

Evaluación Ergonómica con el Método RULA en Condiciones Reales de Trabajo mediante Kinect V2.

- Ergonomic Evaluation with the RULA Method in Real Working Conditions through Kinect V2.

Mag. Harold David Villacís Jara (1)
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
haroldavidvj@hotmail.com

Mag. Daniel Eduardo Araujo Vizuete (3)
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
araujdgx@hotmail.com

Mag. Oscar Iván Zambrano Orejuela (2)
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
ivan.zambrano@epn.edu.ec

Phd. Carlos Enrique Cevallos Barragán (4)
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
carlos.cevallos02@epn.edu.ec

Fecha de Recepción: 3 de Junio de 2019 / Fecha de Aceptación: 24 de Agosto de 2019

Resumen: Actualmente, existen diversos métodos, en su mayoría observacionales, para evaluar la exposición a factores de riesgo ergonómico, de los cuales el método RULA es uno de los más usados. La desventaja del RULA y de los métodos observacionales en general, es que la recolección de datos es muy subjetiva y se basa en estimaciones de ángulos proyectados sobre fotos y/o videos, lo que induce a variaciones de acuerdo al criterio de cada evaluador. Es así, que se propone el uso del sensor Kinect V2, como una herramienta para la evaluación ergonómica en condiciones reales de trabajo en la industria. El Kinect V2 es un sistema de captura de movimiento sin sensores o marcadores, que con la ayuda de su cámara RGB y de profundidad es capaz de detectar el cuerpo humano y obtener información de sus principales posiciones y articulaciones, a lo que se le conoce como seguimiento de esqueleto. A partir de esta información se obtienen los planos, ángulos y posiciones del trabajador, que necesita el método RULA para determinar la existencia de riesgos ergonómicos. La aplicación del sistema con el Kinect V2 se efectuó en una industria metalmeccánica durante horas laborables y se seleccionó una tarea en particular que presenta riesgo ergonómico junto con el Departamento de Seguridad Industrial y Ocupacional de esta empresa. La puntuación RULA obtenida por el sistema implementado se compara con el criterio profesional de un experto, donde ambas evaluaciones concuerdan en que se debe rediseñar el puesto de trabajo analizado. Los resultados obtenidos son muy prometedores y se discutirán cuáles son las mejores condiciones de posicionamiento del sensor y cuáles son sus limitaciones para esta aplicación.

Palabras clave: RULA, Kinect V2, riesgo ergonómico, evaluación ergonómica, condiciones reales de trabajo, sistema de captura de movimiento sin marcadores, seguimiento de esqueleto.

Abstract: Nowadays, there are several methods, mostly observational, to assess exposure to ergonomic risk factors, of which the RULA method is one of the most used. The disadvantage of the RULA and the observational methods in general, is that the data collection is very subjective and is based on estimations of angles projected on photos and/or videos, which induces variations according to the criteria of each evaluator. It is thus, that the use of the Kinect V2 sensor is proposed, as a tool for ergonomic assessment in real workplace conditions in industry. The Kinect V2 is a sensor-less or marker-less motion capture system, which is able to detect the human body and get information of its main positions and joints with the help of its RGB and depth camera, which is known as skeleton tracking. From this information, the planes, angles and positions of the worker are obtained, which the RULA method needs to determine the existence of ergonomic risks. The application of the system with Kinect V2 was carried out in a metalworking industry during working hours and a particular task which presents ergonomic risk was selected together with the Occupational Safety and Health Department of this company. The RULA score obtained by the implemented system is compared with the professional criteria of an expert, where both evaluations agree that the analyzed task must be redesigned. The results obtained are very promising and we will discuss which are the best positioning conditions of the sensor and what are its limitations for this application.

Keywords: RULA, Kinect V2, ergonomic risk, ergonomic assessment, real workplace conditions, marker-less motion capture system, skeleton tracking.

1. Ingeniero en Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE (Ecuador), Magister en Diseño y Simulación de la Escuela Politécnica Nacional (Ecuador). Actualmente, cursa el programa de Maestría en Gerencia de Ingeniería en la Universidad de La Sabana (Colombia) y su proyecto de tesis engloba el modelamiento predictivo para evaluación de proyectos de inversión en innovación en las empresas en Dinámica de Sistemas, es Gerente de Aplicaciones y Procesos de la firma Intervial Cia. Ltda.

2. Máster en Métodos Numéricos y Diseño en Ingeniería, Máster en Informática e Ingeniero Mecánico. Aproximadamente por cuarenta años profesor de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, hasta julio 2019 cumplió las funciones de Subdecano y actualmente desempeña el cargo de Jefe de Departamento de Ingeniería Mecánica. Sus áreas de interés son diseño y producción, automatización industrial, robótica, mecatrónica y bioingeniería.

3. Ingeniero Mecánico de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE (Ecuador), Magister en Diseño y Simulación de la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente es profesor en el Ministerio de Educación de Post-Bachillerato mención: Procesos de Soldadura y es Propietario de DGXDrawings-Ingeniería. www.dgxdrawings.com

4. Ingeniero Mecánico de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) y Doctor en Ciencias de la Motricidad de la Université Libre de Bruxelles (ULB), Director del Programa Doctoral en Ciencias de la Mecánica. Actualmente trabaja como profesor agregado en la EPN (Quito - Ecuador) del Departamento de Ingeniería Mecánica y Colaborador Científico como parte del Laboratorio de Neurofisiología y Biomecánica del Movimiento, Instituto de Neurociencia (ULB).

1. Introducción:

En el campo de la ergonomía, la postura y movimientos de un trabajador representan información importante para determinar el riesgo de presentar trastornos musculoesqueléticos en el puesto de trabajo [1]. Se han desarrollado varios métodos, principalmente observacionales como: RULA, REBA y OWAS [2], que permiten evaluar el riesgo en los puestos de trabajo. Actualmente, en la industria se realizan estudios para evaluar el riesgo en los trabajadores asociado a una elevada carga postural y que pueden ocasionar trastornos en los miembros superiores del cuerpo. Para ello, utilizan el método observacional RULA (Rapid Upper Limb Assessment) que implica la recopilación de información que es generalmente obtenida mediante una observación subjetiva o una simple estimación de ángulos proyectados en fotos y/o videos [3]. Esto hace que la imprecisión y variabilidad de un observador a otro sean bastante considerables, como lo describen en su estudio Burdorf y Laan en [4]; y, Fagarasanu y Kumar en [5].

