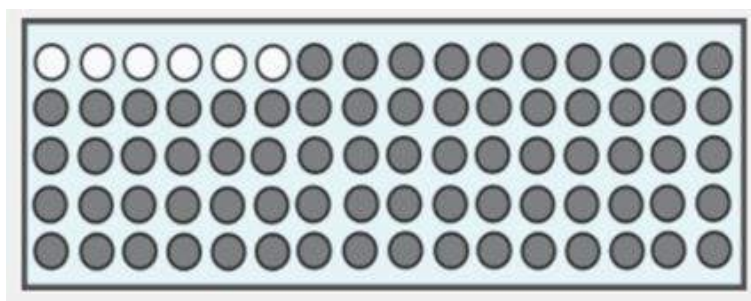


Figura 83. Posicionamiento de viales en la matriz de muestras.

Las trayectorias se ejecutan una vez que se ha presionado el botón de inicio en la interfaz, el cual se habilita después de algunas advertencias. No se pueden realizar ajustes a la configuración de velocidad y número de muestras ni reiniciar las trayectorias hasta que se presiona el botón de paro (Figura 84).



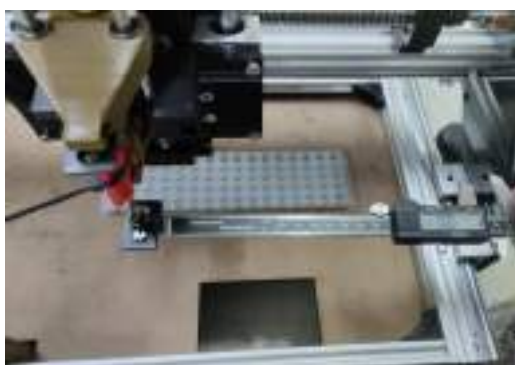
Figura 84. Botones de Inicio, Paro y configuración.

El proceso de inyección de la muestra se realiza en dos etapas, ya que al inyectar la mitad de una muestra se debe cambiar el nombre del archivo en el software de BRUKER para poder diferenciar el análisis positivo del negativo.



### 5.3 Evaluación de la precisión y exactitud de recorridos lineales en los ejes

La norma ISO 5725-1:1994 proporciona una guía fundamental para la evaluación de la exactitud, que incluye la veracidad y la precisión de los métodos y resultados de medición. Esta norma tiene aplicaciones en diversos campos y situaciones donde se necesita precisión en las mediciones [45]. En el escenario de evaluar la precisión del movimiento en un sistema de ejes, como en una máquina CNC, esta norma ofrece un marco sólido para la planificación y ejecución de pruebas de precisión. Las pruebas de precisión implicaron el uso de un vernier digital, un instrumento de medición de alta precisión, que se fijó al automuestreador como se muestra en las Figuras 85, 86, 87 y 88. Siguiendo los principios de la norma ISO 5725-1:1994, se realizaron movimientos a distancias específicas para cada eje, con el objetivo de realizar mediciones repetidas bajo las mismas condiciones.



*Figura 85. Acople del vernier al sistema.*



*Figura 86. Ajuste del vernier al eje y.*



*Figura 87. Ajuste del vernier al eje x.*



*Figura 88. Ajuste del Vernier al eje z.*

Las distancias establecidas para los ejes "X", "Y" y "Z" fueron de 3, 5, 7, 10, 12 y 15 cm. Para los ejes "Inyección" (eje "I") y "Toma de muestra" (eje "T"), las distancias fueron de 5, 6, 7, 8, 9 y 10 cm.

Estas pruebas permitieron una evaluación precisa del rendimiento de cada eje en las distancias establecidas. Este enfoque está en línea con la norma ISO 5725-1:1994, que

enfatisa la importancia de la repetibilidad en las mediciones para evaluar la precisión. Así, estas pruebas y registro de datos proporcionaron una evaluación rigurosa y sistemática de la precisión de los ejes del sistema de manejo e inyección de muestras [45].

- Porcentaje de error de los ejes “X”, “Y”, “Z,” I” y “T”.

La exactitud en el sistema de manejo e inyección de muestras es crucial. Este análisis de resultados se enfocó en evaluar el porcentaje de error en la precisión y exactitud de estos ejes. Para ello, se utilizó la fórmula del error relativo porcentual, media muestral y la fórmula de dispersión de datos, una medida estadística que refleja la diferencia entre un valor medido y el valor verdadero, expresada en términos porcentuales.

- **Promedio**

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (37)$$

Donde:

$\bar{x}$  = *media muestral*

$n$  = *número total de datos*

$x_i$  = *número de dato*

- **Desviación estándar**

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (38)$$

Donde:

$\sigma$  = *desviación estandar*

$N$  = *número total de datos*

$x_i$  = *número de dato*

$\bar{x}$  = *media muestral*

- **Error relativo**

$$E_r = \left( \frac{\bar{x} - x_r}{x_r} \right) * 100 \quad (39)$$

Donde:

$E_r$  = *error relativo porcentual*

$\bar{x}$  = *media muestral*

$x_r$  = *referencia*

Los resultados de las pruebas de cada uno de los ejes se registraron en las Tablas 14-18, además se calculó su promedio, desviación estándar y error relativo.

Tabla 14. Registro de datos del eje "X".

Registro de datos del eje "X" al recorrer diferentes distancias						
Distancia deseada (mm)	30	50	70	100	120	150
Prueba 1	30.03	50.08	70.04	99.87	120.01	150.02
Prueba 2	30.02	50.11	70.14	99.92	119.98	150.05
Prueba 3	30.02	50.09	70.04	99.89	119.88	150.08
Prueba 4	29.99	50.12	70.10	99.74	119.87	150.05
Prueba 5	30.00	49.91	70.04	99.85	119.86	150.00
Prueba 6	29.99	49.94	70.05	99.91	119.94	149.98
Prueba 7	30.01	49.82	69.98	100.01	119.88	149.96
Prueba 8	29.98	50.01	70.01	99.99	119.86	150.05
Prueba 9	30.02	49.94	69.96	99.93	119.90	149.99
Prueba 10	29.98	49.94	70.09	99.95	119.91	150.08
Prueba 11	30.02	50.02	70.12	99.95	119.87	150.12
Prueba 12	30.00	49.92	70.18	99.92	119.91	150.1
Prueba 13	29.99	49.99	69.98	99.93	119.89	150.09
Prueba 14	29.97	49.97	69.95	100.00	119.99	149.99
Prueba 15	30.03	50.06	70.18	99.98	119.86	149.95
Prueba 16	29.98	50.10	70.12	99.88	119.90	150.07
Prueba 17	30.04	49.95	69.95	99.88	119.89	150.02
Prueba 18	29.98	49.98	69.96	99.93	119.89	150.08
Prueba 19	30.00	50.08	70.07	99.88	119.99	150.06
Prueba 20	30.01	49.96	70.03	100.00	119.90	150.08
Prueba 21	30.03	50.06	70.05	99.94	119.91	149.97
Prueba 22	30.01	49.96	70.07	99.91	119.88	150.05
Prueba 23	29.99	49.95	69.98	99.86	119.89	149.98
Prueba 24	30.03	49.95	70.08	100.00	119.91	149.98
Prueba 25	30.04	49.94	70.13	99.89	119.90	149.98
Prueba 26	30.03	50.09	70.17	100.01	119.87	150.00
Prueba 27	29.98	50.05	70.03	99.93	119.91	149.97
Prueba 28	29.97	49.89	70.01	99.90	119.99	149.95
Prueba 29	29.99	49.94	70.03	99.97	119.99	150.09
Prueba 30	29.97	49.90	69.97	99.93	119.91	150.01
<b>Media muestral (mm)</b>	30.003	49.991	70.050	99.925	119.911	150.027
<b>Desviación estándar (mm)</b>	0.022	0.077	0.070	0.058	0.045	0.051
<b>Error relativo (%)</b>	0.009	-0.019	0.072	-0.075	-0.074	0.018

Tabla 15. Registro de datos del eje “Y”

Registro de datos del eje “Y” al recorrer diferentes distancias						
Distancia deseada (mm)	30	50	70	100	120	150
Prueba 1	30.02	49.99	69.91	100.05	119.95	150.04
Prueba 2	30.01	49.97	69.92	99.99	119.98	150.02
Prueba 3	29.97	49.96	69.99	100.10	120.09	150.03
Prueba 4	29.96	49.93	70.01	100.05	119.98	149.97
Prueba 5	30.01	49.91	69.89	100.10	120.02	149.98
Prueba 6	29.99	49.98	69.99	100.06	119.98	150.03
Prueba 7	30.02	49.98	69.99	99.99	119.94	150.12
Prueba 8	29.99	50.00	69.98	100.11	119.94	149.97
Prueba 9	30.01	49.99	69.92	100.06	120.09	150.05
Prueba 10	30.00	49.97	69.92	100.07	120.04	150.10
Prueba 11	30.00	50.01	69.99	100.10	120.05	150.12
Prueba 12	30.00	49.98	70.01	99.98	120.06	150.09
Prueba 13	29.98	49.98	69.94	100.10	119.93	150.07
Prueba 14	29.96	49.99	69.99	100.07	120.02	150.00
Prueba 15	30.03	49.97	69.93	100.11	119.95	150.07
Prueba 16	30.01	49.99	70.00	100.07	120.07	149.98
Prueba 17	30.00	50.00	69.89	100.09	120.06	150.05
Prueba 18	29.96	49.98	69.97	100.05	120.09	150.00
Prueba 19	30.02	49.98	69.97	100.08	119.99	149.99
Prueba 20	30.02	50.01	69.96	100.05	120.08	150.05
Prueba 21	29.99	49.98	69.90	99.99	120.02	149.97
Prueba 22	29.99	49.99	69.91	100.09	120.02	150.00
Prueba 23	30.04	50.01	69.92	100.09	119.93	150.07
Prueba 24	30.03	49.99	69.89	100.11	120.00	149.98
Prueba 25	30.01	50.00	69.96	100.10	119.91	150.03
Prueba 26	30.04	50.01	69.98	100.10	119.92	149.95
Prueba 27	29.97	50.00	69.93	99.96	119.89	150.08
Prueba 28	30.00	49.99	69.98	100.06	119.89	149.95
Prueba 29	29.98	49.98	69.93	100.10	119.85	150.02
Prueba 30	30.01	50.01	69.93	100.08	119.89	150.08
<b>Media muestral (mm)</b>	30.001	49.984	69.950	100.065	119.988	150.029
<b>Desviación estándar (mm)</b>	0.023	0.022	0.039	0.043	0.070	0.050
<b>Error relativo (%)</b>	0.002	-0.031	-0.071	0.065	-0.010	0.019

Tabla 16. Registro de datos del eje "Z"

Registro de datos del eje "Z" al recorrer diferentes distancias						
Distancia deseada (mm)	30	50	80	100	120	150
Prueba 1	29.99	50.08	80.04	100.02	120.03	150.01
Prueba 2	30.04	50.11	80.05	100.04	119.93	150.07
Prueba 3	30.03	50.09	80.07	100.09	119.96	150.04
Prueba 4	29.99	50.12	80.01	100.08	119.89	150.03
Prueba 5	29.99	49.91	79.99	100.12	119.89	149.97
Prueba 6	30.01	49.94	80.00	100.11	120.04	150.01
Prueba 7	30.03	49.82	80.02	100.01	119.90	149.98
Prueba 8	30.03	50.01	80.00	100.02	119.94	149.98
Prueba 9	30.05	49.94	79.99	100.02	120.04	150.03
Prueba 10	30.02	49.94	80.01	99.99	119.92	150.05
Prueba 11	30.03	50.02	80.03	100.04	119.99	150.04
Prueba 12	29.97	49.92	80.01	100.01	119.97	149.97
Prueba 13	30.00	49.99	80.02	100.03	119.99	150.00
Prueba 14	30.01	49.97	80.03	100.02	120.07	150.00
Prueba 15	30.04	50.06	80.00	100.05	120.09	150.02
Prueba 16	30.02	50.10	80.01	100.01	120.11	150.00
Prueba 17	29.99	49.95	80.02	99.99	120.13	150.04
Prueba 18	30.01	49.98	80.01	100.01	120.12	150.01
Prueba 19	29.99	50.08	80.00	100.04	119.99	150.03
Prueba 20	30.04	49.96	80.02	100.00	119.95	149.95
Prueba 21	30.00	50.06	80.01	100.03	119.95	149.98
Prueba 22	29.98	49.96	80.01	100.09	120.01	150.01
Prueba 23	30.01	49.95	80.00	100.08	119.93	150.05
Prueba 24	30.02	49.95	80.02	100.12	119.92	150.03
Prueba 25	30.00	49.94	79.99	100.00	119.95	150.07
Prueba 26	30.04	50.09	80.01	100.02	119.92	150.05
Prueba 27	30.03	50.05	80.01	100.02	120.04	150.03
Prueba 28	29.99	49.89	80.03	99.99	120.05	150.02
Prueba 29	30.02	49.94	80.00	100.02	119.96	150.05
Prueba 30	30.01	49.90	80.02	99.93	119.91	149.94
<b>Media muestral (mm)</b>	30.013	49.991	80.014	100.033	119.986	150.015
<b>Desviación estándar (mm)</b>	0.021	0.077	0.018	0.043	0.071	0.033
<b>Error relativo (%)</b>	0.042	-0.019	0.018	0.033	-0.011	0.010

Tabla 17. Registro de datos del eje de “toma de muestra”

Registro de datos del “eje toma de muestra” al recorrer diferentes distancias						
Distancia deseada (mm)	50	60	70	80	90	100
Prueba 1	50.00	59.97	69.99	79.97	89.97	100.04
Prueba 2	50.04	59.98	70.03	79.99	90.00	100.01
Prueba 3	50.03	60.01	70.05	80.04	89.96	100.06
Prueba 4	50.04	60.03	70.04	79.99	90.03	100.02
Prueba 5	50.02	60.05	70.06	79.97	89.97	99.96
Prueba 6	50.02	59.98	70.07	80.01	89.98	99.97
Prueba 7	49.99	60.00	70.08	80.02	90.04	100.06
Prueba 8	50.01	60.02	70.09	80.00	90.06	99.98
Prueba 9	49.98	59.98	70.05	80.03	89.98	100.00
Prueba 10	49.99	60.05	69.98	80.02	90.06	99.96
Prueba 11	50.01	60.03	70.00	80.01	90.02	99.97
Prueba 12	50.03	60.02	70.05	80.00	89.96	100.03
Prueba 13	49.97	60.06	70.05	80.04	90.04	99.98
Prueba 14	49.99	59.97	70.00	80.04	90.11	100.06
Prueba 15	50.00	59.98	70.03	80.05	90.05	100.02
Prueba 16	50.00	60.07	70.00	80.02	90.06	100.01
Prueba 17	50.02	60.05	70.05	79.99	90.05	99.96
Prueba 18	50.01	60.08	69.99	80.03	90.01	100.00
Prueba 19	50.02	60.03	69.97	80.05	90.07	100.00
Prueba 20	50.04	60.02	70.01	79.99	90.03	100.02
Prueba 21	50.01	60.06	70.01	80.02	89.99	100.04
Prueba 22	50.01	60.00	69.98	80.03	89.97	100.00
Prueba 23	49.99	59.98	70.03	80.02	89.98	99.98
Prueba 24	50.03	60.04	70.02	80.04	90.05	99.99
Prueba 25	50.02	59.99	70.03	80.00	90.06	99.96
Prueba 26	50.00	60.01	70.01	80.06	89.96	99.97
Prueba 27	49.98	60.06	70.04	80.09	90.04	99.97
Prueba 28	49.99	60.03	70.03	80.01	90.02	100.05
Prueba 29	50.04	60.01	70.00	80.06	90.07	100.00
Prueba 30	50.02	60.04	70.02	80.07	90.03	99.97
<b>Media muestral (mm)</b>	50.010	60.020	70.025	80.022	90.021	100.001
<b>Desviación estándar (mm)</b>	0.020	0.032	0.030	0.029	0.041	0.033
<b>Error relativo (%)</b>	0.020	0.033	0.036	0.028	0.023	0.001

Tabla 18. Registro de datos del eje de “inyección”.

Registro de datos del eje de “inyección” al recorrer diferentes distancias						
Distancia deseada (mm)	50	60	70	80	90	100
Prueba 1	50.02	60.01	70.02	80.03	90.01	100.01
Prueba 2	50.00	60.00	70.01	80.04	90.00	100.01
Prueba 3	50.00	60.02	70.03	80.00	90.02	100.02
Prueba 4	49.99	60.00	70.01	80.01	90.01	100.02
Prueba 5	50.01	60.01	70.01	80.04	90.02	100.03
Prueba 6	50.02	59.99	70.01	80.04	90.02	100.04
Prueba 7	50.01	60.03	70.01	79.99	90.02	100.03
Prueba 8	50.01	60.04	70.03	80.01	89.99	99.99
Prueba 9	50.03	60.00	70.02	79.99	90.01	100.00
Prueba 10	50.01	60.00	70.00	80.01	90.00	100.00
Prueba 11	50.00	59.99	70.00	80.04	90.02	100.03
Prueba 12	50.03	60.01	70.02	80.03	89.99	100.02
Prueba 13	50.03	60.01	70.03	80.00	90.00	100.00
Prueba 14	49.99	60.01	70.02	80.01	89.99	99.99
Prueba 15	50.01	60.01	70.01	80.01	90.03	100.03
Prueba 16	50.03	60.03	70.00	80.01	90.00	99.99
Prueba 17	50.03	60.02	70.02	80.01	90.02	100.03
Prueba 18	50.02	60.01	69.99	80.01	90.03	100.03
Prueba 19	50.00	59.99	69.99	79.99	90.03	100.03
Prueba 20	50.01	59.99	69.99	80.00	90.00	100.02
Prueba 21	50.01	60.00	70.01	80.01	90.01	100.00
Prueba 22	49.99	59.99	70.01	80.01	90.00	100.02
Prueba 23	49.99	60.02	70.00	80.02	90.00	100.02
Prueba 24	49.99	60.00	70.03	80.02	90.00	100.03
Prueba 25	50.01	60.04	70.00	80.03	90.00	100.02
Prueba 26	50.00	60.02	70.03	80.00	90.01	99.99
Prueba 27	49.99	60.01	70.00	80.03	90.02	100.02
Prueba 28	50.02	60.02	70.03	80.02	90.03	100.00
Prueba 29	50.01	60.01	70.01	80.02	90.01	100.01
Prueba 30	50.03	60.03	70.00	80.01	90.02	99.99
<b>Media muestral (mm)</b>	50.010	60.010	70.011	80.015	90.010	100.014
<b>Desviación estándar (mm)</b>	0.014	0.014	0.013	0.015	0.012	0.015
<b>Error relativo (%)</b>	0.019	0.017	0.016	0.018	0.011	0.014

Se muestra el grafico del comportamiento de los ejes al recorrer la mínima y mayor distancia en las Figuras 89-98.

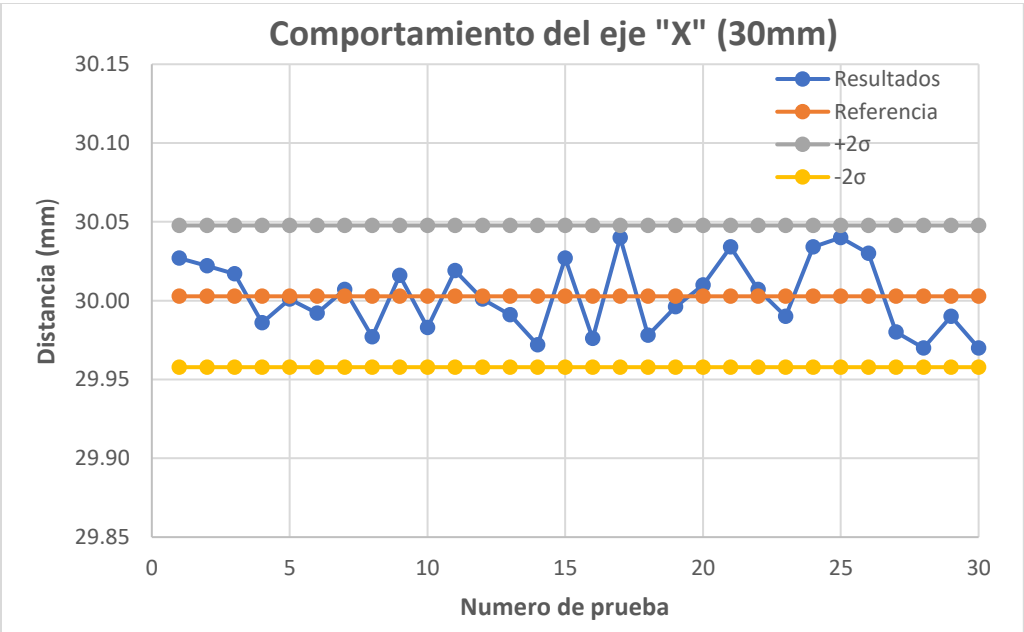


Figura 89. Comportamiento del eje X (30 mm).

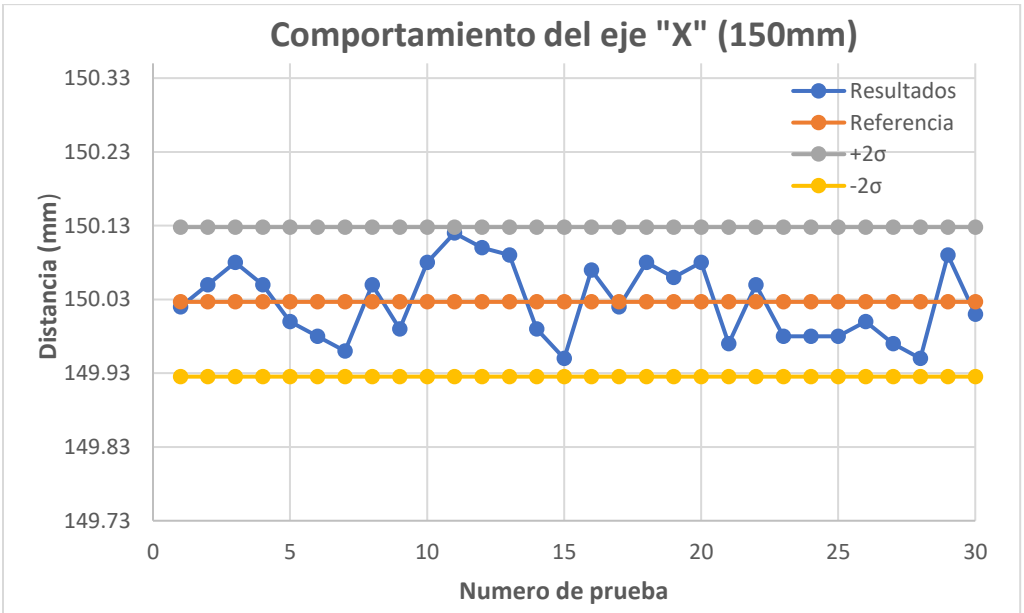


Figura 90. Comportamiento del eje X (30 mm).



