

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA
MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“Desarrollo de un sistema tridimensional para el cálculo de variables antropométricas en tiempo real para análisis de riesgos ergonómicos”

T E S I S

que presenta para obtener el grado de DOCTOR EN CIENCIAS

CESAR ISMAEL LOPEZ BARRERAS

DIRECTOR DE TESIS:

Dra. CLAUDIA CAMARGO WILSON

TIJUANA, B. C.

OCTUBRE DE 2018

Universidad Autónoma de Baja California
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

FOLIO No. 264

Tijuana, B. C., a 20 de septiembre de 2018

C. Cesar Ismael López Barreras
Pasante de: Doctor en Ciencias
Presente

El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la
Opción TESIS

Es propuesto, por los C. Dres. Claudia Camargo Wilson y Juan Andrés López
Barreras

Quienes serán los responsables de la calidad de trabajo que usted presente,
referido al tema Desarrollo de un sistema tridimensional para el cálculo de
variables antropométricas en tiempo real para análisis de riesgos ergonómicos.

el cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:

- I.- INTRODUCCIÓN
- II.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
- III.- MARCO TEÓRICO
- IV.- MARCO DE REFERENCIA
- V.- METODOLOGÍA
- VI.- RESULTADOS Y ANALISIS
- VII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- VIII.- REFERENCIAS
- IX.- ANEXOS



Dra. Claudia Camargo Wilson
Directora de Tesis



Dr. Juan Andrés López Barreras
Co-Director de Tesis



Dr. José Luis González Vázquez
Sub-Director Secretario



Dr. Luis Enrique Palafox Maestre
Director

DEDICATORIA

A mis padres **Juan Andres Lopez Ayala y Rosa Isela Barreras Ortega**, fuente de inspiración y fuerza antes y durante el desarrollo del presente trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa, Daviana Lopez e hijos, Axel y Andrea, por su comprensión y apoyo dado incondicional durante el desarrollo del presente trabajo.

A mis hermanos, Jose María, Juan Andres e Isaac, por toda la ayuda prestada en la realización del documento.

De manera especial, agradezco a la Dra. Claudia Camargo y al Dr. Jesus E. Olguín, por la continua mejora y dirección del documento. De igual manera, a los Dres. Paul Taboada y Quetzalli Aguilar por la invaluable ayuda durante todo el desarrollo del documento.

Especial agradecimiento a CONACYT por financiar mi investigación y desarrollo durante los años de estudio.

RESUMEN de la Tesis de Cesar Ismael López Barreras, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **DOCTOR EN CIENCIAS**. Tijuana, Baja California, México. Octubre de 2018.

DESARROLLO DE UN SISTEMA TRIDIMENSIONAL PARA EL CÁLCULO DE VARIABLES ANTROPOMÉTRICAS EN TIEMPO REAL PARA ANÁLISIS DE RIESGOS ERGONÓMICOS.

Resumen aprobado por:



Claudia Camargo Wilson

Director de tesis

Resumen

La obtención de datos antropométricos requiere de recursos que en la mayoría de los casos no están disponibles, tales como: costos de equipo de medición, disponibilidad de personal capacitado y el tiempo necesario. El objetivo de esta investigación es de desarrollar un sistema portátil no intrusivo y de bajo costo que permita el cálculo de datos antropométricos en tiempo real del cuerpo humano. Este artículo describe el funcionamiento de un sistema de escaneo y reconstrucción en 3D del cuerpo humano, se genera un modelo tridimensional utilizando cuatro sensores de profundidad y de bajo costo, conectados en una sola computadora de manera simultánea del cual se les extraen los datos antropométricos. Se elabora un experimento, el cual se comparan los resultados de las mediciones obtenidas en el método propuesto contra los datos obtenidos los módulos de medición antropométricas que representan las mediciones reales estándares. Las mediciones se realizan a 25 participantes adultos de ambos sexos. Los resultados obtenidos en la etapa de experimentación muestran un error de medición promedio de 2.79 y 2.29 centímetros en las anchuras y alturas respectivamente. Se concluye que el sistema propuesto utilizando un arreglo polar de cuatro sensores, presenta un nivel de error no significativo, con mediciones aceptables.

Palabras clave: Visión artificial, reconstrucción tridimensional, sensor 3D, antropometría.

ABSTRACT of the thesis, presented by Cesar Ismael López Barreras, in order to obtain the DOCTORATE of SCIENCES degree. Tijuana, Baja California, México. October, 2018.

**DEVELOPMENT OF A THREE-DIMENSIONAL SYSTEM FOR THE
CALCULATION OF ANTHROPOMETRIC VARIABLES IN REAL-TIME FOR
ANALYSIS OF ERGONOMIC RISKS.**

Approved by:



Claudia Camargo Wilson

Thesis Director

Abstract

Obtaining anthropometric data requires resources that in most cases are not available, such as: costs of measuring equipment, availability of trained personnel and the necessary time. The objective of this research is to develop a portable, non-intrusive and low-cost system that allows the calculation of anthropometric data in real time of the human body. This article describes the operation of a system of 3D scanning and reconstruction of the human body, a three-dimensional model is generated using four depth sensors and low cost, connected in a single computer simultaneously from which they are extracted the anthropometric data. An experiment is elaborated, which compares the results of the measurements obtained in the proposed method against the data obtained from the anthropometric measurement modules that represent the real standard measurements. The measurements were taken to 25 adult participants of both sexes. The results obtained in the experimentation stage show an average measurement error of 2.79 and 2.29 centimeters in the widths and heights respectively. It is concluded that the proposed system using a polar array of four sensors, presents a non-significant level of error, with acceptable measurements.

Keywords: Computer Vision, tridimensional reconstrucción, 3D sensor, anthropometry.

Índice

| | |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| Capítulo 1 Introducción | 12 |
| 1.1 Antecedentes | 14 |
| 1.1 Marco Contextual..... | 15 |
| 1.1.1 Antropometría en México | 15 |
| 1.1.1 Instrumentación para medición antropométrica | 18 |
| 1.1.1 Visión Artificial..... | 19 |
| 1.1 Planteamiento del Problema..... | 20 |
| 1.1.1 Problema..... | 20 |
| 1.1 Justificación | 20 |
| 1.1 Delimitaciones | 21 |
| 1.1 Objetivos de Investigación..... | 22 |
| 1.1.1 Objetivos Específicos | 22 |
| 1.1 Preguntas de investigación..... | 23 |
| 1.2 Hipótesis..... | 23 |
| Capítulo 2 Marco Teórico | 24 |
| 2.1 Ergonomía..... | 24 |
| 2.1.1 Objetivos de la ergonomía..... | 26 |
| 2.2 Antropometría | 26 |
| 2.2.1 Importancia de antropometría | 27 |
| 2.2.2 Variabilidad..... | 27 |
| 2.2.3 Análisis estadístico..... | 28 |
| 2.2.4 Métodos de medición | 28 |
| 2.2.5 Instrumentos de Medición Antropométricas | 29 |
| 2.2.6 Dimensiones antropométricas | 30 |
| 2.2.7 Tipos de Dimensiones | 30 |
| Capítulo 3 Marco de Referencia..... | 36 |
| 3.1 Sistemas de escaneo y sensores | 37 |
| 3.2 Sensor Kinect | 41 |
| 3.2.1 Tiempo de Vuelo..... | 42 |
| 3.2.2 Características | 43 |
| 3.2.3 Kinect como dispositivo para medición | 45 |
| 3.2.4 Áreas de aplicación | 47 |
| 3.2.5 Kinect y Antropometría..... | 50 |
| 3.3 Análisis tridimensional | 52 |
| 3.3.1 Librería de Nubes de Puntos | 53 |
| 3.3.2 Nubes de Puntos | 54 |
| 3.3.3 Sample Consensus Initial Alignment | 55 |

| | |
|----------------------------------------------------------|------------|
| Capítulo 4 Metodología | 57 |
| 4.1 Aportaciones del Sistema..... | 58 |
| 4.1.1 Múltiples sensores 3D en Paralelo | 58 |
| 4.1.2 Transformación Inicial | 59 |
| 4.1.3 Herramienta de medición | 60 |
| 4.2 Desarrollo del Sistema | 61 |
| 4.2.1 Requerimientos..... | 62 |
| 4.3 Experimentación y Validación..... | 63 |
| 4.3.1 Instalación y Ajuste Inicial..... | 64 |
| 4.4 Proceso General | 64 |
| 4.5 Captura del Modelo..... | 65 |
| 4.6 Transformación Inicial..... | 68 |
| 4.7 Filtrado | 73 |
| 4.7.1 Filtrado Seccional..... | 73 |
| 4.7.2 Filtrado en Voxeles | 74 |
| 4.7.3 Filtrado de puntos atípicos | 75 |
| 4.8 Registro ICP | 77 |
| 4.8.1 Implementación..... | 78 |
| 4.9 Ajuste de Curvaturas | 81 |
| 4.10 Calculo de Datos Antropométricos | 83 |
| 4.10.1 Sistema de medición antropométrica propuesto..... | 83 |
| 4.10.2 Calculo de Alturas..... | 84 |
| 4.10.3 Calculo de Anchuras | 87 |
| 4.11 Cabinas de Medición Antropométricas..... | 88 |
| Capítulo 5 Resultados | 90 |
| 5.1 Conclusiones | 91 |
| 5.2 Trabajo a futuro..... | 92 |
| Referencias | 93 |
| Anexos | 100 |

Lista de Figuras

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1: Métodos de Medición antropométricos..... | 19 |
| Figura 3.2: Sensor Kinect2.. | 44 |
| Figura 3.3: Imágenes generadas por el dispositivo Kinect v2. | 46 |
| Figura 3.4: Sistemas de Escaneo comerciales..... | 54 |
| Figura 4.5: Diagrama de instalación de sensores..... | 60 |
| Figura 4.6: Diagrama de flujo general de proceso..... | 62 |
| Figura 4.7: Transformación inicial por cada sensor..... | 67 |
| Figura 4.8: Flujo para la generación del modelo tridimensional.. .. | 68 |
| Figura 4.9: Transformación Inicial implementada | 72 |
| Figura 4.10: Interface principal y panel de control..... | 72 |
| Figura 4.11: Voxel 3D | 75 |
| Figura 4.12: Proceso de Filtrado..... | 76 |
| Figura 4.13: Conjuntos $P_{f,N}$ filtrados | 80 |
| Figura 4.14: Flujo del proceso de reconstrucción MMC..... | 82 |
| Figura 4.15: Generación del modelo final.. | 82 |
| Figura 4.16: Tablas percentiles de Dreyfuss..... | 85 |
| Figura 4.17: Segmentación en alturas y anchuraso. | 86 |
| Figura 4.18: Procedimiento del cálculo automático de anchuras. | 88 |
| Figura 4.19: Cabinas de Medición Antropométricas:..... | 89 |
| Figura 4.20: Medicion en Cabinas Antropometricas..... | 89 |

Lista de Tablas

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1.1: Instituciones de la salud del trabajador..... | 16 |
| Tabla 3.2: Comparación entre sistemas actuales de escaneo comerciales..... | 41 |
| Tabla 3.3: Comparativa de especificaciones para el Sensor Kinect | 44 |
| Tabla 3.4: Características del Sensor Kinect. | 45 |
| Tabla 4.5: Referencias para las alturas y anchuras. | 86 |
| Tabla 5.6: Resultados de las diferencias porcentuales..... | 91 |

Capítulo 1

Introducción

En estudios de diseños ergonómicos de estaciones de trabajo para procesos industriales, la antropometría juega un papel importante en proveer los datos necesarios para poder determinar las dimensiones óptimas de inmuebles y equipos. Es limitada la aplicación de las nuevas tecnologías para la adquisición de tales dimensiones del cuerpo humano en el área de Ergonomía y Antropometría. Las mediciones antropométricas son requeridas para el diseño de instalaciones, estaciones de trabajo equipos, y en relativamente todo en lo que el cuerpo humano tenga que interactuar. La antropometría es la ciencia que nos proporciona tal información [1]. En este documento se evalúan las herramientas y tecnologías que se pueden aplicar para la toma y captura de mediciones antropométricas de escaneo tridimensional, y evaluación ergonómica, por lo que se realiza una propuesta de una herramienta de virtualización tridimensional utilizando Kinect, que ayude a determinar con mayor precisión y rapidez la captura y análisis de dichos datos y que por lo tanto auxilie en el estudio de la ergonomía en procesos industriales a nivel didáctico. Se denomina Ergonomía, como el estudio del trabajo, la ciencia que estudia el diseño del trabajo para ajustarse al cuerpo del trabajador, y no forzar este para que se ajuste al trabajo [2]. Existen agencias civiles y gubernamentales para el cuidado de la salud y protección del trabajador (**Tabla 1.1**). Antropometría, es el estudio que provee los datos necesarios para los estudios de Ergonomía;

se define como el estudio del cuerpo humano y sus movimientos. Involucra investigaciones con respecto a mediciones al cuerpo humano, llamados Datos Antropométricos. Se requiere de instrumentos de medición específicos, que representa altos costos de inversión para la realización de algún estudio de ergonomía aplicado a un proceso industrial de fabricación en la que están involucrado el recurso humano [3]. El escaneo por medio de imágenes permite obtener dichos datos. Dicha tecnología ya ha sido utilizada en diversos estudios en lo que comúnmente se le denomina como técnicas de escaneado tridimensional para obtener datos antropométricos [4-8]. Algunas no se encuentran a la disposición pública, y las existentes herramientas son de altos costos y de propósitos ajenos a estudios directamente relacionados con Ergonomía y Antropometría, tal como la industria de diseño de ropa y calzado. El acceso a herramientas que posean esta tecnología es limitado para los organismos de educación, tomando en cuenta los costos que estos incurren y la poca disponibilidad. La tarea de realizar las mediciones antropométricas, es un proceso exhaustivo, repetitivo, cansada para la persona encargada de recabar la información, dependiendo de la cantidad de mediciones a realizar. Por otra parte, los sistemas conformados con sensores para medición, son ampliamente utilizados a nivel científico para la automatización de los procesos con la simple premisa de simplificar la tarea y obtener mejores resultados en un producto final [9]. En la mayoría de las circunstancias, la tarea que tienen que realizar dichos sistemas no requieren de la participación directa del individuo en prueba, lo que permite que el error humano este mayormente descartado a la hora de obtener alguna medición. Los sistemas que realizan tareas utilizando sensores presenta la ventaja que no son invasivos, no se requiere algún entrenamiento especial por parte de los participantes o alguna especie de calibración especial del equipo [10]. El presente documento muestra la utilización del dispositivo Kinect, para la rápida obtención de datos antropométricos. Actualmente la utilización de sistemas de escaneos en 3D del cuerpo humano son evaluados en diversas áreas de investigación científica [11, 12, 13]. La obtención modelos tridimensionales del cuerpo humano y datos antropométricos utilizando sensores Kinect ha sido explotado en diversos estudios. Se muestra el desarrollo de un sistema que sea portable, de bajo costo [14], además que sea de uso flexible, es decir que las medidas que se deseen obtener, no estén restringidas a cierta aplicación en particular. Como parte del objetivo inicial, obtener los datos antropométricos y no en sí, la propia generación del modelo tridimensional del cuerpo humano, como

finalidad principal es el de la extracción de los datos antropométricos, no se intenta generar un modelo tridimensional para fines estéticos o artísticos [15]. El presente documento genera un análisis solamente de las mediciones antropométricas y no las posturas de las personas [16]. El sistema es evaluado utilizando los Módulos de Medición y Análisis de Medidas Antropométricas y Biomecánicas *Asiatech* [17], utilizando los estándares de medición ISAK [18] con la finalidad de establecer el estándar dorado en la etapa de experimentación y validación. El resultado del sistema de escaneo propuesto utilizando Kinect, es comparado con las mediciones obtenidas en los módulos de medición antropométrica *Asiatech*, tomando en cuenta los siguientes factores: error de la medición, tiempo de cálculo y costos de implementación. Los datos resultantes solamente están restringidos para análisis antropométrico, en el ámbito académico e incluso profesional. Además de su aplicación para la generación de modelos tridimensionales, para prototipos, impresión en 3D, herramienta virtual para la prueba de prendas de vestir, entre otros; recalcando el hecho que no se recomienda para su uso médico.

1.1 Antecedentes

El análisis antropométrico, ha sido objeto de estudio a través de los últimos años en áreas de la ciencias, diseño industrial, biomecánica, salud y medicina, y principalmente en el área de Ergonomía. La tecnología de sistemas de escaneo tridimensional, representa un avance significativo en los tiempos requeridos para realizar un análisis antropométrico completo, además de los recursos necesarios para llevar a cabo dicha tarea, tales como recurso humano capacitado para la medición y los costos de instrumentación. Los sistemas de escaneo se basan en la utilización de sensores de profundidad (sensor 3D), los cuales hacen posible la reconstrucción de mallas tridimensionales de cualquier objeto sólido y a su vez extraer de ella cualquier información geométrica relevante.

1.1 Marco Contextual

En 1996, Leslie Farkas, realiza un estudio antropométrico basado en una población de más de 1000 niños con síndromes faciales y a más de 2400 individuos saludables. En su estudio destaca los principales problemas con los que un analista se enfrenta asociados con mediciones antropométricas. Los cuales incluyen, entre otros, la relativa validación de las mediciones hechas con instrumentación de medición análoga, la interpretación de los ajustes hechos para el observador de las medidas y los cuestionables juicios de la habilidad de medición de la persona que mide en términos clínicos. Estas características aún están presentes en estudios más actuales. Por lo que esto remarca los aspectos que se tienen que considerar a la hora de realizar cierto estudio ergonómico [20]. OSHA, describe la importancia de la ergonomía en la evaluación de riesgos a la salud, en los que destaca los desórdenes musculo esqueléticos (MSD), como uno de los principales problemas de la salud ocupacional. En el documento se remarca el proceso que se tiene que seguir para el análisis ergonómico y antropométrico, así como el control de los factores involucrados como causas de riesgos a la salud laboral [2]. El CDC en sus apartados de investigación en el área de antropometría y salud ocupacional, NHANES desarrollo un manual de procedimientos de medición antropométrica, describe el instrumental y mediciones necesarios para el desarrollo de la investigación, así como el proceso de medición corporal, captura y análisis de las mediciones [3]. La asociación americana de higiene industrial presentó una compilación de herramientas contemporáneas para evaluaciones ergonómicas. En tal estudio se destaca el flujo que tiene que seguir el analista para la apropiada selección de la herramienta, dependiendo de la aplicación o interés buscado [21].

1.1.1 Antropometría en México

La Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS), es el organismo oficial responsable de velar por la salud del trabajador. Recientemente se añadieron políticas en el Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo publicado en el Diario Oficial de la

Federación acerca de los aspectos relevantes a los que los empleadores en México deben presentar acerca de los estudios de ergonomía en el área de salud ocupacional.

Tabla 1.1: Instituciones públicas y privadas encargadas de la salud y bienestar del trabajador.

| Acrónimo | Descripción |
|-----------------|------------------------------------------------------------|
| NIOSH | The National Institute for Occupational Safety and Health. |
| OSHA | Occupational Safety and Health Administration. |
| AIHA | American Industrial Hygiene Association. |
| IEA | International Ergonomics Association. |
| CDC | Center of Disease Control and Prevention |
| NHANES | National Health and Nutrition Examination Survey |
| AIHA | American Industrial Hygiene Association |
| STPS | Secretaría del Trabajo y Previsión Social en México. |

Lo anterior resulta relevante, ya que las empresas deben realizar proyectos para analizar los factores ergonómicos en sus instalaciones, por decreto federal de acuerdo a los artículos 42 y 43, en su capítulo II. Se desea establecer las disposiciones en materia de seguridad y salud que deberán realizar en los centros de trabajo, a efecto de que tengan las condiciones que permitan prevenir riesgos y, de esta manera, garantizar a los trabajadores el desempeño de sus actividades en un ambiente que asegure su vida, integridad y salud, así como evitar que se dañe al centro de trabajo. Entre las obligaciones de los empresarios se establece que estos deberán contar con un diagnóstico de seguridad y salud en el trabajo, integrar un programa de seguridad y salud en el trabajo, con base en el diagnóstico antes indicado, contar con estudios y análisis de riesgos, informar a los trabajadores respecto de los riesgos relacionados con la actividad que desarrollen, capacitar a los trabajadores sobre la prevención de riesgos y la atención de emergencias, proporcionarles el equipo de protección personal que corresponda a sus actividades. Los centros de trabajo con más de 50 trabajadores deberán contar con instalaciones adecuadas para el acceso y desarrollo de actividades de las personas con discapacidad. Las acciones y programas para la promoción de la salud y la prevención de las adicciones se incorporarán al programa de seguridad y

salud en el trabajo. El nuevo Reglamento amplía la lista de trabajos a los que no pueden asignarse mujeres en estado de gestación y menores de edad, estableciendo listas de trabajos específicos que no pueden asignarse a cada grupo. Regula las condiciones de seguridad y salud que se deben observar respecto a los trabajadores con discapacidad y los trabajadores del campo. Las Instituciones de Educación Superior del país deben estar actualizadas de estas nuevas disposiciones ya que los empresarios recurrirán a ellas en busca de asesoría y de propuestas que aseguren el cumplimiento de lo que la Ley exige. En consecuencia, con todo lo anterior un grupo de investigadores de la Universidad Autónoma de Baja California se ha dispuesto publicar parte de los resultados de siete meses de investigación de un total de cuatro años que se ha proyectado que dure este proyecto. En una resolución a nivel nacional, se pueden citar de organismos que velan por el interés del estudio de Ergonomía y demás Ciencias asociadas a ellas, tal como Antropometría y Biomecánica. Entre ellos se encuentra la sociedad de ergonomistas de México (SEMAC), la cual es un organismo civil fundado en 1995 formado por entusiastas mexicanos de diversos ámbitos científicos y médicos. Este organismo junto con escuelas de nivel superior organiza eventos para la comunidad de ergonomistas y se fomenta y promociona el mismo por medio de los capítulos estudiantiles universitarios llamados CAPUNIS, estos se encargan entre otras cosas, de fomentar a nivel local y regional el estudio de la ergonomía y sus aplicaciones. Entre ellos, diversas universidades de México en conjunto con dicha asociación han logrado darle un nuevo enfoque a Ergonomía, como caso podemos mencionar, La universidad Autónoma de Nuevo León y la Universidad Autónoma de Sonora. En 2001, se realizó un estudio de dimensiones antropométricas de la población en América Latina, en tal publicación se recolectaron los datos antropométricos, que, en el caso de México, estas fueron recolectadas en la parte central y sur del país, con el propósito de ser utilizados para la resolución de problemas ergonómicos, utilizando criterios y principios generales de antropometría. El análisis se enfoca en la extracción de 50 principales dimensiones sugeridas por autores reconocidos para satisfacer de manera general las necesidades de los problemas de diseño de aspecto ergonómico [22]. En 2005, el Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño de la Universidad de Guadalajara publican en su libro: Factores Ergonómicos en el Diseño Antropometría. La cual hace referencia del estudio de la ergonomía en un nivel nacional y destaca, como al igual, a nivel internacional, esta ciencia cuenta con poca difusión y recursos, de los cuales muchas

veces el propio investigador requiere desarrollar sus propias técnicas y métodos para llevar estudios muy particulares. Dicha universidad cuenta con un equipo de escaneo TC², que no se tiene a disposición en ninguna otra institución académica en la región. Este equipo está conformado por 16 sensores Kinect V1, que permiten el escaneo corporal completo [23].

1.1.1 Instrumentación para medición antropométrica

Los métodos de medición e instrumentación, han ido evolucionando con los avances en la ciencia y tecnología. El analista por lo regular realiza mediciones a los sujetos de prueba, ya sea “in-situ”, o en laboratorios donde se cuenta con equipo de medición antropométrica. El proceso puede llevar alrededor de 10 a 20 minutos por persona dependiendo de la cantidad de mediciones que se desea recabar, por lo que se requiere una tarea repetitiva y cansada para la persona que está siendo medida tanto como para el analista (**Figura 1.1**). Desde el siglo pasado se establecieron las bases para la toma de dichas medidas que consiste en la toma de 11 medidas corporales, y las características musculares de los individuos, se considera la manera más rápida, efectiva y eficaz para la toma de mediciones antropométricas. En los métodos directos de medición antropométrica, la cantidad de instrumentos de medición para una apropiada captura, pueden variar desde 6 hasta 20 herramientas distintas de medición, para una completa medición en el cuerpo [3]. Hasta el momento la utilización de instrumentación de medición directa o por contacto sigue siendo la manera más práctica de recabar mediciones. Sin embargo, esto implica ciertas desventajas, tales como el entrenamiento necesario, así como experiencia necesaria para determinar los puntos somato métricos más relevantes, y por lo regular esto requiere de años de práctica. Los instrumentos clásicos de medición se pueden mencionar la cinta de medición y el antropómetro, entre los más usuales.



Figura 1.1: Métodos de Medición antropométricos. Medición manual de anchuras con antropómetro y cinta de medir (a). Medición de Alturas utilizando cabinas de medición antropométricas (b).

1.1.1 Visión Artificial

La visión por computadora o visión artificial es un campo de la Inteligencia Artificial en el cual una unidad de procesamiento lógico extrae información a partir de imágenes, tal como intensidad de luz, patrones, identificación de objetos, segmentación de figuras 2D/3D, tamaño, geometría, textura, etc. Este campo de estudio está conectado fuertemente con Matemáticas y las ciencias computacionales y también se le conoce como Visión de Computadora Geométrica [24]. La manera como se describe el cambio los objetos a partir de distintos puntos de vista está en función a la forma del objeto y los parámetros de la cámara

con los que se hace la observación. Actualmente existen diversas compañías que se dedican a la investigación y desarrollo de esta tecnología para distintas aplicaciones, entre las principales se encuentran la robótica, médica, automotriz y textil. En el presente documento se examina de manera general los principales logros más recientes con respecto a la implementación de visión artificial como una herramienta de escaneo tridimensional.

1.1 Planteamiento del Problema

Un análisis ergonómico, requiere contar con herramientas alternativas a la instrumentación actual para la adquisición de datos antropométricos. La aplicación de la normatividad en cumplimiento para el sector industrial público y privado, aumenta la necesidad de contar con herramientas que sean fiables y de bajo costo de implementación.

1.1.1 Problema

La inexistencia de un método de medición efectivo en tiempo real, y de bajo costo en la región, que permita la rápida captura de datos antropométricos.

1.1 Justificación

La utilización de herramientas y métodos de análisis y mediciones antropométricas presentan características con respecto a la inversión que se tiene que realizar un estudio antropométrico a cierta población. El costo de los equipos utilizados en el presente documento, con respecto a un equipo especializado comercial disminuye su costo en aproximadamente un 800%. En el marco de referencia del presente documento se analizan las características y costos del sistema propuesto y de estos sistemas comerciales. Un análisis antropométrico automatizado representa una mejora significativa con respecto a una

metodología manual. Al ser un sistema parametrizado minimiza el error humano en la captura de información puesto no es necesaria la intervención directa en la medición. Los factores que se toman en cuenta para la implementación del sistema propuesto son:

1. Costos de renta o adquisición de instrumentación de medición requerida.
2. Disponibilidad del personal necesario para realizar tales mediciones.
3. Tiempo de medición y validación de datos.
4. Delimitaciones

1.1 Delimitaciones

Se delimita el sistema que se desea desarrollar en base a tres principales factores: Geográfica, Metodológica y Tecnológica. Se toma en cuenta el hecho de que se desea desarrollar un sistema que sea utilizado en cierta zona de la república mexicana, esto en relación a la población que se desea muestrear. La metodología tiene su restricción con respecto al propósito que se le da a los datos obtenidos y los tipos de mediciones. En un nivel tecnológico, de utilizan dispositivos que originalmente no fueron diseñados con este propósito.