Vignais et al. en [6], muestran un estudio de aplicación de sensores inerciales en la parte superior del cuerpo para evaluar el riesgo ergonómico con el método RULA. Sin embargo, estos sistemas tienen varias desventajas, una de ellas es que necesitan la colocación de sensores en el cuerpo del trabajador, lo que le impide realizar sus tareas con normalidad [7]. Otro de los inconvenientes, es que estos sensores pueden ser perturbados si se aplican en un ambiente electromagnético, por lo que las mediciones no serían fiables [8]. Además, en el caso de los sistemas optoelectrónicos de análisis de movimiento, resultan muy costosos, por lo que únicamente se aplican en condiciones de laboratorio, más no en condiciones reales de trabajo.

Es aquí donde radica la importancia de este estudio, en el que se propone el uso de un sensor de profundidad comercial de bajo costo (Kinect V2) en la evaluación de riesgo ergonómico en condiciones reales de trabajo, con el fin de que la recolección de datos en coordenadas espaciales acerca de la postura del trabajador, se logre de una forma más confiable; comparado a la elaboración de simples proyecciones manuales en dos dimensiones sobre fotografías, como se realiza comúnmente. Este tipo de sensores comerciales, son sistemas de captura de movimiento que no requieren marcadores y/o sensores en el cuerpo del trabajador.

Una de las herramientas que presentan los sensores comerciales, es el seguimiento de esqueleto, que implica el rastreo de puntos que representan las articulaciones del cuerpo humano [9]. Dicha herramienta se utilizará para

identificar posturas y medir ángulos en las extremidades de acuerdo al método RULA.

En 2010, el Kinect V1 de Microsoft fue lanzado como un periférico de la consola de videojuegos Xbox 360 y actualmente es la cámara de profundidad más asequible del mercado. Este sensor es capaz de detectar 20 puntos en el cuerpo humano para realizar su seguimiento. En este punto, empezaron investigaciones en varios campos con el uso de este sensor, como por ejemplo: análisis clínico de la marcha, reconocimiento de gestos, entrenamiento deportivo e interacciones humano-computadora [9]. Una de las primeras investigaciones del Kinect V1 para su aplicación en ergonomía se presenta en [10], publicado en 2011, en donde se muestra una comparación de los datos de este sensor con un sistema de captura de movimiento patrón, proporcionando buenos resultados. En 2014, aparece un estudio de la aplicación del Kinect V1 en la evaluación ergonómica con el método OWAS en condiciones de laboratorio [11], en donde se sugiere que este sensor puede ser muy útil en la tarea de recolección de información para evaluación de posturas, pero que, sin embargo, se requiere más investigación para la posibilidad de aplicarlo en condiciones reales de trabajo. En [12] publicado en 2015, se encuentra un análisis ergonómico enfocado a conductores en la cabina del vehículo, en el cual sólo considera los puntos detectados en el cuerpo de la cintura para arriba. En [13], se muestra los resultados de un algoritmo que identifica el tiempo que una persona se mantiene sentada en una oficina con el fin de alertar y evitar posibles riesgos en la salud.

En el lanzamiento del nuevo Xbox One en 2014, Microsoft incluyó un nuevo modelo de sensor, el Kinect V2. Asimismo, se lanzó un adaptador para poder conectarlo a la PC junto con un SDK oficial. A diferencia del primer modelo, el Kinect V2 no presenta una cámara de luz estructurada (structured light cameras), sino de tiempo de vuelo (time of flight), con lo que se tiene una mayor velocidad de respuesta y precisión. Cabe recalcar, que el Kinect V2 es capaz de detectar 25 puntos en el seguimiento de esqueleto del cuerpo humano. Las características del Kinect V2 son data streams de 512 x 424 a 16 bits de profundidad (30 fps) y 1920x1080 32-bit de color (30 fps) [9]. Respecto a ergonomía, en [8] publicado en 2016, se describe un estudio con la aplicación del sensor Kinect V2 en condiciones reales de trabajo, en el cual se indica que las puntuaciones RULA, obtenidas con la ayuda del sensor y por expertos en ergonomía, tenían similitud en alrededor del 75% de los casos y sugiere un análisis más profundo en cuanto a la ubicación del sensor con el fin de disminuir errores. Y publicado en 2017, en [14] se muestra

una evaluación de ergonomía para conductores de tractor, en el cual sugiere no solamente la identificación de posturas de riesgo, sino un análisis de tiempo real continuo con el método RULA.

Según lo explicado anteriormente, a la fecha existen muy pocas investigaciones de la aplicación de este tipo de sensores comerciales en el campo de la ergonomía. Es así, que se pretende realizar un estudio sobre el uso del Kinect V2 para el seguimiento e inspección de operarios de industrias manufactureras in situ.

2. Metodología:

En esta sección se describe la realización de una herramienta que permita asistir a ergónomos o personal de seguridad industrial y ocupacional de las empresas en la evaluación del riesgo ergonómico de trabajadores en el ámbito industrial, mediante el método RULA. Se utilizó un software de ingeniería de programación en pseudocódigo, en este caso Matlab, para establecer la comunicación y adquisición de datos entre el sensor y el computador. Posteriormente, se definió la programación con la que se obtuvieron coordenadas en el espacio del cuerpo humano mediante el seguimiento de esqueleto. El código calcula planos, ángulos, vectores de manera instantánea; que a su vez se toman en consideración para el cálculo de la puntuación final RULA. Se implementó una interfaz, en la que el usuario ingresa manualmente los parámetros que están fuera del alcance del sensor. Vale destacar, que en la interfaz se visualizan las imágenes del sensor y los ángulos calculados. También, se pueden ingresar el intervalo de tiempo de análisis y el tiempo de muestreo para guardar los datos. Así pues, la interfaz indica cuál es la puntuación RULA y nivel de actuación de la persona analizada en tiempo real, además de la puntuación RULA y nivel de actuación por porcentajes en un intervalo de tiempo de análisis.