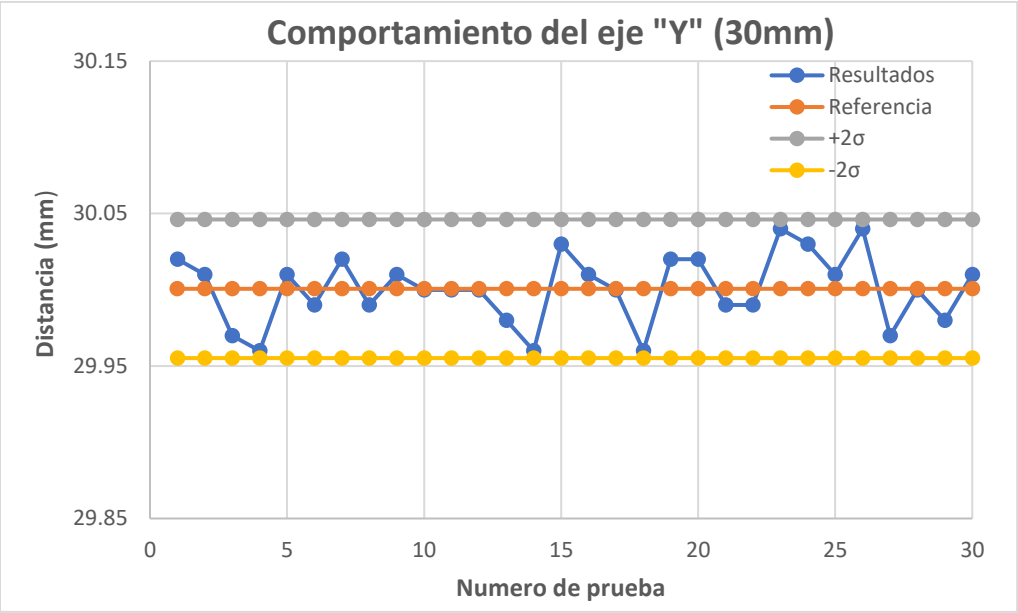


Figura 91.Comportamiento del eje Y (30 mm).

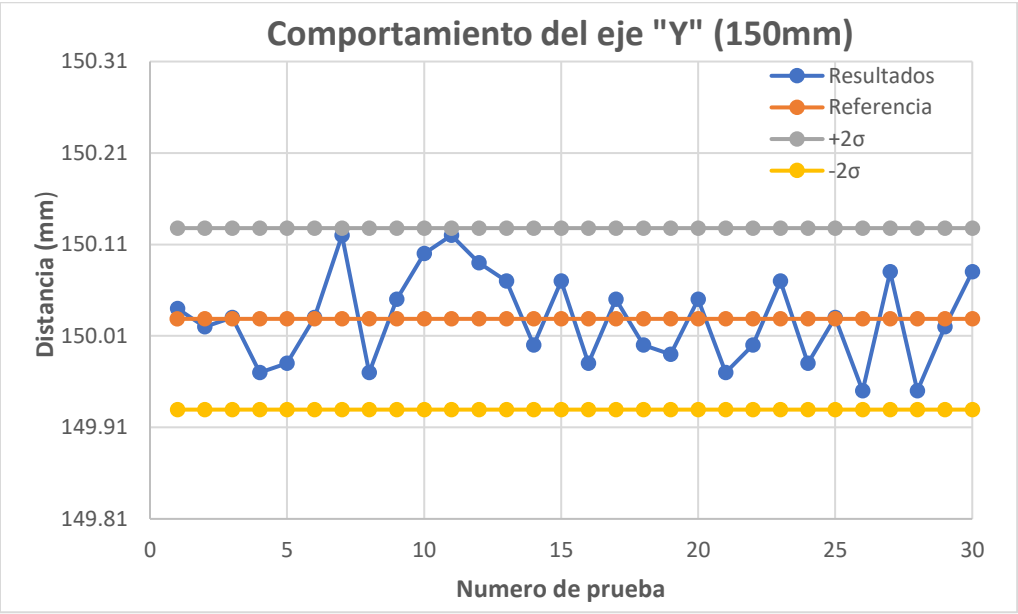


Figura 92.Comportamiento del eje Y (150 mm).

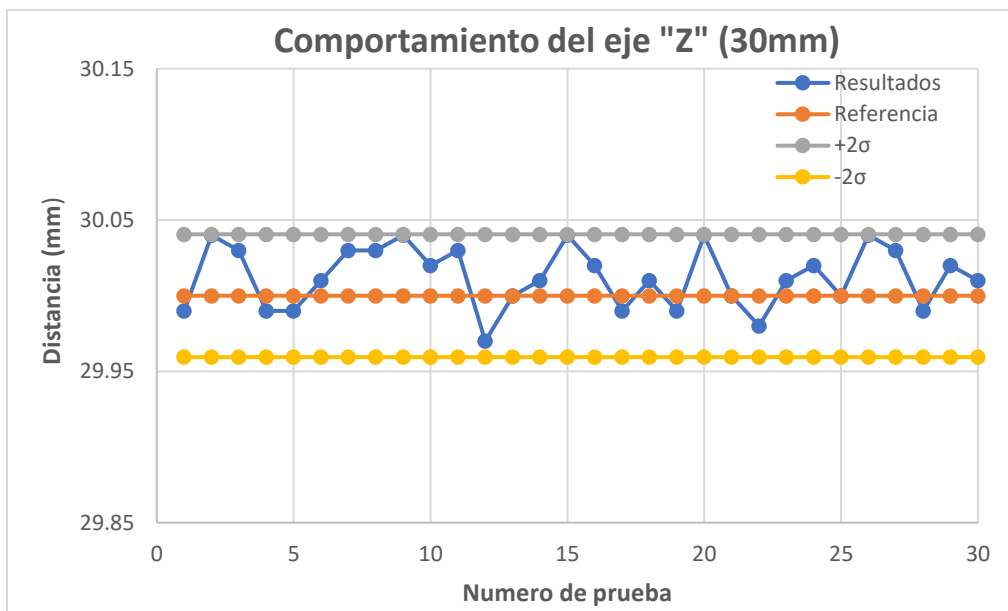


Figura 93. Comportamiento del eje Z (30 mm).

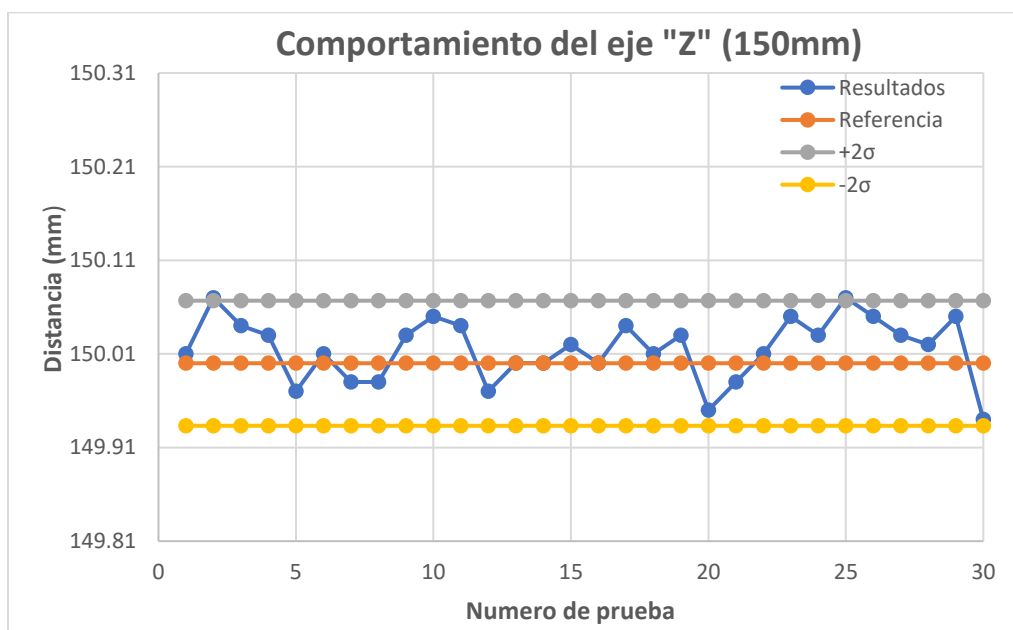


Figura 94. Comportamiento del eje Z (150 mm).

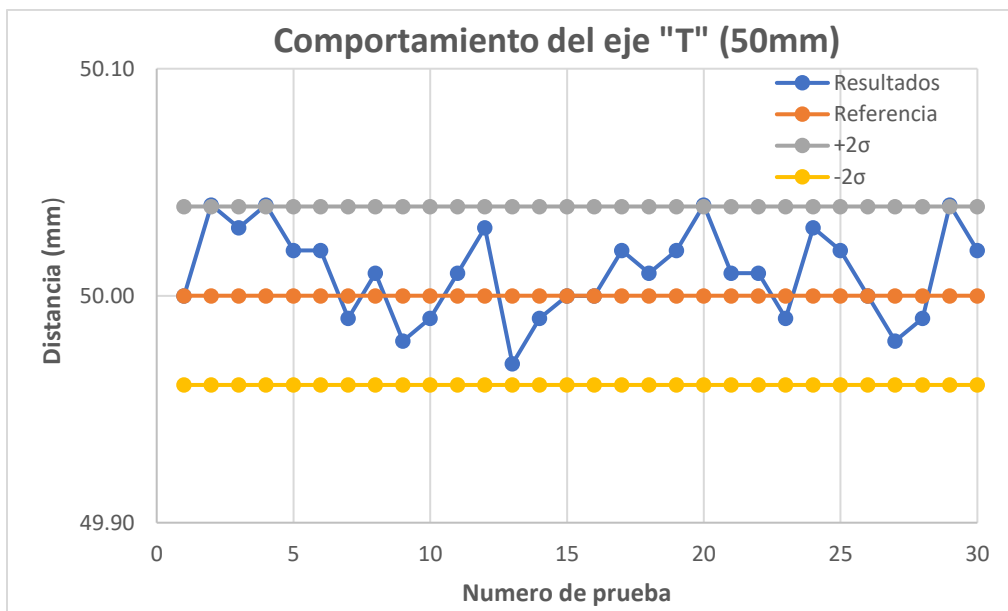


Figura 95. Comportamiento del eje T (50 mm).

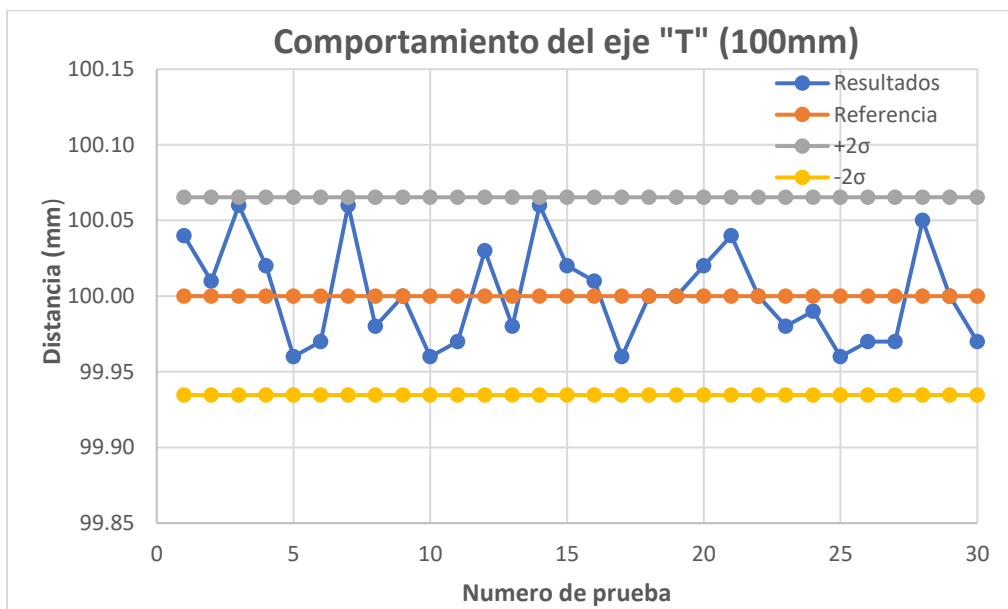


Figura 96. Comportamiento del eje T (100 mm).

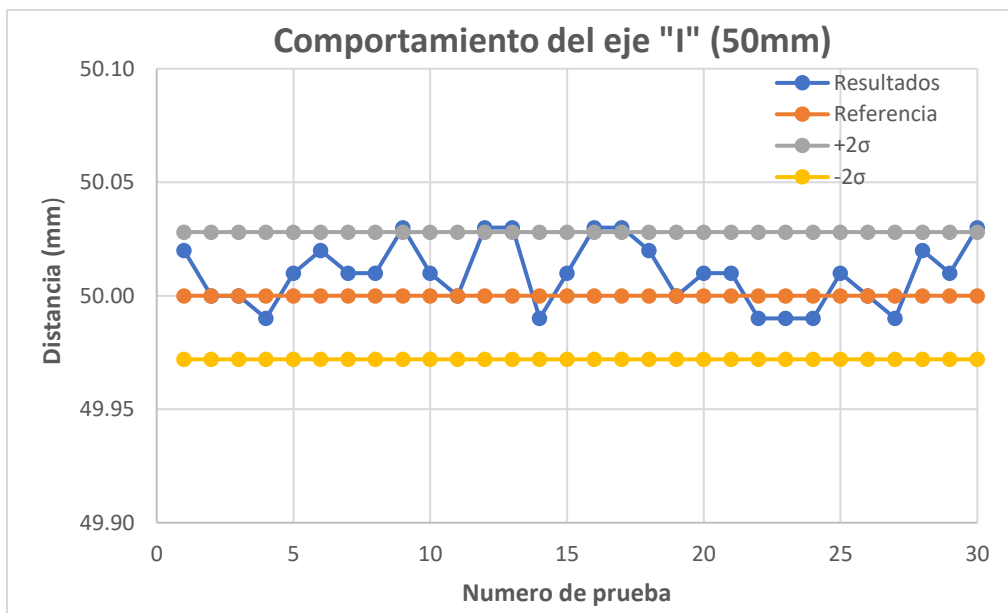


Figura 97. Comportamiento del eje I (50 mm).

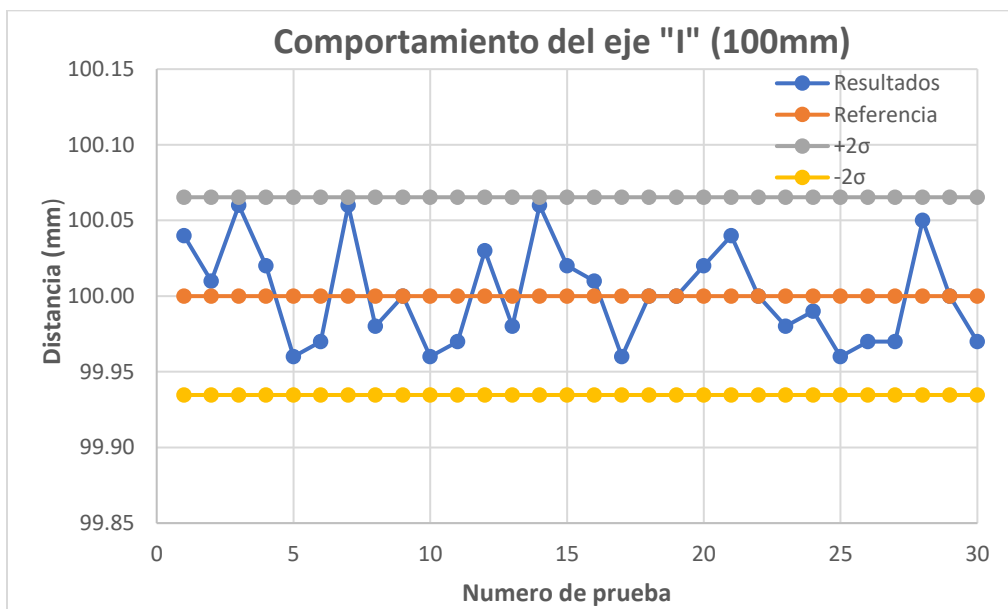


Figura 98. Comportamiento del eje I (100 mm).

#### ▪ Estudio de Tiempos del proceso de manejo e inyección de muestras

La propuesta de solución busca automatizar el proceso de manejo e inyección de muestras al espectrómetro de masas, lo que implica cambiar la forma en la que se llevan a cabo las tareas que conforman dicho proceso, debido a lo anterior, se debe tomar como base el estándar de tiempo del proceso manual ya que esto permite comparar los tiempos de

ejecución del proceso con y sin la implementación de la propuesta de solución, por lo que es necesario realizar un estudio de tiempos siguiendo los requerimientos que se muestran a continuación [46]:

- El operario debe estar completamente familiarizado con el proceso
- El método de ejecución de tareas debe estar estandarizado
- Los analistas de tiempo, operarios y el supervisor deben tomar las medidas necesarias para realizar un estudio coordinado y adecuado
- La maquinaria o equipo involucrados en el proceso deben encontrarse en condiciones normales
- Se debe contar con material suficiente para que el proceso se efectúe de manera adecuada durante todo el estudio

Una vez que se cumple con los requerimientos antes mencionados, se procede a determinar el equipo adecuado para realizar el estudio, para el caso del proceso manual de manejo e inyección de muestras, se empleará el método de regreso a ceros para lo que se emplea:

- Cronómetro
- Video cámara
- Tablero de notaciones de tiempos

Una vez que se han cubierto los aspectos anteriores se realiza el estudio de tiempos cumpliendo las siguientes etapas:

1. *Obtener y registrar toda la información posible acerca del proceso, los operarios y el entorno en el que se lleva a cabo la ejecución de las tareas:*

La información necesaria se obtuvo por medio de encuestas realizadas a los 5 operarios frecuentes del equipo y al supervisor del laboratorio de posgrado e investigación de operaciones unitarias, recopilando su grado académico, área de estudio, tiempo que se lleva trabajando con el equipo, experiencia en la realización del proceso, y condiciones en las que trabajan normalmente.

2. *Desglosar una descripción detallada de cada una de las tareas o etapas que conforman el proceso en su totalidad:*

El proceso de manejo e inyección de muestras se compone de 6 etapas, las cuales se describen a continuación

- Retirar jeringa: el espectrómetro de masas cuenta con una estación fija donde se encuentra la jeringa, para poder comenzar con el proceso se debe retirar la jeringa de dicha estación desacoplándola del tubo capilar que la conecta a la fuente de ionización.
- Enjuagar Jeringa: una vez que se ha retirado la jeringa se realiza un proceso de enjuague en el cual se toman 100  $\mu\text{L}$  de solución, que es posteriormente desechada.

- Tomar muestra: este proceso se realiza siempre y cuando la jeringa haya pasado por el proceso de enjuague, y consta de la toma de 100  $\mu$ L del total de muestra del dial con el que se esté trabajando.
  - Colocar jeringa: una vez que se toma el volumen total de la muestra a analizar, se procede a colocar la jeringa en la estación fija del espectrómetro y se acopla al tubo capilar que permitirá que se realice la inyección de la muestra.
  - Inyección: el usuario debe ajustar la plataforma encargada de empujar el embolo de la jeringa y el proceso de inyección se ejecuta automáticamente.
3. *Medir y registrar el tiempo invertido por el operario en llevar a cabo cada etapa del proceso*  
La medición y registro de tiempos se lleva a cabo por tarea y por usuario lo que permite obtener un tiempo promedio tanto de las etapas individuales como del proceso completo, como se muestra en la Tabla 19

*Tabla 19. Tiempos registrados para poder completar una ejecución con el sistema actual.*

Paso	Etapas	Tiempos de forma manual
1	Retirar jeringa	50 segundos
2	Enjuague	20 segundos
3	Toma de muestra	30 segundos
4	Colocación de la muestra	35 segundos
6	Inyección	15 min

Total en segundos	1035
Total en minutos	17.25

*[Creación propia]*

En la Tabla 20 se muestran los tiempos de ejecución de cada uno de los procesos realizados con el automuestreador, para los cuales se siguió el mismo método de regreso a ceros.

*Tabla 20. Tiempos registrados para completar una ejecución con el sistema propuesto.*

Paso	Etapas	Tiempos registrados con Automuestreador
1	Tomar jeringa	8 segundos
2	Enjuague	15 segundos
3	Toma de muestra	15 segundos
4	Colocación de la muestra	7 segundos
6	Inyección	9 min

Total en segundos	570
Total en Minutos	9.5

[Creación propia]

La Figura 99 muestra una comparación entre los tiempos de ejecución de cada tarea del sistema actual de manejo de toma de muestras y del sistema propuesto.



Figura 99. Tiempos de ejecución de las tareas de forma manual y de forma automática

Como se puede observar en la Figura 92. Existe una notable diferencia en los tiempos de ejecución de cada paso. Esta diferencia no sólo es significativa, sino que también representa una ventaja, ya que estandariza el tiempo requerido para cada paso. Esto es particularmente importante dado que el tiempo puede variar considerablemente en el sistema actual dependiendo de la experiencia del usuario.

#### ■ Tiempos de ejecución del proceso completo

Para determinar el tiempo de ejecución de un proceso completo, se realiza un análisis centrado en el número promedio de muestras que cada usuario examina al utilizar el instrumento. Cabe destacar que, en promedio, cada usuario maneja un total de 20 muestras. Este aspecto es importante para evaluar la eficiencia del instrumento y su rendimiento en condiciones de uso reales.

Los tiempos de ejecución específicos de estas muestras se ilustran en detalle en la Tabla 21.

Tabla 21. Tiempos de ejecución del proceso completo

Tiempos de ejecución del proceso		
No. Muestra	Manual (minutos)	Con Automuestreador (minutos)
1	17.25	9.5
2	37.85	19.75
3	58.45	30
4	79.05	40.25
5	99.65	50.5
6	120.25	60.75
7	140.85	71
8	161.45	81.25
9	182.05	91.5
10	202.65	101.75
11	223.25	112
12	243.85	122.25
13	264.45	132.5
14	285.05	142.75
15	305.65	153
16	326.25	163.25
17	346.85	173.5
18	367.45	183.75
19	388.05	194
20	408.65	204.25
<b>Total</b>	<b>6.86 hrs.</b>	<b>3.41 hrs</b>

Se puede observar que el uso del Automuestreador ofrece una ventaja significativa, ya que reduce el tiempo total de trabajo con el instrumento en un 54.45%. Esta ventaja exponencial de utilizar el sistema de Automuestreo se ilustra de manera más clara en la Figura 100.