1. Geográfica: La muestra poblacional es tomado del área noroeste de México. El método propuesto requiere como referencia cartas antropométricas basadas en la población en la región.
2. Metodológicas: el sistema solamente está diseñado para un uso académico. La implementación tipo industrial se puede utilizar como referencia. No se recomienda su utilización para propósitos médicos. Se limita la cantidad de mediciones realizadas en el área cervical, extremidades no son evaluadas aun por el sistema. La metodología propuesta está en relación al objetivo de determinar datos antropométricos en el menor tiempo posible y con la menor divergencia con respecto a los valores estándares.
3. Tecnológicas: El sensor Kinect representa limitantes con respecto a capacidad de escaneo en sus sensores de profundidad [25]. Los datos arrojados por el sistema

que se presenta en este documento, son meramente informativos y para propósitos del mismo, por lo tanto, se reduce a tomar dichos datos como una valoración o referencia. El nivel de desarrollo del sistema que controla los sensores y realiza los cálculos para las mediciones se encuentra aún en etapas de desarrollo. El nivel de precisión del sistema está en relación directa con la capacidad de los dispositivos, por lo tanto, esto representa nuestra principal restricción en el modelo.

1.1 Objetivos de Investigación

Desarrollar un método de medición para cálculo de datos antropométricos, en tiempo real, los cuales sean capturados mediante un sistema de cómputo y un sensor Kinect, que sea de bajo costo y de fácil instalación y uso.

1.1.1 Objetivos Específicos

1. Conocer los fundamentos teóricos implicados en la programación, cálculos antropométricos, evaluaciones de riesgo ergonómicas más relevantes.
2. Desarrollar un sistema de cómputo que permita la captura del cuerpo humano en tres dimensiones.
3. Implementar el sistema de medición antropométrico y análisis ergonómicos convencionales en el método propuesto.
4. Desarrollar estándares de medición antropométrica y evaluaciones ergonómicas con el nuevo sistema.

1.1 Preguntas de investigación

1. ¿Cuáles son los pasos necesarios para desarrollar un sistema de medición antropométrica y cuáles son las mediciones básicas necesarias que este debe incluir?
2. ¿Cuáles con las bases teóricas para el desarrollo de un sistema de cómputo que permita el control de múltiples sensores en paralelo en un solo computador?
3. ¿Cuáles con las bases teóricas para implementar un sistema de reconstrucción a partir de múltiples dispositivos electrónicos que permita la fusión de múltiples imágenes en 3D?
4. ¿Cuáles con los métodos matemáticos necesarios para el desarrollo de un sistema simple de cálculo de mediciones de alturas y anchuras a partir de un modelo tridimensional?

1.2 Hipótesis

El objetivo es el desarrollo de un sistema que calcule los datos antropométricos de manera eficaz y precisa. Se define una hipótesis estadística en base al error estándar de las muestras, E_m :

H_0 : $E_m < 5\%$. El error estadístico en las mediciones muestreadas, arrojados por el sistema es menor al 5% con respecto a las mediciones reales.

H_a : $E_m > 5\%$. El error estadístico en las mediciones muestreadas, arrojadas por el sistema no son menores al 5% con respecto a las mediciones reales.

Hipótesis de trabajo: Un factor a considerarse es el tiempo de respuesta del sistema, por lo tanto, la implementación del sistema propuesto calcula de manera confiable los datos antropométricos deseados con una frecuencia de actualización menor a 5 segundos.

Capítulo 2

Marco Teórico

Se aborda ergonomía como la ciencia que estudia la actividad del ser humano en interacción con el entorno, medio ambiente, instrumentos, herramientas, posturas y actividades que este que realizar para determinado objetivo. Para realizar un análisis ergonómico se requiere entre otros, los datos referentes al cuerpo humano, es decir, los datos somato métricos. Para ello se requiere primero calcular los datos antropométricos. Estos son los principales datos de entrada a una evaluación ergonómica. Para precisar las áreas de interés en las que se presenta el sistema propuesto se realiza un análisis general en los campos de aplicación que se tiene como objetivo implementar el sistema de medición, en el área de Ergonomía y Antropometría. Se abordan los aspectos generales, así como los objetivos del mismo. Este representa el origen de estudio del documento.

2.1 Ergonomía

Ergonomía significa el estudio o la medida del trabajo. El término trabajo significa una actividad humana con un propósito; va más allá del concepto más limitado del trabajo como una actividad para obtener un beneficio económico, al incluir todas las actividades en las que el operador humano sistemáticamente persigue un objetivo. Así, abarca los deportes y otras actividades del tiempo libre, las labores domésticas, como el cuidado de los niños o las labores del hogar, la educación y la formación, los servicios sociales y de salud, el control

de los sistemas de ingeniería o la adaptación de los mismos, como sucede, por ejemplo, con un pasajero en un vehículo. La ergonomía examina no sólo la situación pasiva del ambiente, sino también las ventajas para el operador humano y las aportaciones que éste/ésta pueda hacer si la situación de trabajo está concebida para permitir y fomentar el mejor uso de sus habilidades [26]. Las habilidades humanas pueden caracterizarse no sólo en relación al operador humano genético, sino también en relación a habilidades más específicas, necesarias en situaciones determinadas, en las que resulta crucial un alto rendimiento. El desarrollo de una técnica con bases científicas, que está en un punto intermedio entre las bien consolidadas tecnologías de la ingeniería y la medicina, se superpone inevitablemente con otras disciplinas. En términos de su base científica, gran parte del conocimiento ergonómico deriva de las ciencias humanas: anatomía, fisiología y psicología. Las ciencias físicas también han contribuido, por ejemplo, la solución de problemas de la iluminación, de la temperatura, del ruido o de las vibraciones. Muchos de los pioneros de este campo en EE.UU. trabajaban en el terreno de la psicología experimental o de la ingeniería y por esta razón sus denominaciones ingeniería humana o factores humanos, reflejan una diferencia en el enfoque, aunque no en los contenidos de interés, con los ergónomos europeos. Esto explica también por qué la higiene industrial, debido a su estrecha relación con la medicina, principalmente con la medicina del trabajo, se considera en Estados Unidos como algo distinto de los factores humanos o la ergonomía. Esta diferencia es menos evidente en otras partes del mundo. La ergonomía se centra en el operador humano en acción; la higiene industrial se centra en el riesgo de un determinado ambiente para el operador humano. Así, el interés central de un higienista industrial es el riesgo tóxico, algo que está fuera del ámbito del ergónomo. El higienista industrial se preocupa por los efectos sobre la salud, a corto o a largo plazo; el ergónomo, naturalmente, se preocupa por la salud, pero también por otras consecuencias, como la productividad, el diseño del trabajo o del espacio de trabajo. La seguridad y la higiene son aspectos generales que atañen tanto a la ergonomía como a la higiene industrial, a la salud laboral y a la medicina del trabajo. Por tanto, no es sorprendente que, en las grandes instituciones de investigación, diseño o producción, estos temas aparezcan agrupados [26].

2.1.1 Objetivos de la ergonomía

Es determinar la eficiencia en cualquier actividad realizada con un propósito, de lograr el resultado deseado sin desperdiciar recursos, sin errores y sin daños en la persona involucrada o en los demás. No es eficaz desperdiciar energía o tiempo debido a un mal diseño del trabajo, del espacio de trabajo, del ambiente o de las condiciones de trabajo. Tampoco lo es obtener los resultados deseados a pesar del mal diseño del puesto, en lugar de obtenerlos con el apoyo de un buen diseño. El objetivo de la ergonomía es garantizar que el entorno de trabajo esté en armonía con las actividades que realiza el trabajador. Este objetivo es válido en sí mismo, pero su consecución no es fácil por una serie de razones. El operador humano es flexible y adaptable y aprende continuamente, pero las diferencias individuales pueden ser muy grandes. Algunas diferencias, tales como las de constitución física y fuerza, son evidentes, pero hay otras, como las diferencias culturales, de estilo o de habilidades que son más difíciles de identificar [26].

2.2 Antropometría

La antropometría es ciencia que trata de la medición del cuerpo [1]. Se puede definir, como la técnica antropológica que mide el cuerpo humano. Desde siglo I, ya existía el interés por las proporciones del cuerpo y por sus implicaciones metrológicas [27]. La idea de que el tamaño físico de una persona se encuentra de algún modo relacionado con su habilidad para funcionar en el mundo es tan antigua que es sorprendente como con frecuencia el concepto se ha descuidado actualmente en el pensamiento popular. La antropometría aplicada al diseño es el uso de métodos de medición física científica a los sujetos humanos para el desarrollo de estándares de la ingeniería y del diseño y con el propósito de asegurar la comodidad, eficiencia y seguridad de estos productos y espacios habitables y de trabajo para la población usuario [23].

2.2.1 Importancia de antropometría

La función primordial de la antropometría es ofrecer datos, la materia prima, a diferentes profesionales para que logren cometidos particulares cada uno en su campo. Los métodos antropométricos se encuentran entre las herramientas básicas de los profesionales en ergonomía, ingeniería y diseño, las cuales sirven para el análisis y desarrollo de requerimientos para el diseño ergonómico, de ahí se deriva su importancia en el ámbito industrial, en la generación de bienes y servicios. Sus consideraciones incluyen un amplio rango en tallas, proporciones, esfuerzos y otros factores que definen físicamente a los humanos. Las capacidades sensoriales y de desempeño humanas están relacionadas en parte con tales características físicas, por eso lo relativo a la antropometría tiene influencia en muchos aspectos de los factores humanos relacionados con la fisiología y la psicología del confort y la percepción [23]. La antropometría auxilia a evaluar aspectos como:

1. Determinar posturas y distancias correctas para alcances.
2. Especificar holguras para separar el cuerpo de peligros como los equipos que se encuentran a su alrededor.
3. Identificar objetos o elementos que restrinjan los movimientos.

Cuando se diseñan espacios, ya sean habitables o de trabajo, se considera el mobiliario o la maquinaria que se integrara al espacio, por lo que, también se deben analizar las adecuaciones antropométricas de estos mobiliarios, equipos o maquinarias. Otros estudios de espacios de trabajo han prestado cada vez mayor atención a los efectos adversos causados por el uso continuo de pantallas de computadora, tales como cansancio visual, dolor de espalda, dolor de cuello, fatiga de brazos [28].

2.2.2 Variabilidad

La variabilidad de los elementos a considerar juega un papel importante en el análisis de datos antropométricos. A diferencia de objetos inanimados, en los que se puede encontrar cierta uniformidad en sus estructuras, contenidos y comportamientos, el ser humano, así

como otras especies biológicas, se distingue por su variabilidad morfológica. Si tomamos, por ejemplo, una muestra de individuos del mismo sexo, misma edad, misma raza y misma condición socioeconómica y observamos sus características físicas, nos encontraremos con una variedad de formas, tamaños, proporciones, colores de piel, tipos de cabello, tan amplia como amplia puede ser la propia muestra. Estas variaciones son producto de la evolución biológica y sociocultural del hombre, y tienen funciones muy particulares en esos mismos niveles de organización, que garantizan la continuidad de nuestra especie. Las personas de todo el mundo difieren en tamaño y forma. Se ha sugerido que las variaciones en estatura han sido hasta cerca de 40 centímetros entre la media de estatura de los grupos de adultos más altos y los más bajos del mundo [29].

2.2.3 Análisis estadístico

Debido a que las muestras entre poblaciones en si presentan variabilidad una con respecto a otra, es necesario analizar los datos de manera estadística para conocer el comportamiento y tendencia de las variables a investigar. Calculando los límites de la variabilidad humana debemos ser capaces de poner límites al rango de las funciones físicas y psicológicas de las personas [23]. Sin embargo, es imposible medir a todos, de manera que el rango de variabilidad de un atributo humano usualmente se predice por medio de la medición de una selección aleatoria de personas representativas del grupo para el que intentamos diseñar. La desviación estándar o típica es el indicador del grado de dispersión que más se emplea y la estimación más confiable de la variabilidad de la población. Es un tipo de promedio de todas las desviaciones respecto de la media [30].

2.2.4 Métodos de medición

Aunque actualmente los métodos de medición directos establecidos por Hertzberg, *et al.*, en 1963 siguen vigentes [31], estamos en el inicio de una nueva era en los métodos de medición, al perfeccionarse los métodos indirectos a través del uso de medios digitales y

computarizados. Los métodos de medición antropométricas se clasifican en dos: la medición directa y la indirecta, dependiendo de que el equipo de medición está en contacto con el cuerpo humano. La antropometría tradicional es un método de medición directa. Los procedimientos tradicionales para realizar las mediciones se basan en determinar las alturas, profundidades y anchos de las diferentes partes del cuerpo humano a partir de puntos anatómicos establecidos y determinados inicialmente por los antropólogos, teniendo en cuenta la biomecánica del movimiento humano. Para realizar estas mediciones hay que tener en cuenta una serie de principios teóricos y prácticos, para conformar lo que se denomina técnica antropométrica. La medición indirecta implica el uso de dispositivos no invasivos, tales como los escáneres corporales que permiten recabar información sin estar en contacto directo con el cuerpo [32].

2.2.5 Instrumentos de Medición Antropométricas

A continuación, se citan los instrumentos básicos de medición antropométrica que se utilizan actualmente.

1. Antropómetro. Compuesto de tres segmentos de metal que se articulan fácilmente. Tiene una amplitud de 210 cm y la precisión de un 1 mm, a lo largo del instrumento corre un cursor en el que se inserta una rama recta que sirve para la localización de los puntos antropométricos. Tiene también un triple que ayuda a mantener la verticalidad mientras se toman las medidas y sirve como base cuando no está en uso.
2. Balanzas. Existen diversos sistemas de balanzas. Las más indicadas son aquellas que poseen pesas de corredera, no se deben utilizar las que están construidas a base de resortes o con escalas automáticas. La precisión optima es de 0.1 kg, pero pueden necesitarse balanzas de mayor sensibilidad cuando se realizan mediciones en niños, especialmente en recién nacidos.
3. Cinta métrica. Puede ser metálica, plástica o de fibra de vidrio. Su graduación debe ser en mm y la amplitud superior a los 150 cm.

4. Calibrador Glissier. Consta de una regla metálica de 45 centímetros de largo con una precisión de 1 milímetro. En uno de sus extremos posee un brazo fijo de 20 cm de largo, otro igual corre a lo largo de la escala.
5. Calibrador Mayor. Calibre de gran tamaño, similar al Glissier, pero con una amplitud de medición de 70 centímetros y precisión de 1 milímetro. Sus brazos cubren una extensión de 25 centímetros.
6. Calibre de profundidad. Consta de una regla metálica de 53 centímetros de largo con una precisión de 1 milímetro. Posee un brazo que corre a lo largo de la escala.

2.2.6 Dimensiones antropométricas

Desde los inicios de la antropometría aplicada, los especialistas lograron acuerdos internacionales para establecer un lenguaje común que permitiera comparar y compartir datos y estudios, que en la actualidad son reconocidos y utilizados [18]. De esta manera, se establecieron varios tipos de dimensiones, se utilizan reglas precisas para la definición de cada una de las dimensiones y se recomiendan puntos somato métricos particulares para estandarizar la toma de mediciones, los cuales se basan en el peso, talla e índice de masa corporal. La importancia de la captura apropiada de las dimensiones antropométricas está en relación directa con la salud de la persona, de esta manera se tiene un control apropiado del peso ideal de las personas en base a sus dimensiones e índice de masa corporal. El análisis de las dimensiones antropométricas va más allá del propósito estético, sino del bienestar de las personas. Los escáneres de profundidad 3D revelan en los últimos estudios un nivel de confiabilidad aceptable al momento de determinar las dimensiones antropométricas para propósito medico [33, 34].

2.2.7 Tipos de Dimensiones

Se consideran dos tipos de dimensiones antropométricas que componen un análisis en general. Uno de ellos es llamado Dimensiones estructurales. Estas se toman con el cuerpo

de los sujetos en posiciones fijas, estáticas [35]. Son las dimensiones de las distintas partes o elementos estructurales del cuerpo, por ejemplo: estatura, longitud del brazo, longitud de la mano, perímetro de la cabeza y altura de la rodilla. Dimensiones funcionales. Son dimensiones que incluyen el movimiento y la acción de segmentos corporales en el espacio de trabajo. El segundo tipo de dimensionado es llamado Datos antropométricos newtonianos [36] agrega esta otra clasificación de datos antropométricos, los cuales son usados en el análisis mecánico de cargas en el cuerpo humano. El cuerpo es considerado como un ensamble de segmentos eslabonados de masa y longitud conocidas. También se proporcionan rangos de los ángulos apropiados que deben sostenerse en las articulaciones adyacentes para habilitar la definición de los rangos apropiados de posturas de trabajo. Estos datos no son muy frecuentes en los reportes antropométricos. A continuación, las definiciones descriptivas de las dimensiones antropométricas [23].

1. Peso. Es la masa total del sujeto, pesada con báscula clínica en kilogramos y con una precisión de 100 gramos.
2. Estatura total. Distancia vertical máxima del vertex al suelo, estando el sujeto de pie con la cabeza orientada al plano de Frankfort.
3. Altura de ojos. Distancia comprendida del exocantion al suelo, estando el sujeto de pie con la cabeza orientada conforme al plano de Frankfort.
4. Altura al oído. Distancia comprendida del tragion al suelo, estando el sujeto de pie con la cabeza orientada conforme al plano de Frankfort.
5. Altura a la vertiente humeral. Longitud comprendida entre el punto medio de la vertiente humeral y el piso, estando el sujeto de pie.
6. Altura al hombro. Distancia comprendida entre el punto más alto y externo de la curvatura del hombro y el piso, estando el sujeto de pie.
7. Altura al codo. Distancia que va de la comisura articular humero-radial al piso, estando el sujeto de pie.
8. Altura al codo flexionado. Distancia comprendida entre la cara inferior del olecranon y el piso con el antebrazo flexionado a 90 grados, estando el sujeto de pie.
9. Altura de la muñeca. Distancia desde el suelo al punto estilo-radial estando el sujeto de pie.

10. Altura del nudillo. Sujeto parado en posición normal, su brazo caído libremente con el puño cerrado, midiendo con el antropómetro la distancia del suelo al punto más bajo del puño.
11. Altura del dedo medio. Es la distancia desde el punto más inferior del dactilio III al piso, estando el sujeto de pie con los dedos extendidos.
12. Altura de la rodilla. Es la distancia entre la parte central de la rótula y el piso, estando el sujeto de pie.
13. Diámetro bideltoideo. Es la distancia máxima entre los dos puntos deltoideos.
14. Anchura máxima del cuerpo. Distancia horizontal entre los dos puntos más sobresalientes del cuerpo, en cualquier lugar que estos se encuentren
15. Diámetro transversal del tórax (anchura posterior del tórax). Comprende la distancia máxima horizontal, entre los dos pliegues externos y superiores de las axilas, por la parte de la espalda, sin que el sujeto mueva los brazos.
16. Diámetro bitrocantérico. Distancia horizontal máxima entre los puntos laterales y superior de los trocánteres mayores del fémur.
17. Profundidad máxima del cuerpo. Es la mayor distancia horizontal anteroposterior, entre los puntos más sobresalientes del cuerpo, dondequiera que se localicen.
18. Alcance brazo frontal. El sujeto de pie, con la parte posterior del cuerpo completamente recargada en la pared y el brazo derecho levantado en forma horizontal dirigido al frente, es la distancia comprendida desde la pared hasta el nudillo medio de la mano.
19. Alcance brazo lateral. Es la distancia entre el punto supra esternal y el nudillo del dedo medio, con el brazo completamente extendido lateralmente.
20. Alcance máximo vertical. Es la distancia máxima a la que llega el nudillo del dedo medio con el brazo completamente extendido hacia arriba con el cuerpo pegado a la pared.
21. Profundidad del tórax. La anchura máxima del tórax queda comprendida entre el punto meso esternal y un punto equivalente en la espalda.
22. Altura normal (sentado). Es la longitud máxima del vertex al asiento con el sujeto sentado normal, con la cabeza orientada al plano de Frankfort.

23. Altura hombro (sentado). Distancia comprendida entre el punto más alto y externo de la curvatura del hombro y la superficie del asiento en posición sentado normal.
24. Altura al omóplato (sentado). Es la distancia que va del vértice inferior del omoplato al asiento con el sujeto sentado normal.
25. Altura del codo sentado. Es la distancia comprendida entre la cara inferior del olecranon y el asiento, con el antebrazo flexionado a 90 grados.
26. Altura máxima del muslo. Es la distancia vertical del asiento a la zona donde el muslo adquiere su mayor elevación.
27. Altura de la rodilla sentada. Es la distancia del punto patelar superior de la rodilla al piso.
28. Altura poplítea. Es la distancia comprendida desde el suelo hasta el punto popliteo con el sujeto sentado normal.
29. Anchura de codos. Es la distancia entre las caras exteriores de las articulaciones derecha e izquierda del codo, con el brazo y el antebrazo a 90 grados y el sujeto en posición sedente.
30. Anchura de caderas (sentado). Es la distancia máxima comprendida entre la parte más lateral a nivel de la nalga de un lado hasta el punto contrario con el sujeto en posición sedente.
31. Longitud nalga-rodilla. Es la longitud mayor entre el punto más anterior de la rodilla y el punto más posterior de la nalga (gluteo-patelar medio) con el sujeto en posición sedente.
32. Longitud nalga-poplítea. Es la distancia mayor comprendida de la parte más posterior de la nalga (glúteo) al encuentro del musculo bíceps crural y el hueco poplíteo (punto poplíteo) con el sujeto en posición sedente.
33. Diámetro a-p cabeza (largo de la cabeza). Es la distancia comprendida entre el entrecejo (glabella) y el opistocraneo.
34. Anchura de la cabeza. Es la máxima distancia entre el parietal izquierdo y el derecho (puntos eurios).
35. Anchura del cuello. Es la dimensión mayor en la base del cuello, ubicada donde cambia de dirección su perfil para formar los hombros.

36. Longitud de la cara. Distancia limitada por el entrecejo (glabella) a la parte mas inferior y anterior de la mandibula (gnation).
37. Anchura de la cara. Es la distancia maxima que queda limitada entre el arco cigomatico izquierdo y el derecho.
38. Diámetro interpupilar. Es la distancia comprendida entre la pupila izquierda y la derecha.
39. Longitud de la mano. Es la distancia limitada por el dobléz más cercano a la región del metacarpo de la muñeca, al vértice del dedo medio (dactilion III).
40. Longitud palma de la mano. Es la distancia del dobléz más cercano a la región del metacarpo de la muñeca, a la base del dedo medio, sobre la articulación metacarpo-falángica III.
41. Anchura de la mano. Es la distancia entre el borde externo del metacarpo (punto metacarpo radial) al borde externo (punto meta carpa cubital), incluido el dedo pulgar.
42. Anchura palma de la mano. Es la distancia comprendida entre el borde interno del metacarpo (cóndilo distal radial del segundo metacarpiano) al borde externo del mismo (cóndilo distal cubital del quinto metacarpiano).
43. Diámetro de empuñadura. Es la distancia máxima comprendida entre dos puntos cerrando un círculo con los dedos índice y pulgar de la mano derecha, se toma con el cono de empuñadura.
44. Longitud total del pie. Es la distancia desde el punto más anterior del mayor de los dedos del pie, acropodio, a la parte más posterior del talón, ternio (ternio-acropodio).
45. Altura del tobillo (maleolar). Es la distancia del vértice inferior del maléolo interno al piso.
46. Anchura del pie. Es la distancia comprendida entre el borde interior del pie y el borde exterior a la altura del tarso.
47. Anchura del talón. Es el grosor máximo de la cara interna del talón a la externa.
48. Perímetro de la cabeza. Es la circunferencia máxima tomando como Referencia las protuberancias frontales y la parte más posterior de la cabeza, occipucio (del frontal al opistocraneo).

49. Perímetro del brazo (braquial). Circunferencia a nivel del punto meso braquial, con el brazo colgando a lo largo del cuerpo, pero ligeramente separado y relajado.
50. Perímetro de la pantorrilla. Es la circunferencia máxima sobre la parte más gruesa de la pierna. Se realizan dos o tres lazadas para encontrar la más grande.

Capítulo 3

Marco de Referencia

El sistema propuesto es desarrollado en torno al análisis antropométrico y se presentan los aspectos técnicos para el funcionamiento apropiado de este, tales como métodos de escaneo, sensores y métodos de reconstrucción. Las metodologías y tecnologías implicadas en el desarrollo del sistema analizadas son el fundamento para el desarrollo tanto del programa que controla los sensores, generar el modelo en 3D y el cálculo de las dimensiones antropométricas a partir del modelo generado. La idea es que el desarrollo se mantenga lo más sencillo y simple posible, pero al mismo tiempo eficaz y eficiente, sin perder de vista los objetivos principales del mismo. Los temas revisados se presentan de manera cronológica, desde los fundamentos de los sistemas de escaneo y un análisis genérico de los sensores de profundidad utilizados por este. Mas a detalle se hace una revisión del sensor Kinect, en su segunda versión para pc. Este será utilizado como cámara 3D para el sistema de propuesto. En seguida se hace referencia a principios técnicos sobre el procesamiento de los datos durante el proceso de escaneo, tales como conceptos generales de conjuntos de puntos 3D, métodos de transformación matricial sistemática (SAC-IA).