A. El método RULA.

La excesiva carga postural es el factor de riesgo más común que aparece sobre todo en los puestos de trabajo de la industria manufacturera, generando trastornos musculoesqueléticos en los trabajadores. Dentro de los métodos de identificación de riesgo ergonómico, el método RULA (Rapid Upper Limb Assessment) es una de las herramientas observacionales para evaluación de posturas más usadas, que fue desarrollado para usarlo en investigaciones ergonómicas de lugares de trabajo donde se presentan trastornos de los miembros superiores del

cuerpo relacionados con posturas y cargas [15]. Para la evaluación del riesgo se consideran la postura adoptada, la duración y frecuencia de ésta y las fuerzas ejercidas. Dada una postura RULA, se obtendrá una puntuación a partir de la cual se establece un determinado nivel de actuación. Este nivel de actuación indicará si la postura es aceptable o en qué medida son necesarios cambios o rediseños en el puesto.

RULA divide el cuerpo en dos grupos, el Grupo A que incluye los miembros superiores (brazos, antebrazos y muñecas) y el Grupo B, que comprende las piernas, el tronco y el cuello [16]. A cada zona corporal se le asigna una puntuación considerando las tablas relacionadas al método. Cabe recalcar que el método se aplica al lado izquierdo o derecho del cuerpo por separado, en donde el evaluador considere un mayor riesgo; sin embargo, en caso de duda se debe aplicar el método a los dos lados del cuerpo.

La puntuación final RULA oscila en un rango de 1 a 7 y propone los llamados niveles de actuación sobre el puesto de trabajo, los mismos que se detallan a continuación:

- Puntuación 1 o 2 (nivel de actuación 1): La tarea realizada por el trabajador presenta un riesgo aceptable y no se requieren cambios.
- Puntuación 3 o 4 (nivel de actuación 2): La tarea del trabajador necesita un estudio más profundo, pueden requerirse cambios.
- Puntuación 5 o 6 (nivel de actuación 3): La tarea necesita cambios, se sugiere el rediseño del puesto de trabajo.
- Puntuación 7 (nivel de actuación 4): La tarea necesita cambios urgentes.

B. Hardware y Software.

Antes de realizar la conexión entre el dispositivo Kinect V2 y el computador, es importante instalar los drivers necesarios para la comunicación. Primero, se instala el paquete Kinect for Windows Software Development Kit 2.0 (SDK) y luego el Kinect Runtime 2.0, los cuales son gratuitos y están disponibles en la página de Microsoft.

A continuación, se requiere un paquete de soporte adicional en Matlab llamado Image Acquisition Toolbox Support Package for Kinect for Windows Sensor, el mismo que se encuentra disponible en la pestaña Add-Ons en la barra de herramientas de Matlab.

Además, se debe añadir un Toolbox llamado Kin2 para MATLAB [17], el mismo que contiene un conjunto de funciones que conectan y encapsulan la mayor parte de la funcionalidad de Kinect para Windows SDK 2.0. Este toolbox permite un desarrollo de aplicaciones de investigación en MATLAB con mayor rapidez, sin

necesidad de profundizar en los lenguajes C# o C++. Posteriormente, se debe conectar el Kinect V2 con el adaptador USB 3.0 al computador (Fig. 1). En este caso se dispone de un equipo con procesador Intel® Core (TM) i7-6820HK 64 bits overclocked 4 GHz, memoria RAM de 64 GB, tarjeta de video Nvidia GeForce GTX 1070 de 8 GB dedicada y sistema operativo: Microsoft Windows 10 Pro.

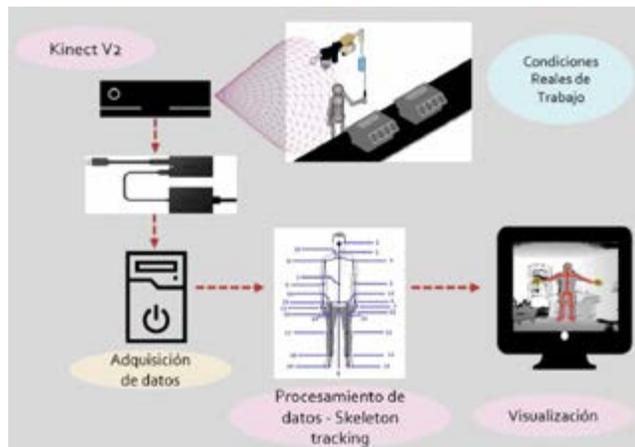


Fig. 1 Diagrama de funcionamiento del sistema Kinect V2

C. Adquisición de Datos y Seguimiento de Esqueleto.

El Kinect V2 es un sistema que provee imágenes de video de tres tipos: RGB, profundidad e infrarrojo. Con esto, el primer paso es generar un objeto en Matlab especificando el tipo de imagen que se desea obtener del sensor, es decir, RGB y profundidad.

La herramienta Kin2 para Matlab permite acceder a la capacidad de seguimiento de esqueleto del sensor cuando se crea un objeto. Estos datos están organizados en un arreglo de matrices, en donde se obtienen datos de hasta 6 cuerpos al mismo tiempo. Cada arreglo consta de los datos de posiciones organizados en matrices de 3x25 con los datos X, Y, Z de los 25 puntos detectados en el espacio (Fig. 2).

