

Modelo de eficiencia energética y mejora continua para la operación esbelta de robótica industrial

Segura Parra, Pablo

2019-05-14

<https://hdl.handle.net/20.500.11777/4221>

<http://repositorio.iberopuebla.mx/licencia.pdf>

UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA PUEBLA

Estudios con Reconocimiento de Validez Oficial por Decreto

Presidencial del 3 de abril de 1981



MODELO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y MEJORA CONTINUA PARA LA
OPERACIÓN ESBELTA DE ROBÓTICA INDUSTRIAL

DIRECTOR DEL TRABAJO

MTRO. JOSÉ CÉSAR ORTEGA MORALES

ELABORACIÓN DE TESIS

que para obtener el Grado de

MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN MANUFACTURA AVANZADA

presenta

PABLO SEGURA PARRA

RESUMEN

Se plantea un marco general para la operación eficiente de tecnologías robóticas dentro del sector industrial incluyendo una perspectiva responsable con el medio ambiente.

En lo particular, se busca obtener información sobre el consumo energético para distintos escenarios de trabajo, con el fin de optimizar el diseño de procesos de producción, asignación de tareas, trayectorias de movimiento, y parámetros de operación en una línea de producción o cadena de suministro. La comparación de dichas evidencias permitirá evaluar el impacto del modelo de eficiencia energética en los indicadores definidos, donde se pretende lograr un ahorro de un 10% hasta un 20% del consumo energético. Así mismo, los beneficios transversales se extienden a la mejora en índices de efectividad de equipos y emisiones de gases de efecto invernadero causadas por la actividad de manipuladores articulados.

Finalmente, la metodología desarrollada en este trabajo se fundamenta en las filosofías Seis Sigma Esbelto y Kaizen para localizar, analizar y discriminar a las actividades que no agregan valor energético al proceso. Esta sinergia entre herramientas de ingeniería industrial y software de manufactura digital hacen posible la creación de un modelo robusto de eficiencia en robótica aplicada a la industria.

PREFACIO

Este proyecto de enfoque tecnológico forma parte de los requisitos para obtener el grado de maestría en ingeniería en manufactura avanzada por la Universidad Iberoamericana Puebla; tiene como propósito exponer un proyecto integrador del programa académico aplicado a un caso existente en la industria de la manufactura.

El postulante a maestro en ingeniería, Pablo Segura Parra, es enteramente responsable de la planeación, ejecución, control y presentación de resultados del proyecto; contando con la amable asesoría del Mtro. José César Ortega Morales, coordinador de operaciones del Instituto de Diseño e Innovación Tecnológica (IDIT) de la Universidad Iberoamericana Puebla. El trabajo a continuación expuesto contó con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a través de la beca “Posgrados con la Industria”.

Puebla, Pue. 27 de febrero del 2019

Pablo Segura Parra

ÍNDICE DEL CONTENIDO

CAPÍTULO 1.- Introducción

| | |
|---|---|
| 1. Planteamiento del problema y objetivos | 1 |
| 1.1 Descripción del problema | 1 |
| 1.2 Objetivo general | 3 |
| 1.3 Objetivos específicos | 3 |
| 2. Justificación | 4 |
| 2.1 Motivaciones | 4 |
| 2.2 Análisis del entorno | 5 |

CAPÍTULO 2.- Marco Teórico

| | |
|--|----|
| 3. Estado del arte | 10 |
| 3.1 Estado de la técnica..... | 10 |
| 4. Marco conceptual | 13 |
| 4.1 Robótica industrial | 13 |
| 4.1.1 Antecedentes..... | 13 |
| 4.1.2 Cinemática del robot industrial..... | 15 |

| | |
|--|----|
| 4.1.3 Problema cinemático directo | 15 |
| 4.1.4 Problema cinemático inverso..... | 19 |
| 4.1.5 Matriz Jacobiana..... | 22 |
| 4.1.6 Dinámica del robot | 23 |
| 4.2 Metodología Seis Sigma Esbelto | 24 |
| 4.2.1 Seis Sigma | 24 |
| 4.2.2 Manufactura Esbelta | 25 |
| 4.2.3 Seis Sigma Esbelto | 26 |
| 4.2.4 Metodología DMAIC..... | 27 |
| 4.2.5 Filosofía Kaizen..... | 30 |