3.1 Sistemas de escaneo y sensores

Se puede definir que los sistemas de escaneo están conformados por sensores de profundidad que detectan la superficie de cualquier objeto y que por medio de un programa de computo, se genera un modelo tridimensional. En el área de diseño de modas textiles, esta tecnología ha sido utilizado para simulación de cabinas para mostrador de venta de ropa. La compañía Textile and Clothing Technology Corporation, desarrollo un sistema prototipo de escaneo tridimensional de cuerpo entero y extracción de mediciones corporales. En 1998 se comenzó a comercializar para las industrias textiles, que originalmente fue concebido bajo ese propósito para posteriormente comercializado en 2008 para otras aplicaciones, entre ellas estudios antropométricos. Uno de los sistemas inicialmente desarrollados utiliza un arreglo de 16 sensores alrededor del cuerpo, para generar un modelo completo que permitiría el cálculo de las dimensiones deseadas. Enseguida desarrollo un sistema portátil con base giratoria con un solo sensor para el área de salud y moda [4, 37]. Se desarrolló un programa de permitía identificar el contorno de una persona mediante la tecnología de escaneo. CEASAR (Civilian American European Anthropometry Resource) es otro proyecto que se ha beneficiado del uso de este tipo de tecnología, es una encuesta antropométrica realizada a la población estadounidense y europea [38]. En este proyecto se utilizó un sistema de escaneo BMS (Body Measurement System) de la compañía TC², que es un escáner tipo cabina con 16 sensores Kinect de primera generación que permiten el escaneo completo del cuerpo humano [39]. La Fuerza Aérea de Estados Unidos utilizo el denominado *CyberWareTM* para realizar mediciones corporales en sitios de investigación militar [40]. Las conferencias internacionales: 3D Body Scanning Technologies, realizadas en Suecia por *Hometrica Consulting*, presentan los artículos e investigaciones más relevantes con respecto a la medición del cuerpo, digitalización superficial y escaneo tridimensional [41]. Las aplicaciones relacionadas al campo de escaneo tridimensional son:

1. Médica y ciencias forenses
2. Textil y modas
3. Belleza y Cosméticos
4. Ergonomía y Antropometría

5. Deportes y Biomecánica
6. Biometría y seguridad
7. Gráficos por Computadora y animación
8. Arte y Escultura
9. Comunicaciones

La Fotogrametría es el estudio de mediciones de objetos por medio de fotografías. La Captura de movimiento, la cual es una variante de fotogrametría, la estudia los movimientos realizados por los objetos. Existen productos que deben su desarrollo gracias a los principios de Fotogrametría y Captura de movimiento. Una fusión de estas dos áreas del conocimiento da como resultado “Bertillonage”, por Antonio Bertillone, la cual es el estudio de las mediciones del cuerpo humano y el análisis de los movimientos hechos por el cuerpo, en 1883 se introdujo el método que es la grabación de datos antropométricos. En 1893 se agregan el sistema de grabación de 11 medidas, la cual consistía en una serie de medidas en distintas poses del cuerpo humano. En 1910 hace su aparición el Medidor de Cabeza, un instrumento de medición especialmente diseñado para estudios antropométricos. Todo esto es a lo que conocemos hoy como Antropometría y Biometría [41]. En 2009, Microsoft desarrolla un dispositivo de escaneo en tercera dimensión llamado Kinect, un dispositivo de muy bajo costo, para su utilización en consola de juegos electrónicos. Equipado con sensores capaces de capturar escenas en tercera dimensión con una complejidad comparable a otros dispositivos de más alto costo. En 2013 se libera su software de desarrollo (SDK, Software Development Kit) para aplicaciones externas a video juegos por lo que sus aplicaciones comenzaron a enfocarse a las áreas científicas y de investigación [42, 43, 44, 45]. En 2014, se realiza un estudio en la cual se analiza la exactitud con la que el dispositivo arroja los valores de la posición del cuerpo en datos matrices vectoriales y validar tal información. El método fue desarrollar una aplicación a partir del kit de desarrollo del dispositivo Kinect. Los valores extraídos eran vectoriales y angulares del esqueleto virtual del sujeto de prueba. Como resultado se probó que el software desarrollado fue capaz de arrojar información con una exactitud aceptable de acuerdo a lo estándares buscados [10, 46]. Como definición genérica, escaneo tridimensional consiste en capturar el modelo tridimensional de un objeto por medio de un dispositivo de captura y transferirlo a un archivo electrónico de computadora, en el cual almacena los datos requeridos para poderlo procesar como una

imagen en pantalla en los distintos cuadrantes vectoriales ortogonales, es decir en un ambiente de tres dimensiones. Dado que se trata de una tecnología nueva relativamente hablando con respecto a las herramientas convencionales de mediciones antropométricas, el método de escaneo tridimensional de cuerpos humanos enteros, aún se encuentra en etapas de investigación y desarrollado.

Existen diversas compañías que desarrollan sistema de escaneo como un producto en los cuales los resultados, equipo, procesamiento y aplicaciones tienen una variación considerable. Los aspectos a considerar al momento de seleccionar cierto sistema son:

1. La Mediciones Requeridas. Si se desea datos antropométricos de cuerpo entero o extremidades, cara.
2. Aplicación. El propósito final por el cual se realiza la medición.
3. Calidad o tipo de resultado.
4. Utilización (manuales, especificaciones técnicas).
5. Ubicación y Entorno.
6. Costos (Escáner, software, ordenadores, soportes).

En antropometría, las generalidades que se tienen que tomar en cuenta al momento de realizar una medición por este método son:

1. Problemas concernientes a los movimientos la persona, respiración, cabello abultado que provocan que una serie de capturas en cierta posición tuviera variación una con respecto a otra.
2. Aspectos físicos de la persona: Estatura, tamaño (grosor), peso.
3. Confort relativo al proceso de escaneo: postura a escanear, tiempo de escaneo, entorno.
4. Cuestiones de Seguridad relativos al método de escaneo: método que no lesione de alguna manera al sujeto al momento de realizar el escaneado, seguro para los ojos de la persona.
5. Problemas Psicológicos: Efectos secundarios debido a la alteración en un ambiente virtual, el provocado por desnudes relativa del sujeto debido al tipo de estudio realizado (Medico).

Las tecnologías aplicadas actualmente a los métodos de escaneo corporal. Entre los más relevantes se encuentran [41]:

1. Escaneo por Laser (IR). Este método consiste en proyectar en el cuerpo humano una línea de láser. Un sensor de luz se encarga de calcular la triangulación de la distancia proyectada por la línea laser menos la distancia a la que colisiona con algún cuerpo y regresa
2. Escaneo por grosor de patrón de luz blanca. En este método se proyecta un patrón de líneas blancas sobre un objeto, una cámara RGB se encarga de capturar la imagen y se procesa la triangulación entre la distancia de las líneas proyectadas y el sensor.
3. Fotogrametría / Silueta: múltiples cámaras capturan un objeto, el proceso arroja una nube de puntos en el contorno de la figura. Por medio de procesamiento fotográfico se obtienen distintas referencias del objeto que al momento de interpolarlas en forma secuencial arrojan una figura en 3d de puntos.
4. Radar de Ondas milimétricas: Múltiples ondas de radio frecuencia son generadas alrededor del objeto, en las cuales se analizan las colisiones de está dando como lugar una imagen tridimensional delimitada por el contorno del objeto y el entorno en el que se realiza (Cabina).

Con respecto a los datos obtenidos en estos análisis, por lo regular siempre se obtienen dos tipos [41]:

1. Generación de un Avatar en tiempo real, utilizados en entornos de Simulación virtual.
2. Generación de un modelo en malla tridimensional del tamaño real del objeto. Estos representan los modelos que permiten la extracción de cualquier tipo de medición antropométrica.

Tabla 3.2: Comparación entre sistemas actuales de escaneo comerciales.

| | TC2-19R | FIT-3D | CARTESIA | TC2-19B | VITUS SMART LC |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------------|
| Tipo sensor | Infrarrojo | Luz Laser | Luz Laser | Infrarrojo | Luz Laser |
| Topología | Base Giratoria | Base Giratoria | Fijo | Fijo | Fijo |
| sensores | 1 | 1 | 3 | 16 | 3 |
| Duración (seg) | 35 | 40 | 2 | 3 | 12 |
| Portable | Si | Si | Si | No | No |
| Precio (dls) | 8,000 | 10,000 | 20,000 | 10,000 | 37,000 |

3.2 Sensor Kinect

Los sistemas antes mencionados, ya sean fijos o rotatorios, utilizan sensores 3D que son los que detectan la profundidad de los objetos que son escaneados sobre determinando plano, esto permite la generación de la nube de puntos del modelo. Uno de los sensores 3D más comunes para la investigación científica es el sensor Kinect (**Figura 3.2**), esto debido a sus dos grandes cualidades: **Bajo costo y fácil disponibilidad**. El precio comercial del sensor es relativamente muy bajo, y ronda alrededor de \$150 dólares estadounidenses y se encuentra disponible casi en la mayoría de los establecimientos comerciales de electrónica. La tecnología que se utiliza para detección de profundidad, por lo regular se basa en la proyección y detección de colisión de luz cuando esta colisiona sobre alguna superficie. La proyección de luz generada por el sensor por lo regular se basa en proyección de luz blanca, rayos laser, rayos infrarrojos, estereofotogrametría, entre los más comunes [39]. Artículos científicos exploran las capacidades del sensor Kinect como una herramienta fiable, de fácil uso y bajo costo para el desarrollo de aplicaciones o estudios en los que se desean obtener posturas o movimiento natural del cuerpo humano [47].

3.2.1 Tiempo de Vuelo

Fankhauser, et al. analiza las capacidades técnicas del sensor como un dispositivo de navegación robótica, establece una comparativa contra la versión anterior y concluye que la tecnología de ToF (Time of Fly), algoritmo de percepción de profundidad, es ideal para aplicaciones que requieran datos con mínimo error a un relativo bajo costo. El principio de la metodología “*ToF*” consiste en la emisión de pulsos de luz, en la que se mide la diferencia entre el tiempo de emisión t_e y el tiempo recibido t_r , donde la distancia d se calcula:

$$d = \frac{(t_r - t_e) * c}{2} \quad 3.1$$

Donde c , se define como la velocidad de la luz [48]. Este cálculo permite generar un modelo tridimensional basado en la profundidad del rayo emitido. Para el desarrollo del sistema propuesto se decide utilizar cuatro sensores Kinect, Versión 2 para Windows. El hecho de que el sensor sea de fácil de obtener, de un relativo bajo costo comparado con otros sistemas de escaneo y que además sea portable, es de principal interés para este estudio, debido el costo-beneficio que estas características presentan. Una restricción con respecto al sensor seleccionado, es que no se tiene soporte por parte del fabricante, el funcionamiento simultaneo de 2 o más sensores, conectados a un solo computador. En términos de capacidad de medición, Kinect es comparado con respecto a otros sistemas de escaneo, tales como los sistemas Vicon, como estándar, en los cuales se obtienen resultados con errores de medición mínimos [49], que se consideran aceptables tomando en cuenta el hecho de que se desean utilizar las mediciones antropométricas para propósitos generales, su uso como herramienta de evaluación médica que afecte directamente la salud o bienestar del ser humano no es recomendable.

3.2.2 Características

Una de las principales funciones que, en el desarrollo de esta investigación, se pretende alcanzar, es el hecho de capturar datos antropométricos por medio de un sistema de cómputo. Por medio de la tecnología de escaneo corporal se planea utilizar un dispositivo con sensor tridimensional que se encargue de dicha tarea y que tenga una capacidad de captura aceptable, es decir, el nivel de detalle proporcionado sea lo suficientemente alto para poder calcular las características geométricas del modelo generado en la captura, para ello, se requiere que las características tecnológicas en las cámaras de profundidad 3D proporcionen suficientes datos, tanto de profundidad, resolución y coloración (**Figura 3.3**). Desarrollado por la compañía Microsoft, Kinect, analizado por muchos desarrolladores de aplicaciones en el ámbito de investigación científica, con diversas aportaciones, dadas sus características de portabilidad, precisión y costo lo hacen completamente asequible para cualquier particular (**Tabla 3.3, Tabla 3.4**). Las características del dispositivo son:

1. **Emisor de Rayos Infrarrojos**. Estos dispositivos cuentan con dos sensores, un emisor y un receptor. Un haz de luz infrarroja es disparado en cierta dirección, cuando este colisiona con un objeto la señal emitida es recibida por el sensor de receptor que detecta la profundidad de este.
2. **Sensor de Colores**: Consiste en una cámara RGB (Red-Green-Blue). Este lente se encarga de guardar los datos en los tres canales a su resolución 1080p nativa. Este hace posible la captura de la imagen a color.
3. **Sensor de profundidad de Rayos infrarrojos**. Este lee los rayos emitidos por el lente de emisión de rayos infrarrojos, los cuales, a su vez, estos son reflejados de regreso a este sensor. Este lente hace posible la captura de la profundidad de la imagen.
4. **Arreglo de Micrófonos**. Permite la captura del sonido, lo que hace posible grabar el audio capturado y saber la posición de la fuente de audio en el entorno.



Figura 3.2: Sensor Kinect2. Sensor 3D se divide en dos cámaras infrarrojas: emisora y receptora. En un espacio de coordenadas cartesianas, el eje Z define la profundidad.

Tabla 3.3: Comparativa de especificaciones para el Sensor Kinect


| Dispositivo | Nombre | Especificaciones |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------|
|  | Kinect (v1) | Cámara RGB @ 1280x960p, 30 fps |
| | | Cámara 3D @ 320x240, 30 fps |
| | | Sistema de rastreo esquelético |
| | | Modo cercano |
|  | Kinect (v2) | Cámara RGB @ 1920x1080p, 30fps |
| | | Cámara 3D @ 512x424, 30 fps |
| | | sistema de rastreo esquelético mejorado |
| | | Rastreo de comportamiento de manos y cara. |
| | | Rastreo de expresiones faciales |

Tabla 3.4: Características del Sensor Kinect.

| Características | Kinect V1 | Kinect V2 |
|--------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| Método para calcular la profundidad de los objetos en escena | Luz Blanca | ToF |
| Resolución | 480p, 960p | 1080p |
| Numero de esqueletos rastreados | 2 | 6 |
| Uniones | 20 | 25 |
| Orientación de los huesos | no | si |
| Detección fuerza ejercida por las articulaciones del cuerpo | no | si |
| Simulación de masa muscular | no | si |
| Reconocimiento de expresiones faciales | no | si |
| Rastreo de rostro | no | si |
| Medición del ritmo cardiaco | no | si |

3.2.3 Kinect como dispositivo para medición

El potencial de uso de dicho dispositivo, ya sea en la industria médica, química o donde se requiera tener por lo regular un ambiente estéril esta validado por diversos estudios [9], en conjunción con otros paquetes de computo (SDK), Kinect se encarga de hacer una lectura del cuerpo en determinada postura. El costo del tiempo involucrado en comparación con realizar dichas operaciones de manera manual con el recurso humano o bajo otros dispositivos sería sumamente alto. Dicha tecnología permite la rápida identificación de los factores relacionados con las fallas humanas y determinar alguna alternativa como solución. La aplicación de una herramienta en tiempo real tiene el potencial de reducir considerablemente el riesgo de desórdenes muscular y esquelético en las instalaciones industriales. La principal contribución de la implementación de dispositivos virtuales en la industria es de permitir capturar datos que eviten lesiones en tiempo real, es algo, que hasta hace poco, nunca había sido sugerido en el pasado [13].

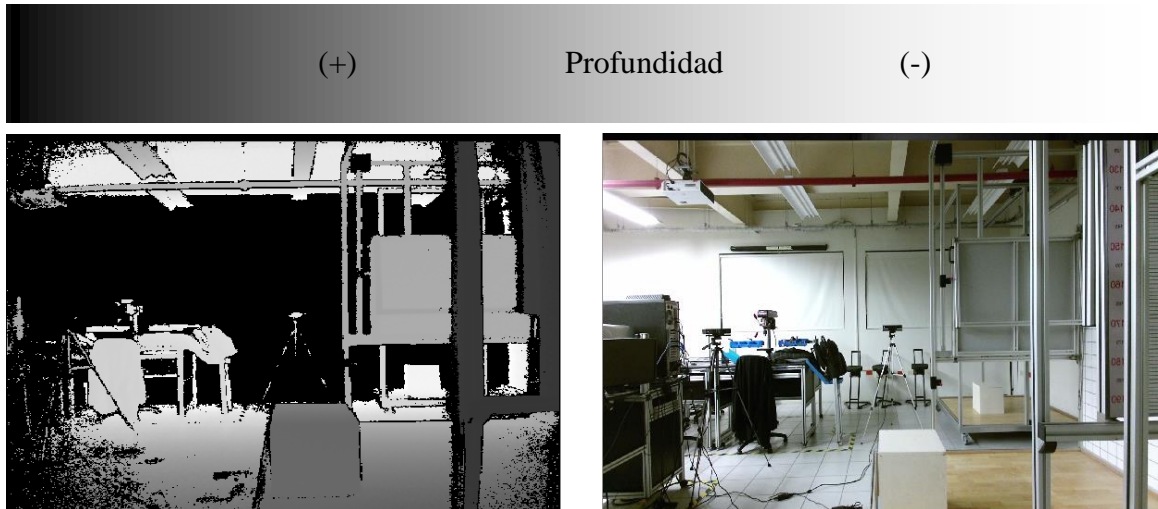


Figura 3.3: Imágenes generadas por el dispositivo Kinect v2. En la gradiente, áreas con regiones más cercanas al sensor se muestran en color Blanco y las de mayor profundidad en color Negro.

En un sistema de validación, también se puede hacer uso de este dispositivo, en un estudio de robótica se elaboró un modelo o maqueta en la cual se intenta validar el resultado de un ensamble de cierto proceso mediante la comparación de un modelo CAD contra una imagen virtual en 3D del modelo en tiempo real, el cual para poder procesar la imagen a comparar, se monta en 2 brazos robóticos los dispositivos Kinect lo cuales se alineaban con respecto a la normal de las caras frontales, laterales y superior [50]. El propósito final era aumentar la eficiencia del proceso en la parte de resolución de problemas. Al final se transfirió el concepto desarrollado en una aplicación industrial. I-Hsum Li y Wei-Yen Wang en su artículo denominado “*Autonomous Ramp Detection and Climbing Systems for Tracked Robot Using Kinect Sensor*” utilizan Kinect como dispositivo de navegación automatizado aplicado en robótica [51]. La función del sensor era la de proveer información al sistema de navegación del robot para determinar datos como Angulo de inclinación, alineación entre otros, para de esta manera tal robot, se pudiera trasladar. Al final, gracias a esto, se desarrolló un controlador auxiliar de navegación para sistemas automatizados en aplicaciones industriales. Con respecto a mediciones, Kinect como un dispositivo de medición en 3D, basado en la reconstrucción de modelos en tercera dimensión, debido a su alta resolución de captura y bajos costos se hace un comparativo con diversos métodos de reconstrucción, se

logra una mejor interpretación de imagen mediante el cálculo de coordenadas de nube de puntos, resultando esto en un proceso eficiente y efectivo [52]. En relación a otras aplicaciones, como las médicas, Kinect ha sido utilizado como una solución de bajo costo de valoración de los síntomas de los movimientos en personas con Deficiencia de Parkinson (PD). Mediante la valoración de la precisión con la que el dispositivo media los movimientos relevantes a esta condición y la captura de los movimientos hechos por un grupo de personas bajo la condición PD en diferentes poses, todos los datos fueron capturados también con otros dispositivos, los cuales fueron analizados y comparados entre sí, con respecto a las mediciones reales hechas en las personas. Los resultados fueron que Kinect puede efectivamente medir de manera precisa en tiempo y forma los movimientos relevantes a PD y ser utilizado como una herramienta de valoración general [10]. En 2014, González-Ortega, *et al.*, presenta el dispositivo Kinect como un sistema de captura en 3D de valoración cognoscitiva y de rehabilitación para personas con problemas para coordinar, lo cual resultaba en una confusión del esquema corporal del lado izquierdo contra el derecho. El método era utilizar el sistema de rastreo esquelético de Kinect para capturar los movimientos y/o ejercicios para prueba en los sujetos con dicha discapacidad, en los cuales tenían que diferenciar un movimiento de otro. La principal función de Kinect era de monitorear de manera automatizada tales movimientos, posteriormente tales datos analizados en relación a los ejercicios psicomotrices del sujeto. Otra de las principales funciones, es la de capturar información relevante a la posición y movimiento del cuerpo humano, para permitir, de esta manera, una natural interacción en modo estereoscópico en ambientes de realidad virtual aumentada, en los que los objetos reales y virtuales coexisten. La importancia de la apropiada calibración es donde se encuentra el estado del arte para obtener datos completamente confiables y precisos [54]. La conclusión, de acuerdo a las muestras que se obtuvieron se obtuvo un 96.28% de monitoreo exitoso utilizando el dispositivo Kinect, con respecto a otros sistemas propuestos.

3.2.4 Áreas de aplicación

Aunque no se recomienda su utilización en el área médica, debido a que no se trata de un dispositivo meramente diseñado para este propósito, el alcance de su investigación está también relacionado con áreas de investigación de salud y bienestar, en 2017 se empleó la tecnología de escaneo corporal para desarrollar una aplicación que determinara y evaluara la obesidad abdominal de manera práctica, utilizo una comparativa de 200 personas con la prueba *t-Student* pareada para determinar las diferencias entre el sistema propuesto y las mediciones a mano, dados los resultados concluyo que el sistema de escaneo propuesto proveía de mejor información que las mediciones manuales [55]. Diversos estudios se han realizado y comparado Kinect contra otros sistemas, obteniéndose resultados favorables con respecto a precisión del sensor, como dispositivo de medición confiable. Gran parte de la investigación científica se centra en la detección del cuerpo humano, así como el rastreo tridimensional de sus posturas, utilizando un esqueleto virtual generado con la información aportada por el sensor. [45, 47, 11, 56, 10, 46, 5]. Koen Buys, desarrollo un sistema que permite la detección del cuerpo humano y la estimación de la postura, utilizando la cámara RGB del sensor Kinect [57]. El experimento se realizó para modelos humanos con cámara en movimiento en áreas internas cerradas. Lin Yang evaluó la precisión del dispositivo mediante el escaneo de superficies planas, perpendiculares con respecto al Kinect V2, con la finalidad de obtener la precisión del sensor de profundidad 3D, en objetos estáticos y planos. Los datos fueron comparados contra un dispositivo de medición laser digital portátil AGPtek. Los datos muestreados presentan una desviación estándar de 1.2 mm con respecto al dispositivo de medición laser [58]. Nguyen-Luc Dao, en 2014, desarrolla un sistema de escaneo y medición basado en un solo sensor, en el cual utilizo una metodología basada en la captura manual de las vistas deseadas (frontal, lateral) dado que el estudio se basa en la utilización de un solo sensor Kinect V1, en que obtuvo mediciones con una desviación de 3.5 centímetros en tiempos de ejecución de ~20 segundos [59]. Los datos del sensor Kinect es utilizado, además, para el reconocimiento de lenguaje a mano, en los cuales los datos analizan los gestos hechos por estos. En las pruebas hechas con el sistema propuesto y el dispositivo Kinect demuestran que se alcanzan a capturar datos con alta definición, todo esto en tiempo real [60]. Se hace referencia a Kinect como una herramienta de captura, de rápido desarrollo, asequible, y como un dispositivo de graficado de posturas portable, que el cual provee información objetiva y cuantificable acerca de centro de masa total del cuerpo

humano, la cual es utilizada como una herramienta de evaluación y medición biomecánica. El propósito del documento es evaluar Kinect como una herramienta de valoración clínica con respecto a dicha medición. Tal medición es comparada contra otros dispositivos especializados de muy alto costo, Vicom Motion Capture [61]. Una opción como herramienta de muy bajo costo con un desempeño aceptable de acuerdo a los estándares establecidos, con respecto a las mediciones del centro de masa total del cuerpo. Además, Kinect es comparado con otros dispositivos como una herramienta poderosa de análisis biomecánico para la evaluación de disfunciones motrices. Los dispositivos de captura en 3D, que son comercialmente utilizados, y especializados para este tipo de tareas, son muy costosos y en la mayoría de las veces incosteable en instalaciones clínicas. El propósito del estudio es realizar una evaluación de la validación de los datos arrojados por Kinect, como sujeto de prueba de bajo costo, contra ViCon Nexus. Como resultado Kinect presenta ciertas variaciones mínimas, con lo que unos ajustes podrían desempeñarse para propósitos clínicos [49]. Kinect, se propone un sistema de reconocimiento de bases de carga en el área de automatización, mediante la captura los datos en 3D e infrarrojo, estos son aplicados a un vehículo de guía automática, la cual gracias a una interface desarrollada para interpretar los datos del Kinect hacia posible que el vehículo trasladara tales bases de un punto a otro en diferentes circunstancias. La tasa de reconocimiento fue del 98% [62]. Ibarra y Malo en 2013, proponen un sistema de rehabilitación para pacientes con trauma cerebrales con deficiencia motriz para las extremidades superiores del cuerpo, desarrollado como un entorno interactivo virtual en tercera dimensión. La tarea de Kinect consiste en capturar los movimientos del paciente en rutinas de ejercicios de recuperación y representar tales movimientos en un avatar, en la cual, tales datos al mismo tiempo son almacenados y monitoreados en el sistema para tener una secuencia del progreso de los pacientes. Kondiri y Yousefi en 2014, desarrollan un método directo y en tiempo real de como estimar la posición de la cabeza del cuerpo humano usando el dispositivo Kinect. Basándose en una serie de imágenes capturadas por Kinect se desarrolló una ecuación la cual aplicada a un paquete de cómputo nos permite tal cálculo, el propósito es tener la orientación de la cabeza para propósitos de estudios de aplicaciones ergonómicos e interactivos. El experimento reafirma la confiabilidad del sensor para aplicaciones médicas, aunque no se recomiende su uso directo en ello [64]. Szu-Hao y Ying-cheng en 2014, mencionan la rotación de personal en trabajos u operaciones de líneas

de manufactura que se requieren ser ergonómicos. Se propone un sistema de medición antropométrico basado en una cámara 3d, que en este caso se utiliza Kinect, que en conjunto al sistema se miden y analizan las posturas que son riesgo de lesiones musculares y se determina una rotación apropiada para esta persona dependiendo de las posturas que se estuvo ejerciendo durante el proceso anterior, todo esto con la idea de minimizar el riesgo de lesión muscular. Como resultado del experimento se logró aterrizar el proyecto en un caso práctico y la propuesta arrojó cambios drásticos y efectivos a en cuanto reducir lesiones en el trabajo en diferentes niveles de estrés.

3.2.5 Kinect y Antropometría

Existen diversos análisis sobre la efectividad del sensor Kinect en implementaciones como herramienta de cálculo de datos en el área de antropometría. Los sensores 3D y cámara RGB, tienen la capacidad de determinar de manera efectiva las mediciones para poder ser utilizado como una herramienta de captura de medición, valoración y análisis en entornos de áreas de trabajo con diseño ergonómico que puede utilizarse como una herramienta bajo ciertas circunstancias [45]. Ju Yong Chang y Seung Woo Nam describen al dispositivo Kinect como una herramienta de captura eficaz y poderosa. Proponen dos métodos de prueba para la captura de mediciones y posiciones antropométricas basada en algoritmos en equipos de cómputo con capacidad relativamente bajos, todo esto con el fin de aumentar la efectividad del dispositivo sin afectar los datos a causa de errores causados por el sistema, en tiempo real. En ambos casos los resultados fueron exitosos, en lo cual se queda claro que el sistema puede ser usado en cualquier dispositivo de cómputo con requerimientos mínimos [66]. En 2014, se examina Kinect como un detector de movimiento esquelético como un método de observación en el análisis ergonómico para las posturas de carga. Con la ayuda de una interface se capturan los datos de Kinect y estos son procesados y analizados. Los resultados son comparados contra las mediciones hechas por personas, en la cual concluyen que la posición del lente con respecto al sujeto influye en la posición relativa capturada por el dispositivo. Sin embargo, la aplicación de este tipo de dispositivos para propósitos de prototipos rápido y observaciones con un mínimo margen de error relativo lo clasifica como

una herramienta poderosa y confiable [16]. Ross A. Clark y Yong-Hao Pua validan el dispositivo Kinect como una herramienta de captura de la posición y movimiento del cuerpo humano en tiempo real para propósito de observaciones clínicas en pacientes con problemas psicomotrices [67]. Las características del dispositivo, portable, efectivo y económico se comparan los datos muestreados en veinte personas en diferentes posturas y se comparan contra un sistema de análisis de movimiento cámaras múltiple en 3D específicamente diseñado para estos propósitos. Los intervalos de confianza del error en la medición de ambos dispositivos muestran una diferencia mínima. Sin embargo, se acota el dispositivo dadas sus capacidades limitadas en hardware como una herramienta de análisis y observaciones en términos clínicos. Kinect como un dispositivo para evaluar riesgos potenciales de lesiones musculares o desordenes musculares y esqueléticas en las estaciones de trabajo, utilizando el método RULA para valorar los resultados, generó un sistema de valuación virtual en tiempo real, probar automáticamente más de 500,000 configuraciones distintas de los movimientos y posiciones, lo que representa algo prácticamente imposible realizarlo bajos los esquemas y herramientas análogos y manuales [68]. Por otra parte, la limitante del hardware con respecto a algunas posiciones realizadas y los errores de tales mediciones varían con respecto a estas, lo que una actualización en la definición del hardware o un arreglo de sensores pudiera solucionar este problema. Sin embargo, para propósitos de un análisis ergonómico como el evaluado por el método RULA, este estudio deja claro que Kinect cumple con las especificaciones necesarias. En 2015, se determina si el Kinect puede ser usado como un fácil, bajo costo y rápida herramienta de estimación de medidas morfológicas. Se comparan los datos del sistema Kinect con respecto a otro sistema estereográfico de alta resolución específicamente diseñado para este tipo de análisis. De acuerdo a los resultados, se encontraron diferencias entre los dispositivos, en los cuales Kinect presentaba una mayor variación, sin embargo, se utilizaron ecuaciones de regresión para corregir estos datos [69]. En posteriores pruebas los resultados fueron reproducibles y precisos en el sistema Kinect. Como conclusión, Kinect representa una solución aceptable como una herramienta rápida de valoración y análisis de medidas morfológicas.