D. Procesamiento de datos

Una vez que se establece la conexión entre el sensor y el computador, y se verifica que se obtienen los datos del seguimiento de esqueleto, se procede a calcular los planos anatómicos que sirven para posteriores proyecciones y cálculos angulares. El proceso de cálculos inicia con la definición de los siguientes planos:

- Plano de tronco: determinado a través de la espina dorsal y la cadera derecha e izquierda, es decir, está formado por los puntos 13, 17, 21 en la Fig. 2.
- Plano sagital: es perpendicular a la línea recta que

conecta la cadera derecha con la izquierda y pasa por el centro de la cadera, es decir, formado por los puntos 13, 17, 1 en la Fig. 2.

- Plano frontal: es un plano vertical que pasa a través de la cadera derecha e izquierda, es decir, formado por los puntos 13, 17 en la Fig. 2.
- Plano transversal: es un plano horizontal que pasa a través de la cadera derecha e izquierda.

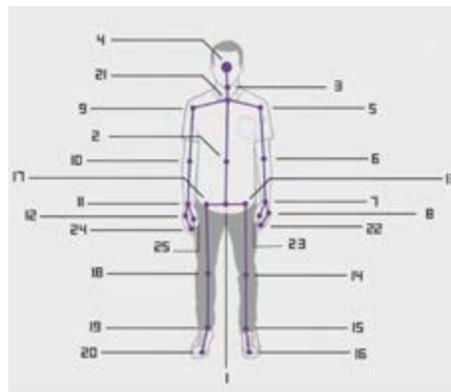


Fig. 2 Diagrama de funcionamiento del sistema Kinect V2. Puntos detectados en el cuerpo por el Kinect V2 con el Toolbox Kin2.
1) Coxis. 2) Mitad de la columna. 3) Cuello. 4) Cabeza. 5) Hombro izquierdo. 6) Codo izquierdo. 7) Muñeca izquierda. 8) Mano izquierda. 9) Hombro derecho. 10) Codo derecho. 11) Muñeca derecha. 12) Mano derecha. 13) Cadera izquierda. 14) Rodilla izquierda. 15) Tobillo izquierdo. 16) Pie izquierdo. 17) Cadera derecha. 18) Rodilla derecha. 19) Tobillo derecho. 20) Pie derecho. 21) Espina dorsal. 22) Dedo medio izquierdo. 23) Pulgar izquierdo. 24) Dedo medio derecho. 25) Pulgar derecho.

1) Cálculo de planos:

Para el cálculo de un plano se deben considerar los tres puntos que lo forman. Entonces, asumiendo tres articulaciones con coordenadas $A(x1,y1,z1)$, $B(x2,y2,z2)$ y $C(x3,y3,z3)$, se obtienen los vectores $(AB)^T$ y $(AC)^T$. Luego, el producto vectorial de $(AB)^T$ y $(AC)^T$ es la dirección normal del plano deseado; por lo tanto, el plano que contiene al punto $(x1,y1,z1)$ y tiene el vector normal $(n^T)=(a,b,c)$ se obtiene con (1). Asimismo, para efectos de cálculo, (1) puede ser representada como (2), que es la ecuación general o implícita del plano.

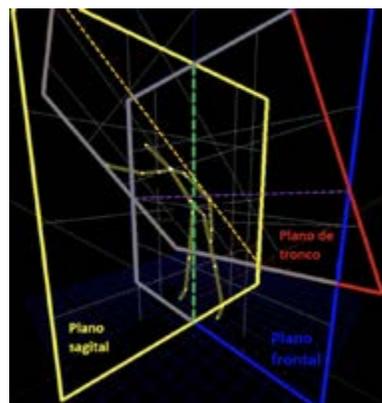


Fig. 3. Planos anatómicos: de tronco, sagital, frontal.

$$1. \quad a(x - x_1) + b(y - y_1) + c(z - z_1) = 0$$

$$2. \quad Ax + By + Cz + D = 0$$

2) Cálculo de ángulos entre articulaciones:

Algunos de los ángulos requeridos se pueden obtener directamente con una ecuación; no obstante, existen otros ángulos que necesitan procesos adicionales. Se debe tener claro que se trabaja en un espacio euclídeo y que los vectores también lo son, por lo tanto, el ángulo entre dos vectores \vec{A} y \vec{B} se puede determinar a partir del producto escalar $\vec{A} \cdot \vec{B} = \|\vec{A}\| \|\vec{B}\| \cos(\theta)$ como se indica en (3).

$$3. \quad \theta = \arccos \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{\|\vec{A}\| \|\vec{B}\|}$$

Otro aspecto importante es considerar cómo se proyecta un vector sobre un plano en el espacio. En (4) se muestra la fórmula para obtener la proyección del vector (\vec{A}) sobre un plano en el espacio que tiene una normal \vec{B} y en (5) se indica la ecuación para obtener la componente perpendicular de la proyección de un vector (\vec{A}) sobre un plano en el espacio.

$$4. \quad \overline{\vec{A} \parallel \vec{B}} = \vec{B} \times (\vec{A} \times \vec{B}) / \|\vec{B}\|^2$$

$$5. \quad \overline{\vec{A} \perp \vec{B}} = \vec{A} \cdot \vec{B} * \vec{B} / \|\vec{B}\|^2$$

El método RULA, al evaluar el riesgo en miembros superiores, empieza valorando la posición del brazo [18]. El ángulo de flexión/extensión del brazo, se calculó entre el vector proyección del brazo sobre el plano sagital y el plano de tronco. Para determinar la abducción de los brazos, se calculó el ángulo entre el vector espina dorsal-hombro y el vector hombro-codo. Se estableció un umbral de 150°, en el que, si el ángulo es mayor a este valor, el brazo se considera abducido.

Para la elevación de los hombros se tomó en cuenta el ángulo que existe entre el vector espina dorsal-cuello y el vector espina dorsal-hombro. Se estableció un umbral de 100°, es decir, si el ángulo es menor a este valor, el hombro se considera elevado.