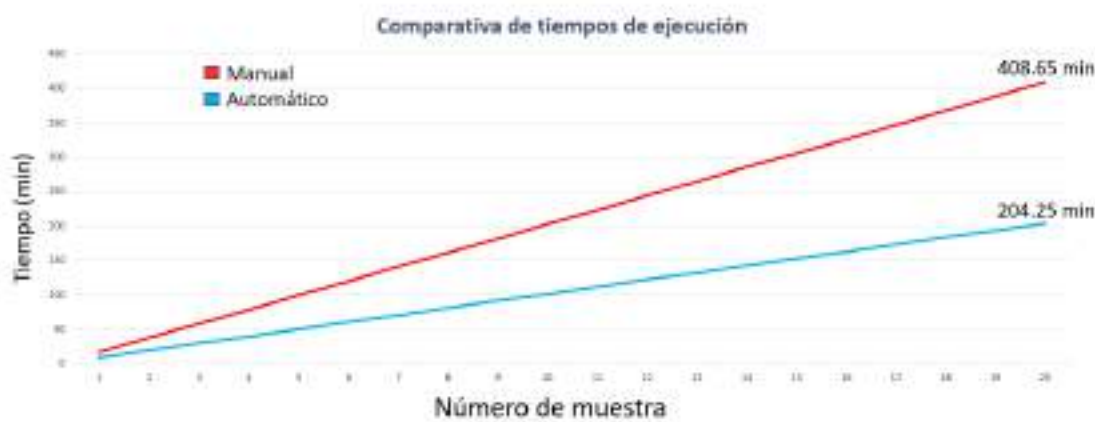


Figura 100. Comparativa de tiempos de ejecución.



## 5.4 Evaluación de la toma e inyección de muestras

Uno de los principales parámetros a verificar en la validación de un método analítico es la exactitud de los resultados proporcionados por dicho método [47]. La exactitud, suma de la veracidad y la precisión, se comprueba asegurando la trazabilidad de los resultados proporcionados por el método analítico a una referencia. Por lo tanto, comparándonos a una referencia podemos saber si somos trazables a la referencia utilizada en el momento de la comparación.

Un gráfico de control (Figura 101) es una herramienta gráfica que muestra una magnitud de una característica que ha sido obtenida a través de un proceso de muestreo. El eje vertical muestra la magnitud, y el eje horizontal representa el tiempo o bien el número de ensayo. La Línea Central (LC) representa el valor deseado de la característica bajo estudio. Las Líneas Superior e Inferior de Control son unos límites que, si son sobrepasados, indican que el proceso probablemente ha perdido su estabilidad estadística y está por tanto probablemente fuera de control.

En la práctica se toman como límites unas “distancias” de 3 veces la desviación típica, a derecha y a izquierda de la línea central.

$$LCI = LC - 3\sigma$$

$$LCS = LC + 3\sigma$$

El motivo de esta elección es de índole puramente práctica y de naturaleza empírica: simplemente se ha demostrado a lo largo del tiempo, desde el primer momento en que Shewhart propuso estos límites, que constituyen buen intervalo en el que se equilibra la capacidad de control con una limitación del coste que suponen las falsas alarmas.

Así mismo, para establecer los límites de aviso se toman unas “distancias” de 2 veces la desviación típica, a derecha y a izquierda de la línea central.

$$LAI = LC - 2\sigma$$

$$LAS = LC + 2\sigma$$

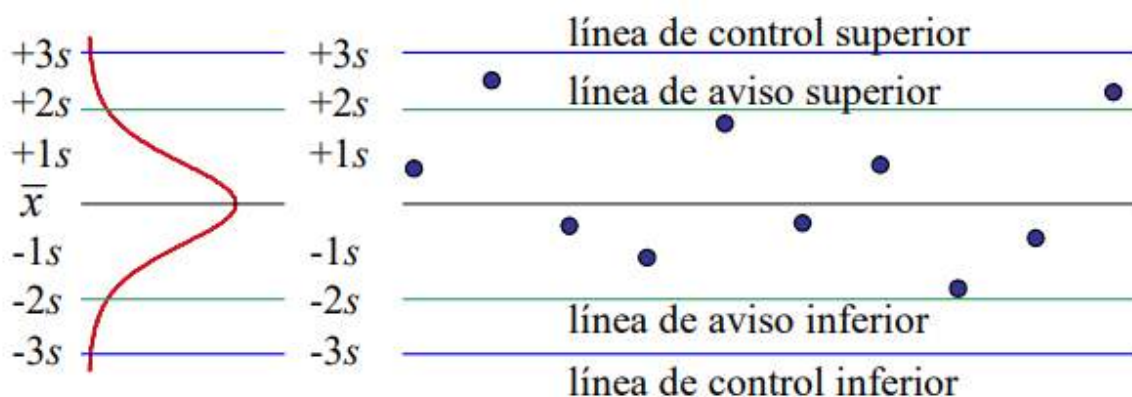


Figura 101. Líneas de aviso y de control en un gráfico de control (parte derecha), y su relación con la distribución de la muestra de control.

Tomando en cuenta lo anterior se realizaron 3 gráficos de control para la toma de muestra a volúmenes diferentes utilizando una jeringa calibrada para realizar la lectura, comprobando con ello que los ensayos realizados son trazables a la referencia deseada como se muestra en las Figuras 102, 103 y 104.

Tabla 22. Tabla de datos para la toma de muestra (100  $\mu$ L)

TOMA DE MUESTRA (100 $\mu$ L)						
#Muestra	Referencia ( $\mu$ L)	Volumen ( $\mu$ L)	(+2 $\sigma$ )	(+3 $\sigma$ )	(-2 $\sigma$ )	(-3 $\sigma$ )
1	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
2	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
3	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
4	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
5	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
6	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
7	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
8	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
9	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
10	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
11	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
12	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
13	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
14	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
15	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
16	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
17	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
18	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
19	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
20	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
21	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
22	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
23	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
24	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
25	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
26	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
27	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
28	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
29	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
30	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
31	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
32	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
33	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
34	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031

35	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
36	100	101	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
37	100	101	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
38	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
39	100	101	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
40	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
41	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
42	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
43	100	101	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
44	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
45	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
46	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
47	100	99	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
48	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
49	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
50	100	100	101.277753	101.9166297	98.72224687	98.08337031
Media muestral ( $\mu\text{L}$ )		99.6				
Desviación estándar ( $\mu\text{L}$ )		0.638876565				
Error relativo (%)		-0.4				

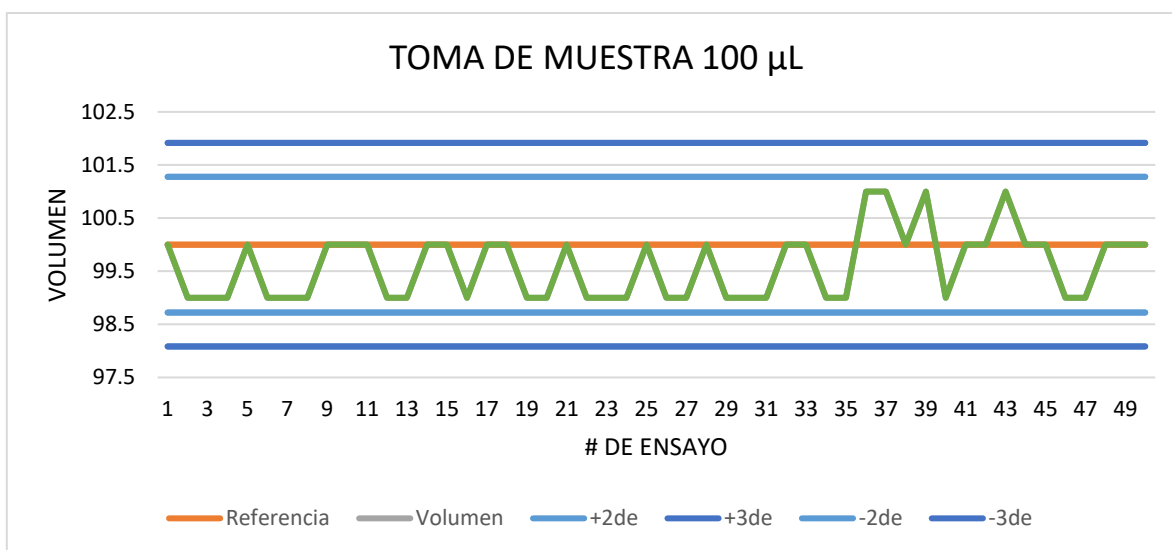


Figura 102. Gráfico de control de toma de muestra de 100  $\mu\text{L}$

Tabla 23. Tabla de datos para la toma de muestra (75  $\mu\text{L}$ )

TOMA DE MUESTRA (75 $\mu\text{L}$ )						
#Muestra	Referencia ( $\mu\text{L}$ )	Volumen ( $\mu\text{L}$ )	(+2 $\sigma$ )	(+3 $\sigma$ )	(-2 $\sigma$ )	(-3 $\sigma$ )
1	75	73	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
2	75	74	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
3	75	74	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
4	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
5	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
6	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
7	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
8	75	74	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
9	75	76	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
10	75	76	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
11	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
12	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
13	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
14	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
15	75	74	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
16	75	74	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
17	75	74	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
18	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
19	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
20	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
21	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
22	75	76	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
23	75	76	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
24	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
25	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
26	75	76	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
27	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
28	75	74	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
29	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
30	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
31	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
32	75	76	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
33	75	76	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
34	75	76	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
35	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
36	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
37	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513

38	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
39	75	76	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
40	75	76	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
41	75	76	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
42	75	74	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
43	75	74	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
44	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
45	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
46	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
47	75	75	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
48	75	74	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
49	75	74	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
50	75	74	76.47965799	77.219487	73.520342	72.780513
Media muestral ( $\mu\text{L}$ )		74.94				
Desviación estándar ( $\mu\text{L}$ )		0.739828993				
Error relativo (%)		1.27027027				

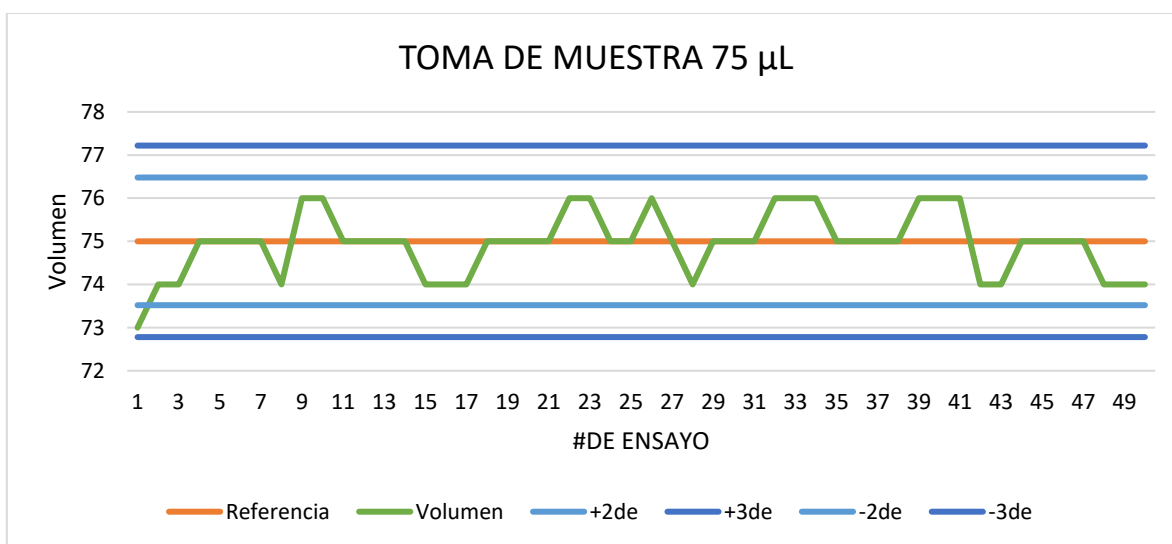


Figura 103. Gráfico de control de toma de muestra de 75  $\mu\text{L}$

Tabla 24. Tabla de datos para la toma de muestra (50  $\mu\text{L}$ )

TOMA DE MUESTRA (50 $\mu\text{L}$ )						
#Muestra	Referencia ( $\mu\text{L}$ )	Volumen ( $\mu\text{L}$ )	(+2 $\sigma$ )	(+3 $\sigma$ )	(-2 $\sigma$ )	(-3 $\sigma$ )
1	50	51	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
2	50	51	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
3	50	51	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
4	50	49	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
5	50	49	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
6	50	49	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
7	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
8	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
9	50	51	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
10	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
11	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
12	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
13	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
14	50	49	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
15	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
16	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
17	50	51	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
18	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
19	50	51	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
20	50	51	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
21	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
22	50	49	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
23	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
24	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
25	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
26	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
27	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
28	50	49	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
29	50	51	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
30	50	51	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
31	50	51	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
32	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
33	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
34	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
35	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
36	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
37	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948

38	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
39	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
40	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
41	50	51	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
42	50	51	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
43	50	51	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
44	50	49	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
45	50	49	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
46	50	49	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
47	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
48	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
49	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
50	50	50	51.33033677	51.99550515	48.6696632	48.0044948
Media muestral ( $\mu\text{L}$ )		50.08				
Desviación estándar ( $\mu\text{L}$ )		0.665168384				
Error relativo (%)		0.16				

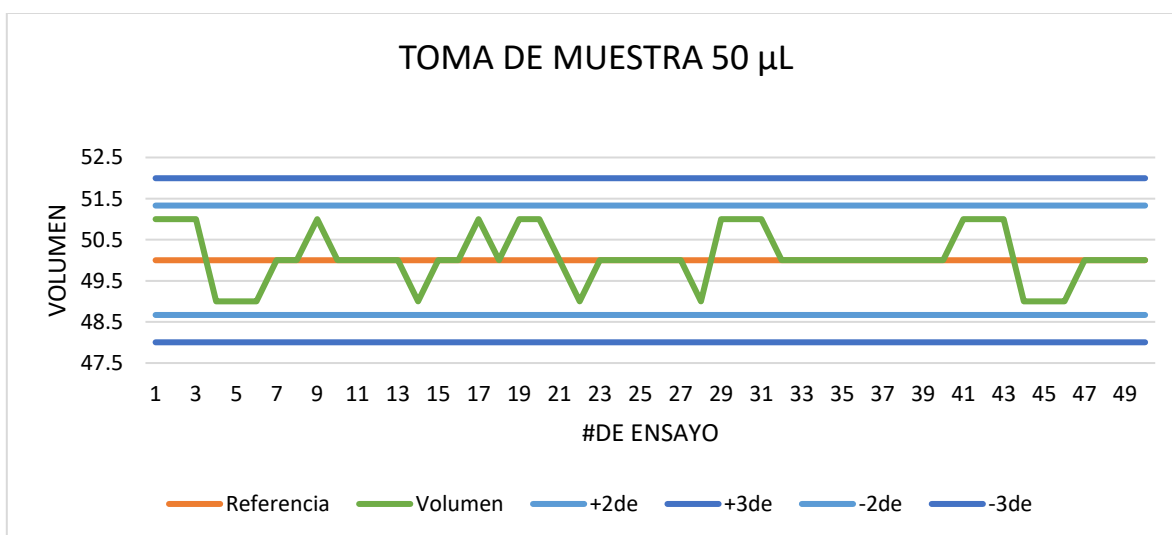


Figura 104. Gráfico de control de toma de muestra de 50  $\mu\text{L}$

Debido al tiempo que demora el proceso de inyección, se realizó únicamente un gráfico de control, que de igual modo, permite comprobar que los ensayos realizados son trazables a la referencia deseada como se muestra en las Figura 105.

Tabla 25. Tabla de datos para la inyección de muestra (2  $\mu\text{L}/\text{min}$ )

INYECCIÓN DE MUESTRA (2 $\mu\text{L}/\text{min}$ )						
#Muestra	Referencia ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )	Flujo ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )	(+2 $\sigma$ )	(+3 $\sigma$ )	(-2 $\sigma$ )	(-3 $\sigma$ )
1	2	2	2.00176964	2.00265446	1.99823036	1.99734554
2	2	1.99960008	2.00176964	2.00265446	1.99823036	1.99734554
3	2	1.99920032	2.00176964	2.00265446	1.99823036	1.99734554
4	2	2.00080032	2.00176964	2.00265446	1.99823036	1.99734554
5	2	1.99880072	2.00176964	2.00265446	1.99823036	1.99734554
6	2	2	2.00176964	2.00265446	1.99823036	1.99734554
7	2	1.99960008	2.00176964	2.00265446	1.99823036	1.99734554
8	2	2.002002002	2.00176964	2.00265446	1.99823036	1.99734554
9	2	2	2.00176964	2.00265446	1.99823036	1.99734554
10	2	2	2.00176964	2.00265446	1.99823036	1.99734554
Media muestral ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )		2.000000352				
Desviación estándar ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )		0.00088482				
Error relativo (%)		1.76077E-05				

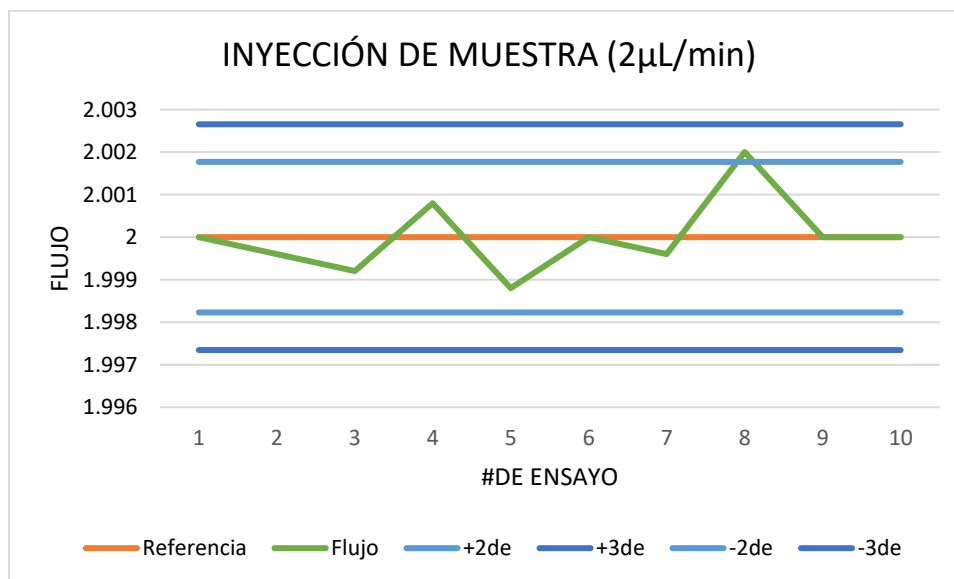


Figura 105. Gráfico de control de inyección de muestra de 2  $\mu\text{L}/\text{min}$



## 5.5 Estudio de factibilidad del proyecto

El primer paso en la construcción del sistema es la preparación de un inventario completo de todos los materiales necesarios. Este inventario es esencial para garantizar que todos los componentes estén disponibles antes de comenzar el proceso de construcción.

Para plasmar la ventaja de la construcción del sistema de automuestreo se realizan los cálculos de construcción y mano de obra del proyecto y se compara con los precios de automuestreadores con características similares en el mercado.

La Tabla 22 proporciona una visión detallada de estos materiales, junto con sus costos asociados. Esta tabla fue una herramienta valiosa para la planificación financiera y logística del proyecto.

Tabla 26. Costos de los componentes y herramientas empleados.

ARTICULO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
<b>MOTORES</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• NEMA 23</li><li>• NEMA 17</li><li>• NEMA 14</li></ul>	2 1 2	\$613 \$180 \$365	\$1,226 \$180 \$730
<b>HUSILLOS DE BOLAS</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• 50 cm</li><li>• 40 cm</li><li>• 20 cm</li></ul>	1 1 1	\$1,393 \$1,263 \$1,190	\$1,393 \$1,263 \$1,190
<b>DRIVER</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• TB 6600</li></ul>	5	\$218	\$1,090
<b>MICROCONTROLADOR</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• ESP 32</li></ul>	1	\$265	\$265
<b>GUÍA LINEAL</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• SRB12 52 cm</li><li>• SRB12 40 cm</li><li>• SRB12 20 cm</li></ul>	2 2 2	\$932 \$602 \$482	\$1,864 \$1,204 \$964
<b>PERFILES</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• 2040 52 cm</li><li>• 2040 40 cm</li></ul>	4 2	\$230 \$210	\$920 \$420

<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2020 52 cm</li> <li>• 2020 40 cm</li> </ul>	2 2	\$190 \$170	\$380 \$340
<b>FUENTE DE ALIMENTACIÓN</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 12 V a 10 A</li> </ul>	1	\$491	\$491
<b>OTROS COMPONENTES Y HERRAMIENTA</b>	--	--	\$10,596
<b>TOTAL: \$24,516</b>			

Una vez obtenido el costo de todos los materiales que se van a utilizar para el desarrollo del proyecto, se determina el costo de mano de obra para la integración total del proyecto, para ello se toma como base el salario promedio mensual en pesos mexicanos de un ingeniero en control y automatización y de un pasante de dicha ingeniería según el Instituto Mexicano para la Competitividad [48], como se muestra en la Tabla 19.

- **Ingeniero en control y automatización**

Salario mensual promedio en México \$22,877

Salario semanal \$5,719.25

Salario diario \$817.05

Salario por hora \$102.13

- **Pasante de ingeniería en control y automatización**

Salario mensual promedio en México \$12,762

Salario semanal \$3,190.5

Salario diario \$455.78

Salario por hora \$56.97

Tomando en cuenta las tarifas por hora desglosadas de los salarios mensuales promedio, se tienen los siguientes costos de acuerdo con el tiempo que se trabajó en el proyecto.

Tabla 27. Desarrollo de ingeniería conceptual y de detalle.

Nombre	Rol	Fecha de ingreso	Tarifa	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
Ing. Control y Automatización	Ingeniería conceptual	10/07/2023	\$ 102.13	\$6,314	\$2,878	--	--	--
	Programación del microcontrolador	04/09/2023	\$ 102.13	--	--	\$7,972	\$5,305	--
	Desarrollo del manual de usuario	27/11/2023	\$ 102.13	--	--	--	--	\$1,021
	Programación de la interfaz de usuario	10/10/2023	\$ 102.13	--	--	--	\$6,513	\$3,700
Técnico en automatización	Construcción y conexión del sistema	28/08/2023	\$ 56.97	--	\$1,139	--	--	--
TOTAL: \$34,842								

En la Tabla 24 se muestra el costo total de proyecto sumando el costo de los materiales y el costo de la ingeniería conceptual y de detalle.