3.3 Análisis tridimensional

El análisis de modelos tridimensionales del cuerpo humano obtenidos a partir de diversos sistemas de escaneo, ha sido estudiado ampliamente en distintas áreas de la investigación científica, que van desde la medicina, hasta la moda y entretenimiento [70, 71]. Los dispositivos utilizados por tales sistemas, comúnmente están conformados por cámaras laser o sensores de profundidad, que utilizan la proyección de luz infrarrojo o luz blanca [72]. Actualmente existen diversos sistemas de escaneo tridimensional, cada uno con características distintas, tales como: VITUS Smart LC 3D Body Scanner [73, 74], TC2-19R PBS (Portable Body Scan) de TC² Labs y Cartesia de SpaceVision (**Figura 3.4**). El costo se presenta como una restricción al momento de comparar cada modelo (**Tabla 3.2**), debido a las capacidades y finalidades de cada uno [39]. Aunque existen numerosos sistemas de escaneo, todos utilizan un mismo proceso que conlleva a la obtención de los datos, el cual es el de generar un modelo tridimensional del cuerpo humano, del que más adelante se le extraen las mediciones. Los datos están conformados por nubes de puntos, donde cada punto representa un vértice o nodo, en un espacio tridimensional, el cual representa la región escaneada [75]. El proceso en general para la obtención de un modelo tridimensional se describe a continuación:

1. Escaneo. El modelo es “escaneado” mediante un lente de profundidad, comúnmente llamado sensor 3D. En este proceso, se genera la nube de puntos (ruido) que conforma el modelo.
2. Procesado o filtrado de datos. En este se eliminan puntos o regiones de datos que se consideran innecesarios para la etapa de registro tridimensional.
3. Registro tridimensional. Consiste en la concatenación de las nubes de puntos generados por cada sensor colocado en distinto ángulo del modelo, conformando el modelo completo tridimensional. El método utilizado en este paso depende del tipo de topología que se utiliza en el escaneo.
4. Segmentación del modelo. En este, el modelo tridimensional resultante es segmentado o separado en distintas partes que delimitan las áreas del cuerpo

humano que se deseen medir. Este proceso es opcional en algunos casos, dependiendo del software utilizado.

Durante el proceso de escaneo, es necesario obtener un modelo completo de la persona, para esto se requiere que el sistema cuente con cierta topología que le permita el escaneo o lectura del cuerpo humano sin ninguna obstrucción, es decir, que se pueda visualizar en todos los ángulos el modelo, siendo estos la vista frontal, lateral y trasera. El tipo de topología comúnmente, van en función a la cantidad de sensores con los que se desee trabajar. Existen dos tipos de topologías utilizadas para la obtención del modelo completo tridimensional: Fija y Rotatoria. Los sistemas con topología fija, contienen 2 o más sensores que permitan la captura total del cuerpo humano. Por lo regular estos están posicionados de manera fija en arnés o estructura, en ángulos de 360 grados alrededor del modelo, es decir, durante el proceso de escaneo, los sensores no se mueven, dado que se abarca el modelo completo. Para el caso de los sistemas Vitus LC, TC2-19B y Cartesia, estos utilizan topología fija. Para los modelos Fit3D y TC2-19R, estos cuentan con una base giratoria y un solo sensor 3D. en estos sistemas, dado que solamente se cuenta con un sensor, el cuerpo necesita girar alrededor de su eje para que se realice un escaneo completo. Todos los sistemas tienen una precisión de escaneo de alrededor 3 milímetros de desviación [39].

3.3.1 Librería de Nubes de Puntos

Se describe como una estructura de trabajo que contiene herramientas que permiten el manejo, procesado, análisis y visualización de puntos contenidos en un conjunto o nube, en un espacio 2D o 3D, también llamado PCL, por sus siglas en inglés: Point Cloud Library. Esta desarrollado en el estado del arte de numerosos algoritmos que permiten realizar tareas como: Filtrado, estimación de características geométricas, reconstrucción de superficie, ajuste del modelo y segmentado. Estos pueden ser utilizados para filtrar “*outliers*” contenidos en una base de datos con ruido, unir o separar conjuntos de puntos, segmentar partes relevantes del conjunto, extracción de puntos de interés en base a una característica geométrica, y extracción de puntos relevantes que permiten la identificación del objeto escaneado en el espacio, creación de formas tridimensionales y visualización.

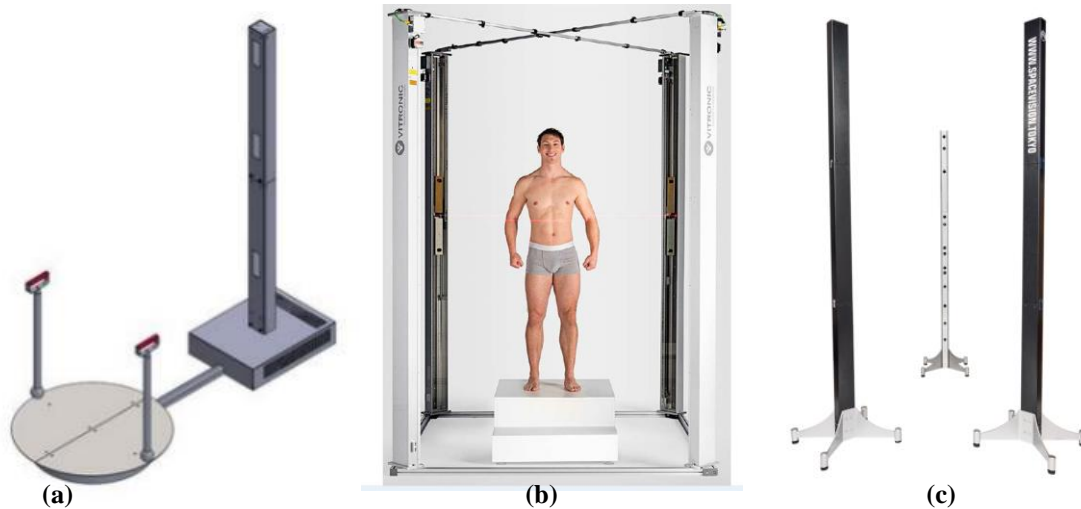


Figura 3.4: Sistemas de Escaneo comerciales. TC2-19R PBS (a), Vitronic Smart LC Body Scanner (b), 3D Body Scanner Cartesia (c).

Su utilización es gratuita para comercialización e investigación [75]. En el presente documento se utiliza esta librería para el procesado de nubes de puntos y la extracción del modelo tridimensional.

3.3.2 Nubes de Puntos

Lo datos generados en un proceso de escaneo, es la obtención de nubes de puntos. Una nube de puntos es una estructura de datos que representa una colección de puntos multidimensionales, que es comúnmente representada en un espacio tridimensional ortogonal. Un punto indica una coordenada geométrica en un espacio 2D o 3D. un punto puede contener además otra información aparte de la coordenada geométrica, tal como color, normalidad y curvatura, esto se puede definir como la característica geométrica de cada punto. Usualmente, estos datos son generados por dispositivos como sensores 3D, tales como cámaras estéreo, escáneres 3D, o cámaras “ToF” (Kinect V2), en tiempo real desde un computador que sintetiza la información desde el sensor por medio de una interface o programa de computo. Una nube de puntos o conjunto de puntos, representa el área escaneada de un solo ángulo de un cuerpo, por ello, para la generación de un modelo completo, se es

necesario generar diversos conjuntos P_N , por lo que es necesario alinear cada conjunto para conformar el modelo deseado. El proceso de alinear todos los conjuntos de nubes de puntos P_N conformadas por puntos 3D \vec{p}_i en un espacio de coordenadas cartesianas $p_i \in P_N$, que definen el modelo final, se le denomina “registro”. Esta etapa, por lo regular, se divide en 2 pasos, primero determinar una transformación inicial de P_N conjuntos que converjan la forma del modelo con cierto nivel de error (ϵ). En este solo se busca encontrar la forma básica del modelo, la transformación se realiza de manera local, es decir, determina las características geométricas de cada $p_i \in P_N$ para poder encontrar la transformación mínima necesaria entre cada conjunto P_N . Y como segundo paso, es el que refina la transformación inicial con una serie de iteraciones que determinan las transformaciones de cada conjunto, similar al primero, solamente que este se define con una ϵ mucho menor que el anterior y lo hace de manera local y después global, es decir, toma en cuenta la matriz de transformación del conjunto P_N .

3.3.3 Sample Consensus Initial Alignment

El método SAC-IA (*Sample Consensus Initial Alignment*) consiste en calcular las características geométricas de cada $p_i \in P_N$, las relaciones existentes de cada punto vecino (neighbor) por cada punto del conjunto P_N , son almacenadas como características en una tabla de frecuencias [77, 78]. Esto permite segmentar o registrar conjuntos de puntos contenidos en P_N en base a una característica geométrica, tales como curvatura, posición y el eje normal de cada punto. Para el caso del sistema propuesto, se buscan las características geométricas requeridas que resulten en la convergencia de cada conjunto de nubes de puntos, llamadas puntos de correspondencia (*Keypoints*). Estos se calculan mediante los métodos Euclidianos o Manhattan, para comparar la distancia entre dos vectores en un espacio ortogonal, de distintos conjuntos P_N , los vectores que contengan menor distancia, o, mejor dicho, la mayor correspondencia, de entre todos los analizados se consideran “Keypoints”. Para esto, se extraen las características geométricas para $p_i \in P_N$, en N iteraciones, el método consiste en la generación de una referencia esférica S , con radio r_i y el punto p_i como su origen, se calculan las características geométricas deseadas para todos los puntos dentro del

radio y se calcula la media μ , se utilizan las tablas de frecuencias (histograma) para almacenar la información de cada $p_i \in P_N$. El uso de histogramas, hace posible el análisis estadístico de las características de cada punto contenida en ella. Por lo tanto se define $P_{f,i}$ como el conjunto de puntos, en el cual la distancia de los puntos con características deseadas están fuera del intervalo $\mu \pm (\alpha \cdot \sigma)$. Donde p_i^f representan el punto con cierta característica, en la clase i , y μ_i , la media del histograma del conjunto, en la clase i . Para el cálculo de distancias entre puntos 3D, en un espacio cartesiano, se utiliza la función Euclidiana:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^{16} (p_i^f - \mu_i)^2} \quad 3.2$$

Sin embargo, este proceso implica el hecho de que entre mayor dispersión existen entre los conjuntos P_N , para cada $p_i \in P_N$, mas posibilidad de que falle este método, por lo tanto, dependiendo del grado de dispersión, es la probabilidad de que se tenga éxito. Por ello, se propone incorporar una rutina de transformación inicial que minimice la dispersión existente entre cada conjunto P_N , tal que se aseguran una convergencia satisfactoria en la etapa de registro ICP. Las librerías PCL proveen de distintos modelos para el cálculo de puntos con correspondencias, para el sistema propuesto se utiliza el módulo *FPFH - Fast Point Feature Histograms* [76].

Capítulo 4

Metodología

El objetivo es desarrollar un sistema sencillo y de bajo costo, portable y fácil instalación que permita la obtención de datos antropométricos: anchuras y alturas del área cervical. El sistema desarrollado consiste en la utilización paralela de 4 sensores Kinect colocados alrededor del objetivo, de las cuales se generan las nubes parciales del cuerpo. Esto representan los datos de entrada a nuestro sistema. Enseguida los datos son sometidos a un proceso de filtrado y muestreo, esto con el fin de eliminar ruidos contenidos en el modelo que pudieran generar errores en la etapa de registro y generar un modelo completo tridimensional del cuerpo humano. Las 4 nubes de datos parciales filtrados son concatenadas, para la generación de una sola nube de puntos que representaría el modelo final registrado. El modelo se somete a un proceso de corrección de áreas vacías y deformes que resulta en un modelo tridimensional más definido y completo. Finalmente se utiliza un método simple de medición antropométrica para la extracción de anchuras y alturas. En la etapa de evaluación se comparan los datos calculados por el sistema contra la medición real adquiridas en los módulos de medición antropométrica y biomecánicas *Asiatech* (**Figura 4.19, Figura 4.20**). Para poder determinar la precisión de las mediciones calculadas del sistema propuesto, se desarrolla un experimento en 3 etapas (**Figura 4.6**):

1. Generación de Datos Estándar: Se toman las medidas a 25 participantes, utilizando las cabinas de experimentación antropométricas, este define nuestro estándar dorado para la comparativa contra el sistema propuesto. Estas cabinas están diseñadas especialmente para la obtención de datos antropométricos, tanto de alturas, anchuras y alcances.
2. Cálculo con sistema propuesto: Se capturan las mismas dimensiones en el sistema propuesto, se requiere de un sistema de cómputo de gama media alta para el cálculo de los datos. Por lo tanto, se requiere solamente de una persona para realizar el análisis. Cada sensor presenta cierta posición y ángulo con respecto al participante, de manera que se pueda obtener una reconstrucción completa del cuerpo (**Figura 4.5**).
3. Análisis de los resultados, discusión y conclusiones. En la sección de anexos se muestran los resultados detallados. El objetivo del experimento es la validación de los datos y determinar su nivel de efectividad mediante el análisis estadístico de las mediciones, en comparación a nuestro estándar dorado recabado en la primera etapa.

4.1 Aportaciones del Sistema

El sistema de escaneo propuesto, está basado en la necesidad de un sistema que permita la obtención rápida y sencilla de datos antropométricos y de bajo costo. Las aportaciones del método propuesto van en función a las características que este presenta en su implementación.

4.1.1 Múltiples sensores 3D en Paralelo

Para que la generación del modelo tridimensional sea rápido y eficiente, se utiliza una topología tipo fija de 4 sensores interconectados a un solo computador, para ello se desarrolló un sistema que permita la adquisición de datos simultanea de los sensores Kinect V2. Por

especificación del fabricante en el kit de desarrollo oficial (SDK), cabe destacar que estos dispositivos no pueden ser utilizados más de 2 de manera simultánea en un solo computador. Los modelos parciales según el ángulo de visión de cada sensor, se conforman por puntos (nubes de puntos) que comúnmente presentan cierto grado de ruido, que son eliminados en el sistema mediante un proceso de filtrado. Los métodos empleados, son técnicas existentes dentro de las librerías PCL [75]. Se generó una plataforma simple que permita el proceso de manera automática, con opción a modificar los ajustes.

4.1.2 Transformación Inicial

Introducción de una plataforma de alineación tridimensional inicial simple mediante dos métodos propuestos: Primeramente, la implementación de un modelo de transformación, que calcula la ubicación y rotación inicial requerida para la concatenación de las nubes parciales de cada sensor, que conforman a su vez el modelo final. El sistema integra como opción ajustar de manera visual en el ordenador la transformación inicial requerida por el algoritmo de registro ICP (*Iterative Closest Point*) por sus siglas en inglés, en cual se concatenan los datos encapsulados en cada nube de puntos, en iteraciones de par en par [79]. Como segundo método, la implementación FPFH, para el cálculo automatizado del valor de transformación inicial [76]. Ambos métodos presentan ventajas y desventajas con respecto a cada uno en comparación, sin embargo, se propone la implementación de ambos sistemas, ya sea en combinación con el primer método o ambos de manera independiente. Esto garantiza, una correcta transformación inicial.

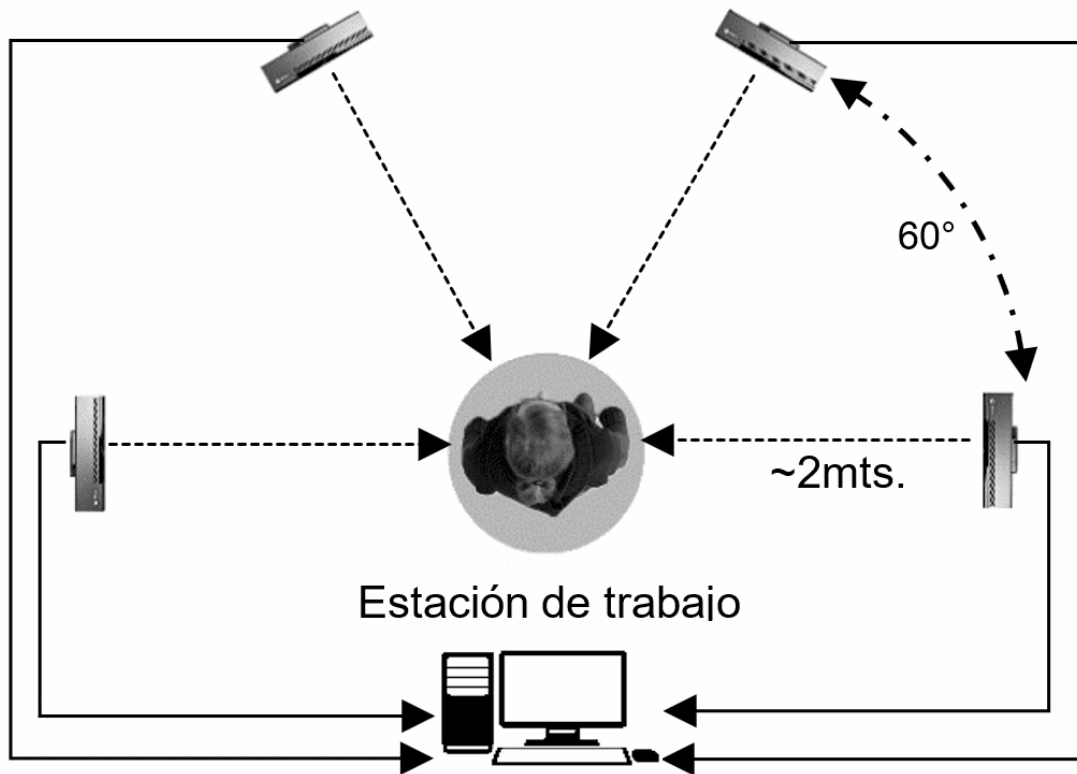


Figura 4.5: Diagrama final de instalación de sensores.

4.1.3 Herramienta de medición

El sistema, fue diseñado inicialmente con el propósito de ser utilizado como una herramienta de escaneo tridimensional para análisis antropométrico y ergonómico, para el laboratorio #104 de Ergonomía, antropometría y biomecánica, Universidad Autónoma de Baja California, lugar donde se realizó la investigación. El laboratorio cuenta con módulos tipo cabina de medición antropométrica (**Figura 4.19**), que se utilizan en las practicas académicas. Sin embargo, la implementación de un sistema que permita la adquisición de tales datos de manera rápida, sencilla, automatizada y además portable son unas de las principales aportaciones en el estudio. 4) Hasta el momento, la existencia de alguna herramienta con tales características no está disponible en la región de Baja California, por lo tanto, pudiera utilizarse para generación de bases de datos de medidas antropométricas

para la media poblacional [23]. El hecho de que se trate de un sistema portable, hace posible su empleo “in situ”. Esto resulta significativo, dado que estos datos son requerimientos para análisis ergonómicos, en los cuales, el gobierno en la región (Baja California, México) exige al sector privado para la regulación de sus operaciones, estudios de análisis de factores de riesgo ergonómico.

4.2 Desarrollo del Sistema

El sistema utiliza los principios básicos de implementación para la generación de modelos tridimensionales en tiempo real a partir de objetos estáticos [79]. Se utilizó software libre, bajo licencia GPL/BSD, además del conjunto para desarrollo de software del dispositivo Kinect V2 (SDK) proporcionado por el fabricante Microsoft [71, 75, 80, 81]. El dispositivo Kinect V2, originalmente fue diseñado para video juegos por la compañía Microsoft, sin embargo, su implementación como un dispositivo capaz de generar datos para visión de computadora e investigación es ampliamente recomendada en el ámbito científico en diversas aplicaciones. La funcionabilidad del sensor está limitada a que solamente se puede utilizar un solo dispositivo en cada computador, esto significa que, debido a las limitantes del fabricante en el controlador, este solamente permite utilizar un solo sensor Kinect V2 y no más de manera simultánea en el mismo computador. Debido a dicha limitante, el sistema integra la capacidad de controlar múltiples sensores conectados en un solo computador, para ello se utilizaron controladores de acceso libre LibFreeNect2 [82]. Se requieren de cuatro sensores Kinect, sin embargo, se tiene la opción de incrementar los dispositivos para el propósito de incrementar o mejorar los datos obtenidos, en relación a tiempo y eficiencia, pero esto afectaría los costos, que es uno de los principales objetivos, de ser de bajo costo. En la presente versión del sistema propuesto, no implementa el rastreo esquelético, sin embargo, se tiene la capacidad de hacerlo.

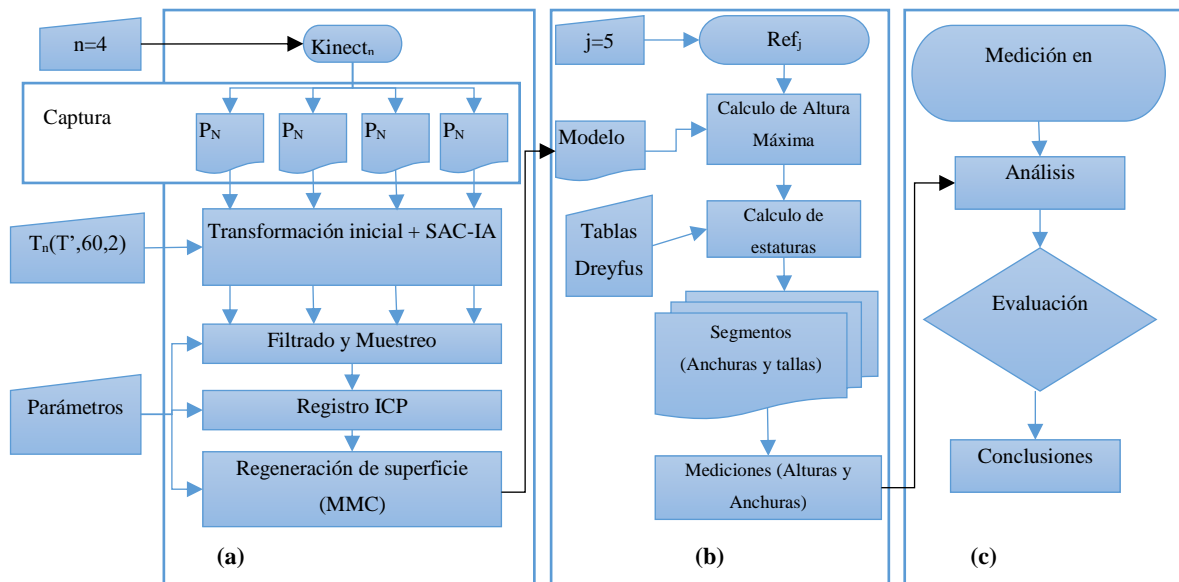


Figura 4.6: Diagrama de flujo general de proceso. Generación de un modelo 3D (a), extracción de datos antropométricos (b) y la validación de los datos (c).

4.2.1 Requerimientos

Específicamente, se utilizaron cuatro sensores Kinect, en su versión 2 para PC (**Figura 4.5**), cada sensor se instala sobre un trípode para cámara. El propósito de la topología, es la de obtener la mayor cantidad de datos recabados por cada sensor, para posteriormente procesar tales datos en la interface de computo. Cada sensor requiere de un puesto USB 3.0 dedicado, por lo que se requirió del uso de tarjetas PCI-E@16x, las cuales se instalan en el ordenador. Las instalaciones utilizadas se encuentran localizadas dentro de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería en la Universidad Autónoma de Baja California, campus Tijuana, laboratorio 104 de Ergonomía y Biomecánica. Las especificaciones del ordenador utilizadas en la etapa de experimentación son: Procesador Intel Core i7, 8 Gb de memoria RAM, Acelerador grafico Nvidia de 3GB de memoria de video con capacidad de procesamiento CUDA y 500 Gb de Almacenamiento masivo. Los controladores LibfreeNect2 integran aceleración grafica OpenGL, lo que libera al procesador CPU de realizar complejos cálculos para el renderizado. Auxiliar a esto, se utiliza programación paralela basado en OpenMP y CUDA, para minimizar tiempos de cálculo en

la generación del modelo y transformaciones matriciales requeridas por los algoritmos estocásticos de aproximación, generalmente en demanda al momento de generar cada punto que conforma la nube de datos en espacio tridimensional en la interface virtual [83]. Para el desarrollo de la interface gráfica, se utilizó OpenCV 3.2, con integración en VTK8.0 y Qt5.8 [84].

4.3 Experimentación y Validación

Para poder determinar la eficiencia del sistema propuesto, basado en los sensores Kinect, se desarrolló un experimento que permita comparar los resultados reales tomados con el sistema clásico de medición contra los datos generados por el sistema propuesto. En detalle, consiste en la obtención de ciertas medidas antropométricas de 100 participantes adultos (alturas y anchuras) y comparar la diferencia de los resultados arrojados por el sistema propuesto, obteniendo como resultado una desviación o error de medición, así como el tiempo de proceso. En general, el experimento consta de tres pasos: En primera instancia, se toman ciertas medidas a 100 participantes, utilizando las cabinas de experimentación antropométricas. Estas cabinas están diseñadas especialmente para la obtención de datos antropométricos, mediante el uso de la medición clásica, en la cual el participante tiene que posar para poder obtener la medición con reglas de medición. Como segundo paso, se capturan las mismas dimensiones en el sistema propuesto con un arreglo polar de cuatro sensores Kinects conectados y funcionando de manera simultánea a un solo computador, en este sistema solamente se requiere una sola computadora de gama media alta sin necesidad de algún otro dispositivo. Para este paso solamente se requiere que cada sensor este en cierta posición y ángulo con respecto al participante, de manera que se pueda obtener una reconstrucción completa del cuerpo. En este paso se obtiene un escaneo tridimensional del cuerpo del cual se le extraen las dimensiones y son mostradas en pantalla (**Figura 4.7**).