En cuanto al antebrazo, se calculó el ángulo entre el vector hombro-codo y el vector muñeca-codo. Para determinar si el antebrazo cruza la línea media del cuerpo o está a un lado del cuerpo, se calculó primero un plano auxiliar llamado plano de hombros que contiene a los hombros izquierdo y derecho, y es perpendicular al plano de tronco. Entonces, se analizó las posiciones relativas de las

proyecciones de la muñeca sobre este plano auxiliar.

Respecto a la puntuación de la muñeca, se consideró el ángulo formado por el vector dedo medio-muñeca y el vector codo-muñeca.

En lo que se refiere al ángulo del cuello, se calculó entre el vector cabeza-cuello y el eje del tronco. El ángulo de inclinación lateral del cuello se calculó entre el vector espina dorsal-hombro y el vector espina dorsal-cuello, si el ángulo está entre 110° y 115° se consideró que no hay inclinación lateral de la cabeza.

La evaluación también considera el ángulo del tronco, que se calculó entre el vector normal del plano de tronco y el vector normal del plano frontal. Para determinar el giro del tronco, se obtuvo un plano auxiliar que contiene a los dos hombros y a la espina dorsal (plano auxiliar de hombros). Luego, se calculó el ángulo entre el vector normal de este plano auxiliar y el vector normal del plano frontal. Se estableció un umbral de 10° para considerar que existe giro del tronco.

Para la inclinación lateral del tronco, se optó por calcular el ángulo que existe entre el vector que une las caderas y el vector que une los hombros. Teóricamente, si una persona está parada, este ángulo debe aproximarse a los 0°. Por lo tanto, después de realizar pruebas con el sensor se logró determinar un umbral adecuado, con lo que se estableció que si el ángulo es mayor a 10°, el tronco se encuentra inclinado.

Por otra parte, para la puntuación de las piernas se tomó en cuenta la posición de los pies en la coordenada vertical. Después de pruebas con distintas posiciones del sensor, se establece que, si existe una diferencia mayor a 7 centímetros, se considera que la persona está apoyada en un solo pie.

A pesar de que el Kinect V2 presenta muchas mejoras respecto a su primera versión, tiene limitaciones para medir ciertos parámetros como: rotación de cuello, rotación de muñeca y desviación de la muñeca. Por lo tanto, estos serán ingresados en la interfaz desarrollada de forma manual. Así también, parámetros como cargas y tipo de actividad, que están fuera del alcance del Kinect V2, serán ingresados de la misma manera.

3) Funcionalidades de la interfaz:

El GUI consta del botón "Start" que inicializa el Kinect V2 e inmediatamente adquiere imágenes de video. En la interfaz se presenta una imagen RGB y una de profundidad. Cuando un cuerpo es detectado, automáticamente se realiza el seguimiento de esqueleto y se empiezan a

calcular los planos, ángulos y puntuación RULA.



Fig. 4. Interfaz gráfica de usuario implementada (GUI).

Como se aprecia en la Fig. 4, en la parte izquierda del GUI se configuran todos los parámetros de ingreso manual como: desviaciones de muñeca, giro de muñeca, rotación de cabeza, tipo de actividad y carga soportada. Cabe señalar que, para la posición de las piernas se puede escoger entre el funcionamiento automático o manual; si se configura automático, la puntuación se da de acuerdo al cálculo que se explicó previamente, y si se configura manual, se puede escoger si la persona está con los dos pies o uno sólo asentado. Esto último se implementó debido a que en muchas ocasiones existe oclusión del ambiente de trabajo en los miembros inferiores del cuerpo. Además, se tiene la posibilidad de realizar la evaluación RULA en un intervalo de tiempo determinado; es decir, guardar las puntuaciones de cada frame con el objetivo de tener una puntuación RULA con diferentes porcentajes de Niveles de Actuación, aplicando (6). Esto, para poder determinar en qué porcentaje de todos los frames evaluados aparecen posturas que representan un riesgo para la salud. En la Fig. 5 se aprecia la visualización de resultados de la interfaz.



Fig. 5. Interfaz gráfica de usuario implementada (GUI).



Fig. 6. Tareas que representan riesgo ergonómico según el Departamento de Seguridad Industrial y Ocupacional de una industria metalmeccánica A) Soldadura de anclajes en planchas para tanques. B) Ubicación de plancha de corte. C) Soldadura de filete en perfiles. D) Cambio de posición y rotación de plancha. E) Traslado de plancha.

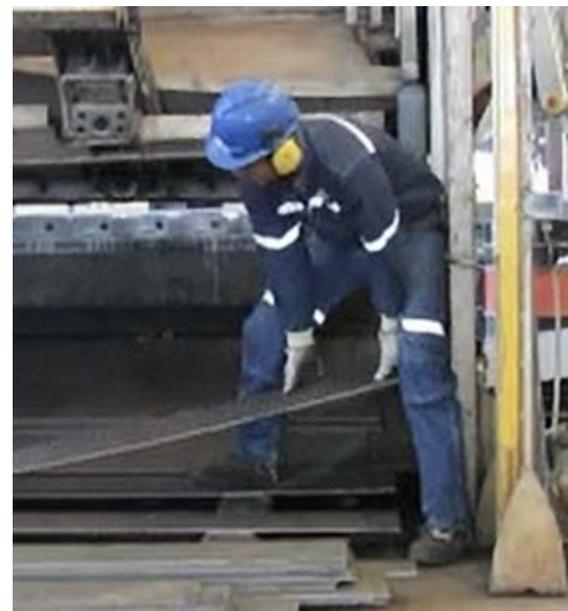


Fig. 7. Tarea elegida para el análisis. Cambio de lugar del material cortado, sin herramienta de elevación

$$6. \%NA = \frac{\text{número de frames con Nivel de Actuación}(1,2,3,4)}{\text{número total de frames}}$$

E. Aplicación del sensor en la industria.

En esta sección, se presenta el protocolo usado para evaluar la relevancia del estudio propuesto en condiciones reales de trabajo. La aplicación del sistema con el Kinect V2 se efectuó durante horas laborables en una industria metalmeccánica y la selección de la tarea que presenta riesgo ergonómico se realizó junto con el Departamento de Seguridad Industrial y Ocupacional de la empresa,