Tabla 28. Costo total del proyecto

Concepto	Cantidad
Costo de materiales	\$24,516
Costo de desarrollo de ingeniería conceptual y de detalle	\$34,842
<b>COSTO TOTAL DEL PROYECTO</b>	<b>\$59,358</b>
NOTA: No incluye IVA	

En la Tabla 25 se realiza la comparativa de precios para analizar la factibilidad del proyecto.

Tabla 29. Comparativa de precios

Comparativa de sistemas	
Solución implementada	\$59,358
Sistema perki elmer Flexar HPLC con detector SQ300 MS	\$223,848
Espectrofotometro perkin elmer lambda 650 UV/Vis L6020031 con sistema de automuestreo	\$195,903
Autosampler RS for Antaris™ II for Antaris II FT- NIR	\$230,000
Muestreadores automáticos ESI DX FAST	\$198,753

Como se puede observar en la Tabla 25, el sistema de muestreo automático desarrollado como solución a los requerimientos de usuario establecidos por el laboratorio tiene una clara ventaja monetaria ya que, si bien los sistemas comerciales cumplen con el manejo de muestras, son de propósito general, por lo que no serán capaces de realizar las operaciones de enjuague e inyección, etapas fundamentales dentro del proceso. Por lo tanto, la construcción del sistema de muestreo automático cumple con el criterio de factibilidad.

## CONCLUSIONES

En el desarrollo del presente proyecto, se realizó el diseño y construcción de un sistema de muestreo automático para un espectrómetro de masas de ultra alta resolución, logrando un avance significativo en la optimización de tiempos y la reducción de errores humanos. Este sistema multifuncional no solo mejora la eficiencia y precisión en la toma e inyección de muestras, sino que también mejora los protocolos del laboratorio.

La exhaustiva evaluación del sistema manual proporcionó una base sólida para identificar las deficiencias y establecer los criterios de diseño para el sistema automático, asegurando que la solución propuesta fuera coherente con los requisitos técnicos y operativos del espectrómetro de masas.

El diseño del sistema automático de muestreo se enfocó en la precisión y eficiencia operativa. La implementación exitosa de este diseño refleja un avance significativo en la precisión y consistencia de la toma e inyección de muestras, resaltando la relevancia de un enfoque integrador y orientado a las necesidades específicas del entorno del laboratorio.

El desarrollo de una interfaz de usuario intuitiva permite una gestión eficiente de las tareas del sistema, mejorando con ello la experiencia del usuario al ofrecer un monitoreo preciso y una operación más personalizada y accesible.

Las pruebas de rendimiento y compatibilidad confirmaron la eficacia del sistema de muestreo automático integrado con la interfaz de usuario. Los resultados obtenidos en la evaluación de precisión demostraron que, al recorrer cada una de las trayectorias establecidas para llevar a cabo el manejo e inyección de muestras, el error relativo porcentual se mantiene por debajo del 1%, independientemente de la distancia de la trayectoria, asegurando que el sistema posea un alto grado de precisión. Por su parte, el análisis de tiempos fue favorable ya que se consiguió una reducción de 54.45% del tiempo total promedio de la realización de cada una de las etapas que conforman el proceso de manejo e inyección de muestras, aspecto que permite realizar un mayor número de ensayos y reduce significativamente la duración de las jornadas en las que se trabaja con el espectrómetro de masas de ultra alta resolución.

La precisión y eficiencia operativa observadas validan el cumplimiento de los objetivos de diseño, demostrando que el sistema proporciona una solución robusta y confiable para la automatización del proceso de muestreo en el espectrómetro de masas de ultra alta resolución.

## PROPUESTA PARA TRABAJOS FUTUROS

Para realizar la implementación del sistema de muestreo automático con el espectrómetro de masas de manera adecuada, se recomienda un desarrollo prospectivo que englobe los siguientes puntos:

- Protocolo de pruebas
- Manual de operación
- Manual de mantenimiento
- Curso de capacitación
- Métodos de salvaguarda manuales

De igual manera, se sientan las bases para el desarrollo de un sistema de aplicación general, en el cual la configuración permitirá que el usuario establezca la velocidad de inyección, las dimensiones de la gradilla de muestras, el número de jeringas a utilizar y su capacidad. El monitoreo y la operación del sistema se proponen a través de una interfaz gráfica, desarrollada en formato de página web, para facilitar el seguimiento desde cualquier dispositivo con acceso a la red Wi-Fi del laboratorio.

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] M. A. G. Cantellano y L. M. M. Zetina, "*La espectroscopia y su tecnología: Un repaso histórico y su importancia para el siglo XXI*," **Latin-American Journal of Physics Education**, vol. 9, no. 4, p. 13, 2015.
- [2] Adaway JE, Keevil BG, Owen LJ. Liquid chromatography tandem mass spectrometry in the clinical laboratory. *Ann Clin Biochem* 2015;52:18-38
- [3] K. L. Busch, Mass spectrometry/mass spectrometry: Techniques and applications of Tandem mass spectrometry. New York, N.Y: VCH Publishers, 1988.
- [4] Model U6k Universal Liquid Chromatography Injector Instruction Manual, Waters, Milford Massachusetts, 1973.
- [5] Operating Instructions Model 7125 Manual Sample Injector, Rheodyne LLC (a subsidiary of IDEX Corporation), Cotati, California, 2320157D, June 2001.
- [6] M. W. Dong, HPLC and UHPLC for Practicing Scientists, (John Wiley, & Sons Hoboken, New Jersey, 2nd ed., 2019), Chapters 2,4,5,7-9, and 11.
- [7] M. C. Carvalho y B. D. Eyre, "A low cost, easy to build, portable, and universal autosampler for liquids", *Methods Oceanogr.*, 2014.
- [8] L. Ruiz, *El control numérico computarizado en el desarrollo industrial*. México D.F: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., 2006.
- [9] G.K. Boon, *Automatización flexible en la industria*. Noriega: Limusa, 1991.
- [10] Bermejo, Química analítica General... Vol.2. Paraninfo, 1992.
- [11] Payá, Andrus. "Fundamentos y Funciones de la Espectrometría de Masa." Universidad de Valencia, España, 2006.
- [12] E. C. MEURER, Espectrometría de Massas para Iniciantes. Editora e Livraria Appris, 2020. doi: 10.18366/ecme.1202.2020.
- [13] F. J. Holler y S. R. Crouch, Eds., Fundamentals of analytical chemistry. CENGAGE Learning, 2014.
- [14] J. J. Thomson, Rays of Positive Electricity, and their Application to Chemical Analysis. Londres: Longmanns Green, 1913.
- [15] Química analítica. McGraw-Hill, 2001.
- [16] W. Skoog, Química analítica. McGraw-Hill Interam., 1998.
- [17] J. E. Pliego Sandoval, A. C. Gschaedler Mathisa, L. Amaya Delgado y E. J. Herrera López, "Diseño de un dispositivo automático para la toma de muestras en un proceso de fermentación sumergida", XXXIV Encuentro Nacional y III Congreso Internacional de la AMIDIQ, 2013.

- [18] “Automuestreador para la venta - Automuestreador HPLC / Sistema de automuestreador - ANTITECK”. AntiTeck. Accedido el 1 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://antiteck.com/es/muestreador-automático-2/>
- [19] J. Ružička y J. W. B. Stewart, “Flow injection analysis,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 79, pp. 79–91, octubre de 1975. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(00\)89421-0](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(00)89421-0)
- [20] K. L. Busch, *Mass spectrometry/mass spectrometry: Techniques and applications of Tandem mass spectrometry*. New York, N.Y: VCH Publishers, 1988.
- [21] L.R. Snyder and J.J. Kirkland, *Introduction to Modern Liquid Chromatography* (John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 3rd ed., 2010), Chapter 3.
- [22] V. Athani, *Stepper Motors: Fundamentals, Applications And Design*. Bombay: New Age Int. Publishers, 2009.
- [23] Baluta, G. (2007). Microstepping Mode for Stepper Motor Control. 2007 International Symposium on Signals, Circuits and Systems, 2, 1–4.
- [24] Elektronik, T. M. (2020, septiembre 8). Motor paso a paso – tipos y ejemplos del uso de motores paso a paso
- [25] Bruno Saravia, A. R. (2020). ESP32 NODE MCU. Microelectrónica.
- [26] H. Yasir y I. Ahmed, “ESP32 Microcontroller Based Smart Power Meter System Design and Implementation”, *Academic Scientific J.*, vol. 25, n.º 2, pp. 136–143, 2020.
- [27] M. Khairudin, R. Asnawi y A. Shah, “The characteristics of TB6600 motor driver in producing optimal movement for the Nema23 stepper motor on CNC machine”, *TELKOMNIKA Telecommunication, Comput., Electron. Control*, vol. 18, n.º 1, pp. 343–450, 2020.
- [28] TB6600 Stepper Motor Driver User Guide. (s/f). Makerguides.com. Recuperado el 25 de abril de 2023, de <https://www.makerguides.com/wp-content/uploads/2019/10/TB6600- Manual.pdf>
- [29] HIWIN, “Husillo de bolas características y selección”, *Motion Control and Systems*, pp. 1–7, 2021
- [30] HIWIN, “Guías lineales” *Motion Control and Systems*, pp. 1–3, 2022
- [31] G. Bertolino, M. Cantero, M. Storti y F. Teruel, “MODELOS MATERIALES PARA PERFILES DE ALUMINIO”, *Mec. Comput.*, vol. 33, pp. 41–43, 2020.
- [32] Martig, S., & Castro, S. (n.d.). *Interfaces para el Monitoreo y Control de Procesos Industriales*. Edu.Ar. Retrieved May 24, 2023.
- [33] M. François, F. Osiurak, A. Fort, P. Crave, y J. Navarro, “Automotive HMI design and participatory user involvement: review and perspectives,” *Ergonomics*, vol. 60,

- [34] J. Cannan y H. Hu, “Human-Machine Interaction (HMI): A Survey”, Psu.edu. [En línea]. Disponible en: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=54640f3a02beb8a61cd59395b74a3f46506a748d>. [Consultado: 29-nov-2023].
- [35] K. Bengler, M. Rettenmaier, N. Fritz, y A. Feierle, “From HMI to HMIs: Towards an HMI framework for automated driving,” *Information (Basel)*, vol. 11, núm. 2, p. 61, 2020.
- [36] J. Cannan y H. Hu, “Human-Machine Interaction (HMI): A Survey,” Psu.edu. [En línea]. Disponible en: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=54640f3a02beb8a61cd59395b74a3f46506a748d>. [Consultado: 27-oct-2023].
- [37] A. Pontes, J. Gavilán, M. Obrero y A. Flores, *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* **3**, 251 (2006).
- [38] F. A. Amo, L. M. Normand, and F. J. S. Pérez, *Introducción a la Ingeniería del software*. Delta Publicaciones, 2005. Accessed: jun. 02, 2023.
- [39] Mateu, C. *Software libre: Desarrollo de aplicaciones Web*. UOC Formación de Posgrado, Barcelona, 2004
- [40] “Google Earth”. Google Earth. Accedido el 9 de octubre de 2023. [En línea].
- [41] H. Álvaro y D. Hernán, “LA IMPORTANCIA DEL MÉTODO EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES”, *Sci. Tech.*, vol. X, n.º 24, pp. 175–180, 2020.
- [42] Mateu, C. (2004). *Software libre: Desarrollo de aplicaciones Web*. UOC Formación de Posgrado, Barcelona.
- [43] I. Morales, *Internet Y Diseño Web Desarrollo Web (Web Development)*. Curso Práctico De Formación. RC Libros, 2022.
- [44] *Interfaces hombre-máquina para sistemas de automatización de procesos*, 101.01, ANSI, 2015.
- [45] F. Xavier Rius, Alicia Maroto, Ricard Boqué, Jordi Riu, *Técnicas de Laboratorio* 252 (2000) 382-385.
- [46] Exactitud (veracidad y precisión) de los métodos de medición y de los resultados — Parte 1: Principios *generales y definiciones*, 5725-1, ISO, 1994.
- [47] Meyers, F. E. *Estudios de tiempos y movimientos: para la manufactura gil*. Pearson educación, 2000.
- [48] <https://imco.org.mx/comparacarreras/carrera/713>
- [49] THK, “Guia de seleccion”, 24 de febrero de 9, Husillos de bolas, Madrid, España, [justificacion%20de%20materiales%20cnc/03%20Guía%20de%20selección.pdf](#).



[50] NB, “SLIDE GUIDE”, 24 de febrero de 9, GUIAS DESLIZANTES,  
[https://www.nbcorporation.com/wp-content/uploads/Catalogo\\_General\\_No\\_172S\\_SP\\_slideguide.pdf](https://www.nbcorporation.com/wp-content/uploads/Catalogo_General_No_172S_SP_slideguide.pdf).

# ANEXOS

# PATENTE

Los tramites de la patente de este proyecto se encuentran en curso

TÍTULO DE LA INVENCIÓN:	Automuestreador para manejo e inyección de muestras
-------------------------	---

**INVENTORES\*:**

<b>NOMBRE COMPLETO DEL INVENTOR/INVENTORA</b>	<b>INDIQUE SI ES: DOCENTE IPN, ADMINISTRATIVO IPN, ALUMNO, EGRESADO O COLABORADOR EXTERNO</b>	<b>DEPENDENCIA A LA QUE PERTENCE</b>	<b>DATOS DE CONTACTO (CORREO ELECTRÓNICO, EXTENSIÓN)</b>
Gutiérrez Potrero Zeltzin Yamileth	Alumno	ESIME	zgutierrezp1600@alumno.ipn.mx
Hernández Chávez Emanuel	Alumno	ESIME	Ehernandezc1612@alumno.ipn.mx
Pérez Estrada David	Alumno	ESIME	dpereze1900@alumnno.ipm.mx

\*Inventores: son aquellas personas que han realizado una aportación intelectual para obtener la invención.

**PUBLICACIONES DE LA INVENCIÓN (tesis, poster, memoria de congreso, artículo científico, gaceta politécnica, Facebook, youtube)**

¿Se ha difundido la invención?    Sí \_\_\_\_\_    No   X  

En caso afirmativo, indicar la fecha, medio y contenido. Copia y pega link donde se encuentra la información o bien anexa el documento.

Si aún no se ha divulgado, pero se pretende publicar en los próximos 12 meses, indicar la posible fecha de divulgación.

Marzo del 2024

## INFORMACIÓN TÉCNICA DE LA INVENCION

Describa su invención: en qué consiste su invención, es una formulación, máquina, dispositivo, proceso para elaborar algo, un uso nuevo, es una mejora de un producto o de un proceso y qué problema resuelve que no resuelva algo existente, elementos principales y como se encuentran conectados, cuál es su funcionamiento o etapas y condiciones del proceso.

La invención se centra en la creación de un equipo de muestreo automático para un espectrómetro de masas de ultra alta resolución. El problema que se presentaba era que ni la empresa ni las marcas externas disponían de un equipo específico para esta tarea. Además, el análisis con el equipo existente resultaba tedioso y requería largas jornadas de trabajo, por lo que se necesitaba automatizar el proceso.

Lo que logramos fue crear una máquina que realiza cada uno de los pasos necesarios para trabajar con el equipo. Decidimos que el principio de funcionamiento del equipo se basara en una CNC, ya que esto nos permitiría tener una cama de trabajo y controlar las posiciones.

El equipo cuenta con dos estaciones: una para la inyección hacia el espectrómetro de masas de ultra alta resolución y otra que se encarga de la toma de cada una de las muestras. Para trabajar con cada una de las muestras, se deben utilizar jeringas de microlitros calibradas, ya que el equipo requiere trabajar con 100 microlitros.

La máquina trabaja con dos jeringas y debe tomar cada una de ellas, realizar un proceso de enjuague, tomar 100 microlitros de una gradilla donde se colocan las muestras y, posteriormente, colocar la jeringa en la estación de inyección para iniciar el análisis de esa muestra.

Mientras este proceso se lleva a cabo, la máquina se dirige a tomar la segunda jeringa para repetir el proceso de enjuague y tomar 100 microlitros de la segunda muestra. Luego, espera que termine el proceso de inyección para inmediatamente quitar la primera jeringa y colocar la segunda, continuando así con el proceso de análisis. Posteriormente, la primera jeringa se lleva a enjuagar y se repite el proceso tantas veces como el usuario lo haya solicitado.

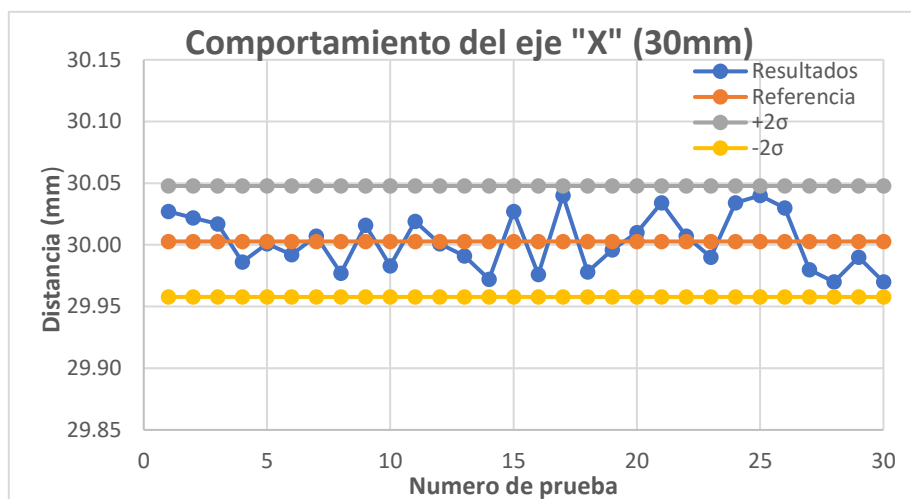
## ASPECTOS TÉCNICOS NOVEDOSOS DE LA INVENCION, VENTAJAS:

El equipo cuenta con una estación de inyección propia que replica el funcionamiento de la que ya viene incluida en el espectrómetro de masas de ultra alta resolución, el equipo trabaja con dos jeringas, cuenta con una zona específica de enjuague y con una zona específica para una gradilla de 80 muestras, cuenta con una interfaz gráfica de usuario intuitiva y fácil de usar.

## DATOS EXPERIMENTALES QUE SOPORTAN LA INVENCION:

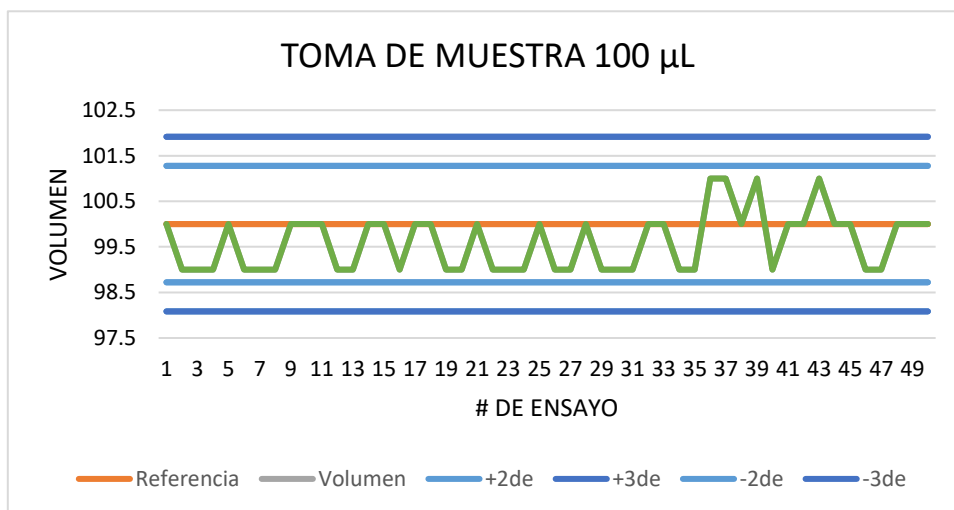
Se aplicaron los parámetros indicados en la norma ISO 5725-1:1994 para la evaluación de la exactitud, que incluye la veracidad y la precisión del desplazamiento de los ejes "X", "Y" y "Z", para los cuales se establecieron distancias de 3, 5, 7, 10, 12 y 15 cm. Para los ejes "Inyección" (eje "I") y "Toma de muestra" (eje "T"), las distancias fueron de 5, 6, 7, 8, 9 y 10 cm.

Algunos de los resultados obtenidos se presentan en la gráfica siguiente:

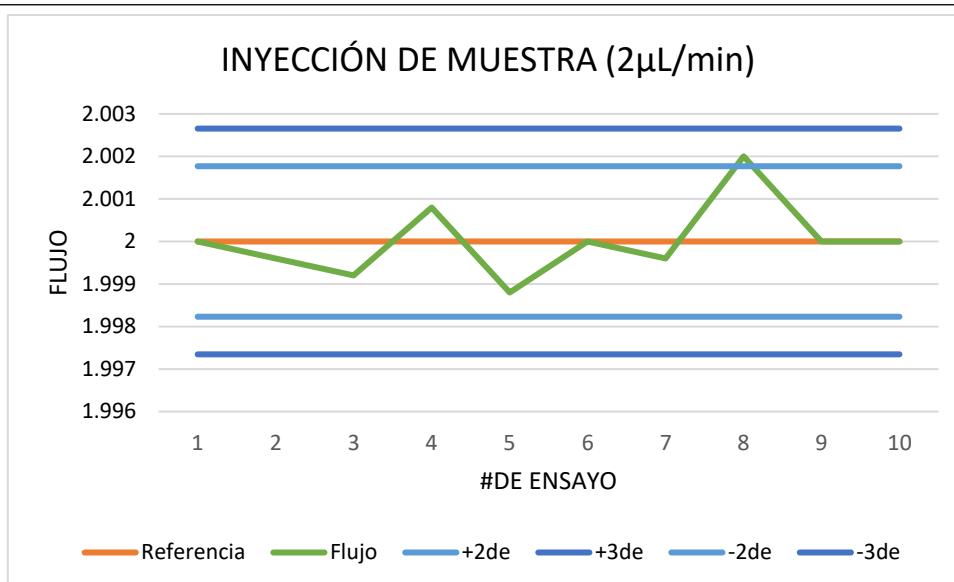


Por su parte, para la ejecución de las tareas de toma e inyección de muestras, se realizaron gráficos de control para comprobar la exactitud, que implica la suma de la veracidad y la precisión, asegurando la trazabilidad de los resultados obtenidos a una referencia.