4.3.1 Instalación y Ajuste Inicial

Los datos son capturados y mostrados en pantalla en tiempo real. Cada sensor nos aporta un conjunto de datos sin procesar P_N (**Figura 4.8a**). Los sensores se colocan sobre trípodes, cada sensor debe de estar correctamente alineado hacia el participante que se desea escanear. La rutina de instalación inicial consiste en la de ajustar físicamente las bases de los sensores (trípodes), tal que la alineación resultante coincida con la posición y ángulo de escaneo deseado (**Figura 4.5**). Sin embargo, este proceso pudiera resultar ciertamente extenso y tedioso, si fuera el único método de ajuste de transformación inicial. El hecho de que existe intervención humana en este paso, pudiera afectar al resultado de la medición, sin embargo, se implementa en la interface, controles que permitan el ajuste virtual de la transformación inicial requerida. En esta, el usuario puede ajustar la posición y rotación deseada de cada conjunto de puntos (nube de puntos), con la finalidad de aumentar la precisión con la que se reconstruye el modelo final en la etapa de registro y eliminar el margen de error de la medición extraída de este. Para este paso se muestran en la interface tridimensional, los cuatro conjuntos de nubes de puntos, por separado, estos conforman el modelo aun no ajustado o alineado de manera completa, en tiempo real (**Figura 4.8b**).

4.4 Proceso General

Como esquema general del proceso del Sistema propuesto, el sistema reconstruye una representación del cuerpo en un objeto tridimensional que nos permita calcular las dimensiones (alturas y anchuras) deseadas y los resultados mostrarlos en pantalla. La rutina general del proceso se presenta en los siguientes pasos (**Figura 4.6a**):

1. Captura.
2. Transformación Inicial.
3. Filtrado.
4. Registro.
5. Reconstrucción de la superficie (nube de puntos final).

6. Calculo de Dimensiones.

Los datos son capturados y mostrados en pantalla en tiempo real, directamente desde el sensor. Cada sensor debe de estar correctamente alineado apuntando hacia el ángulo del participante que se desea escanear. Como rutina inicial es aplicar una alineación que “corrija la posición y ángulo de cada sensor, de manera que se pueda obtener el modelo deseado. Para la apropiada identificación de los datos arrojados para cada sensor, estos se muestran en pantalla con distinto color y un único valor vectorial de origen respectivamente. Este paso consiste en ajustar de manera física la posición y ángulo de separación y rotación de cada sensor en cada soporte de colocación (trípode para cámara convencional) debido a que cada iteración tiene distinto ángulo de visión con respecto a la posición original de cada sensor (**Figura 4.7**). El analista tiene que asegurarse que dicha posición, distancia y ángulo entre cada sensor sea la correcta antes de iniciar con el proceso de escaneo a cada participante (**Figura 4.5**). Enseguida que el ajuste en físico sea el adecuado, el operador del sistema puede “refinar” estos ajustes en el sistema ajustando los valores vectoriales de posición de cada nube de datos, para que de esta manera obtener un modelo inicial más definido con respecto al modelo inicial.

4.5 Captura del Modelo

El paso de escaneado, es donde los datos recogidos directamente desde el sensor son capturados en la memoria de la computadora. Para el sistema basado en Kinect, el sensor genera un grupo de vértices, con una posición única en el espacio muestral que representa los límites de la superficie del cuerpo escaneado llamados Nubes de Puntos. Estas direcciones representan nuestra base de datos inicial para el resto del proceso. El método de escaneo que el sensor Kinect V2 utiliza es Tiempo de Vuelo, “*ToF*” [85]. Este proceso genera niveles de ruido o error, lo cual es importante tomar en cuenta, dado que es un indicador del nivel de respuesta que esperamos obtener de dicho sistema. El ruido generado o errores son más adelante removidos de la muestra. El sistema además incorpora un método de filtrado que permite la reducción significativa de áreas no necesarias y áreas con ruido en exceso. El proceso de escaneado captura los correspondientes conjuntos de datos de las distintas vistas

que se desea escanear en este caso se obtienen cuatro conjuntos de datos P (**Figura 4.8**). Cada conjunto de datos, o nube de puntos, es una estructura conformada por puntos en 3D, los cuales representan una colección de puntos multidimensionales $p_i \in P_N$. Cada punto contiene una posición única en un sistema de coordenadas ortogonales. Cada conjunto de datos se fusiona para formar una sola nube de puntos final que representa el modelo en 3D completo. Para el procesado de datos se utilizó PCL (*Point Cloud Libraries*) en su versión 1.8 [75]. Inicialmente se obtienen los conjuntos P con una matriz de identidad igual para los cuatro conjuntos, por lo tanto, es necesario que cada conjunto P , contenga una transformación inicial, necesaria para el proceso de registro ICP.

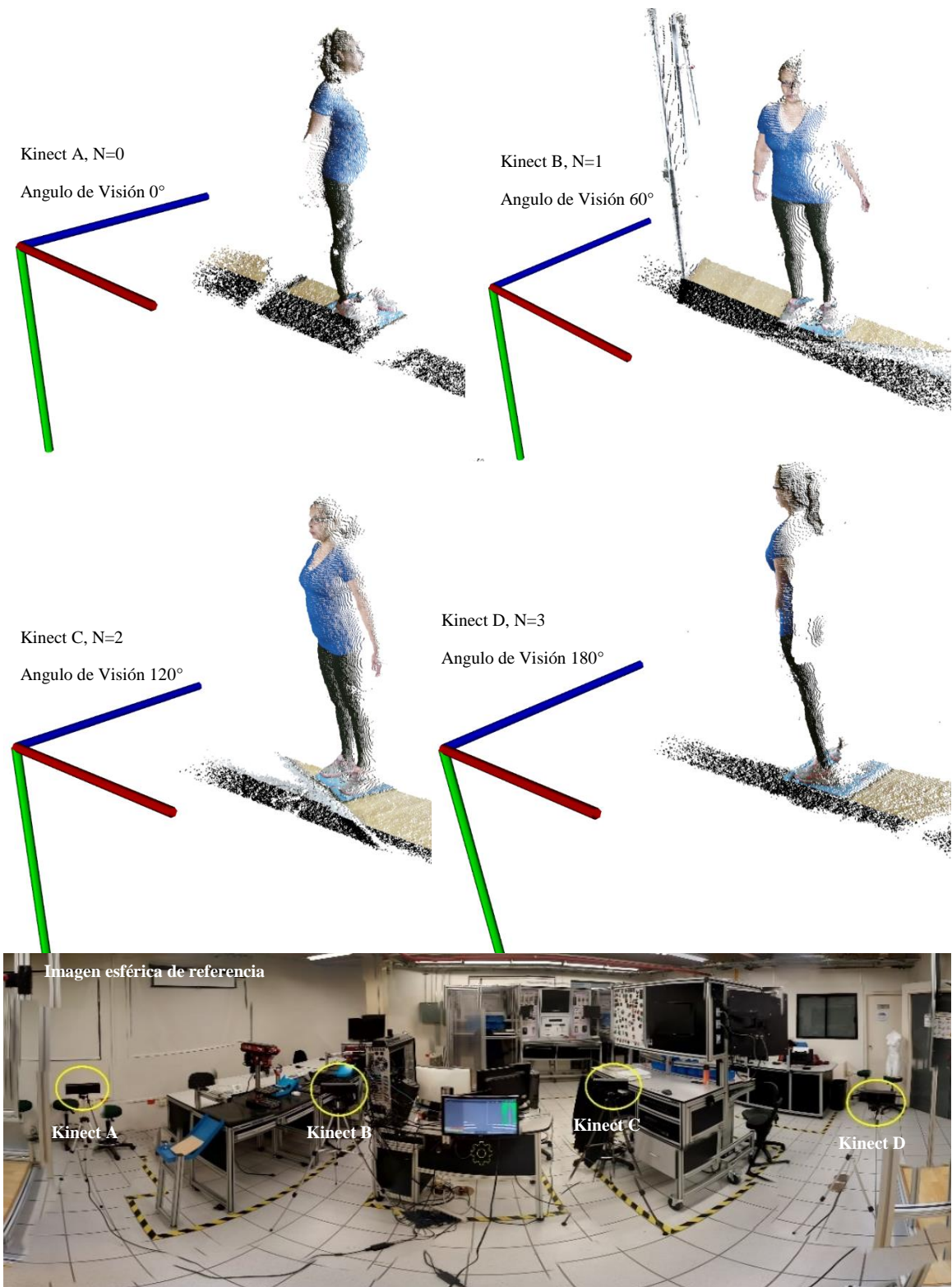


Figura 4.7: Transformación inicial por cada sensor. El punto de origen del modelo se encuentra en la posición del sensor Kinect.

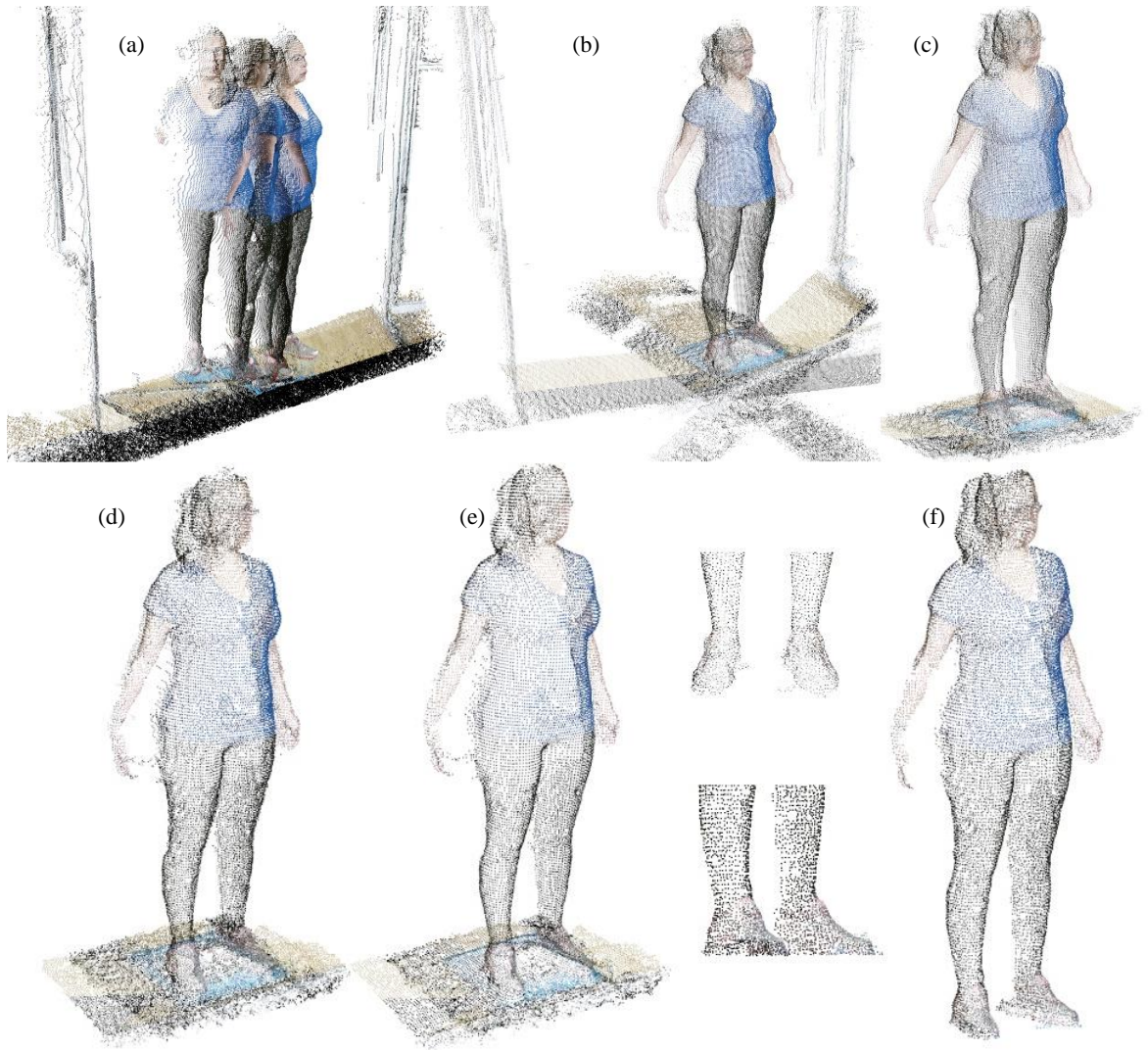


Figura 4.8: Flujo para la generación del modelo tridimensional. Conjunto de datos capturados desde el sensor (a). Método propuesto: Transformación inicial rígida en coordenadas globales (b). Filtrado (c) y proceso de registro ICP (d). Modelo final (d).

4.6 Transformación Inicial

Al momento que se capturan los datos directamente del sensor, la transformación de cada conjunto $p_i \in P_N$ está situada en el punto origen de cada sensor. Al momento de representar todos los conjuntos P_N obtenidos en un espacio global, cada conjunto tendrá su propia matriz de transformación inicial en su punto de origen (**Figura 4.7**). Se propone un método simple para el cálculo de transformación matricial inicial para cada conjunto de $p_i \in$

P_N . Se incorpora una transformación previa al flujo clásico al algoritmo ICP de registro. Esta transformación consiste en alinear el conjunto P_N de tal manera que se tenga una transformación global inicial para minimizar el grado de dispersión entre cada conjunto. Este paso representa un pre-procesado de la matriz de transformación requerida en la etapa de registro ICP. El proceso para calcular la transformación inicial, definimos al conjunto de puntos P_N como:

$$P_N = \{\vec{p}_i\} \quad 4.1$$

Dónde: $p_i \in R^3$ representa un punto en espacio tridimensional ortogonal, i , la cantidad total de puntos del conjunto de P_N . N , representa el actual dispositivo Kinect:

$$N = \{0, 1, 2, 3\} \quad 4.2$$

Por lo tanto, decimos que para $p_i \subseteq P_N$, sea T_N , la transformación global inicial requerida:

$$T_N(Rot_i, Pos_i, \theta_y, d_z | \alpha = Rot_y + \theta_{y,N}) = R_f + L_f \quad 4.3$$

Donde $Rot_i = \{rot_x, rot_y, rot_z\}$, $0 \leq Rot_i \leq \pi$, representa el componente de ajuste rotación, en radianes. El cual nos permite controlar los ángulos de rotación de P_N . $Pos_i = \{pos_x, pos_y, pos_z\}$, $-200 \leq Pos_i \leq 200$, presenta el ajuste del vector de translación, en centímetros, donde i representa el eje de coordenadas cartesianas [86, 87]. Se define a Rot_i, Pos_i como los ajustes de transformación deseados T' . El ángulo de separación $\theta_{y,N}$ entre cada sensor con respecto al eje Y (**Figura 4.5**), se define:

$$\theta_{y,N} = \{\theta_{y,N=0}, \theta_{y,1}, \theta_{y,2} * 2, \theta_{y,3} * 3\} = \{0, 60, 120, 180\} \quad 4.4$$

Dado que la separación con respecto al eje Y permanece constante, este incrementa con respecto al conjunto de puntos inicial $P_{N=0}$, el cual no requiere ajuste, el resto de las

iteraciones $N = \{1,2,3\}$, se derivan del ángulo inicial, en incrementos de la constante θ . La constante d_z , es la distancia de separación entre el sensor y el participante: $d_z = 2.0 \text{ metros} = 200 \text{ cms}$. La matriz de rotación final, R_f , representa la combinación:

$$R_f = R_{rot_x} * R_\alpha * R_{rot_z} \quad 4.5$$

Aplicando la Matriz de Rotación Euclidiana:

$$R_{Rot_x} = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(rot_x) & -\text{sen}(rot_x) \\ 0 & \sin(rot_x) & \cos(rot_x) \end{Bmatrix}$$

$$R_\alpha = \begin{Bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \text{sen}(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{Bmatrix} \quad 4.6$$

$$R_{Rot_z} = \begin{Bmatrix} \cos(rot_z) & -\text{sen}(rot_z) & 0 \\ \text{sen}(rot_z) & \cos(rot_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}$$

Donde R_{Rot_x} representa el giro de rotación para el eje X, R_α representa el giro de rotación para el eje Y, R_{Rot_z} el giro de rotación en el eje Z. α representa la constante del ángulo inicial para P_N . Al momento de capturar P_N , desde el sensor, el ángulo de rotación con respecto al eje Y es actualmente 0, α , representa el ajuste que alinea a P_N a 60 grados:

$$\alpha = rot_y + \theta_{y,N} \quad 4.7$$

Algoritmo 1: Transformación inicial para $p_i \in P_N$

- 0: N = Dispositivos Kinect
 - 1: T_N = Transformación inicial
 - 2: Generar Controles de transformación.
 - 3: Para T_N :
 - 4: Capturar conjunto de datos P_N
 - 5: Actualizar T_N para P_N $P_{t,N}(T_N|SAC_IA)$
 - 6: Aplicar transformación $P_{t,N}$
 - 7: Visualizar datos de $P_{t,N}$
 - 8: Mientras ($N \neq 1$): Actualizar $P_N(P_{t,N})$
 - 9: Finalizado
-

Los valores de Rot_i pueden ser modificados en cualquier etapa de proceso. Para el vector de posición final L_f tenemos que:

$$L_f = [\vec{V}_{d_z} - \vec{V}^i] + \vec{V}_{Loc_i} \quad 4.8$$

Donde $\vec{V}_{d_z} = \{0, 0, d_z\}$. Cada sensor está a una separación de 200 centímetros con respecto al centro del participante, este representa el actual *centroide*, o el punto origen \vec{V}_{d_z} para P_N , el vector \vec{V}^i representa producto punto de la matriz de rotación y el actual punto de origen de P_N :

$$\vec{V}^i = R_f \cdot (\vec{V}_{d_z}) \quad 4.9$$

Finalmente añadimos el vector de ajuste traslación final (**Figura 4.9, Figura 4.8b**):

$$\vec{V}_{Loc_i} = \{pos_x, pos_y, pos_z\} \quad 4.10$$

El método de entrada para que el usuario ajuste los parámetros de transformación en esta etapa se implementa en la interface 3D (**Figura 4.10**). La transformación inicial propuesta, se trata de un modelo empírico, que su fundamento se basa en la práctica del usuario con el sistema, el cual se es necesario trabajar con el nivel de incertidumbre que se tiene al momento de hacer los ajustes, por lo tanto, se tiene una curva de aprendizaje, que por tratarse de datos inicio, se consideran aceptables para el proceso ICP. Sin embargo, para

incrementar el grado de precisión de la matriz de la transformación anterior, se implementa el método SAC-IA para la convergencia global de los conjuntos P, este método es opcional.

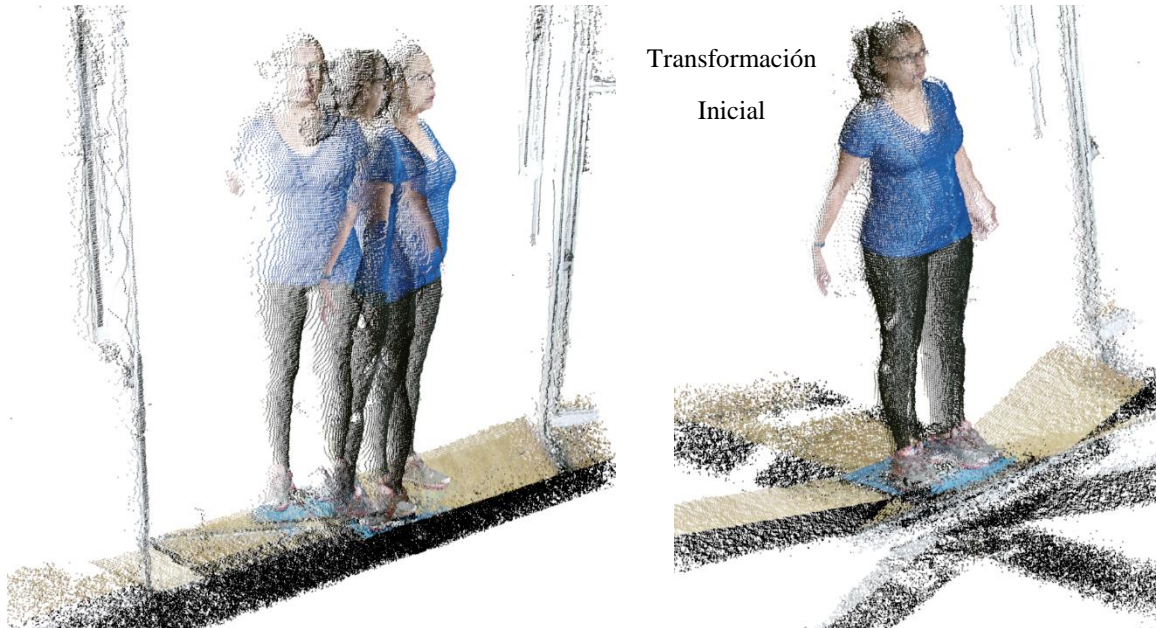


Figura 4.9: Transformación Inicial implementada

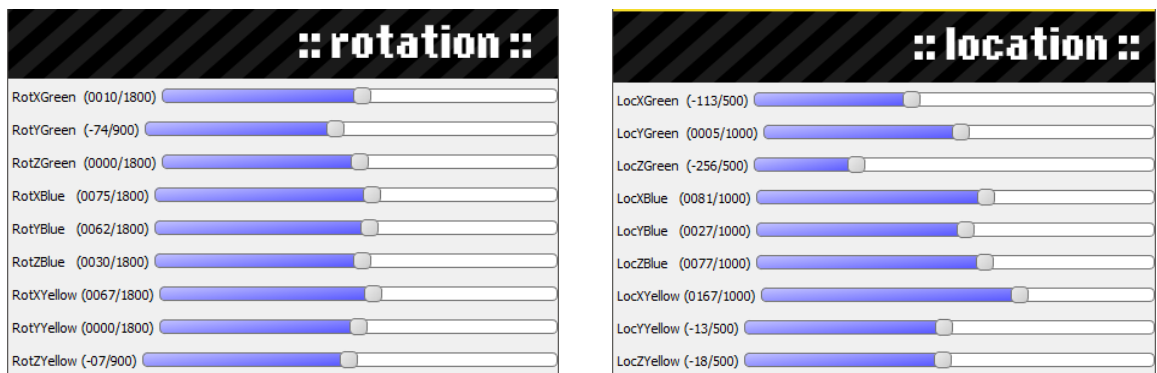


Figura 4.10: Interface principal y panel de control para ajuste de Rotación y traslación.

4.7 Filtrado

Los datos capturados, se les aplica un proceso de filtrado, que es donde la nube de puntos original es simplificada mediante la eliminación de puntos innecesarios que no son parte del cuerpo, o que se presentan como “*outliers*” de datos estadísticos que no se requieren para cálculos posteriores (**Figura 4.8c**). Este tipo de filtrado es necesario, dado que la señal arrojada por Kinect y que a su vez es procesada por PCL, básicamente se basa en ruido de datos. Los datos filtrados son utilizados para la reconstrucción del modelo, este proceso se llama “Registro”, lo cual consiste en la integración de cada nube de datos en un solo modelo unificado, posteriormente para generar las mediciones antropométricas deseadas. Los datos capturados $P_{t,N}$, se les aplica un proceso de filtrado, que es donde la nube de puntos original es simplificada y reprocesada (**Figura 4.12**). Este proceso consiste en la eliminación de puntos que representan ruido. Las librerías PCL proveen de múltiples herramientas que permiten esta tarea [79]. Los datos filtrados son utilizados para la reconstrucción del modelo, este proceso se llama “Registro”, lo cual consiste en la integración de cada nube de datos en un solo modelo unificado, posteriormente para generar las mediciones antropométricas deseadas. Para igualar el proceso para cada conjunto $P_{t,N}$ se implementó una simple rutina la cual es utilizada para la etapa de filtrado (Algoritmo 2). Por lo tanto, definimos $P_{f,N} \subseteq P_{t,N}$ como el subconjunto de datos filtrado.

4.7.1 Filtrado Seccional

La primera etapa de procesamiento de filtrado, se utiliza el filtrado seccional, el cual define $p_{i,pt}$ como todo $p_i \subseteq P_{t,N}$ en el plano ortogonal $k\{x, y, z\}$, $-\infty \leq l \leq \infty$ donde l se define como el dominio de la recta:

$$p_{i,pt} \in \left\{ k \left\{ x_l^{P_{t,N}}, y_l^{P_{t,N}}, z_l^{P_{t,N}} \right\}, (-\infty \leq l \leq \infty) \right\} \quad \mathbf{4.11}$$

Si $p_{i,pt}$ se encuentra dentro de los límites l en el plano k , es filtrado y en consecuencia, eliminado del conjunto, por lo tanto definimos los conjuntos de puntos filtrados:

$$P_{f,N} = p_{i,pt} - p_t \in P_{t,N} \quad 4.12$$

Este filtro resulta de gran utilidad porque en una sola operación por conjunto $p_t \in P_{t,N}$ elimina la mayoría de los puntos innecesarios $p_{i,pt}$, que define el conjunto de puntos resultantes $P_{f,N}$ (**Figura 4.8c**).

4.7.2 Filtrado en Voxeles

Para las siguientes subrutinas de filtrado se definen filtrado Uniforme (UniformSampling) y filtrado por mayas en 3D o Voxels (VoxelGrid). Un voxel se define como el cubo resultante formado por el vector que une 2 puntos en un espacio tridimensional. Para ambas subrutinas de filtrado, se utiliza el mismo principio para $p_i \in P_{f,N}$, el cual consiste en generar un voxel (caja 3D) que agrupe a cierta cantidad de puntos en un espacio, se calcula el centroide de cada caja, que se define como el punto convergente entre los puntos agrupados (**Figura 4.11**), los puntos dentro de las cajas son aproximados con respecto el punto del centroide generado, ambos métodos simplifican los conjuntos mediante este proceso, el objetivo es el de representar la superficie de manera más uniforme y definida [88].

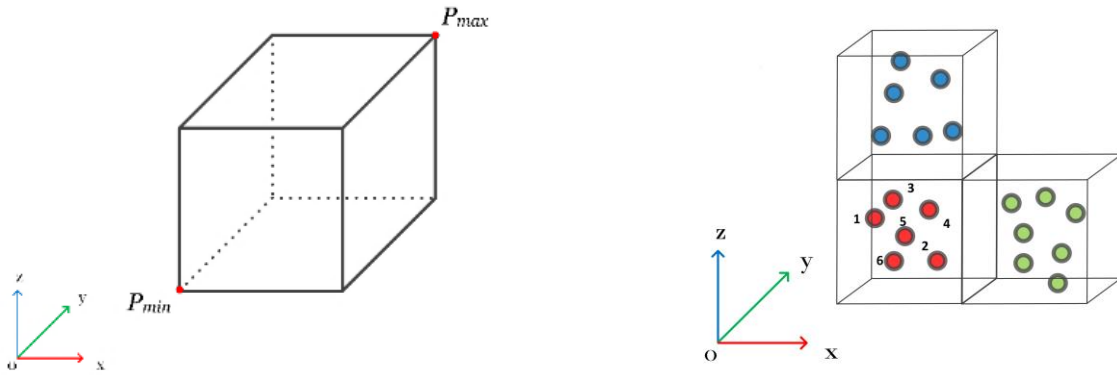


Figura 4.11: Voxel 3D formado por la distancia entre 2 puntos en un espacio de coordenadas (izquierda). Nubes de puntos agrupados en Voxeles (derecha). [88].