CAPÍTULO 3.- Modelo de eficiencia energética y mejora continua

| | |
|--|----|
| 5. Componentes del modelo | 32 |
| 5.1 Estrategias de operación energética esbelta | 32 |
| 5.2 Herramientas de operación energética esbelta | 35 |
| 5.3 Métodos de eficiencia energética | 39 |

CAPÍTULO 4.- Caso de estudio

| | |
|---|----|
| 6. Descripción del caso de estudio..... | 49 |
| 6.1 Resumen..... | 49 |
| 6.2 Equipo robótico..... | 50 |
| 6.2.1 KUKA KR 16-2..... | 50 |
| 6.2.2 Manufactura digital..... | 51 |
| 6.3 Operación robótica..... | 52 |
| 6.3.1 Escenario de trabajo..... | 52 |
| 6.3.2 Digitalización de la celda robótica | 55 |
| 6.4 Aplicación del modelo de operación energética esbelta | 56 |
| 6.4.1 Tácticas de reducción de consumo energético..... | 56 |
| 6.4.2 Fase: Definir | 60 |
| 6.4.3 Fase: Medir | 61 |
| 6.4.4 Fase: Analizar | 66 |
| 6.4.5 Fase: Mejorar | 83 |
| 6.4.6 Fase: Controlar..... | 89 |

CAPÍTULO 5.- Conclusiones

| | |
|--|-----|
| 7. Eficiencia energética y trabajo futuro..... | 91 |
| 7.1 Eficiencia energética | 91 |
| 7.2 Trabajo futuro..... | 92 |
| | |
| BIBLIOGRAFÍA | 94 |
| | |
| LISTADO DE TABLAS | 98 |
| | |
| LISTADO DE FIGURAS | 99 |
| | |
| ANEXOS | 103 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1 Planteamiento del problema y objetivos

1.1 Descripción del problema

El diseño de procesos de producción asistidos por robots industriales no cuenta con un modelo consolidado de planeación, mejora y control de su consumo energético, el cual cuenta actualmente con un déficit promedio de entre el 10% al 25% de la electricidad utilizada de acuerdo a Paryanto, Brossog, Bornschlegl y Franke [1]; esto genera importantes costos de oportunidad y una huella ecológica de mayor profundidad para el sector industrial.

Así mismo, las redes eléctricas inteligentes (smart grids en inglés), como tendencia mundial en distribución de energía, han facilitado la creación de tarifas dinámicas en el precio de la electricidad, cuyo objetivo es poner mayor peso económico, en tiempo real, a la carga y horario de uso de la infraestructura energética. Por lo tanto, las organizaciones deben empezar a buscar minimizar costos implementando una secuenciación de la producción más dinámica y, al mismo tiempo, eficiente en términos energéticos según Joon-Yung y Park [2].

Finalmente, se ha encontrado una brecha de conocimientos entre especialistas en sistemas mecatrónicos y especialistas en planeación de la producción que deja fuera del análisis a la administración energética [3]. La ausencia de una solución híbrida entre ambas disciplinas, que combine la programación de manipuladores industriales con estrategias de gestión de la producción, impacta negativamente a los sistemas de manufactura avanzada.

El modelo desarrollado en este documento plantea un marco de simulación, ejecución y validación, que integra el rendimiento energético de los servomotores de un robot KUKA KR 16-2 bajo distintos escenarios de trabajo, con un análisis sistémico mediante herramientas pertenecientes a la metodología Seis Sigma Esbelto. Lo anterior con el propósito de asistir a planeadores, programadores y tomadores de decisiones en la identificación, medición, análisis, mejora y control de áreas energéticas de oportunidad en el diseño de procesos de producción y programación de celdas robotizadas. Como se muestra en la figura 1.1, las metodologías convencionales de ingeniería industrial como Manufactura Esbelta es utilizada de marco para el análisis de operaciones esbeltas y libres de desperdicios, con el fin de asegurar que cada secuencia agregue valor al proceso. Por otro lado, Seis Sigma es parcialmente usado como mecanismo de control estadístico de procesos robóticos, en relación con su desempeño energético y, con ello, lograr un esquema de monitoreo y control de dichas variables de sostenibilidad.



Figura 1.1: Métodos de ingeniería industrial en robótica industrial

1.2 Objetivo general

Desarrollar un modelo de operación esbelta para robots industriales desde una perspectiva energética, mediante la aplicación de una selección de herramientas de la metodología Seis Sigma Esbelto al proceso de mejoramiento continuo de trayectorias de movimiento y configuración de parámetros de operación.