Algunos de los resultados obtenidos se presentan en la gráfica siguiente:



## DATOS EXPERIMENTALES QUE SOPORTAN LA INVENCIÓN:



De igual modo se realizó un estudio de factibilidad económica del proyecto, obteniendo los siguientes resultados:

Concepto	Cantidad
Costo de materiales	\$24,516
Costo de desarrollo de ingeniería conceptual y de detalle	\$34,842
<b>COSTO TOTAL DEL PROYECTO</b>	<b>\$59,358</b>

NOTA: No incluye IVA

Se realizó una comparativa con sistemas comerciales existentes:

Comparativa de sistemas	
Solución implementada	\$59,358
Sistema perki elmer Flexar HPLC con detector SQ300 MS	\$223,848
Espetrofotometro perkin elmer lambda 650 UV/Vis L6020031 con sistema de automuestreo	\$195,903
Autosampler RS for Antaris™ II for Antaris II FT- NIR	\$230,000
Muestreadores automáticos ESI DX FAST	\$198,753

**APLICACIONES DE LA INVENCION. Describa brevemente ¿En qué y cómo se aplica?**

El Automuestreador se aplica al proceso de manejo e inyección de muestras del espectrómetro de masas de ultra alta resolución del Laboratorio de Posgrado e Investigación de Operaciones Unitarias de ESIQIE, mediante la automatización de las tareas de:

- Enjuague de jeringa antes y después de cada ensayo mediante la estación móvil del sistema
- Toma de muestras mediante la estación móvil del sistema
- Inyección de muestras hacia el espectrómetro de masas por medio de la estación fija del sistema

El proceso anterior permite la obtención del espectro de la muestra analizada a través del espectrómetro de masas.

**PALABRAS CLAVE/KEYWORDS QUE DEFINAN LA INVENCION:**

<b>ESPAÑOL</b>	Automuestreador
<b>INGLÉS</b>	Autosampler

## 1. PLANOS

**Se presenta los planos detallados de las dimensiones de la máquina.**









## 2. FOTOGRAFIAS

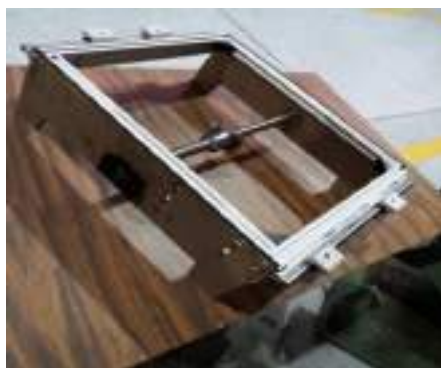
### Construcción y ensamblaje del sistema de muestreo



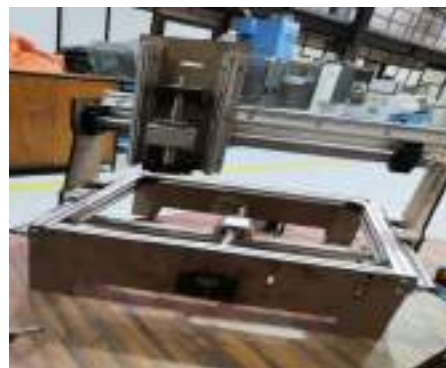
*Figura 107. Corte de piezas en MDF.*



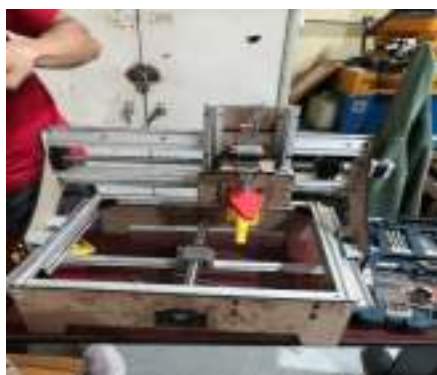
*Figura 106. Perfiles de aluminio.*



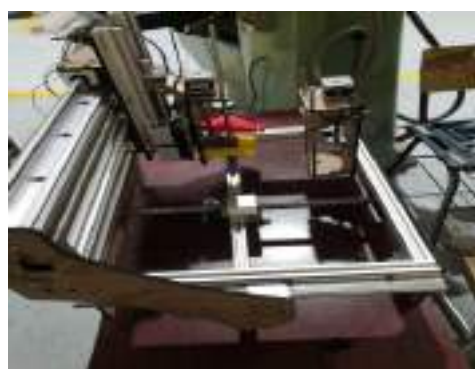
*Figura 109. Base de automuestreador.*



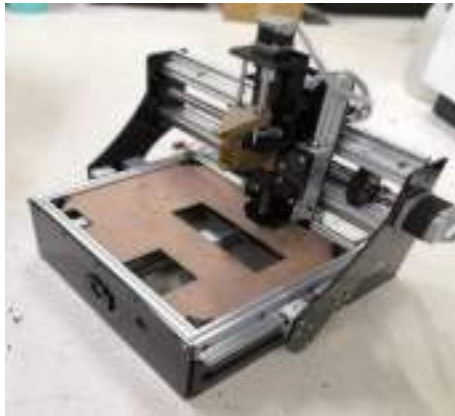
*Figura 108. Integración de eje X e Y.*



*Figura 110. Integración de eje X, Y, Z.*



*Figura 111. Integración de la estación de Inyección.*



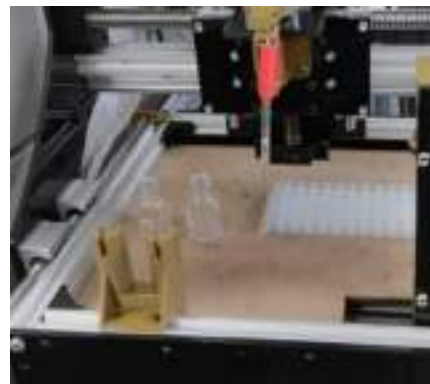
*Figura 113. Acabado final del sistema.*



*Figura 112. Integración de la estación de inyección*



*Figura 114. Colocación de la gradilla de muestras.*



*Figura 115. Integración de la estación de jeringas y la zona de deshecho y enjuague.*

## Conexión y montaje del gabinete de conexión



*Figura 116. Distribución de los elementos en la placa del tablero.*



*Figura 117. Montaje y cableado de los elementos*



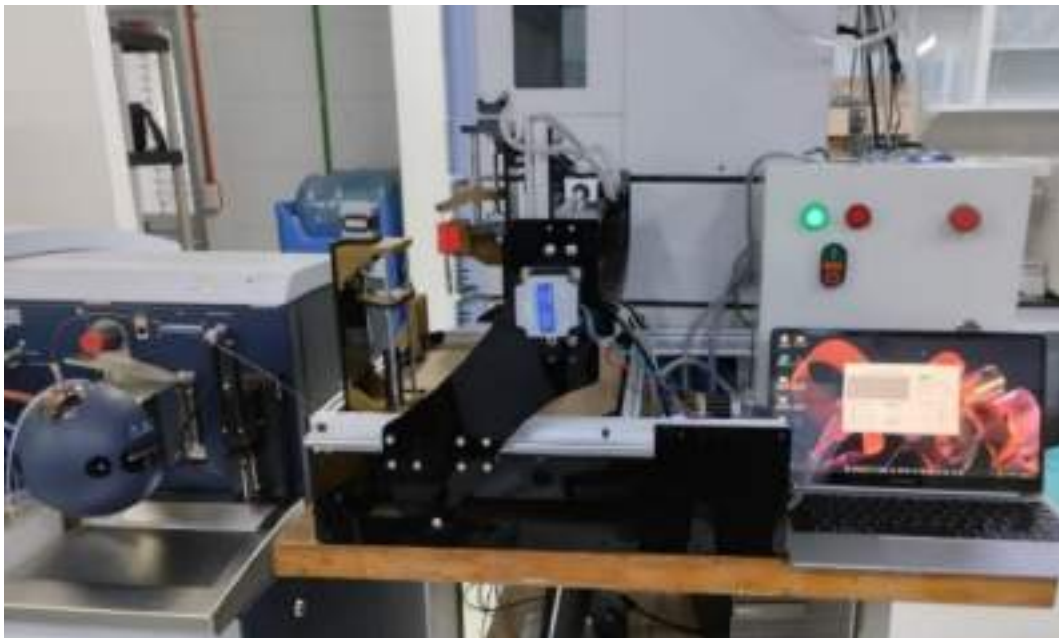


*Figura 118. Montaje de la placa con gabinete.*



*Figura 119. Gabinete con botones de control y lámparas piloto.*

Sistema terminado e integrado con la interfaz gráfica de usuario.



*Figura 120. Integración del sistema de muestreo automático con la interfaz de usuario*

### 3. CALCULOS

#### ▪ Desarrollo de cálculos del husillo correspondiente al eje “X”

Velocidad máxima ( $V_{max}$ )

$$V_{max} = \frac{0.5 \text{ m}}{6.667 \text{ s}} = 0.0454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Aceleración ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{0.0454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}{0.1 \text{ s}} = 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

Cargas axiales máximas para un desplazamiento horizontal ( $F$ )

$$F_1 = 0.01 * 15Kg * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 32N + 20Kg * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = 40.2215N$$

$$F_2 = 0.01 * 15Kg * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 32N = 33.4715N$$

$$F_3 = 0.01 * 15Kg * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 32N - 20Kg * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = -26.7215N$$

$$F_4 = -0.01 * 15Kg * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 32N - 20Kg * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = -40.2215N$$

$$F_5 = -0.01 * 15Kg * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 32N = -33.4715N$$

$$F_6 = -0.01 * 15Kg * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 32N + 20Kg * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = -26.7215N$$

Torque por fricción debido a una carga exterior ( $\tau_1$ )

$$\tau_1 = \frac{33.4715N * 5mm}{2000 * \pi * 0.8} = 0.0332Nm$$

Velocidad máxima de rotación ( $N_{max}$ )

$$N_{max} = \frac{0.0454 * 60 * 10^3}{5mm} = 540 \text{ min}^{-1}$$

Aceleración angular ( $\omega$ )

$$\omega = \frac{2 * \pi * 540 \text{ min}^{-1}}{60 * 0.1s} = 565.488 \text{ rad/seg}^2$$

Momento de inercia de traslación ( $J_{traslacion}$ )

$$J_{traslacion} = 15Kg * \left( \frac{5mm}{2 * \pi} \right)^2 * 10^{-6} = 9.4988 * 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

Momento de inercia de rotación ( $J_{rotacion}$ )

$$J_{rotacion} = \frac{0.0197 \text{kgcm}^2 * 400 \text{mm}}{10000} = 0.000788 \text{kgm}^2$$

Momento de inercia total del sistema ( $J$ )

$$J = (0.000788 \text{kgm}^2 + 9.4988 * 10^{-6} \text{kgm}^2) * 1^2 = 0.0007974 \text{kgm}^2$$

Torque requerido en la aceleración ( $\tau_2$ )

$$\tau_2 = 0.0007974 \text{kgm}^2 * 565.488 \frac{\text{rad}}{\text{seg}^2} = 0.4509 \text{Nm}$$

Torque de torción de rotación requerido durante la aceleración ( $\tau_t$ )

$$\tau_t = 0.0332 \text{Nm} + 0.4509 \text{Nm} = 0.4842 \text{Nm}$$

#### ▪ Desarrollo de cálculos del husillo correspondiente al eje “Y”

Velocidad máxima ( $V_{max}$ )

$$V_{max} = \frac{0.4 \text{m}}{8.8 \text{s}} = 0.0454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Aceleración ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{0.0454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}{0.1 \text{s}} = 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

Cargas axiales máximas para un desplazamiento horizontal ( $F$ )

$$F_1 = 0.01 * 15 \text{Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 32 \text{N} + 20 \text{Kg} * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = 40.2215 \text{N}$$

$$F_2 = 0.01 * 15 \text{Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 32 \text{N} = 33.7215 \text{N}$$

$$F_3 = 0.01 * 15 \text{Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 32 \text{N} - 20 \text{Kg} * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = 26.7215 \text{N}$$

$$F_4 = -0.01 * 15 \text{Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 32 \text{N} - 20 \text{Kg} * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = -40.2215 \text{N}$$

$$F_5 = -0.01 * 15 \text{Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 32 \text{N} = -33.4715 \text{N}$$

$$F_6 = -0.01 * 15 \text{Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 32 \text{N} + 20 \text{Kg} * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = -26.7215 \text{N}$$

Torque por fricción debido a una carga exterior ( $\tau_1$ )

$$\tau_1 = \frac{33.4715 \text{N} * 5 \text{mm}}{2000 * \pi * 0.8} = 0.0332 \text{Nm}$$

Velocidad máxima de rotación ( $N_{max}$ )

$$N_{max} = \frac{0.0454 * 60 * 10^3}{5mm} = 540 \text{ min}^{-1}$$

Aceleración angular ( $\omega$ )

$$\omega = \frac{2 * \pi * 540 \text{ min}^{-1}}{60 * 0.1s} = 565.488 \text{ rad/seg}^2$$

Momento de inercia de traslación ( $J_{traslacion}$ )

$$J_{traslacion} = 15Kg * \left(\frac{5mm}{2 * \pi}\right)^2 * 10^{-6} = 9.4988 * 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

Momento de inercia de rotación ( $J_{rotacion}$ )

$$J_{rotacion} = \frac{0.0197kgcm^2 * 500mm}{10000} = 0.000985 \text{ kgm}^2$$

Momento de inercia total del sistema ( $J$ )

$$J = (0.000985Kg\text{m}^2 + 9.4988 * 10^{-6} \text{ Kg}\text{m}^2) * 1^2 = 0.0009944 \text{ kgm}^2$$

Torque requerido en la aceleración ( $\tau_2$ )

$$\tau_2 = 0.0009944Kg\text{m}^2 * 565.488 \frac{\text{rad}}{\text{seg}^2} = 0.5623Nm$$

Torque de torción de rotación requerido durante la aceleración ( $\tau_t$ )

$$\tau_t = 0.0332Nm + 0.5623 \text{ Nm} = 0.5956Nm$$

#### ▪ Desarrollo de cálculos del husillo correspondiente al eje “Z”

Velocidad máxima ( $V_{max}$ )

$$V_{max} = \frac{0.2 \text{ m}}{4.4s} = 0.0454 \left[\frac{m}{s}\right]$$

Aceleración ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{0.045 \left[\frac{m}{s}\right]}{0.1s} = 0.45 \left[\frac{m}{s^2}\right]$$

Cargas axiales máximas para un desplazamiento vertical ( $F$ )

$$F_1 = 4Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} + 32N + 4Kg * 0.3 \left[\frac{m}{s^2}\right] = 73.04N$$

$$F_2 = 4Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} + 32N = 71.24N$$

$$F_3 = 4Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} + 32N - 4Kg * 0.3 \left[\frac{m}{s^2}\right] = 69.44N$$

$$F_4 = -4Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} - 32N - 4Kg * 0.3 \left[\frac{m}{s^2}\right] = -73.04N$$



$$F_5 = -4Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} - 32N = -71.24N$$

$$F_6 = -4Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} - 32N + 4Kg * 0.3 \left[ \frac{m}{s^2} \right] = -69.44N$$

Torque por fricción debido a una carga exterior ( $\tau_1$ )

$$\tau_1 = \frac{73.04N * 5mm}{2000 * \pi * 0.8} = 0.0708Nm$$

Velocidad máxima de rotación ( $N_{max}$ )

$$N_{max} = \frac{0.045 * 60 * 10^3}{5mm} = 540 \text{ min}^{-1}$$

Aceleración angular ( $\omega$ )

$$\omega = \frac{2 * \pi * 540 \text{ min}^{-1}}{60 * 0.1s} = 565.488 \text{ rad/seg}^2$$

Momento de inercia de traslación ( $J_{traslacion}$ )

$$J_{traslacion} = 4Kg * \left( \frac{5mm}{2 * \pi} \right)^2 * 10^{-6} = 2.5339 * 10^{-12} \text{ kgm}^2$$

Momento de inercia de rotación ( $J_{rotacion}$ )

$$J_{rotacion} = \frac{0.0197kgcm^2 * 200mm}{10000} = 0.000394 \text{ kgm}^2$$

Momento de inercia total del sistema ( $J$ )

$$J = (0.000394Kg\text{m}^2 + 2.5339 * 10^{-12}Kg\text{m}^2) * 1^2 = 0.000394 \text{ kgm}^2$$

Torque requerido en la aceleración ( $\tau_2$ )

$$\tau_2 = 0.000394Kg\text{m}^2 * 565.488 \frac{\text{rad}}{\text{seg}^2} = 0.2228Nm$$

Torque de torción de rotación requerido durante la aceleración ( $\tau_t$ )

$$\tau_t = 0.0708Nm + 0.2228Nm = 0.2936Nm$$

#### ▪ Desarrollo de cálculos del husillo correspondiente al eje “T” y eje “I”

Fuerza hacia arriba ( $F_e$ )

$$F_e = \frac{9.81N * (0.51 * 3.1416 * 0.0075m * \sec(15^\circ) + 0.001m)}{(3.1416 * 0.0075m - 0.51 * 0.001m * \sec(15^\circ))} = 5.72 \text{ N}$$

Fuerza hacia arriba ( $F_e$ )

$$F_e = \frac{9.81N * (0.51 * 3.1416 * 0.0075m * \sec(15^\circ) - 0.001m)}{(3.1416 * 0.0075m + 0.51 * 0.001m * \sec(15^\circ))} = 4.65N$$

Torque hacia arriba ( $\tau_{tu}$ )

$$\tau_{tu} = \frac{5.72N * 0,0075m}{2} = 0.021Nm$$

Torque hacia arriba ( $\tau_{td}$ )

$$\tau_{td} = \frac{4.65N * 0,0075m}{2} = 0.017Nm$$

Torque collarín ( $\tau_c$ )

$$\tau_c = \frac{9.81N * 0,007m}{2} = 0.0174Nm$$

Torque total ( $\tau_{TOTAL}$ )

$$\tau_{TOTAL} = 0.0174Nm + 0.021Nm = 0.038Nm$$

$$\tau_{TOTAL} = 0.0174Nm + 0.017Nm = 0.034Nm$$

#### 4. CALIBRACIÓN

##### Procedimiento de calibración

Análisis de datos técnicos de los componentes

- Calibración del eje X, Y, Z.

##### **NEMA 23**

$$\theta = 1.8^\circ$$

$$200 \text{ puls} * 1.8^\circ = 360^\circ = 1 \text{ Rev}$$

$$200 = \text{Num de pulsos del motor}$$

$$\text{Torque} = 80\%$$

$$\text{Velocidad} = 80\%$$

Driver TB6600

$$\text{Corriente} = 3 \text{ Amp}$$

$$\mu\text{step} = 2$$

$$400 \text{ puls} * \frac{1.8^\circ}{2} = 1 \text{ Rev} \quad (\text{A})$$

$$\text{Rev por pulso} = 0.0025 \left( \frac{\text{Rev}}{\text{Pulso}} \right)$$

##### **NEMA 17**

$$\theta = 1.8^\circ$$

$$200 \text{ puls} * 1.8^\circ = 360^\circ = 1 \text{ Rev}$$

$$\text{Torque} = 80\%$$

$$\text{Velocidad} = 80\%$$

Tornillo sin fin

$$\text{Paso del tornillo} = 5 \text{ mm}$$

Considerando los datos técnicos se calcularon las revoluciones por segundo. Además, se consideraron dos métodos que pertenecen a la librería Accelstepper, utilizada para el control de los motores NEMAS.

***Stepper.SetMaxSpeed("x")***: Donde “x” representa un valor numérico indicando el número de pulsos que realiza por segundo, es decir la frecuencia de pulsos.

$$x \left[ \frac{\text{pulsos}}{\text{seg}} \right] \quad (B)$$

***Stepper.SetMaxAcceleration("y")***: Donde “y” representa un valor numérico indicando el número de pulsos que realiza por segundo

$$y \left[ \frac{\text{pulsos}}{\text{seg}^2} \right] \quad (C)$$

Revoluciones del NEMA 23 = Revoluciones en Eje x = Revoluciones en Eje y = Revoluciones en Eje z

Para calcular el número de revoluciones necesarias para una frecuencia de  $400 \left( \frac{\text{pulsos}}{\text{seg}} \right)$ , se usa la Ecuación A1 y la Relación A.

$$\text{NumRev} = \text{Rev por pulso} * \text{Frecuencia de pulsos} \quad (A1)$$

$$\text{NumRev} = 0.0025 \left( \frac{\text{Rev}}{\text{Pulsos}} \right) * 400 \left( \frac{\text{pulsos}}{\text{Seg}} \right) = 1 \frac{\text{Rev}}{\text{Seg}}$$

Este número de revoluciones aumentara en base al valor de “x” y “y” que se maneje en los métodos de la librería Accelstepper. Es decir, si se requiere el doble de revoluciones en un segundo, el valor de “x” y “y” se incrementa al doble.

Finalizado el ajuste de velocidad se determina la resolución del automuestreador con la Ecuación A2.

Se toman los pasos enteros del motor NEMA 23, es decir, no se considera el ajuste del driver también se necesita el paso del tornillo sin fin.

$$\text{Resolución sin considerar driver} = \left[ \frac{\text{Num de Pulsos del motor}}{\text{Paso del tornillo}} \right] \quad (A2)$$

$$\text{Resolución sin considerar driver} = \left[ \frac{200 \text{ Pulsos}}{5 \text{ mm}} \right] = 40 \frac{\text{Pulsos}}{\text{mm}}$$

Después se calcula la resolución final de acuerdo con la configuración del driver elegida (8  $\mu\text{step}$ ), utilizando la Ecuación A3.

$$\text{ResoluciónFinal} = \text{Resolución sin considerar driver} * \mu\text{step} \quad (A3)$$

$$ResoluciónFinal = \left[ 40 \frac{Pulsos}{mm} \right] * [2] = 80 \frac{Pulsos}{mm}$$

$$80 \frac{Pulsos}{mm} \quad (D)$$

Una vez calculada la resolución final, se determinan las coordenadas de cada una de las trayectorias del proceso de manejo de muestras utilizando la relación (D).