4.7.3 Filtrado de puntos atípicos

Se aplica un análisis estadístico a todos aquellos puntos que se consideren como puntos atípicos o que estén fuera de cierta distancia calculada. Un punto con característica atípica, se define como todo aquel dato que considere fuera de un dominio, en comparación a la media muestral. Para la detección de un punto atípico en una muestra, se definen k -puntos mínimos necesarios para estimar la distancia media d_{μ} entre ellos, una vez calculada la desviación estándar σ de la muestra tenemos que $D_{max} = d_{\mu} * \sigma$, la distancia máxima resultante se utiliza como condición para definir cada $p_i \in P_{f,N}$ como un dato atípico dentro de la muestra, que finalmente se elimina del conjunto al que pertenece [88].

Algoritmo 2: Subrutina de filtrado a $P_{T,N}$

- 0: $P_{t,N}$ = Conjunto de entrada de datos con transformación inicial
1: r = Radio que define la esfera de selección para cada p_i .
 k = recta en un plano ortogonal, l = dominio de la recta.
 n = cantidad de puntos p_i vecinos para el cálculo μ distal.
2: Para $P_{t,N}$:
3: Definimos al subconjunto $P_{f,N} \subseteq P_{t,N}$
4: Filtrar $P_{f,N}$:
5: Filtrado seccional $P_{pt,N}(P_{f,N}, k, l)$, $P_{pt,N} \subseteq P_{f,N}$
6: Muestreo Uniforme/Voxel $P_{uv,N}(P_{pt,N}, r)$
7: Eliminación de puntos atípicos $P_{o,N}(P_{uv,N}, n)$
8: redefinimos $P_{f,N} = P_{o,N}$
9: Visualizar $P_{f,N}$
10: Finalizado.
-

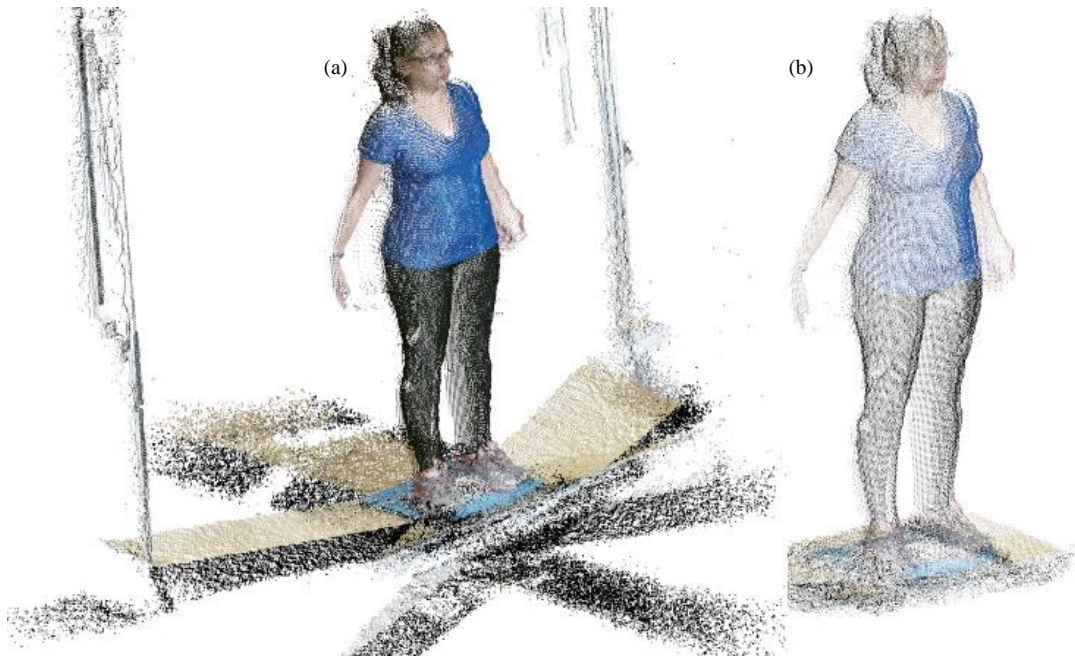


Figura 4.12: Proceso de Filtrado, el modelo es regenerado y se eliminan áreas innecesarias de cada conjunto $P_{T,N}$ (b).

4.8 Registro ICP

Dado que se cuenta con un ajuste inicial en la posición de cada nube de datos de cada sensor, este se dio de manera manual, por lo que se tiene aún, un error significativo que necesita ser corregido (**Figura 4.13a**), parte del objetivo del sistema es eliminar en el mayor grado posible el error humano, por lo que se requiere solamente una mínima intervención. El proceso principal del sistema propuesto se concentra en este paso, dado que calcula la transformación final de cada nube de datos de cada sensor debe contener de manera que, al momento de calcular la dimensión de dicho modelo, este no presente un sesgo con respecto a la medición actual del participante. Finalmente, se aplica la transformación al modelo y se genera un solo modelo. Hasta este momento se tienen 4 conjuntos de datos por cada sensor, con una determinada posición y ángulo con respecto al participante, para poder eliminar el error actual de la transformación inicial, el sistema utiliza el método ICP (*Iterative Closest Point*), el cual consiste en una serie de iteraciones que determinan “ n ” pares de nodos correspondientes entre cada conjunto de nube de datos, estimar una transformación (posición y rotación) que minimice la distancia entre tales nodos correspondientes, una vez generado el cálculo más apropiado, se aplica la transformación, que a su vez es iterado “ i ” cantidad de veces hasta que se tenga un coeficiente de correlación elevado entre cada nodo correspondiente. Este método consiste en un algoritmo que calcula la transformación rígida, que minimice la diferencia en dos conjuntos de nube de datos [79]. La nube de datos objetivo permanece fija, mientras la nube de datos fuente es transformada hasta el ajuste más óptimo de correspondencia con cierto nivel de error. A diferencia del método SAC-IA, ICP no calcula las propiedades geométricas de cada punto en el conjunto, si no que se basa en encontrar los puntos que tengan menor distancia entre 2 grupos y alinear los pares de puntos encontrados. Esto se realiza de manera iterada hasta cubrir los criterios de rechazo que se establecen en el proceso o hasta encontrar una convergencia (transformación) aceptable con un mínimo de error ϵ . El algoritmo de ICP utilizado se puede segmentar en los siguientes pasos:

1. Selección: Muestreo de los conjuntos P de entrada (*subconjuntos*).

2. Pareado: Estimación de las distancias mínima geométricas entre los puntos de los subconjuntos.
3. Filtrado: Filtrado de las correspondencias encontradas para reducir el número de puntos atípicos en la muestra.
4. Rechazo: Asignación de un error métrico ε y minimizarlo para determinar una transformación óptima.

4.8.1 Implementación

Este método solamente funciona cuando se tienen conjuntos de puntos que intersectan entre si y que además exista una transformación inicial que alinee los conjuntos de manera más global. Es por eso que es necesario contar con un ángulo de separación entre los sensores de tal manera que al momento de escanear dos conjuntos existan puntos que se “repitan” o se intersecten entre sí, es decir, que se encuentren tanto en el conjunto origen, así como en el conjunto destino. Se implementan dos métodos de transformación inicial T_N a los conjuntos de $P_{f,N}$, el propuesto, que requiere una alineación inicial visual, además del algoritmo SAC-IA como método complementario, sin embargo, los conjuntos de datos aún no están completamente alineados, parte del objetivo del sistema es eliminar en el mayor grado posible el error correspondiente a la transformación inicial T_N . Hasta este momento se tienen 4 conjuntos de datos $P_{f,N}$, cada uno con una transformación inicial T_N , para poder eliminar el error actual de la transformación inicial, se utiliza el método ICP [89, 90]. Existen distintas variantes del algoritmo ICP [79, 91]. El implementado en el sistema propuesto utiliza el ICP base de las librerías PCL, la transformación final es estimada en base al valor único de descomposición (SVD) propuesto por Besl y McKay en 1992. El algoritmo ICP utilizado se define por el error métrico de transformación manhattan de punto a punto E_{pp} , donde T es la transformación compuesta por el vector de translación t y el componente vector de rotación R [79].

$$E_{pp}(T) = \sum_{k=1}^N \omega_k \|T_{t,R}(p_k - q_k)\|^2 \quad 4.13$$

Donde p_k, q_k representa el k-ésimo par de N puntos con correspondencia de distancia euclidiana. ω_k define el peso o importancia de cada par al momento de calcular las distancias de los mínimos cuadrados, para $\omega_k = 1$ si no se desea utilizar la característica de peso. Por lo tanto, dada transformación matricial con 6GL $E_{pp}(T)$ que mejor se ajuste para orientar dos diferentes conjuntos de nubes de puntos ($P_{f,N}$) en un espacio multidimensional, definimos:

$$P_r = P_{f,N=0} + \left\{ \sum_{N=1}^N p_{f,N}^{E_{pp}(T)} \subseteq P_{f,N} \right\} \quad 4.14$$

Donde P_r es el conjunto de puntos final registrado que representa la concatenación de cada $p_{f,N}^{E_{pp}(T)}$ perteneciente al conjunto $P_{f,N}$. $P_{f,N=0}$ representa el conjunto de datos filtrados de la primera muestra (Kinect A, N=0), dado que este representa nuestro conjunto fuente en el cual el resto de los conjuntos van convergiendo de uno en uno, no se le aplica ninguna transformación. Finalmente se obtiene un modelo completo definido por los 4 conjuntos integrados (**Figura 4.13b**).

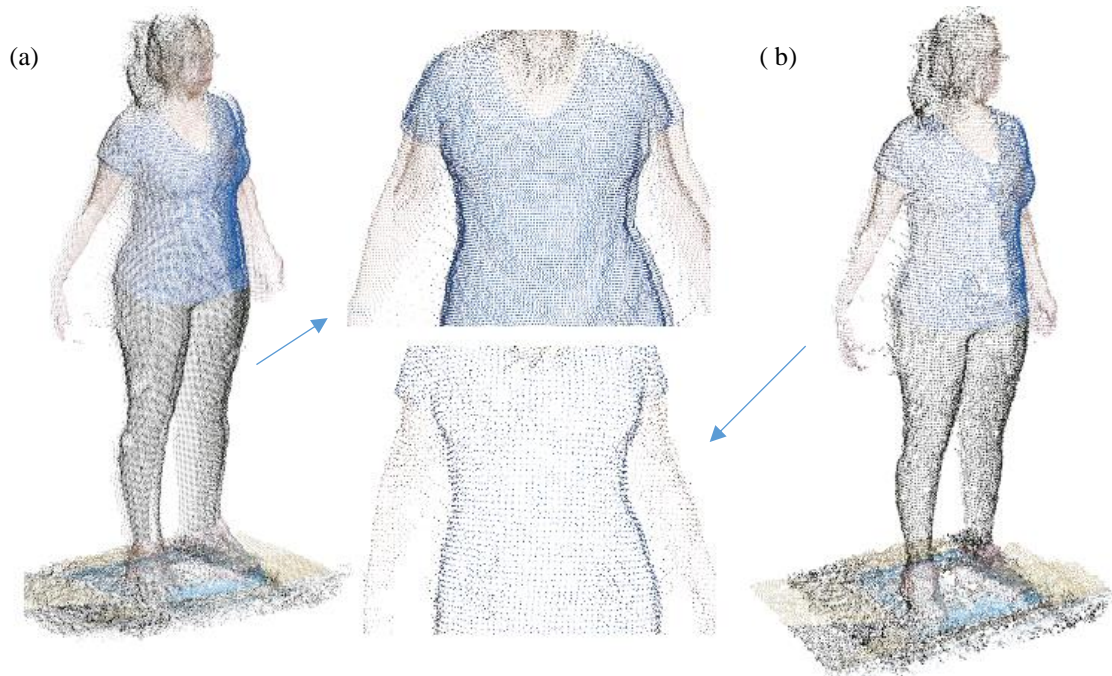


Figura 4.13: Conjuntos $P_{f,N}$ filtrados (a), modelo registrado P_r (b). En el área marcada por el círculo se observa la transformación cada conjunto de $P_{f,N}$ en la etapa de registro ICP.

Algoritmo 3: Registro de conjuntos $P_{f,N}$

- 0: $P_{f,N}$ = Conjunto de datos de entrada filtrados
 T = Transformación global resultante.
 t = Transformación local entre conjuntos.
 P_{local} = Conjunto de $P_{f,N}$ con transformación local.
 P_{global} = Conjunto resultante de P_{local} , P_r = resultado final
 - 1: *Calcular Alineación ($P_{f,N}$).*
 - 2: *Para $P_{f,N=1}$*
 - 3: *Alineación ($P_{f,N-1}, P_{f,N}, P_{\text{local}}, t$)*
 - 4: *Estimar transformación rígida (t)*
 - 5: *Aplicar transformación local $P_{\text{local}}(t)$*
 - 6: *Convertir transformación Global*
 $P_{r,N-1} = P_{\text{global}}(P_{\text{local}}(t))$
 - 7: *Concatenar $P_r = P_r + P_{r,N-1}$*
 - 9: *Visualizar (P_r)*
 - 10: Finalizado.
-

4.9 Ajuste de Curvaturas

El conjunto P_r presenta cierto ruido en las curvaturas que necesitan ser redefinidas (**Figura 4.15b**), que además representa nuestro modelo de restricción para el cálculo de estaturas, se optó por eliminar la región de suelo que es la superficie plana perpendicular al eje Y del modelo. Esto es necesario ya que las mediciones de estaturas, están basadas en la estura máxima resultante. Para ello se utilizó el método de los mínimos cuadrados para determinar curvatura final que define la superficie del modelo [92]. Dado $p_i \in P_{reg}$ y S_p representa la superficie aproximada generada por el modelo de los mínimos cuadrados para cada punto p_i , el cual da como resultado un conjunto ajustado $R = \{r_i\}$, por lo tanto tenemos $r_i \in S_p$ (**Figura 4.14**). La siguiente operación del modelo nos arroja a S_R que es la curvatura final resultante de $r_i \in S_p$. Este proceso se puede iterar N veces hasta la curvatura deseada. El hecho es que este método “suaviza” la curvatura del modelo original, se utiliza un coeficiente de correlación entre las curvaturas generadas para poder controlar el nivel de “deformación” que este proceso pudiera generar con respecto al modelo original. La librería PCL proveen del algoritmo de reconstrucción paralela (*pcl::MovingLeastSquaresOMP*) Método de los Mínimos cuadrados (MMS). El costo en tiempo de procesamiento es de ~30ms para un modelo que contenga 200 mil puntos aproximadamente. Finalmente se implementa un algoritmo para segmentar el modelo resultante de la región del suelo, para ello se utiliza el método RANSAC para un modelo de selección planar. Este método itera a través del conjunto de puntos y selecciona todos los k-punto en los que sus características coincidan con las condiciones geométricas de un modelo plano, una vez seleccionados los puntos, estos son eliminados del conjunto original [93].

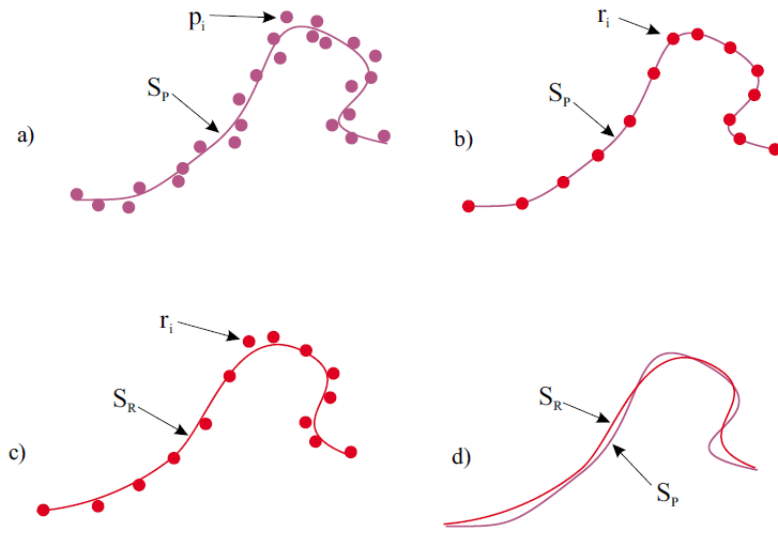


Figura 4.14: Flujo del proceso de reconstrucción utilizando MMC para determinar el modelo de la pendiente S_R a partir de S_P (d) [92].

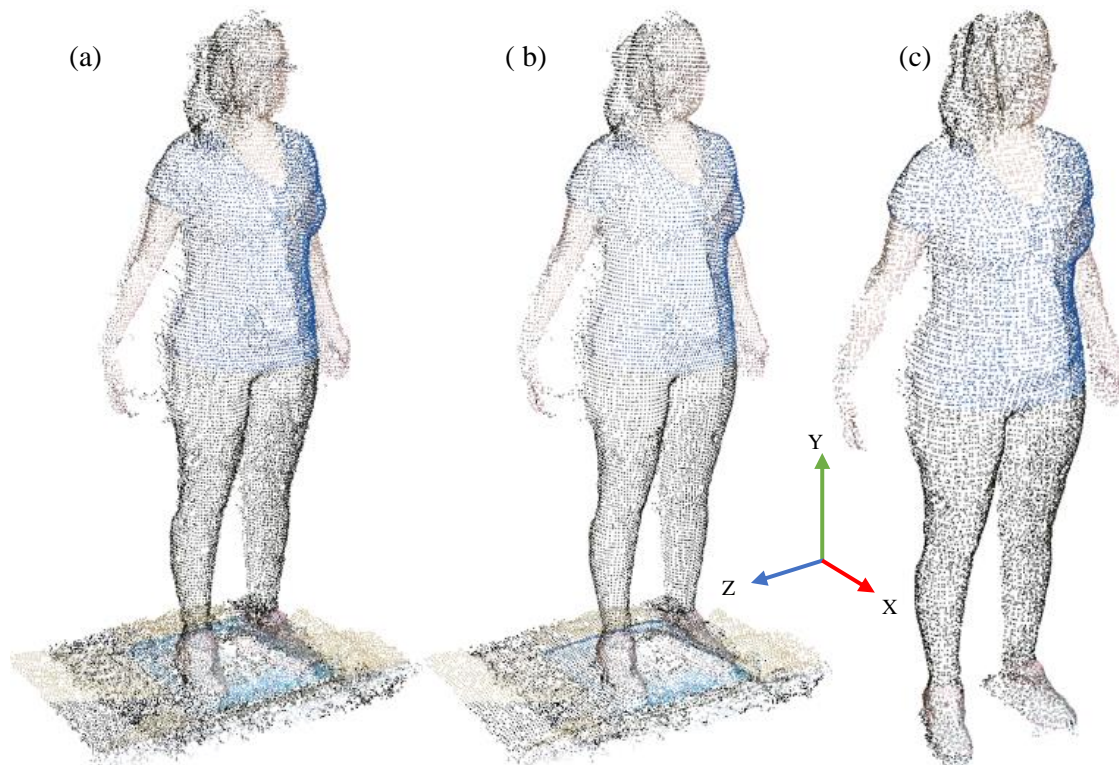


Figura 4.15: Generación del modelo final. Conjunto de datos registrados (a). Modelo con superficie redefinida S_P (b). Modelo Final (c).

4.10 Calculo de Datos Antropométricos

Para el cálculo dimensional basado en el modelo tridimensional generado, es el último paso del sistema propuesto, se estima la posición del punto máximo y mínimo de la nube de puntos con respecto al eje de elevación, en este caso, sobre el eje Y en un plano tridimensional. De esta manera, se calcula la altura máxima del modelo. Este dato nos permite, además, calcular un estimado del resto de las alturas requeridas. Se utilizaron las tablas antropométricas de Dreyfuss [94] para estimar los percentiles del resto de las alturas (**Figura 4.16**). El usuario puede modificar estas alturas calculadas automáticamente por el sistema, por alguna otra alguna altura en particular. Para el cálculo de anchuras, se seccionan las Alturas del modelo deseado, designado por las guías de alturas deseadas (**Figura 4.17**), por lo que se obtiene una periferia que es calculado utilizando un algoritmo de Convex Hull [95]. Los resultados son mostrados inmediatamente en pantalla (**Figura 4.18**). De igual manera, una vez calculada la dimensión deseada, el usuario puede volver a modificar las guías para recalcular las mediciones de altura y anchura del modelo.

4.10.1 Sistema de medición antropométrica propuesto

El sistema de medición antropométrica propuesto se representa en el diagrama de flujo general (**Figura 4.6**). El cual consiste en la medición de alturas, anchuras y talla del cuerpo humano. Para propósitos de experimentación, se calculas las mediciones del área troncal del cuerpo humano, descartando extremidades. La altura se los modelos se encuentran en el rango del eje Y en el espacio de coordenadas cartesianas (**Figura 4.17**). Dado P_S se desean estimar las estaturas dadas por las alturas $h_k = \{altura\ máxima, cabeza, hombros, pecho, cintura, cadera\}$. La rutina desarrollada para este proceso es el siguiente:

1. Dado el modelo a medir P_S se calcula la estatura máxima $h_{k=0}$.
2. Se calculan los segmentos h_k y h_k' , dado un factor de escala como referencia SF_i de los percentiles de medición [95].
3. Se calculan las anchuras y tallas de por cada segmento h_i .

4. Ajustado de las alturas $h_{i,adj} = h_i +/- adj$. Se desea una anchura del modelo P_S distinta a la proporcionada por el sistema.
5. Recalcular mediciones y almacenar datos antropométricos.

4.10.2 Calculo de Alturas

Se define cada segmento desde la base hasta el punto deseado, por tanto, se define $h_{k=0}$, como la altura desde la base de los pies hasta la coronilla (**Figura 4.17**), este se estima directamente con la función euclidiana:

$$h_k = \sqrt{(q_i^l \in P_S - p_i^l \in P_S)^2}, k = 0, l = Y \quad 4.14$$

Donde p y q representan el punto máximo y mínimo del conjunto P_S respectivamente en el plano ortogonal l . Para el resto de las mediciones $h_{k>0}$, se requiere encontrar el residual h'_k entre la altura máxima $h_{k=0}$ y la altura deseada $h_{k>0}$. La diferencia se calcula como:

$$h'_k = h_k * SF_k, i > 0 \quad 4.15$$

Donde SF_k define una magnitud escalar:

$$SF_k = \{(ref_{t,k=0} - ref_{t,k})/ref_{t,k=0}\} \quad 4.16$$

Sea $ref_{t,k}$, la altura de referencia requerida del perfil antropométrico seleccionado t , y k la referencia de las alturas obtenidas en las tablas antropométricas, por lo tanto $ref_{t,k=0}$ representa la altura máxima del perfil t (**Tabla 4.5**). Se selecciona el perfil que mejor se ajuste a la altura máxima del modelo:

$$t = \min_{\forall t} \{h_k - ref_{t,k}\}, k = 0$$

4.17

Por lo tanto, $h_k = h_{k=0} - h_k'$. El sistema propuesto no está restringido solamente a las cartas antropométricas de Dreyfuss, de igual manera, se pudieran utilizar cualquier otra carta antropométrica, que corresponda a la población que se desea analizar.

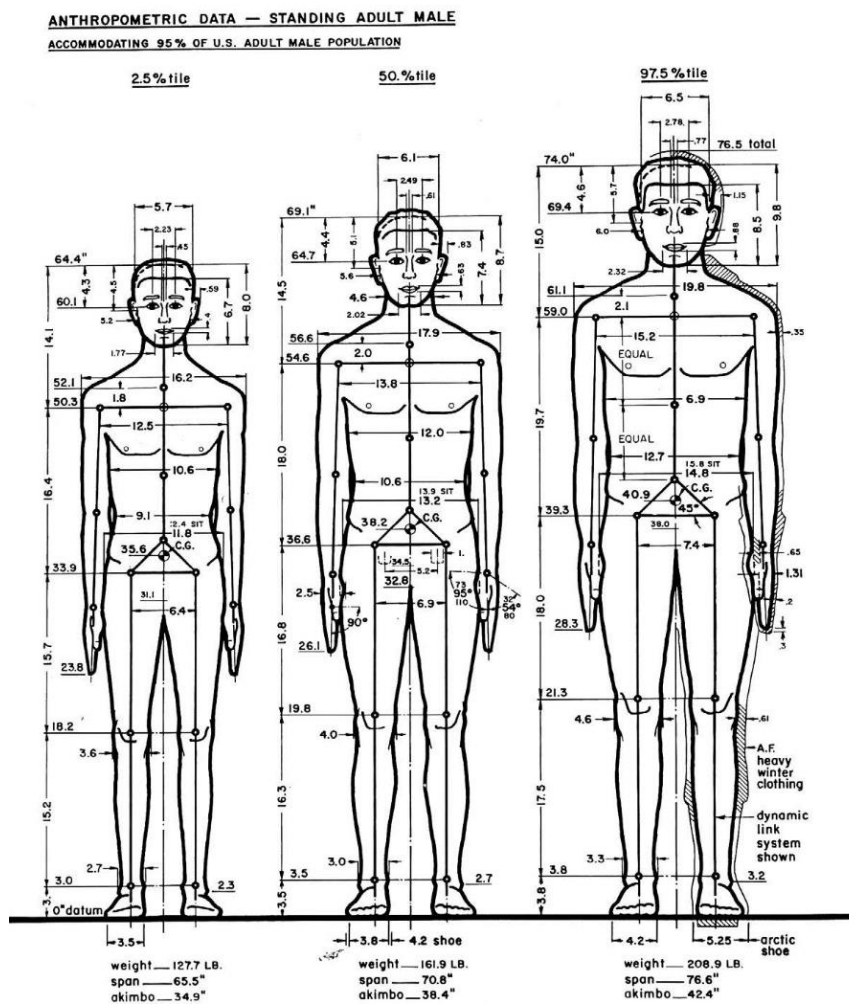


Figura 4.16: Tablas percentiles de Dreyfuss [94].