1.3 Objetivos específicos

- 1) Seleccionar, adaptar e integrar herramientas de la metodología Seis Sigma Esbelto para su aplicación en proyectos energéticos.
- 2) Diseñar escenarios de trabajo para una operación de manejo de materiales, con el fin de aplicar, analizar y validar el modelo de operación esbelta.
- 3) Realizar simulación de la celda robótica, y verificar limitantes de operación a través del *software* Siemens Tecnomatix en su módulo Process Simulate.
- 4) Realizar pruebas físicas para cada escenario de trabajo, y monitorear en tiempo real el comportamiento presentado por los servomotores de un robot KUKA KR 16-2.
- 5) Analizar resultados obtenidos de la validación del modelo de operación esbelta, y plantear conclusiones generales de los experimentos.

2 Justificación

2.1 Motivaciones

Este trabajo de investigación aplicada pretende aportar nuevas técnicas en tópicos de manufactura avanzada, en específico a los denominados como Industria 4.0. Dicho concepto contempla a la robótica como actor protagónico de los sistemas de producción mundial en el futuro inmediato [4], por esta razón la generación de conocimiento e innovaciones prácticas en este ramo es de alto impacto para el contexto interno y externo.

A nivel local los beneficios del proyecto se vinculan con las líneas de generación y aplicación del conocimiento de la Maestría en Ingeniería en Manufactura Avanzada de la Universidad Iberoamericana Puebla, en particular con las líneas Manufactura y Automatización Inteligentes, y Energía, Medio Ambiente y Alimentos [5]. De igual manera, hay afinidad con la estrategia del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) que tiene como áreas prioritarias del Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación (PECiTI) tanto a la manufactura de alta tecnología, automatización y robótica, como al consumo sustentable de energía [6]. Así mismo, a nivel internacional, la Organización de las Naciones Unidas, a través de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible para el 2030 busca: duplicar la tasa mundial de mejora de eficiencia energética; modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales [7]. La propuesta que se presenta en este documento se posiciona como un proyecto tecnológico afín a la estrategia de desarrollo de la localidad y del país, donde los resultados esperados están también siendo encaminados a los esfuerzos de la Organización de Naciones Unidas para el futuro global a corto y mediano plazo.

2.2 Análisis del entorno

El sector industrial ha sido favorecido por la aplicación de la robótica dentro de su cadena de suministro, teniendo como principales ventajas la alta repetibilidad y reproducibilidad de procesos a costos inferiores, si esta se compara con sistemas que mayormente integran personal humano. Evidencia de esto es el crecimiento en la adopción de manipuladores industriales por organizaciones de distintos giros.

La Federación Internacional de Robótica, IFR por sus siglas en inglés, ha publicado en su reporte ejecutivo del año 2017 comportamientos y tendencias del mercado de la robótica en su uso industrial. De acuerdo con la IFR [8] y la figura 2.1, la población mundial de robots está creciendo, en promedio, 14% anualmente. Según este mismo reporte, del año 2010 al 2020 se tiene proyectado un incremento del 300% en dicha población, pasando de uno a tres millones de unidades activas.