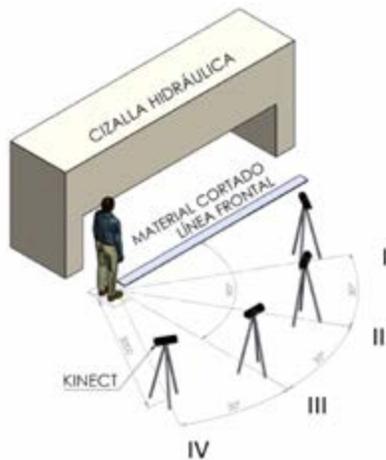


Fig. 8. Ubicación del Kinect V2 con respecto a la línea frontal del operario. Se presetan las siguientes posiciones angulares del Kinect V2: I) 30°. II) 60°. III) 90°. IV) 120°. La elegida para el análisis es la posición II.

utilizando la observación y recomendación del mismo y basándose en datos históricos de riesgos identificados a partir de las 14h00, donde el agotamiento y la rutina incrementan los riesgos en general. Algunas de las tareas que presentan riesgo en la industria metalmeccánica según los expertos en seguridad industrial, se pueden apreciar en la Fig. 6.

La tarea escogida para realizar el análisis fue específicamente en una cizalla hidráulica, donde el operario, de 1,70 m de estatura y 65 kg de peso, cambia de lugar el material cortado sin herramienta de elevación, en intervalos que duran 13 segundos aproximadamente (carga y descarga), durante 2 a 3 minutos y con pausas de 15 a 20 minutos entre lotes de corte (Fig. 7).

En este punto, el operario no recibe indicaciones ni interrupciones en sus labores, eso quiere decir que los datos receptados son inherentes a la tarea diaria analizada.

El Sensor Kinect V2 fue colocado a 3 metros de separación del operario, a una altura de 1,2 metros sobre el suelo y variando 4 posiciones angulares (30°, 60°, 90° y 120°) respecto a la línea frontal del mismo (Fig. 8), evitando interrumpir el libre desempeño del operario durante el intervalo de carga y descarga.

Se ejecutó tres veces la aplicación del programa a cada ángulo analizado, obteniendo matrices que permiten descartar posibles errores ajenos a la habitual recepción de datos del Kinect V2 que pudieron haberse dado por las partículas residuales de corte en el ambiente, desbaste y soldadura que se practica en la industria, oclusión del ambiente o movimientos innecesarios del operario. En la posición del Kinect V2 a 60° de la línea frontal (posición II de la Fig. 8), fue donde se obtuvieron los mejores resultados de seguimiento de esqueleto a lo largo de toda la duración de la tarea.

Con el fin de lograr estabilidad estadística se repitió 3 veces la aplicación del programa a cada ángulo analizado, obteniendo matrices que permitieron descartar posibles errores ajenos a la habitual recepción de datos del Kinect V2 que pudieron haberse dado por las partículas residuales en el corte, desbaste y soldadura que se practica en la industria, oclusión del ambiente o movimientos innecesarios del operario.

El algoritmo calcula la puntuación RULA en tiempo real y registra la puntuación en intervalos definidos para posteriormente obtener un promedio de toda la tarea analizada. Sin embargo, lo recomendable es que el



Fig. 9. Modelado de los 25 puntos capturados por el Kinect V2 mediante SolidWorks. Los círculos rojos representan las articulaciones detectadas por el sensor y las líneas azules son los enlaces que representan los miembros del cuerpo.

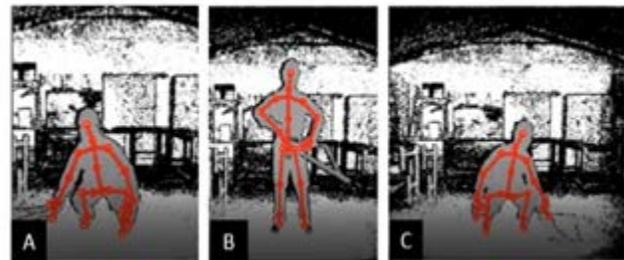


Fig. 10. Reconocimiento de esqueleto en: a) La acción de recoger planchas cortadas. B) El levantamiento de planchas cortadas. C) La acción de cambiar la posición de planchas cortadas.

experto evaluador del riesgo ergonómico registre los datos en tiempo real según el criterio propio y apunte cuando identifique una postura forzada e incorrecta, con el fin de obtener una mayor confiabilidad del análisis realizado.

En la Fig. 9 se muestra el modelado mediante el software SolidWorks 2018 de una posición capturada registrada durante la labor industrial analizada.

F. Descripción de la tarea analizada.

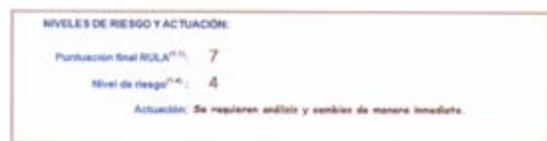
La tarea elegida para el análisis ergonómico se da en una línea de ensamble de vigas puente, específicamente en la estación de corte, en donde se tiene una cizalla hidráulica que procesa planchas de hasta 8 mm que sirven para

refuerzos o nervios. La máquina corta en tiras a las planchas y los operarios deben levantarlas parcialmente y acomodarlas en lotes, para luego trasladarlas mediante tecla a la estación de soldadura. Esta actividad dura aproximadamente 13 segundos y el peso en promedio que levantan es 6 kg. La tarea consta de los siguientes movimientos secuenciales (Fig. 10):

- 1) Etapa A: El operador flexiona sus rodillas e inclina el tronco hacia adelante para tomar la plancha cortada con una sola mano.
- 2) Etapa B: El operador se levanta nuevamente en su posición erguida y cambia la plancha que tomó a la otra mano.
- 3) Etapa C: El operador flexiona sus rodillas e inclina el tronco hacia adelante para tomar la plancha cortada con una sola mano.