Tabla 4.5: Referencias para las alturas y anchuras contenidas en las tablas de medición antropométricas de Dreyfuss.

| k | Medición | Percentil (t) | | 50% (t=1) | | 97.5% (t=2) | |
|---|---------------|---------------|---------|-----------|---------|-------------|---------|
| | | 2.5% (t=0) | Alturas | Anchuras | Alturas | Anchuras | Alturas |
| 0 | Altura máxima | 163.6 | | 175.5 | | 188 | |
| 1 | Cabeza | 152.7 | 14.5 | 164.3 | 15.5 | 176.3 | 16.5 |
| 2 | hombros | 132.3 | 41.2 | 143.8 | 45.5 | 155.2 | 50.3 |
| 3 | pecho | 122.2 | 31.8 | 133.6 | 35.1 | 143.8 | 38.6 |
| 4 | cintura | 99.3 | 23.1 | 108.2 | 26.9 | 112 | 32.3 |
| 5 | cadera | 86.1 | 30 | 93 | 33.5 | 99.8 | 37.6 |

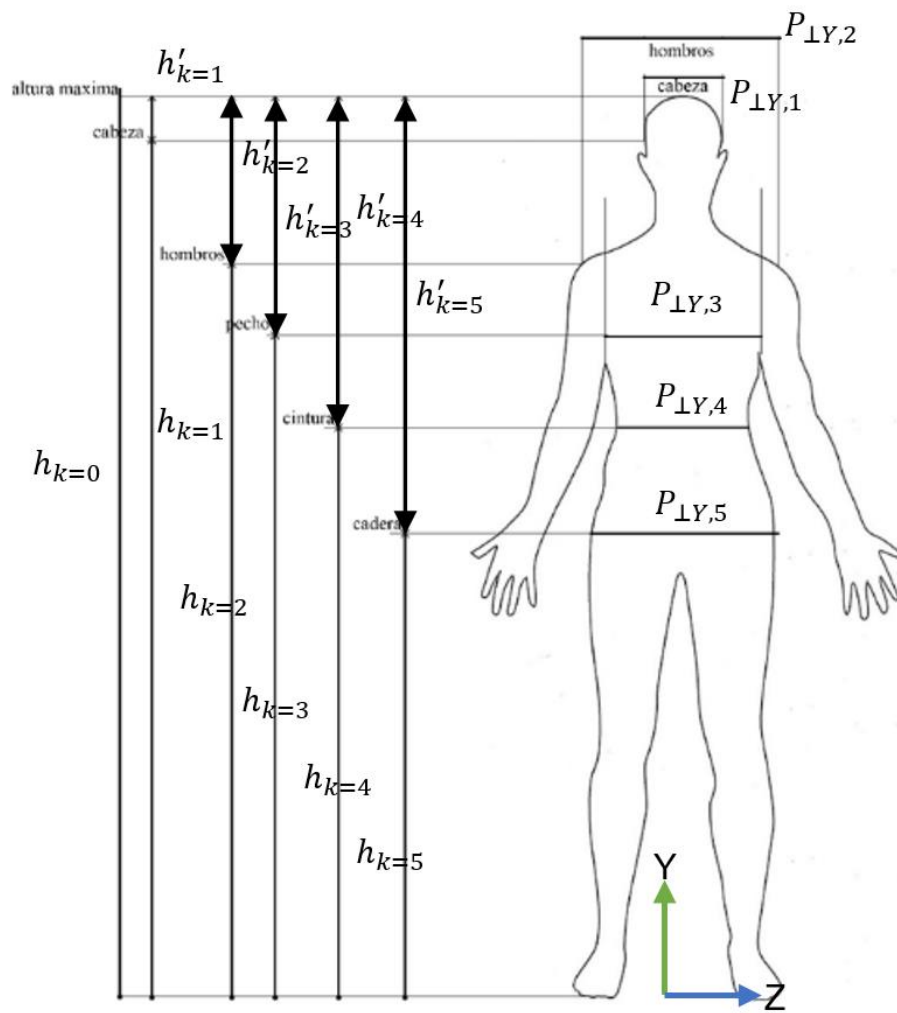


Figura 4.17: Segmentación en alturas y anchuras del esquema de medición propuesto.

4.10.3 Calculo de Anchuras

El cálculo de las mediciones de las anchuras se realiza de la siguiente manera:

1. Se secciona las anchuras del modelo a una altura definida por $h_{k>0} \pm 1\text{mm}$ de espesor (Figura 15), y se extraen los puntos resultantes en el conjunto $P_{s,k}$.
2. Los puntos $p_j \in P_{s,k}$, se proyectan perpendicular sobre el plano Y, esto para la obtención de un conjunto $P_{\perp Y,k}$ en un plano 2D (X, Z).
3. Dado los puntos $p_j \in P_{\perp Y,k}$ se extraen la posición los puntos mínimos y máximos sobre los ejes X, Z y se calcula la distancia euclidiana entre ellos, los residuales representan los valores de profundidad (X) y anchura (Z).

Para el cálculo de periferia o tallas se genera un polígono convexo del conjunto $P_{\perp Y,k}$ mediante el algoritmo de triangulación Delaunay [95, 96]. Este proceso consiste en calcular las distancias euclidianas entre cada punto del polinomio generado para la extracción de la periferia. De igual manera, se puede ajustar los valores de $h_{i,adj}$ y recalcular las mediciones de altura y anchura del modelo (**Figura 4.10**).

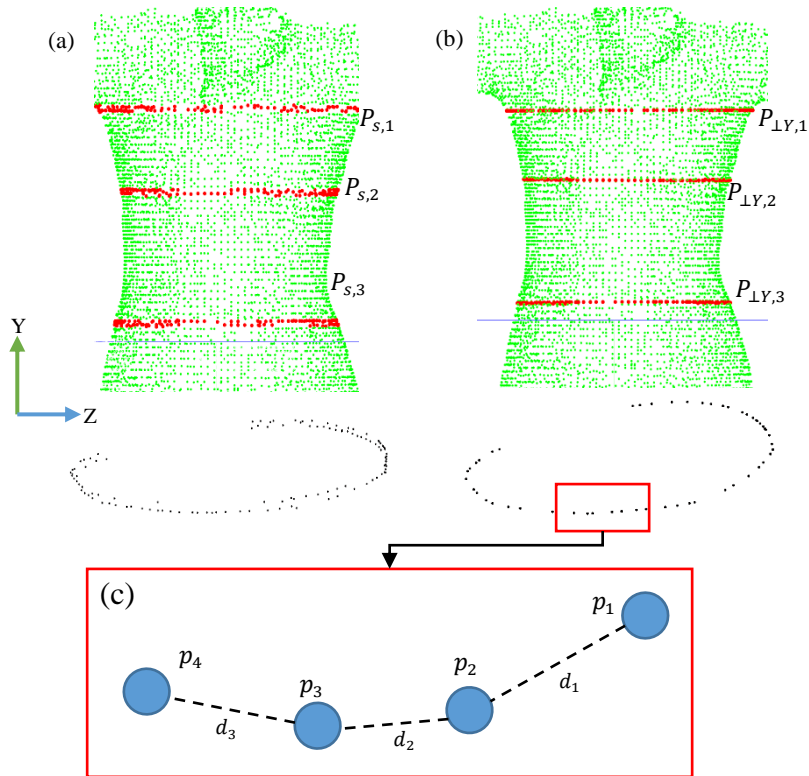


Figura 4.18: Procedimiento del cálculo automático de anchuras: segmentación del conjunto de la altura $h_i \pm 1mm$ (a). Proyección de los puntos segmentados sobre el plano Y (b). cálculo de perímetro del polígono que define la anchura y talla de h_i .

4.11 Cabinas de Medición Antropométricas

En este proceso el objetivo es obtener las mediciones reales de 25 participantes, que será el estándar dorado de comparación. Se optó por utilizar los módulos de medición ya que estos fueron diseñados por la compañía *Asiatech* (2015), que están específicamente diseñados para la toma de datos antropométricos, ya sean alturas, anchuras y alcances. Cada módulo cuenta cada una con dispositivo de medición con luz infrarroja para toma de medición (**Figura 4.20**). Se tomaron mediciones a 25 participantes adultos (mujeres jóvenes) en pose parado, con la parte superior del cuerpo en dos posiciones: posición en T (brazos extendidos, separados del dorso en un Angulo entre 45 y 60 grados) para la obtención de medidas de anchuras del dorso, y posición con codos de los antebrazos pegados al cuerpo con antebrazo hacia afuera, con el fin de obtener las mediciones de hombros. Las mediciones muestreadas

de alturas y anchuras se hicieron en referencia a las alturas representadas en las tablas antropométricas, y representan los valores de referencia con los que se validarán los datos arrojados el sistema de medición.

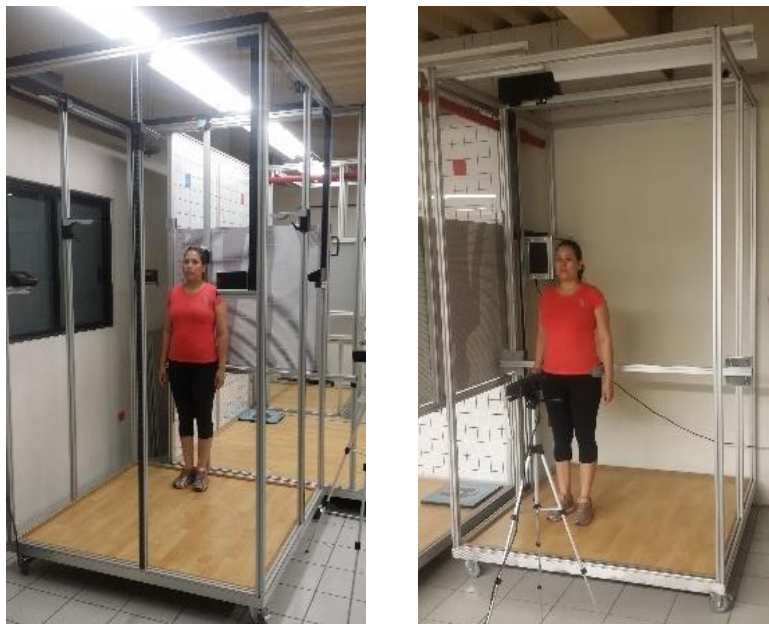


Figura 4.19: Cabinas de Medición Antropométricas: Módulo de medición de Alturas (izquierda). Módulo de medición de Anchuras (derecha).

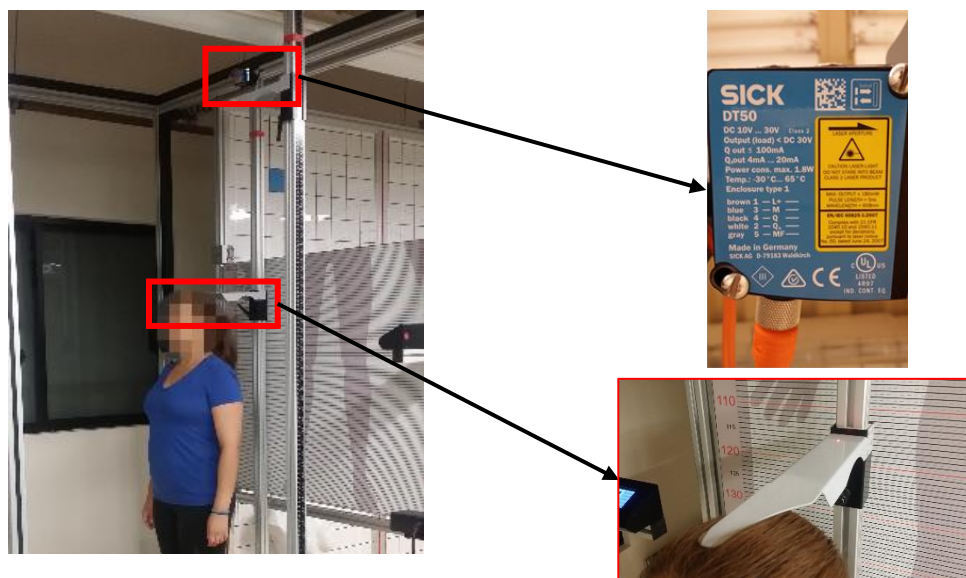


Figura 4.20: Cabinas de medición antropométrica. Cada módulo cuenta con un sensor infrarrojo para la medición SICK DT50.

Capítulo 5

Resultados

Se analizan las diferencias porcentuales entre los datos obtenidos en cabinas y los datos proporcionados por el sistema. Por participante, se obtuvo un tiempo promedio en la generación, procesamiento y medición del modelo 3D de alrededor 4.8 segundos, mientras que en las cabinas de medición antropométricas se obtuvo un promedio de 15 minutos, un 95% más que el sistema propuesto. Los datos promedio muestran un error promedio de 2.79 y 2.29 centímetros en las anchuras y alturas respectivamente (**Tabla 5.6**). Sin embargo, es notable como las mediciones promedio para las alturas mantienen una relativa uniformidad, en las anchuras existe una mayor variación de los datos, donde la medición de la cintura presenta la mayor variación en comparación con el resto, de lo cual se pueda deber al hecho de que ciertos participantes de la muestra, portaban prendas no apropiadas (prendas no completamente ajustadas al cuerpo). Los valores mínimos se presentaron en las anchuras de la cabeza y hombro, con un error del 3% promediado con respecto a las mediciones reales. En general se tiene un 93.52% de efectividad del sistema, con respecto al error promediado de 6.47% dada la muestra recabada. En condiciones donde la vestimenta es apropiada para mediciones antropométricas, se obtiene un error de hasta 0.35%, con una desviación promedio de 0.5 centímetros.

Tabla 5.6: Resultados de las diferencias porcentuales entre las 25 mediciones (cm) realizados en las cabinas de medición antropométricas y el sistema propuesto. Los datos mostrados en las columnas de Error y % (porcentaje), representan los valores promediados. En la parte final se presenta el promedio general del Error distal y porcentual.

| Medición | Alturas | | Medición | Anchuras | |
|-----------------------------------|----------------|-----------|----------------------------------|-----------------|-----------|
| | μ -Error | μ (%) | | μ -Error | μ (%) |
| máxima | 2.1112 | 1.5954 | cabeza | 0.6224 | 3.9768 |
| hombros | 2.1524 | 1.4507 | hombros | 1.5296 | 3.5082 |
| pecho | 2.1112 | 1.5954 | pecho | 3.0456 | 9.3031 |
| cintura | 2.1464 | 2.0114 | cintura | 4.4672 | 14.852 |
| cadera | 5.46 | 5.4083 | cadera | 3.0226 | 8.9986 |
| μ (general) | 2.7962 | 2.4123 | μ(general) | 2.5375 | 8.1278 |

5.1 Conclusiones

El arreglo de cuatro sensores Kinect controlado por el sistema propuesto arroja resultados favorables con un error relativamente mínimo, comparado con las mediciones reales. El tiempo de proceso promedio resulta conveniente, para los casos en los que se deseen evaluar una muestra más grande. Las pruebas con cuatro sensores permiten generar de manera aceptable un modelo tridimensional. El modelo de transformación inicial propuesto resulta satisfactorio dado que disminuye los ciclos de cálculo para el algoritmo ICP reflejados en el tiempo de proceso. Dados los resultados y el nivel de eficiencia, el sistema propuesto para la captura de datos antropométricos, tiene la capacidad calcular de manera satisfactoria las anchuras y alturas del cuerpo humano. Los datos obtenidos pueden ser utilizados para el diseño de instrumentación o estaciones de trabajo ergonómicas para el trabajador en la región. Existen otros métodos que se están considerando al momento de desarrollo de este documento para minimizar la desviación arrojada por el sistema y hacerlo más robusto, sin embargo, se considera para trabajo a futuro. Considerando el hecho que en el experimento, para la obtención de datos antropométricos con el método convencional se

utilizaron cabinas de medición de medición especialmente diseñadas para la obtención de dichos datos, por lo tanto el desarrollo de esta faceta en un entorno de trabajo clásico, donde no se tuvieran disponibles tales cabinas, hubiera resultado en un incremento en el tiempo de procesado, realizando las mediciones con métodos más rudimentarios con reglas y cintas de medición en el área del trabajador, o en su caso, acondicionado otra área en particular de la empresa para esta labor, lo que probablemente, incrementara además los costos del análisis antropométrico o ergonómico. Los datos finales se consideran satisfactorios en su primera entrega, y dichos datos serán implementados en análisis ergonómico automatizado en el mismo sistema propuesto, esto como trabajo en proceso para futuras entregas. Para la condición en la que se requiere que el Sistema genere datos en tiempo real, los resultados muestran un tiempo promedio entre proceso para cada participante de 4.8 segundos, lo que se considera un Sistema con una frecuencia de actualización relativamente bajo. Durante el experimento el sistema tuvo contratiempos para poder reconocer áreas en las cuales el sensor no pudo generar datos para la nube de puntos, como la parte posterior del cuerpo, debido al hecho que no se tiene ningún dispositivo colocado en esa posición. La parte superior de la cabeza (coronilla) y la parte inferior (pies) presentan niveles elevados de ruido, debido a las limitantes que presenta en ángulo de visión de la cámara de profundidad de cada sensor, los cuales en su gran mayoría son eliminados durante la etapa de filtrado. Sin embargo, esto no presenta una seria limitante para la estimación de las dimensiones. Una solución propuesta sería incrementar la cantidad de sensores necesarios para dichas áreas, pero esto incrementaría los costos del sistema.

5.2 Trabajo a futuro

Utilizando los mismos principios de programación aplicados al sistema Kinect, se tienen futuras implementaciones como el cálculo vectorial de las posiciones de extremidades y ángulos, en tiempo real, simulación de procesos en realidad virtual, entre otros, para su implementación en el área de Biomecánica y Ergonomía, así como su directa implementación en metodologías clásicas como RULA/REBA.

Referencias

- [1] Stephen Pheasant, Christine M. Haslegrave. *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the design of Work*. CRC Press. Tercera Edición. Pp 352. 2005
- [2] Occupational Safety and Health Administration. *Ergonomics: The study of work*. <http://www.osha.gov>. 2000. Acceso en Mayo, 5, 2017.
- [3] Centers for Disease Control and Prevention. *National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) anthropometry procedures manual*. USA: CDC. 2012.
- [4] Simmons, Karla Peavy. *Body shape analysis using three-dimensional body scanning technology*. NCSU 2002.
- [5] B. Molnár, CK Toth, A. Detrekői. Accuracy Test of Microsoft Kinect for Human Morphologic Measurements. *Sensors* Vol. 12. Num. 2, pp. 1437-1454. 2012.
- [6] Clarkson, S., Choppin, S., Hart, J., Heller, B., & Wheat, J. Calculating Inertia Body Segment Parameters from a Single Rapid Scan Using the Microsoft Kinect. *3rd International Conference on 3D Body Scanning Technologies*, pp. 153-163. Lugano, Switzerland. 2012. doi: 10.15221 / 14.
- [7] Pin Zhang, Shengfeng Qint and D. K. Wright. Novel Method of Capturing Static and Dynamic Anthropometric Data for Home Design. *EUROCON 2005*. pp. 562-565.
- [8] Robinette, K.M., Daanen, H. and Paquet, E. The CAESAR project: a 3-D surface anthropometry survey. *IEEE*. pp. 380-386. 1999.
- [9] Horejsi, P., Gorner, T., Kurkin, O., Polasek, P. and Januska, M. Using Kinect technology equipment for ergonomics. *MM Science Journal*, 389. 2013.
- [10] Galna, B., Barry, G., Jackson, D., Mhiripiri, D., Olivier, P. and Rochester, L. Accuracy of the Microsoft Kinect sensor for measuring movement in people with Parkinson's disease. *Gait & posture*, 39(4), pp.1062-1068. 2014.
- [11] Xu, X., Robertson, M., Chen, K.B., Lin, J.H. and McGorry, R.W. Using the Microsoft Kinect™ to assess 3-D shoulder kinematics during computer use. *Applied Ergonomics*. Vol. 65. pp 418-423. 2017.
- [12] Sun, H. M., Li, S. P., Zhu, Y. Q., & Hsiao, B. The effect of user's perceived presence and promotion focus on usability for interacting in virtual environments. *Applied ergonomics*, 50, 126-132.
- [13] Vignais, N., Miezal, M., Bleser, G., Mura, K., Gorecky, D. and Marin, F. Innovative system for real-time ergonomic feedback in industrial manufacturing. *Applied ergonomics*, 44(4), pp.566-574. 2013.

- [14] Markiewicz, Ł., Witkowski, M., Sitnik, R., & Mielicka, E. 3D anthropometric algorithms for the estimation of measurements required for specialized garment design. *Expert Systems with Applications*, 85, 366-385. 2017.
- [15] Liu, Z., Huang, J., Bu, S., Han, J., Tang, X., & Li, X. Template deformation-based 3-d reconstruction of full human body scans from low-cost depth cameras. *IEEE transactions on cybernetics*, 47(3), 695-708. 2017.
- [16] Diego-Mas, J. A., & Alcaide-Marzal, J. Using Kinect™ sensor in observational methods for assessing postures at work. *Applied ergonomics*, 45(4), 976-985. 2014.
- [17] Asiatech. Módulo de Medición y Análisis de Medidas Antropométricas y Biomecánicas. 2017. <http://www.asiatech.com.mx>. Acceso en Octubre 2017.
- [18] Stewart, A., Marfell-Jones, M., Olds, T., & Ridder, D. H. International Society for Advancement of Kinanthropometry. International standards for anthropometric assessment. Lower Hutt, New Zealand: International Society for the Advancement of Kinanthropometry, 50-3. 2011.
- [20] Farkas, L. G. Accuracy of anthropometric measurements: past, present, and future. *The Cleft palate-craniofacial journal*, 33(1), 10-22. 1996.
- [21] Radwin, Robert G., and Jonathan T. Haney. *An ergonomics guide to hand tools*. AIHA, 1996.
- [22] Chaurand, Rosalío Ávila, Lilia R. Prado León, and Elvia L. González Muñoz. *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana*. Universidad de Guadalajara, CUAAD, 2007.
- [23] Prado León, Lilia, and Rosalío Ávila Chaurand. *Factores Ergonómicos en el Diseño. Percepción Visual*. Editorial Universitaria, Universidad de Guadalajara. Guadalajara Mexico. Pp 2006.
- [24] Hartley, Richard, and Andrew Zisserman. "Multiple view geometry in computer vision." *Robotica* 23.2 (2005): 271-271.
- [25] Wasenmüller, Oliver, and Didier Stricker. "Comparison of kinect v1 and v2 depth images in terms of accuracy and precision." *Asian Conference on Computer Vision*. Springer, Cham, 2016.
- [26] Laurig, Wolfgang, and Joachim Vedder. "Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo." Capítulo 29 Ergonomía, <http://intranet.oit.org.pe/index.php>. Acceso en Noviembre 2017.
- [27] Panero, JuliusZelnik y MartínJulius Panero. *Las dimensiones humanas en los espacios interiores: estándares antropométricos*. Editorial Gustavo Gil. Séptima Edición. Pp 320. 1984.
- [28] Smith, M. J., Stammerjohn, L. W., Cohen, B. G., & Lalich, N. R. Job stress in video display operations. *Ergonomic Aspects of Visual Display Terminals*, 201-210. 1980.

- [29] Openshaw S, Taylor E. Ergonomics and design a reference guide. Allsteel Inc., Muscatine, Iowa. 2006.
- [30] Turner, Robert G. "Consistency, self-consciousness, and the predictive validity of typical and maximal personality measures." *Journal of Research in Personality* Vol.12, Num.1, pp.117-132. 1978.
- [31] Hertzberg, Hans Theodore Edward. *Anthropometric Survey of Turkey, Greece and Italy*. No. 73. Blackwell Publishing Ltd. DOI:10.1111/an.1960.1.7.6.2. 1963.
- [32] Smith, B., Crowell, B., Ozgur, O., Goetchuis, E., Newby, N., & Scott, J. Non-Invasive 3-Dimensional Facial Modeling for the Quantification of Facial Edema. *The FASEB Journal*, 31(1 Supplement), 849-1. 2017.
- [33] Medina-Inojosa, J., Somers, V. K., Ngwa, T., Hinshaw, L., & Lopez-Jimenez, F. Reliability of a 3D Body Scanner for Anthropometric Measurements of Central Obesity. *Obesity*, open access, 2(3). 2016.
- [34] Caroline A.A. Beaumont, Paul G.M. Knoop, Alessandro Borghi, N.U. Owase Jeelani, Maarten J. Koudstaal, Silvia Schievano, David J. Dunaway, Naiara Rodriguez-Florez, Three-dimensional surface scanners compared with standard anthropometric measurements for head shape, In *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, Volume 45, Issue 6, pp 921-927. 2017
- [35] Sanders, M. S., & McCormick, E. J. *Human factors in engineering and design*. McGraw-Hill. 1987.
- [36] Bridger, R. S *Introduction to ergonomics* (Third edition). Boca Raton, [Florida] London, [England] New York CRC Press, 2009.
- [37] Fan, Jintu, Winnie Yu, and Lawrence Hunter. *Clothing appearance and fit: Science and technology*. Elsevier, 2004.
- [38] Blackwell, Sherri, et al. *Civilian American and European Surface Anthropometry Resource (CAESAR)*. Volume 2: Descriptions. SYTRONICS INC DAYTON OH, 2002.
- [39] Daanen, Hein AM, and Frank B. Ter Haar. 3D whole body scanners revisited. *Displays*, vol. 34, num. 4, pp 270-275. 2013.
- [40] Fairhurst, Catherine, ed. *Advances in apparel production*. Elsevier, 2008.
- [41] D'Apuzzo, Hometrica Consulting-Dr Nicola. *3D Body Scanning Technologies*. 5th International Conference on 3D Body Scanning Technologies. 2014.
- [42] Espitia-Contreras, Alvaro, Pedro Sanchez-Caiman, and Alvaro Uribe-Quevedo. "Development of a Kinect-based anthropometric measurement application." *Virtual Reality (VR)*, 2014 IEEE. IEEE, 2014.
- [43] Nambiar, Athira M., et al. Towards View-point Invariant Person Re-identification via Fusion of Anthropometric and Gait Features from Kinect Measurements." *VISIGRAPP (5: VISAPP)*. 2017.

- [44] Kale Moyano, R. Human gait characterization using Kinect. 2015.
- [45] Dutta, Tilak. Evaluation of the Kinect™ sensor for 3-D kinematic measurement in the workplace. *Applied ergonomics* 43.4 (2012): 645-649. 2012.
- [46] Geerse, Daphne J., Bert H. Coolen, and Melvyn Roerdink. "Kinematic validation of a multi-kinect v2 instrumented 10-meter walkway for quantitative gait assessments." *PloS one* 10.10 : e0139913. 2015.
- [47] Plantard, Pierre, Hubert PH Shum, Anne-Sophie Le Pierres, and Franck Multon. Validation of an ergonomic assessment method using Kinect data in real workplace conditions. *Applied ergonomics*. 2016.
- [48] Lawin, F. Järemo. Depth data processing and 3D reconstruction using the Kinect v2. Diss. Master's thesis, Linköping University, 2015.
- [49] Pfister, Alexandra, Alexandre M. West, Shaw Bronner, and Jack Adam Noah. Comparative abilities of Microsoft Kinect and Vicon 3D motion capture for gait analysis. *Journal of medical engineering & technology* 38, no. 5, pp. 274-280. 2014.
- [50] Brecher, C., Breitbach, T., Müller, S., Mayer, M. P., Odenthal, B., Schlick, C. M., & Herfs, W. (2012). 3D assembly group analysis for cognitive automation. *Journal of Robotics*, 2012.
- [51] Li, I-Hsum, Wei-Yen Wang, Yi-Hsing Chien, and Nai-Hong Fang. "Autonomous ramp detection and climbing systems for tracked robot using Kinect sensor." *International Journal of Fuzzy Systems* 15, no. 4, pp 452-459. 2013.
- [52] Guangsong, Li, and Luo Jiehong. "A Method of Reconstruction Based on Kinect Depth Camera." *Journal of Applied Sciences* 13, no. 19, pp: 3968-3974. 2013.
- [53] González-Ortega, D., Díaz-Pernas, F. J., Martínez-Zarzuela, M., & Antón-Rodríguez, M. A Kinect-based system for cognitive rehabilitation exercises monitoring. *Computer methods and programs in biomedicine*, 113(2), 620-631. 2014.
- [54] Canessa, Andrea, Manuela Chessa, Agostino Gibaldi, Silvio P. Sabatini, and Fabio Solari. "Calibrated depth and color cameras for accurate 3D interaction in a stereoscopic augmented reality environment." *Journal of Visual Communication and Image Representation* 25, no. 1. pp: 227-237. 2014.
- [55] Japar, S., Manaharan, T., Shariff, A. A., Mohamed, A. M., & Merican, A. F. M. A. Assessment of Abdominal Obesity using 3D Body Scanning Technology. *Sains Malaysiana*, 46(4), 567-573. 2017.
- [56] Xu, X., Robertson, M., Chen, K. B., Lin, J. H., & McGorry, R. W. Using the Microsoft Kinect™ to assess 3-D shoulder kinematics during computer use. *Applied Ergonomics*. 2017.