- Calibración del motor de toma de muestra

**NEMA 14**

$\theta = 1.8^\circ$

$200 \text{ puls} * 1.8^\circ = 360^\circ = 1 \text{ Rev}$

$Torque = 80\%$

$Velocidad = 80\%$

Driver TB6600

$Corriente = 0.5 \text{ Amp}$

$\mu Pasos = 2$

$400 \text{ puls} * \frac{1.8}{2} = 360^\circ = 1 \text{ Rev}$

Tornillo sin fin

$200 \text{ puls} = 1 \text{ Rev} = 1 \text{ mm}$

Jeringa de inyección

Rango 0 -250  $\mu\text{L}$

Cálculo de velocidad de toma de muestra con ayuda de la Ecuación A1 para tener 4 revoluciones por segundo.

$$NumRev = 0.0025 \left( \frac{Rev}{Pulsos} \right) * 400 \left( \frac{pulsos}{Seg} \right) = 1 \frac{Rev}{Seg} * 4 = 4 \frac{Rev}{Seg}$$

Ahora para tomar una muestra de 100  $\mu\text{L}$  se tienen las siguientes relaciones

Por cada 6mm que avance el embolo se toman 25  $\mu\text{L}$  (F)

Por lo tanto, si se desean tomar muestras de 100  $\mu\text{L}$  se utiliza la ecuación A4 para conocer la distancia que se necesita recorrer.

$$DistanciaR = \left[ \frac{\text{Cantidad} \mu\text{L Deseada} * \text{Distancia recorrida}}{\text{Cantidad} \mu\text{L tomada}} \right] \quad (A4)$$

$$DistanciaR = \left[ \frac{100 \mu\text{L} * 6\text{mm}}{25 \mu\text{L}} \right] = 24\text{mm}$$

- Calibración del motor del sistema de Inyección

**NEMA 14**

$\theta = 1.8^\circ$

$200 \text{ puls} * 1.8^\circ = 360^\circ = 1 \text{ Rev}$

$Torque = 80\%$

Velocidad = 80%

$\mu Pasos = 1$

Driver TB6600

$$400 \text{ puls} * \frac{1.8}{2} = 360^\circ = 1 \text{ Rev}$$

Corriente = 0.5 Amp

Tornillo sin fin

$$200 \text{ puls} = 1 \text{ Rev} = 1 \text{ mm} \quad (E)$$

Para la calibración del motor de inyección se toma como base uno de los requerimientos de usuario que es una velocidad de inyección de  $120 \frac{\mu L}{hr}$ , para determinar la frecuencia de pulsos necesarios que satisfacen este requerimiento.

Lo primero es obtener la velocidad de inyección  $\frac{\mu L}{seg}$  utilizando la Relación (F) y (G).

$$\left( \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \right) \quad (F)$$

$$\left( \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} \right) \quad (G)$$

$$\mu L \text{ por tiempo} = 120 \left( \frac{\mu L}{hr} \right) * \left( \frac{1hr}{60 \text{ min}} \right) * \left( \frac{1min}{60 \text{ seg}} \right) = 0.033333 \left( \frac{\mu L}{seg} \right)$$

Para relacionar los  $\mu L$  por tiempo a distancia recorrida por tiempo utilizamos la relación (F).

$$\text{Distancia recorrida por tiempo} = 0.033333 \left( \frac{\mu L}{seg} \right) * \left( \frac{6mm}{25 \mu L} \right) = 0.008 \left( \frac{mm}{Seg} \right)$$

Continuando con el proceso de calibración se utiliza la Relación (E), con el objetivo de obtener una relación de unidades de  $\left( \frac{Rev}{Seg} \right)$

$$\text{NumRev} = 0.008 \left( \frac{mm}{Seg} \right) * \left( \frac{1Rev}{1mm} \right) = 0.008 \left( \frac{Rev}{seg} \right)$$

Por último, se calcula la frecuencia de pulsos necesaria para cumplir con el requerimiento de usuario utilizando la Ecuación A1.

$$\text{Frecuencia de pulsos} = \left( \frac{\text{NumRev}}{\text{Rev por pulso}} \right)$$

$$\text{Frecuencia de pulsos} = \left( \frac{0.008}{0.005} \right) \left( \frac{\text{pulsos}}{\text{Seg}} \right)$$

$$\text{Frecuencia de pulsos} = 1.6 \left( \frac{\text{pulsos}}{\text{Seg}} \right)$$

**EXPECTATIVAS SOBRE LA INVENCION (AVANZAR NIVEL DE MADUREZ TECNOLÓGICA, LICENCIAR, PUBLICACIÓN CURRICULAR, OBTENER GRADO ACADÉMICO, CREACIÓN DE UNA EMPRESA)**

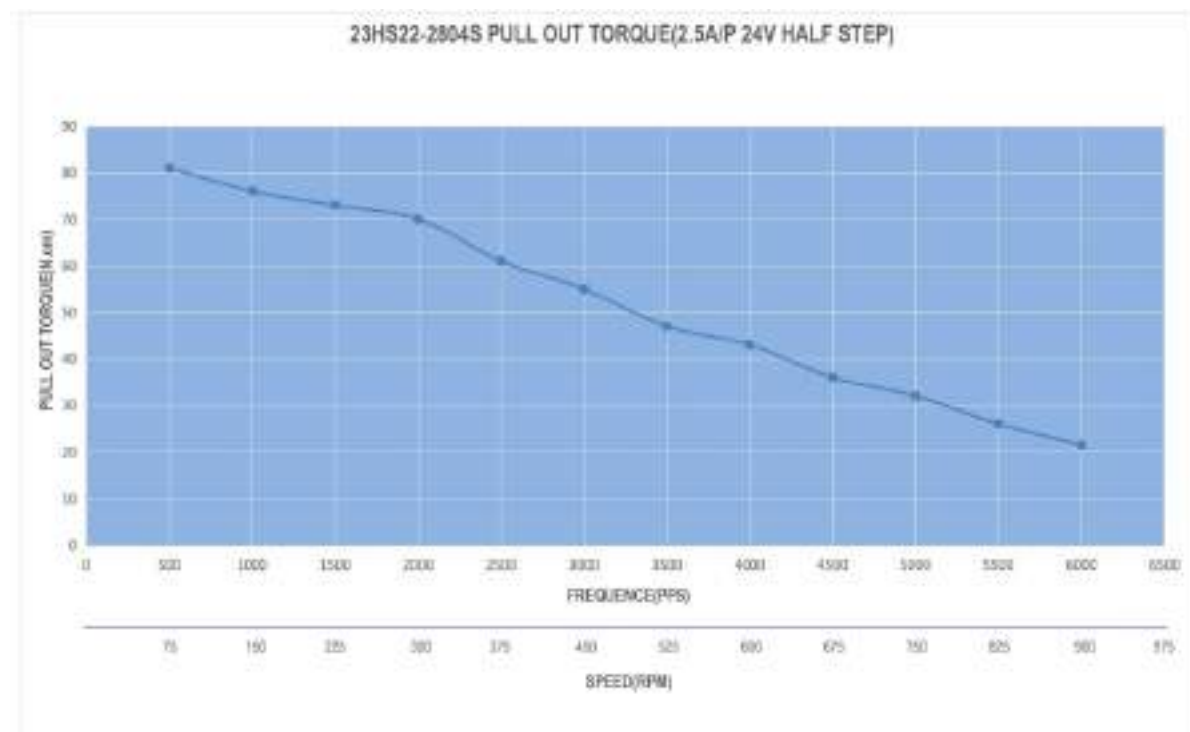
La invención fue realizada con el fin de obtener el grado de ingenieros en control y automatización, pero se espera continuar con mejorara para avanzar nivel de madurez tecnológica

**¿CONOCE LA NORMATIVA APLICABLE A SU INVENCION PARA QUE SALGA A LA VENTA AL PÚBLICO?**

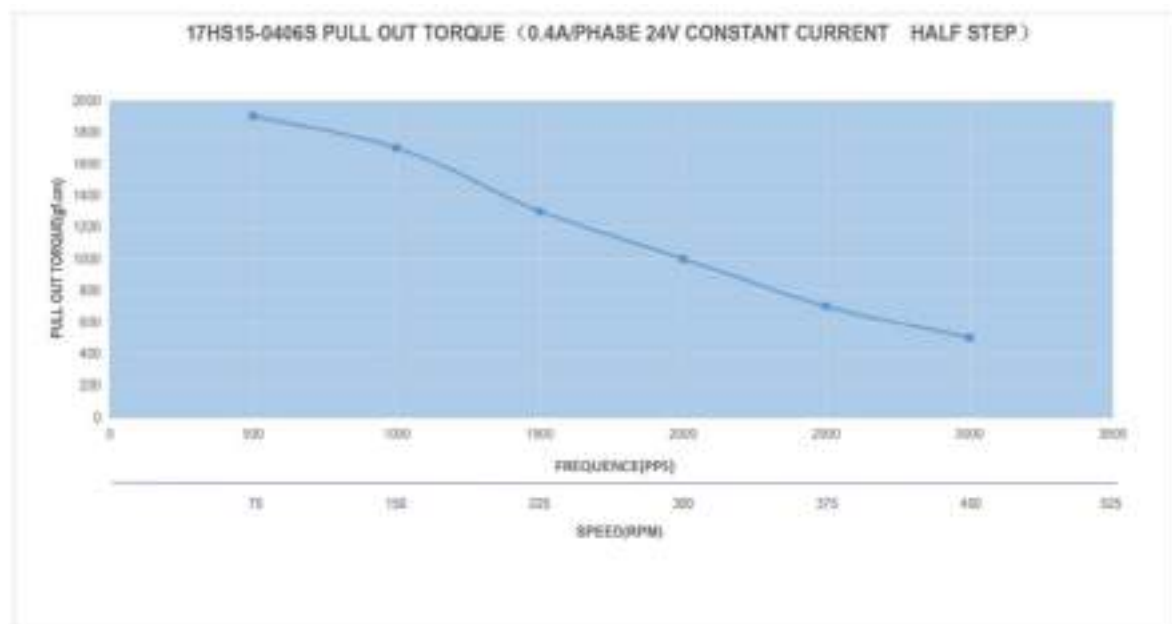
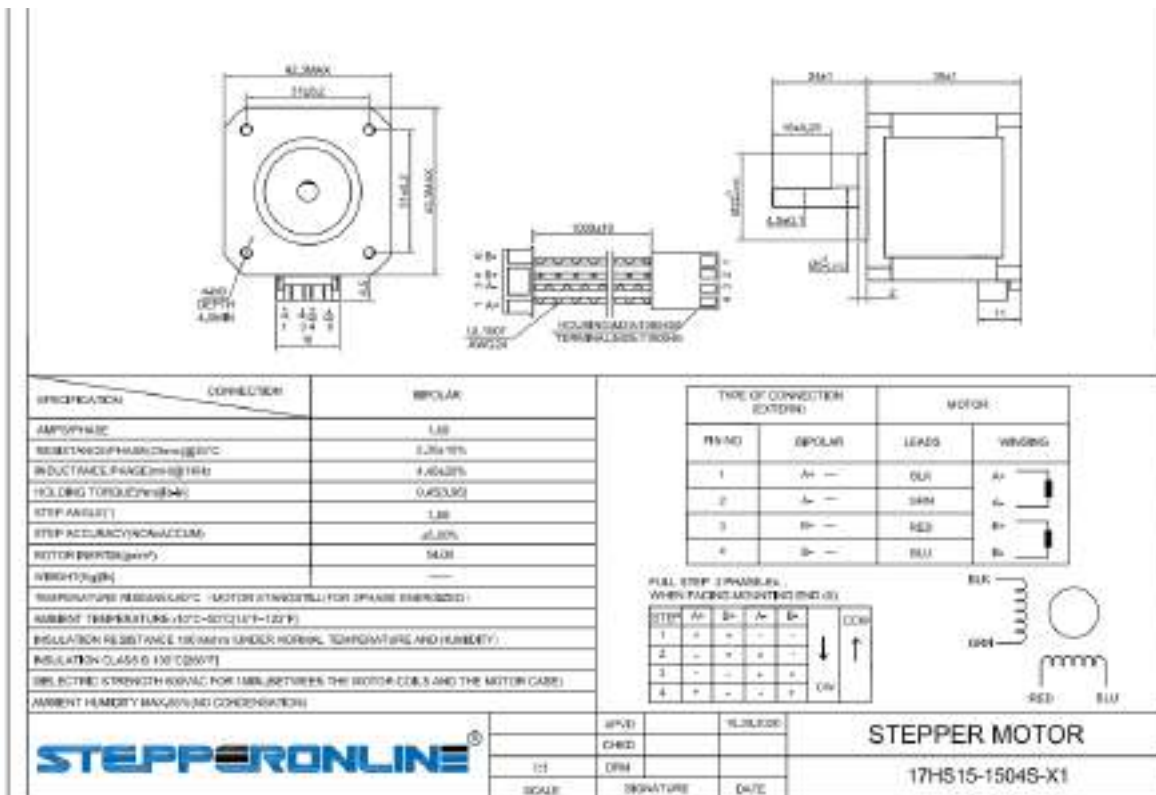
**NO\_X\_\_**

**SI\_\_\_ INDIQUELA:**

## Especificaciones técnicas de los componentes

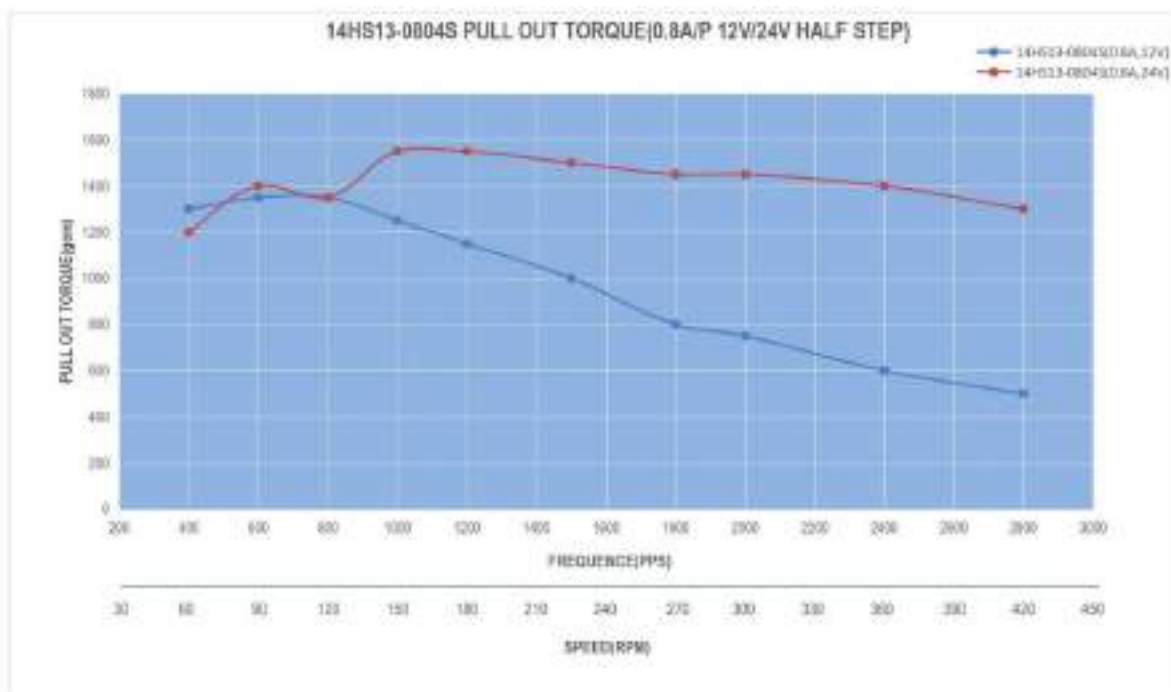
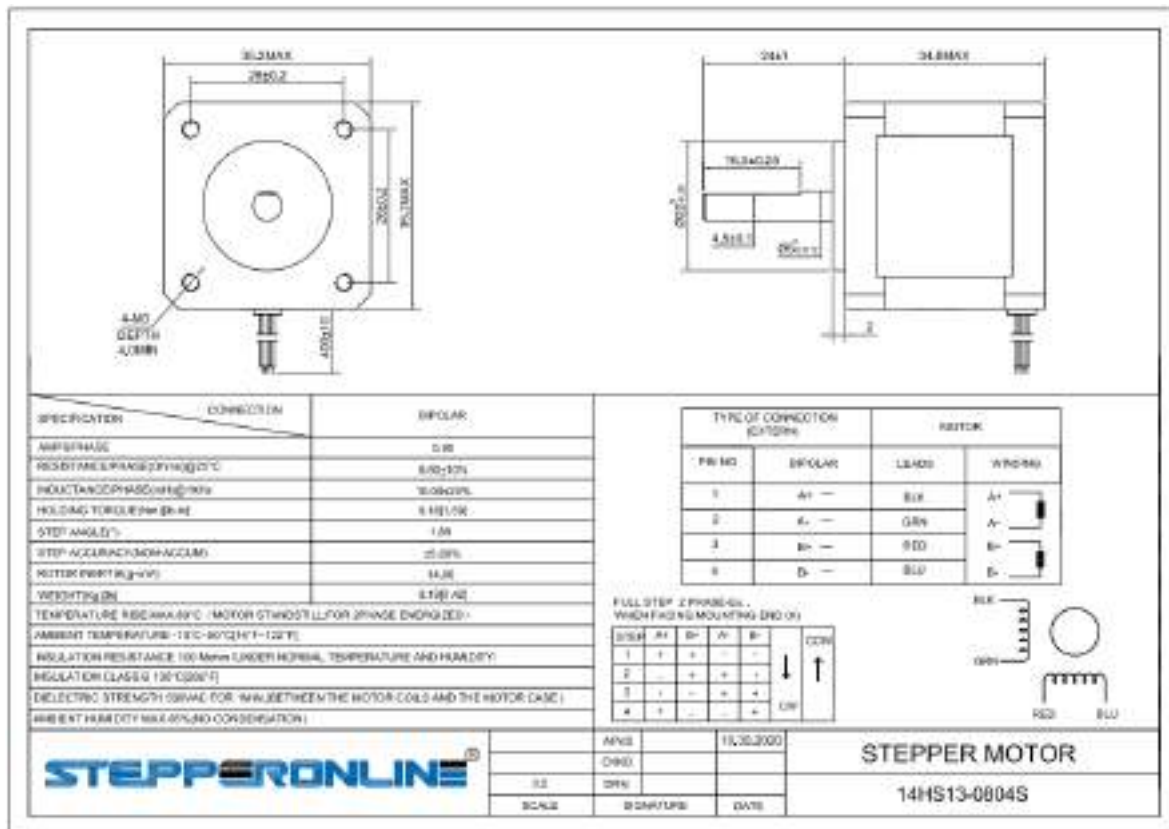


■ Motor NEMA 17





▪ Motor NEMA 14

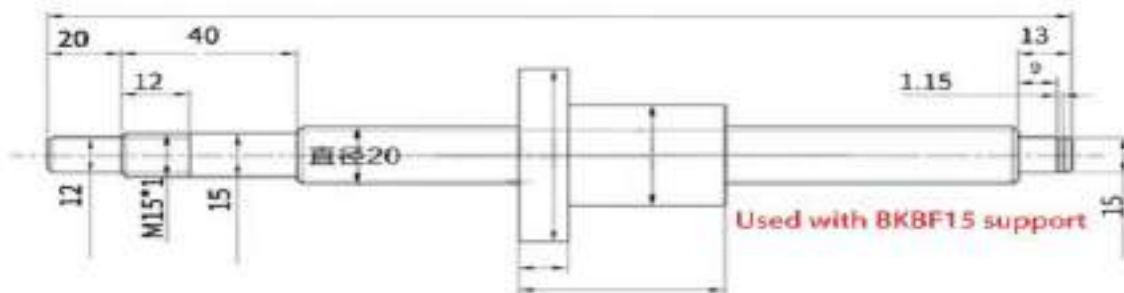


- Husillo de bolas SFU2005



Set: Ball screw rod SFU2005 with end machine

## SFU 2005 Ballscrew processing map



Husillo de bola SFU2005 200 500 1000 1200mm husillo con extremo mecanizado + soporte BK15BF15 + acoplador + husillo de bola con carcasa de tuerca para CNC

### Especificación:

Modelo: SFU2005

Precisión: C7 grado

Diámetro: 20mm

Paso: 5mm

Color: plata

Longitud: 200-1600mm

## ■ Guía lineal SRB12



### Incluye:

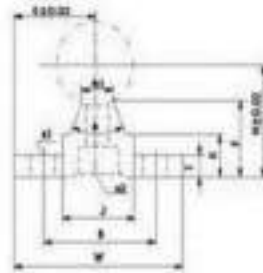
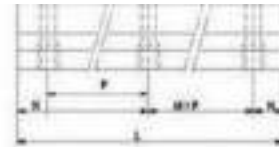
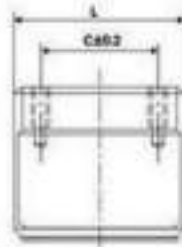
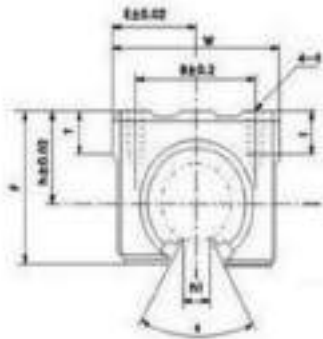
Dos rodamientos lineales SBR12UU  
 1 Guía lineal SBR12 (1.5m a elegir)

### Guía SBR12:

Diámetro: 12mm  
 Largo: 1.2 metros / 1.5metros largo a elegir.  
 Ancho de la base: 34mm  
 Peso: 159g / metro

### Rodamiento SBR12UU:

Tamaño total: 41 x 39 x 25 mm  
 Rodamientos lineal de tipo abierto integrado LM12UU-OP  
 Diámetro del eje: 12 mm  
 Peso: 100gramos.



MODEL NO.	SHAFT DIAMETER	MAIN DIMENSIONS										MOUNTING DIMENSION					WEIGHT(kg/m)
		H	E	W	L	F	T	K	J	h1	θ	B	N	P	S1	S2	
SBR12RAIL	12	20.46	17	34	1000	15	4.5	9.8	15	6	80°	25	30	100	4.5	M4	1.39
SBR16-RAIL	16	25	20	40	1000	17.8	5	11.7	18.5	8	80°	30	25	150	5.5	M5	2.55
SBR20-RAIL	20	27	22.5	45	1000	17.7	5	10	19	8	50°	30	25	150	5.5	M6	3.30
SBR25-1000L	25	33	27.5	55	1000	21	6	12	21.5	8	50°	35	25	200	6.5	M6	5.30

MODEL NO.	SHAFT DIAMETER	MAIN DIMENSIONS								MOUNTING DIMENSIONS				BASIC LOAD RATING		WEIGHT(kg)
		h	E	W	L	F	T	h1	θ	B	C	S	I	e(kgf)	Ce(kgf)	
SBR12UU	12	17	20	40	39	27.6	8	8.5	80°	28	26	M5	10	52	79	0.10
SBR14UU	16	20	22.5	45	45	33	9	10	80°	32	30	M5	10	59	91	0.15
SBR20UU	20	23	24	48	50	39	11	10	60°	35	35	M6	12	88	140	0.20
SBR25UU	25	27	30	60	65	47	14	11.5	60°	40	40	M6	12	100	160	0.45

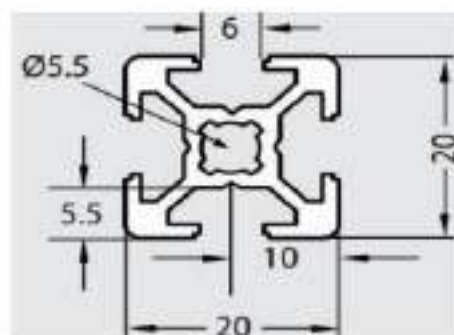
- Perfiles de aluminio 2020 y 2040



## Moas Modular Aluminum System SA de CV

### Dimensiones generales

#### **Ranura 6**



Centro de 5.5 mm, se rosca a M6 directamente.