3. Resultados y discusión:

El objetivo de la presente investigación es probar el sistema en condiciones reales de trabajo, por tanto, una vez elegida la tarea de riesgo ergonómico, se realizan las pruebas con el sensor y el algoritmo implementado, con el cual se obtuvo una puntuación RULA de 6 para el lado izquierdo y derecho del cuerpo en la posición más crítica del trabajador. Este número RULA indica un nivel de actuación 3, que significa que se necesita el rediseño de la tarea.



Elaborado por:

Dennys Valencia

Ingeniero en Seguridad y Salud Ocupacional

Registro SENESCYT 1036-2016-1726922



Fig. 11. Reporte del profesional experto en Seguridad y Salud Ocupacional.

El experto en evaluaciones ergonómicas realiza el análisis de la tarea y selecciona la postura de mayor riesgo para el trabajador para obtener la puntuación final RULA. En este caso, la posición analizada por el experto fue la que se

muestra en la Fig. 10 (posiciones A y C), que es el momento en que el trabajador flexiona sus rodillas e inclina su tronco hacia adelante para acomodar las planchas.

El resultado que arroja el estudio del ergónomo es de una puntuación final RULA de 7 para la postura mencionada, que indica un nivel de actuación 4, es decir, la tarea requiere cambios urgentes (Fig. 11).

En lo que se refiere a la validación del sistema implementado con el criterio de un experto ergónomo, en resumen, se obtuvo una puntuación de 7 con el evaluador, y una de 6 con el sistema implementado en la actividad del trabajador que es objeto de estudio. Ambas puntuaciones coinciden en que se deben hacer cambios en la tarea, ya que representa un riesgo de posibles trastornos musculoesqueléticos. Esta diferencia en puntuaciones, posiblemente se da por las diferentes referencias de medición de los ángulos, ya que estos criterios varían de acuerdo a cada evaluador; además, se debe insistir en que el experto efectúa las medidas de los ángulos solamente en dos dimensiones sobre imágenes de video y no en el espacio, como se logra con el sensor Kinect V2. Es necesario decir que, en el caso de que la puntuación del software implementado difiera del obtenido por el ergónomo, la última palabra siempre tendrá el experto; debido a que el software solamente constituye una herramienta de ayuda para el criterio del evaluador.

En resumen, de los resultados obtenidos, se puede decir que el Kinect V2 es aplicable en el estudio de las evaluaciones ergonómicas para el caso de esta tarea y puesto de trabajo en específico. No obstante, hace falta profundizar el estudio en la detección de los movimientos de las manos, en donde el Kinect V2 disminuye considerablemente la capacidad de seguimiento.

En definitiva, las causas por las que en ciertos ángulos se tiene un mayor error, están las siguientes:

- Detección errónea del esqueleto por movimientos repentinos y rápidos.
- Oclusiones causadas por los miembros del sujeto analizado.
- Oclusiones del ambiente.
- Poca iluminación.

A. Limitaciones

A pesar de que el Kinect V2 tiene la posibilidad de detectar la muñeca, mano, dedo medio y pulgar, no es factible determinar si la muñeca presenta desviación o giro, ya que son movimientos relativamente pequeños que son difíciles de detectar por la sensibilidad del sensor. Por este motivo, las desviaciones y giros de la muñeca siempre deberán ser ingresadas manualmente por el usuario del sistema. De igual modo se tiene la limitación de determinar la rotación de la cabeza, ya que el Kinect V2 detecta a esta parte del cuerpo y al cuello solamente como puntos; por lo tanto, el ingreso de este parámetro debe ser manual.

Debido a la oclusión del ambiente al realizar pruebas en condiciones reales de trabajo, es posible que el sensor no pueda determinar la posición de las extremidades inferiores del cuerpo; razón por la cual se agrega la opción en la interfaz de que la posición de las piernas pueda ser ingresada manualmente, así también, el tipo de actividad y carga soportada.

El rango de profundidad de detección según el manual del Kinect V2 es máximo de 4,5 metros; y considerando esto, hay que dejar en claro que la posición de colocación del Kinect V2 deberá variar de acuerdo a la tarea que se va a analizar hasta encontrar las mejores condiciones de: seguimiento de esqueleto, luz del ambiente y oclusión ambiental; además de evitar obstaculizar las actividades del trabajador.

B. Trabajos Futuros

El presente proyecto se enfoca en el campo de investigación que trata sobre el uso de sensores de profundidad de bajo costo, como el Kinect V2, en evaluaciones ergonómicas, el cual ha sido muy poco explorado; y por ello, existe una variedad de estudios y proyectos que se pueden desarrollar sobre este tema, los mismos que se detallan a continuación:

1) Evaluación ergonómica en otros puestos de trabajo: Existen otras tareas y puestos de trabajo en los que se puede explorar también como, por ejemplo: oficinas, conductores de vehículos, puestos relacionados a la atención en salud (enfermeras, pediatras, cirujanos, entre otros). Así también, dentro de la industria existen puestos de trabajo en líneas de ensamble, carga y descarga de materiales, operarios de máquinas, etc.

2) Sistemas multi-sensor: Como se menciona antes, una de las limitaciones del sistema implementado es la oclusión, tanto del ambiente, como del sujeto de análisis. Una solución a este problema puede ser realizar un sistema con dos o más sensores, para poder tener un mayor rango de visión del trabajador, así como más precisión en cuanto al seguimiento de esqueleto.

3) Otros métodos de evaluación ergonómica: Con el presente estudio se pretende abrir paso a posteriores investigaciones que involucren otros métodos de evaluación ergonómica. El objetivo es llegar a un sistema integral en el que el ergónomo tenga todos los métodos a su disposición, y dependiendo del factor de riesgo que desee evaluar, pueda escoger el método y junto con el Kinect V2, lograr resultados más completos, precisos y en menor tiempo.