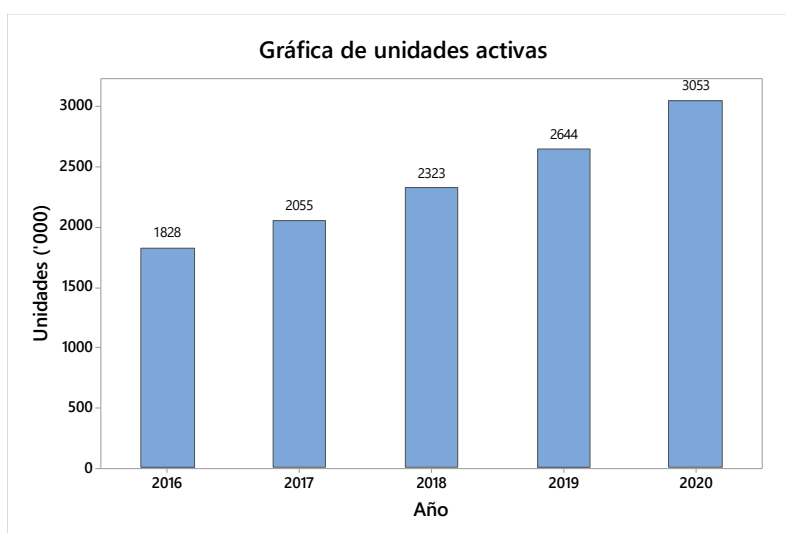


Figura 2.1: Número de robots industriales en operación

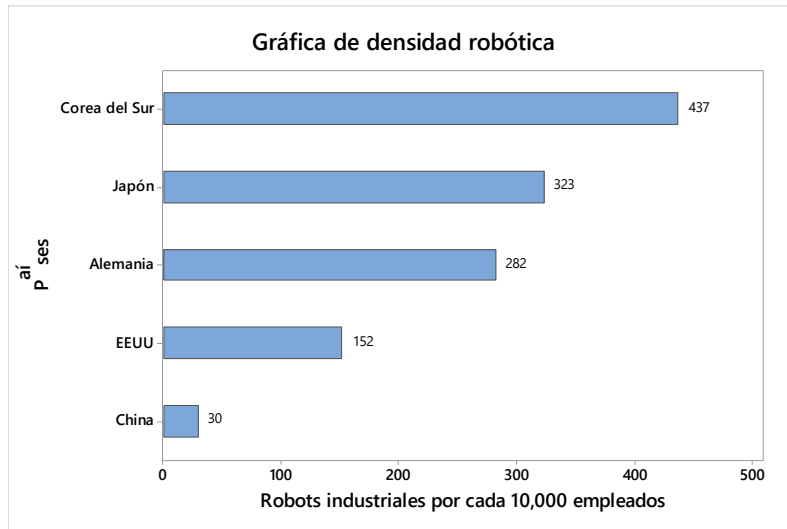


Figura 2.2: Robots industriales por cada 10,000 empleados

Otro índice para destacar dentro del mercado es la densidad de estos dispositivos en el sector de la manufactura. Como se muestra en la figura 2.2, Corea del Sur es el país que posee la concentración de robots más alta en los pisos de producción. Por tal razón, el país asiático es un referente global en términos de adopción, integración y administración de sistemas robotizados. La infraestructura robótica con la que cuentan estos países se aplica principalmente en las industrias señaladas en la figura 2.3, donde la automotriz se posiciona en el primer lugar, empleando aproximadamente a 4 de cada 10 robots activos.