- [57] Buys, K., Cagniard, C., Baksheev, A., De Laet, T., De Schutter, J., & Pantofaru, C. An adaptable system for RGB-D based human body detection and pose estimation. *Journal of visual communication and image representation*, 25(1), 39-52. 2014.
- [58] Yang, L., Zhang, L., Dong, H., Alelaiwi, A., & El Saddik, A. Evaluating and improving the depth accuracy of Kinect for Windows v2. *IEEE Sensors Journal*, 15(8), 4275-4285. 2015.
- [59] Nguyen-Luc Dao (2014). "Fast and Automatic Human Body Circular Measurement Based on A Single Kinect". DOI: 10.1109/APSIPA.2014.7041571. Conference: ASIPA ASC, At Cambodia.
- [60] Dominio, F., Donadeo, M., & Zanuttigh, P. Combining multiple depth-based descriptors for hand gesture recognition. *Pattern Recognition Letters*, 50, 101-111. 2014.
- [61] Yeung, L. F., Kenneth C. Cheng, C. H. Fong, Winson CC Lee, and Kai-Yu Tong. "Evaluation of the Microsoft Kinect as a clinical assessment tool of body sway." *Gait & posture* 40, no. 4, pp: 532-538. 2014.
- [62] Oh, J. Y., Choi, H. S., Jung, S. H., Kim, H. S., & Shin, H. Y. Development of Pallet Recognition System using Kinect Camera. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 9(4), pp. 227-232. 2014.
- [63] Zannatha, J. M. I., Tamayo, A. J. M., Sánchez, Á. D. G., Delgado, J. E. L., Cheu, L. E. R., & Arévalo, W. A. S. Development of a system based on 3D vision, interactive virtual environments, ergonomic signals and a humanoid for stroke rehabilitation. *Computer methods and programs in biomedicine*, 112(2), 239-249. 2013.
- [64] Kondori, F. A., Yousefi, S., & Li, H. Direct three-dimensional head pose estimation from Kinect-type sensors. *Electronics Letters*, 50(4), 268-270. 2014.
- [65] Huang, S. H., & Pan, Y. C. Ergonomic job rotation strategy based on an automated RGB-D anthropometric measuring system. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(4), 699-710. 2014.
- [66] Chang, J. Y., & Nam, S. W. (2013). Fast Random-Forest-Based Human Pose Estimation Using a Multi-scale and Cascade Approach. *ETRI Journal*, 35(6), 949-959.
- [67] Clark, R. A., Pua, Y. H., Fortin, K., Ritchie, C., Webster, K. E., Denehy, L., & Bryant, A. L. Validity of the Microsoft Kinect for assessment of postural control. *Gait & posture*, 36(3), 372-377. 2012.
- [68] Plantard, Pierre, Edouard Auvinet, Anne-Sophie Le Pierres, and Franck Multon. "Pose estimation with a kinect for ergonomic studies: Evaluation of the accuracy using a virtual mannequin." *Sensors* 15, no. 1, pp. 1785-1803. 2015.
- [69] Bonnechere, B., Jansen, B., Salvia, P., Bouzahouene, H., Sholukha, V., Cornelis, J., Van Sint Jan, S. Determination of the precision and accuracy of

morphological measurements using the Kinect™ sensor: Comparison with standard stereophotogrammetry. *Ergonomics*, 57(4), 622-631. 2014.

- [70] Lothar P. The Innovative 3D Spine Form Analysis and Parametrization of Scoliosis, Lordosis, Kyphosis and Malposition with TERGOSKOP. 1st International Conference on 3D Body Scanning Technologies. Switzerland. 2010.
- [71] Rahman, Mansib. Beginning Microsoft Kinect for Windows SDK 2.0: Motion and Depth Sensing for Natural User Interfaces. Apress. USA. 2017.
- [72] Wulf, O., & Wagner, B. Fast 3D scanning methods for laser measurement systems. In International conference on control systems and computer science (CSCS14) (pp. 2-5). 2003
- [73] Maurer M. (2012). "VITUS 3D Body Scanner". Asian Workshop on 3D Body Scanning Technologies, Tokyo, Japan, 17-18 April 2012.
- [74] Daniell, N. A comparison of the accuracy of the Vitus Smart® and Hamamatsu Body Line® 3D whole-body scanners. In Kinanthropometry X: Proc. of the 10th International Society for the Advancement of Kinanthropometry Conference (pp. 39-54). 2007.
- [75] Rusu, R. B., & Cousins, S. 3d is here: Point cloud library (pcl). In Robotics and automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on (pp. 1-4). IEEE. 2011.
- [76] Rusu, R. B., Blodow, N., & Beetz, M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration. In Robotics and Automation. ICRA. IEEE International Conference on (pp. 3212-3217). IEEE. 2009.
- [77] Rusu, R. B., Marton, Z. C., Blodow, N., & Beetz, M. Learning informative point classes for the acquisition of object model maps. In Control, Automation, Robotics and Vision, 2008. ICARCV 2008. 10th International Conference on (pp. 643-650). IEEE. 2008.
- [78] Rusu, R. B., Blodow, N., Marton, Z. C., & Beetz, M. Aligning point cloud views using persistent feature histograms. In Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on (pp. 3384-3391). IEEE. 2008.
- [79] Holz, D., Ichim, A. E., Tombari, F., Rusu, R. B., & Behnke, S. Registration with the point cloud library: A modular framework for aligning in 3-d. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 22(4), 110-124. 2015.
- [80] Jana, Abhijit. Kinect for windows SDK programming guide. Packt Publishing Ltd, 2012.
- [81] Webb, Jarrett, and James Ashley. Beginning Kinect Programming with the Microsoft Kinect SDK. Apress, 2012.

- [82] Xiang, L., F. Echtler, C. Kerl, and T. Wiedemeyer. "Lars, hanyazou, R. Gordon, F. Facioni, laborer R. Wareham, M. Goldhoorn, alberth, gaborpapp, S. Fuchs, jmtatsch, J. Blake, Federico, H. Jungkurth, Y. Mingze, vinouz, D. Coleman, B. Burns, R. Rawat, S. Mokhov, P. Reynolds, P. Viau, M. Fraissinet-Tachet, Ludique, J. Billingham, and Alistair. libfreenect2: Release 0.2 (2016).
- [83] Salemi, Peter, Barry L. Nelson, and Jeremy Staum. Moving Least Squares Regression for High-Dimensional Stochastic Simulation Metamodeling. *ACM TOMACS* 26, no. 3. pag. 16. 2016.
- [84] Kaehler, Adrian, and Gary Bradski. *Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, Inc., 2016.
- [85] Corti, Andrea, Silvio Giancola, Giacomo Mainetti, and Remo Sala. "A metrological characterization of the Kinect V2 time-of-flight camera." *Robotics and Autonomous Systems*. Vol. 75, pp. 584-594. 2016.
- [86] Goldstein, Herbert. *Classical mechanics*. Pearson Education India, 2011.
- [87] George B. Arfken and Hans J. Weber. *Mathematical Methods for Physicists*, 4th ed. *American Journal of Physics* 1999 67:2, 165-169
- [88] Wang, J., Lindenbergh, R. C., & Menenti, M. (2015). Evaluating voxel enabled scalable intersection of large point clouds. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-3/W5, 2015, *ISPRS Geospatial Week 2015*, 28 Sep–03 Oct 2015, La Grande Motte, France.
- [89] Chen, Y. and Medioni, G. Object modelling by registration of multiple range images. *Image and vision computing*, 10(3), pp.145-155. 1992.
- [90] Besl, P. J., & McKay, N. D. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 14(2), 239-256. 1992.
- [91] Rusinkiewicz, Szymon, and Marc Levoy. Efficient variants of the ICP algorithm. *3-D Digital Imaging and Modeling*, 2001. *Third International Conference on IEEE*, 2001.
- [92] Ichim, A. E. *Point Cloud Library-Toyota Code Sprint Final Report*. 2012.
- [93] Hulik, Rostislav, Vitezslav Beran, Michal Spanel, Premysl Krsek, and Pavel Smrz. "Fast and accurate plane segmentation in depth maps for indoor scenes." In *Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ*, pp. 1665-1670. 2012.
- [94] Tilley, Alvin R. *The measure of man and woman: human factors in design*. Vol. 1. John Wiley & Sons, 2002.
- [95] Akl, S. G., & Toussaint, G. T. A fast convex hull algorithm. *Information processing letters*, 7(5), 219-222. 1978.
- [96] O'Rourke, J., & Mallinckrodt, A. J. Computational geometry in C. *Computers in Physics*, 9(1), 55-55. 1995.

Anexos

Anexo 1.1: Detalle de mediciones de 25 participantes con vestimenta regular.

| Medición | Coronilla/Pe | | | | | | Hombros | | | | | | Cabeza | | | | | | Pecho | | | | | |
|-------------------|----------------|----------------|--------------|---------------|-----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|--------------|-----------------|---------------|--------------|--------------|----------------|----------------|-----------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|-----------------|-------------|
| | Altura Max. | | Espesor | | Enclitidm Error | | Altura | | Espesor | | Enclitidm Error | | Altura | | Espesor | | Enclitidm Error | | Altura | | Espesor | | Enclitidm Error | |
| | Cabina | Kinect3D | %Error | Cabina | Kinect3D | %Error | Cabina | Kinect3D | %Error | Cabina | Kinect3D | %Error | Cabina | Kinect3D | %Error | Cabina | Kinect3D | %Error | Cabina | Kinect3D | %Error | Cabina | Kinect3D | %Error |
| <i>J</i> | 190.30 | 191.15 | 0.85 | 17.40 | 16.18 | 1.22 | 153.00 | 157.82 | 3.15 | 47.60 | 43.85 | 3.75 | 7.88 | 7.88 | 138.20 | 137.09 | 1.11 | 0.80 | 36.00 | 39.16 | 8.78 | 3.16 | 3.16 | 8.78 |
| <i>K</i> | 175.00 | 175.44 | 0.44 | 15.60 | 15.56 | 0.04 | 142.00 | 143.70 | 1.20 | 39.70 | 39.52 | 0.18 | 0.45 | 0.45 | 130.00 | 133.55 | 3.55 | 2.73 | 29.70 | 30.70 | 1.00 | 3.37 | 3.37 | 8.78 |
| <i>L</i> | 172.00 | 176.93 | 4.93 | 17.40 | 17.79 | 0.39 | 142.00 | 144.76 | 2.46 | 42.50 | 42.89 | 0.39 | 0.92 | 0.92 | 124.80 | 127.37 | 2.57 | 2.06 | 32.00 | 33.74 | 1.74 | 5.44 | 5.44 | 8.78 |
| <i>M</i> | 181.20 | 179.00 | 2.20 | 16.70 | 17.42 | 0.72 | 152.00 | 146.09 | 5.91 | 3.89 | 45.30 | 48.00 | 2.70 | 5.96 | 442.20 | 138.00 | 4.20 | 2.95 | 32.00 | 33.80 | 1.10 | 3.36 | 3.36 | 8.78 |
| <i>N</i> | 176.00 | 175.50 | 0.50 | 15.60 | 16.46 | 0.86 | 145.40 | 143.75 | 1.65 | 1.13 | 43.20 | 43.92 | 0.72 | 3.83 | 132.20 | 132.69 | 0.49 | 0.37 | 31.00 | 30.45 | 0.55 | 1.77 | 1.77 | 8.78 |
| <i>O</i> | 172.80 | 171.61 | 1.19 | 14.10 | 14.50 | 0.40 | 139.10 | 140.56 | 1.46 | 1.05 | 39.30 | 37.36 | 1.94 | 4.94 | 128.60 | 130.63 | 2.03 | 1.58 | 30.90 | 32.50 | 1.60 | 5.18 | 5.18 | 8.78 |
| <i>P</i> | 166.50 | 165.07 | 1.43 | 15.80 | 16.42 | 0.62 | 137.30 | 133.53 | 3.77 | 2.25 | 41.90 | 45.97 | 4.07 | 9.71 | 125.00 | 124.00 | 1.00 | 0.80 | 33.30 | 32.96 | 0.34 | 1.02 | 1.02 | 8.78 |
| <i>Q</i> | 182.60 | 179.65 | 2.95 | 15.10 | 16.42 | 1.32 | 144.80 | 147.15 | 2.35 | 1.62 | 44.20 | 42.10 | 2.10 | 4.75 | 130.20 | 136.75 | 6.55 | 5.03 | 34.30 | 36.15 | 1.85 | 5.39 | 5.39 | 8.78 |
| <i>R</i> | 187.50 | 183.89 | 3.41 | 16.00 | 16.76 | 0.76 | 153.10 | 151.83 | 1.27 | 0.83 | 43.10 | 47.35 | 4.25 | 9.86 | 134.60 | 140.65 | 6.05 | 4.49 | 38.30 | 37.66 | 0.64 | 1.67 | 1.67 | 8.78 |
| <i>S</i> | 170.70 | 172.46 | 1.76 | 14.50 | 13.95 | 0.55 | 141.70 | 141.26 | 0.44 | 0.31 | 41.50 | 43.08 | 1.58 | 3.81 | 128.60 | 131.28 | 2.68 | 2.08 | 28.20 | 32.06 | 3.86 | 13.69 | 13.69 | 8.78 |
| <i>T</i> | 180.10 | 182.27 | 2.17 | 12.00 | 14.50 | 2.50 | 151.40 | 150.49 | 0.91 | 0.60 | 43.20 | 45.05 | 1.85 | 4.28 | 139.30 | 139.41 | 0.11 | 0.08 | 33.00 | 34.75 | 1.75 | 5.30 | 5.30 | 8.78 |
| <i>U</i> | 171.60 | 175.98 | 4.38 | 14.70 | 15.85 | 1.15 | 142.00 | 142.74 | 0.74 | 0.52 | 41.20 | 38.86 | 2.34 | 5.68 | 130.30 | 133.96 | 3.66 | 2.81 | 29.90 | 29.75 | 0.15 | 5.00 | 5.00 | 8.78 |
| <i>V</i> | 176.10 | 177.08 | 0.98 | 15.30 | 15.80 | 0.50 | 145.60 | 145.05 | 0.55 | 0.38 | 41.10 | 40.78 | 0.32 | 0.78 | 136.20 | 134.79 | 1.41 | 1.04 | 29.60 | 33.55 | 3.95 | 13.34 | 13.34 | 8.78 |
| <i>W</i> | 176.00 | 177.77 | 1.77 | 17.00 | 17.30 | 0.30 | 148.30 | 145.65 | 2.65 | 1.79 | 42.30 | 43.31 | 1.01 | 2.39 | 134.00 | 135.32 | 1.32 | 0.99 | 32.60 | 34.90 | 2.30 | 7.06 | 7.06 | 8.78 |
| <i>X</i> | 183.00 | 182.13 | 0.87 | 15.70 | 16.16 | 0.46 | 149.50 | 150.38 | 0.88 | 0.59 | 48.60 | 48.33 | 0.27 | 0.56 | 125.60 | 127.24 | 1.64 | 1.31 | 34.40 | 39.15 | 4.75 | 13.81 | 13.81 | 8.78 |
| <i>Y</i> | 172.00 | 173.99 | 1.99 | 15.50 | 14.99 | 0.51 | 143.70 | 142.51 | 1.19 | 0.83 | 44.50 | 42.00 | 2.50 | 5.62 | 135.10 | 134.68 | 0.42 | 0.31 | 34.40 | 34.87 | 0.47 | 0.49 | 0.49 | 8.78 |
| <i>Z</i> | 176.00 | 176.27 | 0.27 | 15.70 | 16.67 | 0.97 | 144.10 | 144.38 | 0.28 | 0.19 | 44.90 | 45.36 | 0.46 | 1.02 | 130.50 | 133.50 | 3.00 | 2.30 | 34.60 | 39.92 | 5.32 | 15.38 | 15.38 | 8.78 |
| <i>AA</i> | 175.00 | 176.66 | 1.66 | 14.50 | 14.40 | 0.10 | 148.00 | 144.70 | 3.30 | 2.23 | 42.10 | 43.05 | 0.95 | 2.26 | 128.70 | 128.47 | 0.23 | 0.18 | 30.10 | 35.85 | 5.75 | 19.10 | 19.10 | 8.78 |
| <i>AB</i> | 185.00 | 184.40 | 0.60 | 16.00 | 15.49 | 0.51 | 155.50 | 152.25 | 3.25 | 2.09 | 44.30 | 44.29 | 0.01 | 0.02 | 134.00 | 135.64 | 1.64 | 1.22 | 33.00 | 36.79 | 3.79 | 11.48 | 11.48 | 8.78 |
| <i>AC</i> | 178.00 | 177.12 | 0.88 | 16.10 | 16.81 | 0.71 | 151.00 | 148.08 | 2.92 | 1.93 | 46.10 | 46.42 | 0.32 | 0.69 | 134.30 | 135.39 | 1.09 | 0.81 | 35.50 | 40.86 | 5.36 | 15.10 | 15.10 | 8.78 |
| <i>AD</i> | 173.00 | 175.79 | 2.79 | 16.40 | 16.75 | 0.35 | 150.90 | 146.00 | 4.90 | 3.25 | 42.40 | 42.16 | 0.24 | 0.57 | 131.90 | 134.14 | 2.24 | 1.70 | 34.50 | 38.98 | 4.48 | 12.99 | 12.99 | 8.78 |
| <i>AE</i> | 183.00 | 185.54 | 2.54 | 13.90 | 14.85 | 0.95 | 154.30 | 153.19 | 1.11 | 0.72 | 44.60 | 44.45 | 0.15 | 0.34 | 137.70 | 136.81 | 0.89 | 0.65 | 32.40 | 36.57 | 4.17 | 12.87 | 12.87 | 8.78 |
| <i>AF</i> | 177.00 | 180.10 | 3.10 | 14.30 | 14.23 | 0.07 | 148.80 | 148.32 | 0.48 | 0.32 | 46.80 | 48.75 | 1.95 | 4.17 | 135.00 | 137.90 | 2.90 | 2.15 | 33.50 | 39.69 | 6.19 | 18.48 | 18.48 | 8.78 |
| <i>AG</i> | 182.00 | 183.44 | 1.44 | 15.40 | 15.96 | 0.56 | 153.75 | 151.46 | 2.29 | 1.49 | 45.70 | 43.95 | 1.75 | 3.83 | 138.40 | 139.79 | 1.39 | 1.00 | 34.40 | 39.71 | 5.31 | 15.44 | 15.44 | 8.78 |
| <i>AH</i> | 179.00 | 180.78 | 1.78 | 16.10 | 15.19 | 0.91 | 150.60 | 148.07 | 2.53 | 1.68 | 45.30 | 43.76 | 1.54 | 3.40 | 137.00 | 137.61 | 0.61 | 0.45 | 31.80 | 38.66 | 6.86 | 21.57 | 21.57 | 8.78 |
| AVG | 177.648 | 178.401 | 1.875 | 15.620 | 15.882 | 0.622 | 147.536 | 146.549 | 2.152 | 1.451 | 43.620 | 43.782 | 1.530 | 3.508 | 132.896 | 134.266 | 2.111 | 1.595 | 32.816 | 35.727 | 3.046 | 9.303 | 9.303 | 8.78 |
| SD | 5.670 | 5.269 | 1.208 | 0.692 | 1.038 | 0.356 | 5.097 | 4.954 | 1.524 | 1.011 | 2.360 | 2.856 | 2.873 | 4.649 | 4.199 | 1.685 | 1.273 | 2.337 | 3.286 | 3.286 | 2.112 | 6.466 | 6.466 | 8.78 |
| Std. Error | 1.13 | 1.05 | 0.24 | 0.14 | 0.18 | 0.07 | 1.02 | 0.99 | 0.30 | 0.20 | 0.47 | 0.57 | 0.25 | 0.57 | 0.93 | 0.84 | 0.34 | 0.25 | 0.47 | 0.66 | 0.42 | 0.42 | 0.42 | 8.78 |

participantes

Anexo 1.1: Detalle de mediciones de 25 participantes con vestimenta regular. (continuación)

| Medición | Cámara | | | | | | Cadena | | | | | | | | | |
|------------|---------|----------|-----------------|---------|-----------------|--------|--------|----------|-----------------|---------|-----------------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | Altura | | | Espesor | | | Altura | | | Espesor | | | | | | |
| | Cabina | Kinect3D | Euclidian Error | %Error | Euclidian Error | %Error | Cabina | Kinect3D | Euclidian Error | %Error | Euclidian Error | %Error | | | | |
| 1 | 116.10 | 114.22 | 1.88 | 1.62 | 33.60 | 38.45 | 4.85 | 14.43 | 103.70 | 101.79 | 1.91 | 1.84 | 34.00 | 39.70 | 5.70 | 16.76 |
| 2 | 104.00 | 107.98 | 3.98 | 3.83 | 26.80 | 32.95 | 6.15 | 22.95 | 93.20 | 92.77 | 0.43 | 0.46 | 32.00 | 34.16 | 2.16 | 6.75 |
| 3 | 102.80 | 109.07 | 6.27 | 6.10 | 32.50 | 36.76 | 4.26 | 13.11 | 94.90 | 93.71 | 1.19 | 1.25 | 31.00 | 36.78 | 5.78 | 18.65 |
| 4 | 111.80 | 110.14 | 1.66 | 1.48 | 31.40 | 35.04 | 3.64 | 11.59 | 100.50 | 94.62 | 5.88 | 5.85 | 33.30 | 35.88 | 2.58 | 7.75 |
| 5 | 106.60 | 107.46 | 0.86 | 0.81 | 28.00 | 32.91 | 4.91 | 17.54 | 92.60 | 92.32 | 0.28 | 0.30 | 35.60 | 36.31 | 0.71 | 1.99 |
| 6 | 105.10 | 104.83 | 0.27 | 0.26 | 31.10 | 34.64 | 3.54 | 11.38 | 88.70 | 90.00 | 1.30 | 1.47 | 31.10 | 34.67 | 3.57 | 11.48 |
| 7 | 99.80 | 101.56 | 1.76 | 1.76 | 29.90 | 34.22 | 4.32 | 14.45 | 82.30 | 88.00 | 5.70 | 6.93 | 33.80 | 35.53 | 1.73 | 5.12 |
| 8 | 108.30 | 111.30 | 3.00 | 2.77 | 30.20 | 34.51 | 4.31 | 14.27 | 94.50 | 95.48 | 0.98 | 1.04 | 38.30 | 36.16 | 2.14 | 5.59 |
| 9 | 112.10 | 108.53 | 3.57 | 3.18 | 31.30 | 35.62 | 4.32 | 13.80 | 90.20 | 96.72 | 6.52 | 7.23 | 36.20 | 36.77 | 0.57 | 1.57 |
| 10 | 104.40 | 106.32 | 2.02 | 1.94 | 25.50 | 32.45 | 6.95 | 27.25 | 95.70 | 91.35 | 4.35 | 4.55 | 30.50 | 32.78 | 2.28 | 7.48 |
| 11 | 111.40 | 111.25 | 0.15 | 0.13 | 35.70 | 40.97 | 5.27 | 14.76 | 102.70 | 95.58 | 7.12 | 6.93 | 35.60 | 40.97 | 5.37 | 15.08 |
| 12 | 103.40 | 107.43 | 4.03 | 3.90 | 27.30 | 32.37 | 5.07 | 18.57 | 95.00 | 92.30 | 2.70 | 2.84 | 33.00 | 35.15 | 2.15 | 6.53 |
| 13 | 106.80 | 109.17 | 2.37 | 2.22 | 28.70 | 33.23 | 4.53 | 15.78 | 99.40 | 93.79 | 5.61 | 5.64 | 34.90 | 36.84 | 1.94 | 5.56 |
| 14 | 108.50 | 105.69 | 2.81 | 2.59 | 29.30 | 33.93 | 4.63 | 15.80 | 102.00 | 96.16 | 5.84 | 5.73 | 33.30 | 36.70 | 3.40 | 10.21 |
| 15 | 110.90 | 109.45 | 1.45 | 1.31 | 28.30 | 35.00 | 6.70 | 23.67 | 103.00 | 97.54 | 5.46 | 5.30 | 31.40 | 35.31 | 3.91 | 12.45 |
| 16 | 105.20 | 107.23 | 2.03 | 1.93 | 31.30 | 34.76 | 3.46 | 11.05 | 102.00 | 92.12 | 9.88 | 9.69 | 33.80 | 36.33 | 2.53 | 7.49 |
| 17 | 106.50 | 108.67 | 2.17 | 2.04 | 33.30 | 36.71 | 3.41 | 10.24 | 101.00 | 93.36 | 7.64 | 7.56 | 38.20 | 40.06 | 1.86 | 4.87 |
| 18 | 105.10 | 108.90 | 3.80 | 3.62 | 29.00 | 32.08 | 3.08 | 10.62 | 104.00 | 93.56 | 10.44 | 10.04 | 31.50 | 32.08 | 0.58 | 1.84 |
| 19 | 108.00 | 109.69 | 1.69 | 1.56 | 32.80 | 38.01 | 5.21 | 15.88 | 104.00 | 97.75 | 6.25 | 6.01 | 34.50 | 39.38 | 4.88 | 14.14 |
| 20 | 106.50 | 109.65 | 3.15 | 2.96 | 34.00 | 36.68 | 2.68 | 7.88 | 100.00 | 94.91 | 5.09 | 5.09 | 35.30 | 38.59 | 3.29 | 9.32 |
| 21 | 108.60 | 108.64 | 0.04 | 0.04 | 36.80 | 38.26 | 1.46 | 3.97 | 107.00 | 93.33 | 3.67 | 12.78 | 35.00 | 40.72 | 5.72 | 16.34 |
| 22 | 110.50 | 109.36 | 1.14 | 1.03 | 30.40 | 36.24 | 5.84 | 19.21 | 105.00 | 97.46 | 7.54 | 7.18 | 32.10 | 37.38 | 5.28 | 16.45 |
| 23 | 110.70 | 111.61 | 0.91 | 0.82 | 27.70 | 32.73 | 5.03 | 18.16 | 105.00 | 95.89 | 9.11 | 8.68 | 33.30 | 36.04 | 2.74 | 8.23 |
| 24 | 110.90 | 108.91 | 1.99 | 1.79 | 33.70 | 38.05 | 4.35 | 12.91 | 108.00 | 97.06 | 10.94 | 10.13 | 36.10 | 38.80 | 2.70 | 7.48 |
| 25 | 110.30 | 110.96 | 0.66 | 0.60 | 30.90 | 34.61 | 3.71 | 12.01 | 96.00 | 95.33 | 0.67 | 0.70 | 34.10 | 36.09 | 1.99 | 5.84 |
| AVG | 107.768 | 108.721 | 2.146 | 2.011 | 30.780 | 35.247 | 4.467 | 14.852 | 98.816 | 94.516 | 5.460 | 5.408 | 33.916 | 36.767 | 3.023 | 8.999 |
| SD | 3.658 | 2.494 | 1.450 | 1.398 | 2.827 | 2.300 | 1.236 | 5.046 | 6.302 | 2.859 | 3.659 | 3.466 | 2.111 | 2.285 | 1.626 | 4.946 |
| Std. Error | 0.73 | 0.50 | 0.29 | 0.28 | 0.57 | 0.46 | 0.25 | 1.01 | 1.26 | 0.57 | 0.73 | 0.69 | 0.42 | 0.46 | 0.33 | 0.99 |

participantes