4. Conclusiones:

En el presente estudio se ha empleado un sensor de bajo costo, en este caso el Kinect V2, como una herramienta útil en el campo de la ergonomía. Al tener valoraciones ergonómicas muy subjetivas, se ha comprobado que los sensores de bajo costo pueden constituir un instrumento de ayuda para el evaluador, con el fin de tener mediciones más cercanas a la realidad, y por lo tanto un estudio ergonómico más completo y confiable.

Uno de los problemas que existe al realizar el estudio en condiciones de trabajo, es la oclusión del ambiente; es decir, que parte del cuerpo quede oculto por equipos o maquinaria, o por otras partes del mismo cuerpo. El Kinect V2 tiene un algoritmo interno que permite inferir las articulaciones que presenten oclusión; sin embargo, en estos casos la puntuación RULA no sería fiable. Los mejores resultados se presentan cuando el trabajador está de frente a la cámara o con poca desviación respecto al eje frontal, con una buena iluminación y poca oclusión ambiental.

Normalmente, en este tipo de métodos observacionales, el evaluador usa únicamente ciertas posturas que en un principio representan riesgo de acuerdo a su criterio; esto significa que se podría pasar por alto alguna postura que también pueda significar trastornos musculoesqueléticos. Por lo tanto, al proponer en esta investigación un análisis continuo implica una mayor cantidad de información de entrada, con lo que la evaluación será mucho más objetiva. Adicionalmente, el hecho de que el análisis sea continuo, va a permitir desglosar y entender mejor la

tarea del trabajador.

Se debe añadir que, el método RULA es aplicado por el evaluador a un solo lado del cuerpo; es decir, al que a su criterio represente más riesgo. La ventaja de la propuesta de este proyecto es que al mismo tiempo se logra obtener el análisis de los dos lados del cuerpo.

Finalmente, el sensor Kinect V2 es un dispositivo de confiabilidad muy aceptable para capturar movimiento. Sin embargo, hay en considerar que, para poder usar este sensor en estudios biomecánicos, se debe tener en mente de que este provee de información general del movimiento del cuerpo, y que le es difícil detectar variaciones pequeñas, es decir, el Kinect V2 responde mucho mejor cuando los movimientos de la persona no son muy rápidos. Por tanto, es necesario un estudio más profundo en este campo para poder mejorar su precisión.

- [11] J. Diego-Mas and J. Alcaide-Marzal, "Using Kinect (TM) sensor in observational methods for assessing postures at work," *Applied Ergonomics*, vol. 45, no. 4, pp. 976-985, 2014.
- [12] M. Francesco, A. Pezzuolo, F. Gasparini and L. Sartori, "Ergonomics analyses through motion capture in a vehicle cabin by means of Kinect sensor," *Proceedings International Conference of Agricultural Engineering*, 2015.
- [13] M. As'ari, S. Lukman, L. Ismail, N. Zakaria, N. Mahmood and H. Omar, "Automated Prolonged Sitting Detection in Office Workplaces using Kinect," *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 23, pp. 14025-14032, 2016.
- [14] T. Schempp and S. Boettinger, "Ergonomic Checks in Tractors through Motion Capturing," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 58, pp. 31-36, 2017.
- [15] L. McAtamney and N. Corlett, "RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders," *Applied Ergonomics*, vol. 24, no. 2, pp. 91-99, 1993.
- [16] J. Diego-Mas, "Evaluación postural mediante el método RULA," *Ergonautas*. Universidad Politécnica de Valencia, 2015.
- [17] J. Terven and D. Córdova-Esparza, "Kin2. A Kinect 2 toolbox for MATLAB," *Science of Computer Programming*, pp. 97-106, 2016.
- [18] J. Diego-Mas, "Selección de métodos de evaluación ergonómica de puestos de trabajo," *Ergonautas*. Universidad Politécnica de Valencia, 2015.
- [19] S. Artagaga, "Computer Hoy," 16 10 2015. [Online]. Available: <https://computerhoy.com/noticias/hardware/myo-brazalete-controlar-dispositivos-gestos-35559>. [Accessed 14 12 2018].

REFERENCIAS / REFERENCES:

- [1] L. Wiedemann, R. Planinc and M. Kampel, "Ergonomic - Monitoring of Office Workplaces using Kinect," *Ambient Assisted Living and Daily Activities*, pp. 275-278, 2014.
- [2] Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (ISTAS), "La prevención de riesgos laborales y los trastornos musculoesqueléticos," 2015.
- [3] P. Plantard, H. Shum and F. Multon, "Ergonomics Measurements using Kinect with a Pose Correction Framework," *Proceedings of Digital Human Modeling*, pp. 1-8, 2016.
- [4] A. Burdorf and J. Laan, "Comparison of methods for the assessment of postural load on the back," *Scand J Work Environ Health*, vol. 17, pp. 425-429, 1991.
- [5] M. Fagarasanu and K. Shrawan, "Measurement instruments and data collection: a consideration of constructs and biases in ergonomics research," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 30, no. 6, pp. 355-369, 2002.
- [6] N. Vignais, M. Miezal, G. Bleser, K. Mura, D. Gorecky and F. Marin, "Innovative system for real-time ergonomic feedback in industrial manufacturing," *Applied Ergonomics*, vol. 44, no. 4, pp. 566-574, 2013.
- [7] V. Manguishi, A. Uva, M. Fiorentino, B. Vitoantonio, G. Trotta and G. Monno, "Real time RULA assessment using Kinect v2 sensor," *Applied Ergonomics*. Elsevier, pp. 1-11, 2017.
- [8] P. Plantard, H. Shum, A.-S. Le Pierres and F. Multon, "Validation of an ergonomic assessment method using Kinect data in real workplace conditions," *Applied Ergonomics*. Elsevier, pp. 1-8, 2016.
- [9] "Kinect for Developers," 2018. [Online]. Available: <http://www.kinectfordevelopers.com/es/2014/01/28/caracteristicas-kinect-2/>.
- [10] T. Dutta, "Evaluation of the Kinect sensor for 3-D kinematic measurement in the workplace," *Applied Ergonomics*, no. 43, pp. 645-649, 2011.