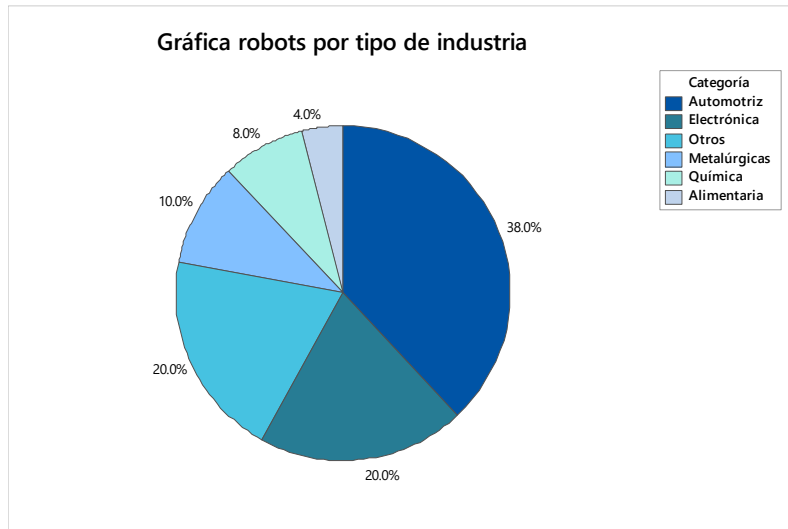


Figura 2.3: Distribución de robots por tipo de industria

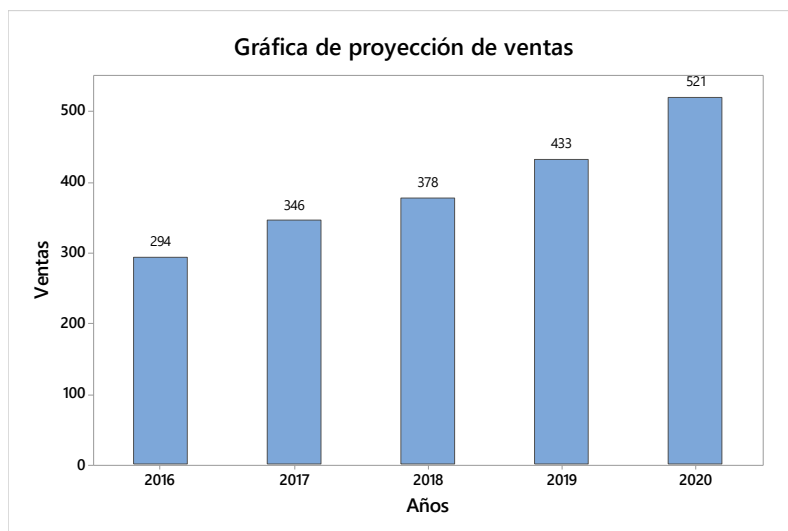


Figura 2.4: Proyección de ventas

Finalmente, en la figura 2.4 se muestra la tendencia en las ventas de manipuladores industriales a nivel mundial. La proyección presenta un incremento promedio anual del 20% para el periodo 2016-2020. La organización manufacturera debe ser competitiva en el entorno internacional, por lo que no sólo debe limitarse a adquirir la tecnología sino optimizar la productividad de los dispositivos robóticos en sus distintas aplicaciones dentro de la cadena de suministro.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

3 Estado del arte

3.1 Estado de la técnica

La investigación documental realizada para dar soporte teórico y práctico a este modelo de eficiencia energética está centrada en las especialidades señaladas en la figura 3.1. Se puede observar producción académica proveniente principalmente de universidades y centros de investigación de Estados Unidos, Alemania, Corea del Sur y China.

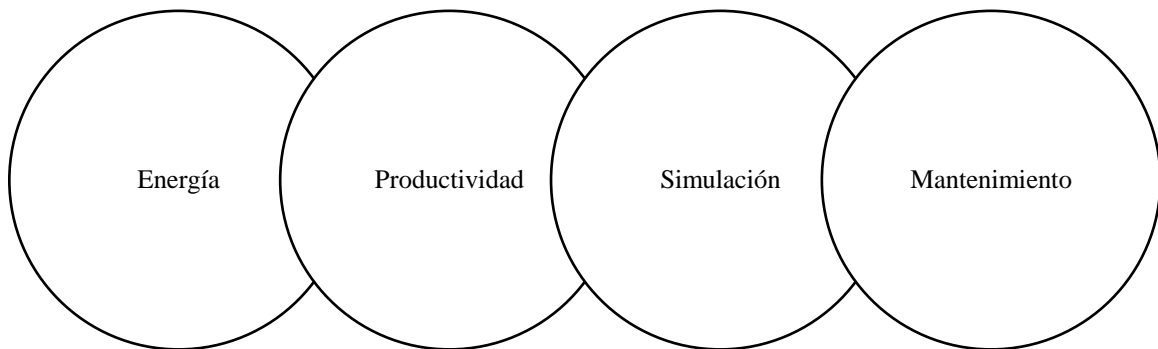


Figura 3.1: Áreas de investigación documental

En estudios de energía aplicada a la robótica, Paryanto, Brossog y Bornschlegl [1] realizan una serie de simulaciones modificando cargas de trabajo y velocidades con el objetivo de reducir el consumo energético de robots industriales, se concluye que existe una fuerte correlación entre dichas variables que incrementa en un 1.2% el consumo por cada

kilogramo de carga adicional. Por su parte, Burghardt *et al.* [9] experimentan físicamente con distintos escenarios de trabajo en parámetros de velocidad y aceleración, consiguiendo una reducción del 15% del consumo energético manteniendo el tiempo de ciclo por debajo de la meta establecida.

El uso de herramientas de ingeniería industrial para sistemas de manufactura y energía está planteado por Micieta, Markovic y Binasova [3], contemplando metodologías como Seis Sigma y Manufactura Esbelta obteniendo un retorno de inversión en dos años. Un enfoque similar al del trabajo anterior es el presentado por Bornschlegl *et al.* [10], quienes hacen una planeación del consumo energético mediante ingeniería de métodos, desarrollando un modelo para robótica industrial para su futura ponderación. Mariano, Nucci, del Prete y Grieco [11] y Joon-Yung y Park [2] elaboran un marco de optimización para minimizar el consumo energético y costos de producción, a través de una secuenciación de producción inteligente y técnicas de investigación de operaciones. Los resultados aseguran el cumplimiento de KPIs , Key Performance Indicators se traduce al español como Indicadores de Desempeño Claves, en entornos flexibles de tarifas de energía y demanda del mercado; siendo necesario, sin embargo, una inversión inicial en diversificación de fuentes y almacenamiento de energía como paneles solares, turbinas eólicas, celdas de combustibles y baterías de almacenamiento.