Presentación: perfil de hasta 6 metros de largo

Usar accesorios de ranura 6 mm para serie 20 mm

Ideal para construcciones ligeras, manipuladores para máquinas de inyección, marcos, etc.

#### **Accesorios relacionados:**

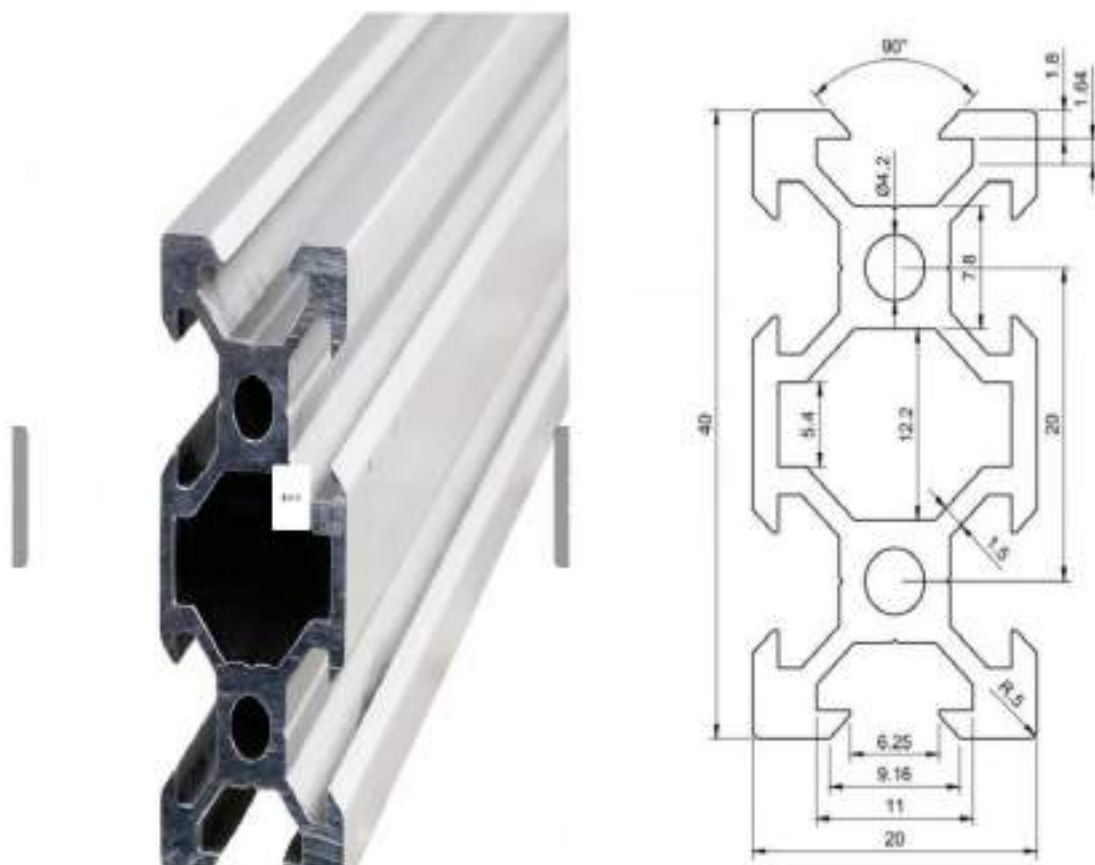
Sujetador std	20-021
Anglo interno con tapa	20-021
Tapa plástica	18-802
Bisagra plástica	23-020
Tuerca balin 20, rosca M5	20-045
Tuerca cab/martillo, M4	20-047R6

#### **Moas Modular Aluminum System, SA de CV**

Tule No. 24 Local A y B, Tlalnepantla Mexico CP 54080

Tel oficina (55) 5362 4016 Almacén (55) 4993 9413 Cel. 04455 3733 0934

[www.moastienda.com.mx](http://www.moastienda.com.mx) [www.perfilesdealuminiooranurado.com.mx](http://www.perfilesdealuminiooranurado.com.mx)



## INFO

Los perfiles de aluminio extruido V-Slot fueron diseñados por Openbuilds como una mejora a los perfiles T-Slot. Con estos perfiles puedes hacer todo lo que se puede hacer con clásicos perfiles T-Slot como estructuras mecánicas, soportes y mecanismos. Adicionalmente su ranura en forma de V le permite actuar como guía lineal para deslizadores de ruedas V, con esto los perfiles se convierten en la herramienta ideal para hacer estructuras para máquinas CNC, impresoras 3D, robots cartesianos y cualquier cosa que puedas diseñar.

Para ayudarte a construir con perfiles de aluminio también tenemos una gran gama de accesorios, conectores, uniones, tornillos y herramientas.

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- Material: Aluminio 6063 T5
- Tamaño: 20x40mm
- Peso: 8.08g por cm
- Acabado Superficial: Natural (Plateado)
- Momentos de inercia de áreas:  $I_x = 48.163 \times 10^{-9} \text{ m}^4$ ,  $I_y = 12.305 \times 10^{-9} \text{ m}^4$

## LINKS

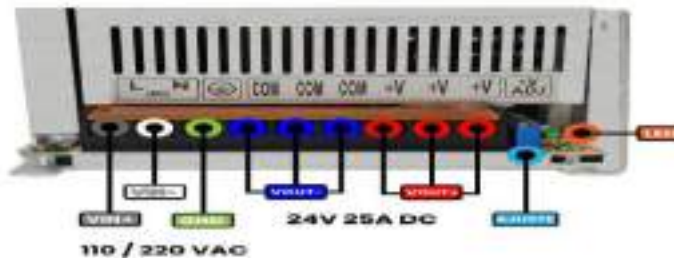
- [Catálogo V-Slot de Maylamr Mechatronics](#)
- [Dibujos DWG de perfiles V-Slot](#)
- [Guía básica: Cómo calcular deflexión en perfiles V-Slot](#)



- Fuente de alimentación



**PINOUT**  
**FUENTE CONMUTADA 24V 25A**



### ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS

- Tipo: Fuente conmutada de 24 VCD a 25A
- Voltaje de entrada: AC110-220V 50/60Hz rango de entrada seleccionable por interruptor
- Potencia Máxima de salida: 600W
- Protección: cortocircuito / sobrecarga / sobretensión
- Filtro EMI
- Temperatura de trabajo: -30 ~ + 50 y el grado; c
- Temperatura de almacenamiento: -30 ~ 100 y el grado; c
- Humedad ambiente: 20% ~ 95 % sin condensación
- Dimensiones : 24 mm x 12.2 mm x 8.5cm (L \* W \* H)
- Peso:1400g
- Material de Shell: metal / base de aluminio

Conexión en regleta para toma de VCD :

- +V: Terminal positiva
- +V ADJ: Ajuste del voltaje de salida al  $\pm 0.05$  volts
- COM: Terminal común

Conexión en regleta para ingresar VCA :

- T : terminal a Tierra física del toma corriente
- N: terminal Neutra del toma corriente
- L : terminal Línea o fase del toma corriente

- Microcontrolador ESP32

# ESP32 Series

## Datasheet

### Including:

ESP32-D0WD  
ESP32-D0WDQ6  
ESP32-D2WD  
ESP32-S0WD

## 2. Pin Definitions

### 2.1 Pin Layout

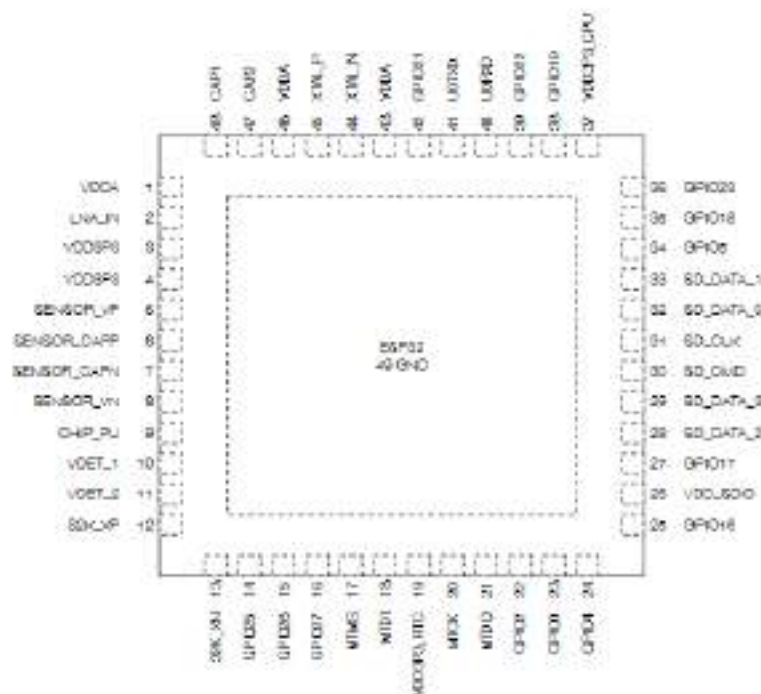


Figure 2: ESP32 Pin Layout (QFN 6\*6, Top View)

Table 1: Pin Description

Name	No.	Type	Function
Analog			
VDDA	1	P	Analog power supply (2.3 V – 3.6 V)
LNA_IN	2	IO	RF input and output
VDDIP3	3	P	Analog power supply (2.3 V – 3.6 V)
VDDIP3	4	P	Analog power supply (2.3 V – 3.6 V)
VDDIP3_RTC			
SENSOR_VF	5	I	GPIO9, ADC1_CH0, RTC_GPIO0
SENSOR_CAP0	6	I	GPIO7, ADC1_CH1, RTC_GPIO1
SENSOR_CAPN	7	I	GPIO8, ADC1_CH2, RTC_GPIO2
SENSOR_VN	8	I	GPIO9, ADC1_CH3, RTC_GPIO3
CHIP_PU	9	I	High: On, enables the chip Low: Off, the chip powers off Note: Do not leave the CHIP_PU pin floating.

Name	No.	Type	Function
VDET_1	10	I	GPIO4, ADC1_CH6, RTC_GPIO4
VDET_2	11	I	GPIO5, ADC1_CH7, RTC_GPIO5
32K_XP	12	IO	GPIO22, ADC1_CH4, RTC_GPIO9, TOUCH8, 32K_XP (32.768 kHz crystal oscillator input)
32K_XN	13	IO	GPIO3, ADC1_CH5, RTC_GPIO8, TOUCH8, 32K_XN (32.768 kHz crystal oscillator output)
GPIO25	14	IO	GPIO25, ADC2_CH8, RTC_GPIO6, DAC_1, EMAC_RXD0
GPIO26	15	IO	GPIO26, ADC2_CH9, RTC_GPIO7, DAC_2, EMAC_RXD1
GPIO27	16	IO	GPIO27, ADC2_CH7, RTC_GPIO17, TOUCH7, EMAC_RX_DV
MTMS	17	IO	GPIO14, ADC2_CH8, RTC_GPIO16, TOUCH6, EMAC_TXD2, HSPCLK, HS2_CLK, SD_CLK, MTMS
MTDI	18	IO	GPIO12, ADC2_CH5, RTC_GPIO15, TOUCH5, EMAC_TXD3, HSPDQ, HS2_DATA2, SD_DATA2, MTDI
VDDIP3_RTC	19	P	Input power supply for RTC IO (2.3 V – 3.6 V)
MTCK	20	IO	GPIO13, ADC2_CH4, RTC_GPIO14, TOUCH4, EMAC_RX_ER, HSPDQ, HS2_DATA3, SD_DATA3, MTCK
MTDO	21	IO	GPIO15, ADC2_CH3, RTC_GPIO13, TOUCH3, EMAC_RXD3, HSPDQ, HS2_CMD, SD_CMD, MTDO
GPIO2	22	IO	GPIO2, ADC2_CH2, RTC_GPIO12, TOUCH2, HSPWR, HS2_DATA0, SD_DATA0
GPIO0	23	IO	GPIO0, ADC2_CH1, RTC_GPIO11, TOUCH1, EMAC_TX_CLK, CLK_OUT1
GPIO4	24	IO	GPIO4, ADC2_CH0, RTC_GPIO10, TOUCH0, EMAC_TX_ER, HSPDQ, HS2_DATA1, SD_DATA1
VDD_SDIO			
GPIO16	25	IO	GPIO16, HSI_DATA4, U2RXD, EMAC_CLK_OUT
VDD_SDIO	26	P	Output power supply: 1.8 V or the same voltage as VDDIP3_RTC
GPIO17	27	IO	GPIO17, HSI_DATA5, U2TXD, EMAC_CLK_OUT_180
SD_DATA_2	28	IO	GPIO9, HSI_DATA2, U1RXD, SD_DATA2, SPIHD
SD_DATA_3	29	IO	GPIO10, HSI_DATA3, U1TXD, SD_DATA3, SPIWP
SD_CMD	30	IO	GPIO11, HSI_CMD, U1RTS, SD_CMD, SPICS0
SD_CLK	31	IO	GPIO6, HSI_CLK, U1CTS, SD_CLK, SPICLK
SD_DATA_0	32	IO	GPIO7, HSI_DATA0, U2RTS, SD_DATA0, SPI0
SD_DATA_1	33	IO	GPIO8, HSI_DATA1, U2CTS, SD_DATA1, SPI0
VDDIP3_CPU			
GPIO5	34	IO	GPIO5, HSI_DATA6, VSPIC50, EMAC_RX_CLK
GPIO18	35	IO	GPIO18, HSI_DATA7, VSPICLK
GPIO23	36	IO	GPIO23, HSI_STROBE, VSPID
VDDIP3_CPU	37	P	Input power supply for CPU IO (1.8 V – 3.6 V)
GPIO19	38	IO	GPIO19, U0CTS, VSPIDQ, EMAC_TXD0
GPIO22	39	IO	GPIO22, U0RTS, VSPWRP, EMAC_TXD1
U0RXD	40	IO	GPIO3, U0RXD, CLK_OUT2
U0TXD	41	IO	GPIO4, U0TXD, CLK_OUT3, EMAC_RXD2
GPIO21	42	IO	GPIO21, VSPIDQ, EMAC_TX_CN
Analog			
VDDA	43	P	Analog power supply (2.3 V – 3.6 V)
XTAL_N	44	O	External crystal output
XTAL_P	45	I	External crystal input
VDDA	46	P	Analog power supply (2.3 V – 3.6 V)
CAP2	47	I	Connects to a 3 nF capacitor and 20 kΩ resistor in parallel to CAP1
CAP1	48	I	Connects to a 10 nF series capacitor to ground
GND	49	P	Ground



## 3.1 CPU and Memory

### 3.1.1 CPU

ESP32 contains one or two low-power Xtensa® 32-bit LX6 microprocessor(s) with the following features:

- 7-stage pipeline to support the clock frequency of up to 240 MHz (160 MHz for ESP32-S0WD and ESP32-D2WD)
- 16/24-bit Instruction Set provides high code-density
- Support for Floating Point Unit
- Support for DSP instructions, such as a 32-bit multiplier, a 32-bit divider, and a 40-bit MAC
- Support for 32 interrupt vectors from about 70 interrupt sources

The single-/dual-CPU interfaces include:

- Xtensa RAM/ROM Interface for instructions and data
- Xtensa Local Memory Interface for fast peripheral register access
- External and internal interrupt sources
- JTAG for debugging

### 3.1.2 Internal Memory

ESP32's internal memory includes:

- 448 KB of ROM for booting and core functions
- 520 KB of on-chip SRAM for data and instructions
- 8 KB of SRAM in RTC, which is called RTC FAST Memory and can be used for data storage; it is accessed by the main CPU during RTC Boot from the Deep-sleep mode.
- 8 KB of SRAM in RTC, which is called RTC SLOW Memory and can be accessed by the co-processor during the Deep-sleep mode.
- 1 Kbit of eFuse: 256 bits are used for the system (MAC address and chip configuration) and the remaining 768 bits are reserved for customer applications, including flash-encryption and chip-ID.
- Embedded flash

- Driver TB6600



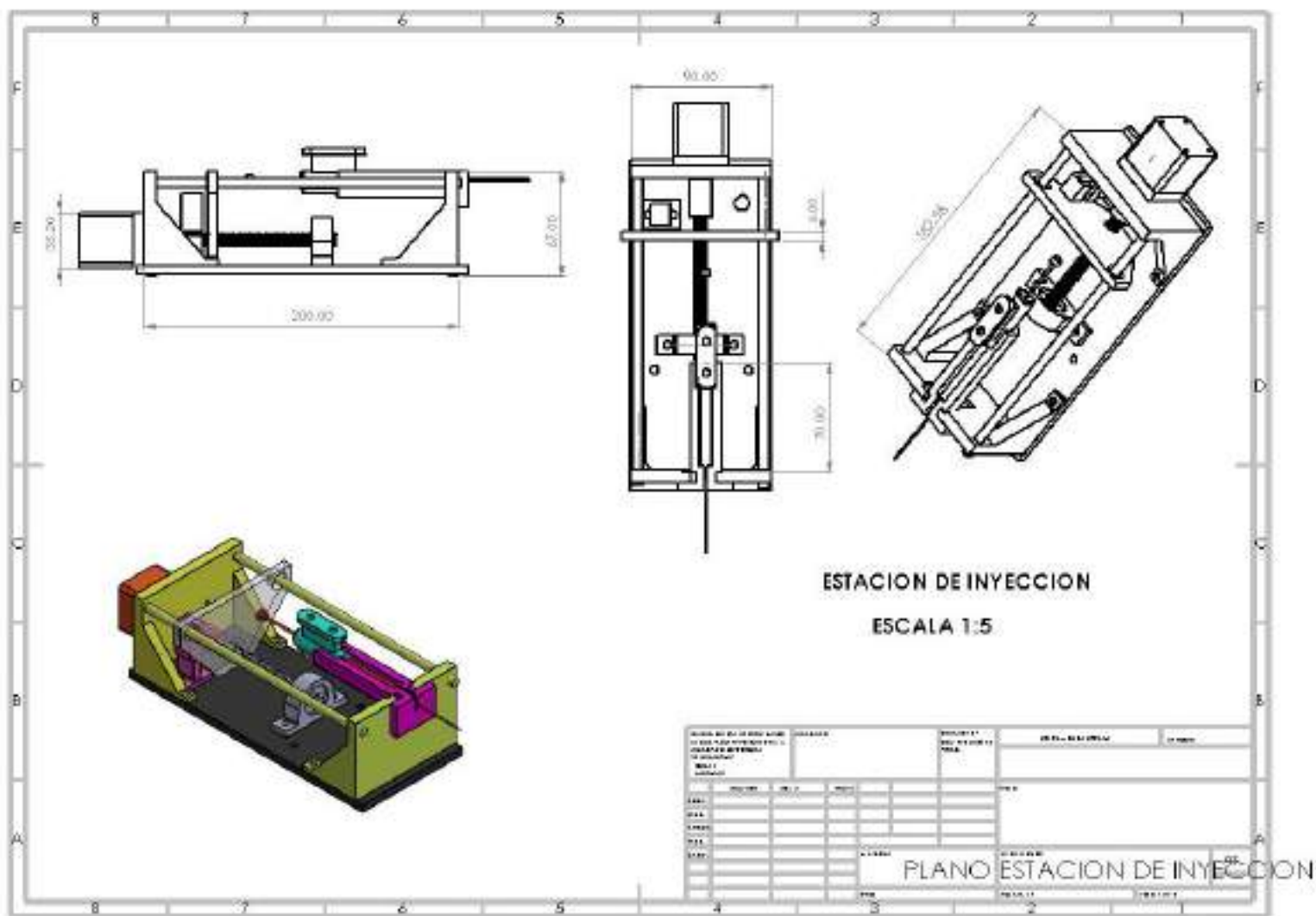
## ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS

- Voltaje de alimentación: 9 a 42Vdc
- Corriente de entrada: Min. 1A Max. 5A
- Salida de corriente: 0.5 a 3.5A (ajustable)
- Señales de control: 3.3 a 24V
- Potencia máxima: 160W
- Micro Step: 1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16, 32
- Humedad: Sin condensación
- Dimensiones: 96x56x33 mm
- Admite 8 tipos de control de corriente
- Admite 7 tipos de micro pasos ajustables
- La interfaz adopta un aislamiento de optoacoplador de alta velocidad
- Semiflujo automático para reducir el calor
- Disipador de calor de área grande
- Capacidad de interferencia anti-alta frecuencia
- Entrada de protección anti-reversa
- Protección contra sobrecalentamiento, sobrecorriente y cortocircuito
- Temperatura de funcionamiento: -10 a 45°C
- Peso: 200 gramos

# APENDÍCE

**Se presenta los planos detallados de las dimensiones de la máquina.**







## 2. CALCULOS

### ▪ Desarrollo de cálculos del husillo correspondiente al eje “X”

Velocidad máxima ( $V_{max}$ )

$$V_{max} = \frac{0.5 \text{ m}}{6.667 \text{ s}} = 0.0454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Aceleración ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{0.0454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}{0.1 \text{ s}} = 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

Cargas axiales máximas para un desplazamiento horizontal ( $F$ )

$$F_1 = 0.01 * 15Kg * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 32N + 20Kg * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = 40.2215N$$

$$F_2 = 0.01 * 15Kg * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 32N = 33.4715N$$

$$F_3 = 0.01 * 15Kg * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 32N - 20Kg * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = -26.7215N$$

$$F_4 = -0.01 * 15Kg * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 32N - 20Kg * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = -40.2215N$$

$$F_5 = -0.01 * 15Kg * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 32N = -33.4715N$$

$$F_6 = -0.01 * 15Kg * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 32N + 20Kg * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = -26.7215N$$

Torque por fricción debido a una carga exterior ( $\tau_1$ )

$$\tau_1 = \frac{33.4715N * 5mm}{2000 * \pi * 0.8} = 0.0332Nm$$

Velocidad máxima de rotación ( $N_{max}$ )

$$N_{max} = \frac{0.0454 * 60 * 10^3}{5mm} = 540 \text{ min}^{-1}$$

Aceleración angular ( $\omega$ )

$$\omega = \frac{2 * \pi * 540 \text{ min}^{-1}}{60 * 0.1s} = 565.488 \text{ rad/seg}^2$$

Momento de inercia de traslación ( $J_{traslacion}$ )

$$J_{traslacion} = 15Kg * \left( \frac{5mm}{2 * \pi} \right)^2 * 10^{-6} = 9.4988 * 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

Momento de inercia de rotación ( $J_{rotacion}$ )

$$J_{rotacion} = \frac{0.0197 \text{ kgcm}^2 * 400mm}{10000} = 0.000788 \text{ kgm}^2$$

Momento de inercia total del sistema ( $J$ )

$$J = (0.000788 \text{ Kg m}^2 + 9.4988 * 10^{-6} \text{ Kg m}^2) * 1^2 = 0.0007974 \text{ kg m}^2$$

Torque requerido en la aceleración ( $\tau_2$ )

$$\tau_2 = 0.0007974 \text{ Kg m}^2 * 565.488 \frac{\text{rad}}{\text{seg}^2} = 0.4509 \text{ Nm}$$

Torque de torción de rotación requerido durante la aceleración ( $\tau_t$ )

$$\tau_t = 0.0332 \text{ Nm} + 0.4509 \text{ Nm} = 0.4842 \text{ Nm}$$

#### ▪ Desarrollo de cálculos del husillo correspondiente al eje “Y”

Velocidad máxima ( $V_{max}$ )

$$V_{max} = \frac{0.4 \text{ m}}{8.8 \text{ s}} = 0.0454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Aceleración ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{0.0454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}{0.1 \text{ s}} = 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

Cargas axiales máximas para un desplazamiento horizontal ( $F$ )

$$F_1 = 0.01 * 15 \text{ Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 32 \text{ N} + 20 \text{ Kg} * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = 40.2215 \text{ N}$$

$$F_2 = 0.01 * 15 \text{ Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 32 \text{ N} = 33.7215 \text{ N}$$

$$F_3 = 0.01 * 15 \text{ Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 32 \text{ N} - 20 \text{ Kg} * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = 26.7215 \text{ N}$$

$$F_4 = -0.01 * 15 \text{ Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 32 \text{ N} - 20 \text{ Kg} * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = -40.2215 \text{ N}$$

$$F_5 = -0.01 * 15 \text{ Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 32 \text{ N} = -33.4715 \text{ N}$$

$$F_6 = -0.01 * 15 \text{ Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 32 \text{ N} + 20 \text{ Kg} * 0.454 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = -26.7215 \text{ N}$$

Torque por fricción debido a una carga exterior ( $\tau_1$ )

$$\tau_1 = \frac{33.4715 \text{ N} * 5 \text{ mm}}{2000 * \pi * 0.8} = 0.0332 \text{ Nm}$$

Velocidad máxima de rotación ( $N_{max}$ )

$$N_{max} = \frac{0.0454 * 60 * 10^3}{5 \text{ mm}} = 540 \text{ min}^{-1}$$

Aceleración angular ( $\omega$ )



$$\omega = \frac{2 * \pi * 540 \text{ min}^{-1}}{60 * 0.1s} = 565.488 \text{ rad/seg}^2$$

Momento de inercia de traslación ( $J_{traslacion}$ )

$$J_{traslacion} = 15Kg * \left(\frac{5mm}{2 * \pi}\right)^2 * 10^{-6} = 9.4988 * 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

Momento de inercia de rotación ( $J_{rotacion}$ )

$$J_{rotacion} = \frac{0.0197\text{kgcm}^2 * 500mm}{10000} = 0.000985 \text{ kgm}^2$$

Momento de inercia total del sistema ( $J$ )

$$J = (0.000985\text{kgm}^2 + 9.4988 * 10^{-6} \text{ kgm}^2) * 1^2 = 0.0009944 \text{ kgm}^2$$

Torque requerido en la aceleración ( $\tau_2$ )

$$\tau_2 = 0.0009944\text{kgm}^2 * 565.488 \frac{\text{rad}}{\text{seg}^2} = 0.5623\text{Nm}$$

Torque de torción de rotación requerido durante la aceleración ( $\tau_t$ )

$$\tau_t = 0.0332\text{Nm} + 0.5623 \text{ Nm} = 0.5956\text{Nm}$$

#### ▪ Desarrollo de cálculos del husillo correspondiente al eje “Z”

Velocidad máxima ( $V_{max}$ )

$$V_{max} = \frac{0.2 \text{ m}}{4.4s} = 0.0454 \left[\frac{m}{s}\right]$$

Aceleración ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{0.045 \left[\frac{m}{s}\right]}{0.1s} = 0.45 \left[\frac{m}{s^2}\right]$$

Cargas axiales máximas para un desplazamiento vertical ( $F$ )

$$F_1 = 4Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} + 32N + 4Kg * 0.3 \left[\frac{m}{s^2}\right] = 73.04N$$

$$F_2 = 4Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} + 32N = 71.24N$$

$$F_3 = 4Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} + 32N - 4Kg * 0.3 \left[\frac{m}{s^2}\right] = 69.44N$$

$$F_4 = -4Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} - 32N - 4Kg * 0.3 \left[\frac{m}{s^2}\right] = -73.04N$$

$$F_5 = -4Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} - 32N = -71.24N$$

$$F_6 = -4Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} - 32N + 4Kg * 0.3 \left[\frac{m}{s^2}\right] = -69.44N$$

Torque por fricción debido a una carga exterior ( $\tau_1$ )

$$\tau_1 = \frac{73.04N * 5mm}{2000 * \pi * 0.8} = 0.0708Nm$$

Velocidad máxima de rotación ( $N_{max}$ )

$$N_{max} = \frac{0.045 * 60 * 10^3}{5mm} = 540 \text{ min}^{-1}$$

Aceleración angular ( $\omega$ )

$$\omega = \frac{2 * \pi * 540 \text{ min}^{-1}}{60 * 0.1s} = 565.488 \text{ rad/seg}^2$$

Momento de inercia de traslación ( $J_{traslacion}$ )

$$J_{traslacion} = 4Kg * \left(\frac{5mm}{2 * \pi}\right)^2 * 10^{-6} = 2.5339 * 10^{-12} \text{ kgm}^2$$

Momento de inercia de rotación ( $J_{rotacion}$ )

$$J_{rotacion} = \frac{0.0197kgcm^2 * 200mm}{10000} = 0.000394 \text{ kgm}^2$$

Momento de inercia total del sistema ( $J$ )

$$J = (0.000394Kg\text{m}^2 + 2.5339 * 10^{-12}Kg\text{m}^2) * 1^2 = 0.000394 \text{ kgm}^2$$

Torque requerido en la aceleración ( $\tau_2$ )

$$\tau_2 = 0.000394Kg\text{m}^2 * 565.488 \frac{\text{rad}}{\text{seg}^2} = 0.2228Nm$$

Torque de torción de rotación requerido durante la aceleración ( $\tau_t$ )

$$\tau_t = 0.0708Nm + 0.2228Nm = 0.2936Nm$$

#### ▪ Desarrollo de cálculos del husillo correspondiente al eje “T” y eje “I”

Fuerza hacia arriba ( $F_e$ )

$$F_e = \frac{9.81N * (0.51 * 3.1416 * 0.0075m * \sec(15^\circ) + 0.001m)}{(3.1416 * 0.0075m - 0.51 * 0.001m * \sec(15^\circ))} = 5.72 \text{ N}$$

Fuerza hacia arriba ( $F_e$ )

$$F_e = \frac{9.81N * (0.51 * 3.1416 * 0.0075m * \sec(15^\circ) - 0.001m)}{(3.1416 * 0.0075m + 0.51 * 0.001m * \sec(15^\circ))} = 4.65N$$

Torque hacia arriba ( $\tau_{tu}$ )

$$\tau_{tu} = \frac{5.72N * 0.0075m}{2} = 0.021Nm$$

Torque hacia arriba ( $\tau_{td}$ )

$$\tau_{td} = \frac{4.65N * 0,0075m}{2} = 0.017Nm$$

Torque collarín ( $\tau_c$ )

$$\tau_c = \frac{9.81N * 0,007m}{2} = 0.0174Nm$$

Torque total ( $\tau_{TOTAL}$ )

$$\tau_{TOTAL} = 0.0174Nm + 0.021Nm = 0.038Nm$$

$$\tau_{TOTAL} = 0.0174Nm + 0.017Nm = 0.034Nm$$

### 3. CALIBRACIÓN

#### Procedimiento de calibración

Análisis de datos técnicos de los componentes

- Calibración del eje X, Y, Z.

##### NEMA 23

$$\theta = 1.8^\circ$$

$$200 \text{ puls} * 1.8^\circ = 360^\circ = 1 \text{ Rev}$$

$$200 = \text{Num de pulsos del motor}$$

$$\text{Torque} = 80\%$$

$$\text{Velocidad} = 80\%$$

Driver TB6600

$$\text{Corriente} = 3 \text{ Amp}$$

$$\mu\text{step} = 2$$

$$400 \text{ puls} * \frac{1.8^\circ}{2} = 1 \text{ Rev} \quad (\text{A})$$

$$\text{Rev por pulso} = 0.0025 \left( \frac{\text{Rev}}{\text{Pulso}} \right)$$

##### NEMA 17

$$\theta = 1.8^\circ$$

$$200 \text{ puls} * 1.8^\circ = 360^\circ = 1 \text{ Rev}$$

$$\text{Torque} = 80\%$$

$$\text{Velocidad} = 80\%$$

Tornillo sin fin

$$\text{Paso del tornillo} = 5 \text{ mm}$$

Considerando los datos técnicos se calcularon las revoluciones por segundo. Además, se consideraron dos métodos que pertenecen a la librería Accelstepper, utilizada para el control de los motores NEMAS.

***Stepper.SetMaxSpeed("x")***: Donde "x" representa un valor numérico indicando el número de pulsos que realiza por segundo, es decir la frecuencia de pulsos.

$$x \left[ \frac{\text{pulsos}}{\text{seg}} \right] \quad (\text{B})$$

***Stepper.SetMaxAcceleration("y")***: Donde "y" representa un valor numérico indicando el número de pulsos que realiza por segundo

$$y \left[ \frac{\text{pulsos}}{\text{seg}^2} \right] \quad (\text{C})$$

Revoluciones del NEMA 23 = Revoluciones en Eje x = Revoluciones en Eje y = Revoluciones en Eje z

Para calcular el número de revoluciones necesarias para una frecuencia de  $400 \left( \frac{\text{pulsos}}{\text{seg}} \right)$ , se usa la Ecuación A1 y la Relación A.

$$\text{NumRev} = \text{Rev por pulso} * \text{Frecuencia de pulsos} \quad (\text{A1})$$

$$NumRev = 0.0025 \left( \frac{Rev}{Pulsos} \right) * 400 \left( \frac{pulsos}{Seg} \right) = 1 \frac{Rev}{Seg}$$

Este número de revoluciones aumentara en base al valor de “x” y “y” que se maneje en los métodos de la librería Accelstepper. Es decir, si se requiere el doble de revoluciones en un segundo, el valor de “x” y “y” se incrementa al doble.

Finalizado el ajuste de velocidad se determina la resolución del automuestreador con la Ecuación A2.

Se toman los pasos enteros del motor NEMA 23, es decir, no se considera el ajuste del driver también se necesita el paso del tornillo sin fin.

$$Resolución \text{ sin considerar driver} = \left[ \frac{Num \text{ de Pulsos del motor}}{Paso \text{ del tornillo}} \right] \quad (A2)$$

$$Resolución \text{ sin considerar driver} = \left[ \frac{200 \text{ Pulsos}}{5mm} \right] = 40 \frac{Pulsos}{mm}$$

Después se calcula la resolución final de acuerdo con la configuración del driver elegida (8  $\mu step$ ), utilizando la Ecuación A3.

$$ResoluciónFinal = Resolución \text{ sin considerar driver} * \mu step \quad (A3)$$

$$ResoluciónFinal = \left[ 40 \frac{Pulsos}{mm} \right] * [2] = 80 \frac{Pulsos}{mm}$$

$$80 \frac{Pulsos}{mm} \quad (D)$$

Una vez calculada la resolución final, se determinan las coordenadas de cada una de las trayectorias del proceso de manejo de muestras utilizando la relación (D).

- Calibración del motor de toma de muestra

**NEMA 14**

$\theta = 1.8^\circ$

$200 \text{ puls} * 1.8^\circ = 360^\circ = 1 \text{ Rev}$

Torque = 80%

Velocidad = 80%

Driver TB6600

Corriente = 0.5 Amp

$\mu Pasos = 2$

$400 \text{ puls} * \frac{1.8}{2} = 360^\circ = 1 \text{ Rev}$

Tornillo sin fin

$200 \text{ puls} = 1 \text{ Rev} = 1 \text{ mm}$

Jeringa de inyección  
Rango 0 -250  $\mu\text{L}$

Cálculo de velocidad de toma de muestra con ayuda de la Ecuación A1 para tener 4 revoluciones por segundo.

$$\text{NumRev} = 0.0025 \left( \frac{\text{Rev}}{\text{Pulsos}} \right) * 400 \left( \frac{\text{pulsos}}{\text{Seg}} \right) = 1 \frac{\text{Rev}}{\text{Seg}} * 4 = 4 \frac{\text{Rev}}{\text{Seg}}$$

Ahora para tomar una muestra de 100  $\mu\text{L}$  se tienen las siguientes relaciones

Por cada 6mm que avance el embolo se toman 25  $\mu\text{L}$  (F)

Por lo tanto, si se desean tomar muestras de 100  $\mu\text{L}$  se utiliza la ecuación A4 para conocer la distancia que se necesita recorrer.

$$\text{DistanciaR} = \left[ \frac{\text{Cantidad}\mu\text{L Deseada} * \text{Distancia recorrida}}{\text{Cantidad}\mu\text{L tomada}} \right] \quad (\text{A4})$$

$$\text{DistanciaR} = \left[ \frac{100 \mu\text{L} * 6\text{mm}}{25 \mu\text{L}} \right] = 24\text{mm}$$

- Calibración del motor del sistema de Inyección

**NEMA 14**

$\theta = 1.8^\circ$

$200 \text{ puls} * 1.8^\circ = 360^\circ = 1 \text{ Rev}$

$\text{Torque} = 80\%$

$\text{Velocidad} = 80\%$

Driver TB6600

$\text{Corriente} = 0.5 \text{ Amp}$

$\mu\text{Pasos} = 1$

$400 \text{ puls} * \frac{1.8}{2} = 360^\circ = 1 \text{ Rev}$

Tornillo sin fin

$$200 \text{ puls} = 1 \text{ Rev} = 1 \text{ mm} \quad (\text{E})$$

Para la calibración del motor de inyección se toma como base uno de los requerimientos de usuario que es una velocidad de inyección de  $120 \frac{\mu\text{L}}{\text{hr}}$ , para determinar la frecuencia de pulsos necesarios que satisfacen este requerimiento.

Lo primero es obtener la velocidad de inyección  $\frac{\mu\text{L}}{\text{seg}}$  utilizando la Relación (F) y (G).

$$\left( \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \right) \quad (\text{F})$$

$$\left( \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} \right) \quad (\text{G})$$

$$\mu\text{L por tiempo} = 120 \left( \frac{\mu\text{L}}{\text{hr}} \right) * \left( \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} \right) * \left( \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right) = 0.033333 \left( \frac{\mu\text{L}}{\text{seg}} \right)$$

Para relacionar los  $\mu\text{L}$  por tiempo a distancia recorrida por tiempo utilizamos la relación (F).

$$\text{Distancia recorrida por tiempo} = 0.033333 \left( \frac{\mu\text{L}}{\text{seg}} \right) * \left( \frac{6\text{mm}}{25 \mu\text{L}} \right) = 0.008 \left( \frac{\text{mm}}{\text{Seg}} \right)$$

Continuando con el proceso de calibración se utiliza la Relación (E), con el objetivo de obtener una relación de unidades de  $\left( \frac{\text{Rev}}{\text{Seg}} \right)$

$$\text{NumRev} = 0.008 \left( \frac{\text{mm}}{\text{Seg}} \right) * \left( \frac{1\text{Rev}}{1\text{mm}} \right) = 0.008 \left( \frac{\text{Rev}}{\text{seg}} \right)$$

Por último, se calcula la frecuencia de pulsos necesaria para cumplir con el requerimiento de usuario utilizando la Ecuación A1.

$$\text{Frecuencia de pulsos} = \left( \frac{\text{NumRev}}{\text{Rev por pulso}} \right)$$

$$\text{Frecuencia de pulsos} = \left( \frac{0.008}{0.005} \right) \left( \frac{\text{pulsos}}{\text{Seg}} \right)$$

$$\text{Frecuencia de pulsos} = 1.6 \left( \frac{\text{pulsos}}{\text{Seg}} \right)$$

## 4. CÓDIGOS

- Programación del Microcontrolador ESP32

```
#include <Arduino.h>

// Incluye la librería AccelStepper

#include <AccelStepper.h>
#include <Arduino.h>
#include <freertos/FreeRTOS.h>
#include <freertos/task.h>

//Definimos los pines necesarios para nuestros dos motores eje x e y

#define MOTOR1_PUL1 4
#define MOTOR1_DIR1 0
#define MOTOR1_PUL2 17
#define MOTOR1_DIR2 16
#define MOTOR1_PUL3 18
#define MOTOR1_DIR3 5
#define MOTOR1_PUL4 21
#define MOTOR1_DIR4 19
#define MOTOR1_PUL5 23
#define MOTOR1_DIR5 22 //22

//Definimos los pines necesarios para los sensores de homing

#define Sensor_x 12
#define Sensor_y 26
#define Sensor_z 25

//Creamos variables que usaremos
volatile int ejecucion=1,Tomamuestra=0,Inyeccion=0,Enjuague=0;
int x,y;
int dato1 =0 ,dato2 =0 ,dato3=0;
volatile char paroRemoto='a';
volatile bool ejecutarloop2=false;
char caracterEspecial = '#';
String datoStr = "";
String datoEspecial = "";
```



```
//-----FUNCIONES PRINCIPALES-----

void Ejecucion_para_2jeringas() --
void Homing() --
void Numero_muestra() --

//-----FUNCIONES SECUNDARIAS-----

//BLOQUE DE FUNCIONES QUE SOLO SE EJECUTAN UNA VEZ//

void tomar_jeringa1(int x1,int y1) --
void tomar_muestra(int,int) --
void Inyectar_muestra() --

//BLOQUE DE FUNCIONES QUE SE EJECUTAN EN BUCLE HASTA QUE SE TÉRMINEN EL NUMERO DE MUESTRAS

void tomar_jeringa2(int a1,int b1) --
void dejar_jeringa2(int c1,int d1) --
void enjuagar() --
void dejar_jeringa1(int e1,int f1) --
void llevar_Inyectar1(int xx,int yy) --
void llevar_Inyectar2(int xx1,int yy1) --

//-----FUNCIONES TERCIARIAS-----

void Acoplar() --
void Desacoplar() --
void Tomaranalito() --
void Tomarsolucion() --
void DesecharSolucion() --

//-----FUNCIONES BASICAS-----

void EnvioDatos() --

void LeerDatos() --
```

Void espera(){}...

Void Leer\_Datos(){}...

void setup()

{

Serial.begin(115200);

motorx.setMaxSpeed(1800);

motorx.setAcceleration(5000000);

motory.setMaxSpeed(2200);

motory.setAcceleration(999999999999);

motorz.setMaxSpeed(1800);

motorz.setAcceleration(5000000);

motor\_Inyeccion.setMaxSpeed(dato2);

```

motor_Inyeccion.setAcceleration(6000000);
motor_Enjuague_Tmuestra.setMaxSpeed(1000);
motor_Enjuague_Tmuestra.setAcceleration(100000);

pinMode(Sensor_x,INPUT);
pinMode(Sensor_y,INPUT);
pinMode(Sensor_z,INPUT);

xTaskCreatePinnedToCore(
    Task1,    /* Función que implementa la tarea */
    "Task1", /* Nombre de la tarea */
    90000,   /* Tamaño de la pila de la tarea */
    NULL,    /* Parámetro de entrada a la tarea */
    1,       /* Prioridad de la tarea */
    NULL,    /* Referencia a la tarea */
    0);

}

void Task1(void * parameter)
{
    for(;;){

        // Leer_Data();

        if(ejecutarloop2==false&&dato3==1)
        {
            LeerDatos();
            delay(1);
        }

        if(ejecutarloop2==true&&dato3==1)
        {
            LeerDatos();
            //Serial.println("Ya estoy inyectando");
            Inyectar_muestra();
            //Serial.println("Desactive ejecutarloop2");
            //Serial.println("Ya no estoy inyectando");
            LeerDatos();
            ejecutarloop2=false;
        }
        vTaskDelay(100);
    }
}

```

```

    }
}

void loop()
{
    while(paroRemoto=='a')
    {
        Numero_muestra();
        if((dato1 == 1000 || dato1 == 900 || dato1 == 800 || dato1 == 700 || dato1 ==
600 || dato1 == 500) && dato2 >= 0 && dato2 <= 80 && dato3==1&&paroRemoto=='a')

        {

            Homing();
            ejecucion=1;
            Ejecucion_para_2jeringas();
            dato1=0;
            dato2=0;
            dato3=0;
            EnvioDatos();

        }

    }

    paroRemoto='a';
    delay(100);

    // Asegúrate de incluir un delay en tu bucle infinito para evitar un bloqueo
}

```

- Programación de la interfaz de monitoreo

```

using HMI_Automuestreador.Properties;
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.IO.Ports;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using static System.Windows.Forms.VisualStyles.VisualStyleElement;
using static System.Windows.Forms.VisualStyles.VisualStyleElement.ToolBar;

namespace HMI_Automuestreador
{
    5 referencias
    public partial class Form1 : Form
    {
        private System.Windows.Forms.Timer timer1 = new System.Windows.Forms.Timer();
        private string txtChange = "";
        1 referencia
        public Form1()...

        private int number;
        private int number2;
        private int number3;
        private string DATOS;
        private string ParototalRemoto;
        private string Continuar;
        private bool botonPresionado = false;
        bool mensajeMostrado = false;

        8 referencias
        public Form1(int number, int number2, string DATOS, int number3, string ParototalRemoto, string Continuar)
        {
            this.number = number;
            this.number2 = number2;
            this.DATOS = DATOS;
            this.number3 = number3;
            this.ParototalRemoto = ParototalRemoto;
            this.Continuar = Continuar;
        }
    }
}

```

```

1 referencia
private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)...

1 referencia
private void Form1_FormClosing(object sender, FormClosingEventArgs e)...

1 referencia
private void serialPort1_DataReceived(object sender, SerialDataReceivedEventArgs e)...

1 referencia
private void buttonConectar_Click(object sender, EventArgs e)...

1 referencia
private void buttonDesconectar_Click(object sender, EventArgs e)...

1 referencia
private void buttonInicio_Click(object sender, EventArgs e)...

1 referencia
private void comboBoxVelocidad_SelectionChangeComitted(object sender, EventArgs e)...
1 referencia
private void timer1_Tick(object sender, EventArgs e)...
1 referencia
private void buttonPare_Click(object sender, EventArgs e)...

1 referencia
private void buttonReinicio_Click(object sender, EventArgs e)...

1 referencia
private void buttonPareRemoto_Click(object sender, EventArgs e)...

1 referencia
private void textBoxNumeromuestra_TextChanged(object sender, EventArgs e)...

1 referencia
private void buttonContinuar_Click(object sender, EventArgs e)...
}

```