Trabajos con una perspectiva más general en sostenibilidad y sistemas de manufactura, como los casos de Rubio, Llopis-Albert, Valero y Suñer [12], Abu-Dakka, Assad, Alkhdour y Abderahim [13], y Pandian y Ali [14], evalúan la productividad de líneas de ensamble robotizadas mediante la planeación matemática y simulada de trayectorias de movimiento, en estos casos los resultados señalan un posible incremento de las ganancias en

5% y de la productividad en 20%. Por último, Nganga, Pintelon, Martin y Chemweno [15] llevan a cabo un estudio de simulación de efectividad de maquinaria desde el punto de vista de políticas de mantenimiento preventivo y predictivo.

4 Marco conceptual

4.1 Robótica industrial

4.1.1 Antecedentes

La robótica industrial moderna tiene su origen en el siglo XIX, cuando hiladoras y telares mecánicos se crearon para la industria textil. En algunos de estos casos, ya se implementaba un sistema de tarjetas perforadas de programación. Este punto es conocido como el inicio formal de la automatización industrial [16]. Durante la parte final de la Segunda Guerra Mundial, se desarrollaron dispositivos mecánicos telemanipulados; una década después se dejó atrás a la transmisión mecánica por una de tipo eléctrica; y en los años sesenta se empezaron a comercializar, ya con el nombre de robots, como una solución para la industria nuclear, militar y espacial.

Actualmente se puede definir a este tipo de máquinas como: Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas [17]. A partir de ese momento, países como Estados Unidos, Japón y Alemania han tomado la batuta en el desarrollo de robots industriales para manufactura y, más recientemente, servicios. Las aplicaciones más comunes en manufactura son manipulación de materiales, soldadura, pintura y ensamblado.

Del mismo modo, reciben distintas clasificaciones de acuerdo con su dinámica de funcionamiento o grado de tecnología integrada. La Federación Internacional de Robótica clasifica a los robots industriales en:

1. Secuencial
2. Trayectoria controlable
3. Adaptativo
4. Telemanipulado

Por su parte, la Asociación Francesa de Robótica Industrial (AFRI) clasifica a los robots industriales por generaciones como se plasma en la tabla 4.1:

Tabla 4.1: Generaciones de la robótica industrial

| | |
|-------------------------------|--|
| Primera Generación | Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno. |
| Segunda Generación | Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia. Localiza, clasifica y detecta esfuerzos adaptando sus movimientos. |
| Tercera Generación | Se realiza su programación mediante un lenguaje natural. Posee capacidad para la planificación automática de tareas. |

De acuerdo con [18], generaciones posteriores de manipuladores industriales tendrán la integración total de sensores inteligentes conectados a sistemas de información, y técnicas de control a través de protocolos de inteligencia artificial.

4.1.2 Cinemática del robot industrial

La cinemática de robots industriales analiza al movimiento de estos dispositivos respecto a un sistema de referencia, y es usada para su modelación compleja. Tiene como finalidad describir la interacción que existe entre la posición y orientación del extremo final del robot, con el sistema de coordenadas de sus articulaciones.

Existen dos acercamientos distintos para analizar cinemáticamente manipuladores industriales, siendo estos los métodos cinemática directa y cinemática inversa. El primer método refiere a la determinación de la posición y orientación del extremo final del robot, utilizando valores ya establecidos en su configuración. Mientras que el segundo, cuenta con la información de posición y orientación del extremo final, y se busca la configuración necesaria del robot.

4.1.3 Problema cinemático directo

El método de cinemática directa, como fue mencionado anteriormente, se emplea para el cálculo de la posición y orientación del extremo final del robot, conociendo la configuración de los ejes. Esta configuración hace alusión a los ángulos para los ejes rotativos y a las extensiones para los ejes prismáticos de cada articulación.

Un marco de referencia para solucionar casos de cinemática directa en robótica es el algoritmo de Denavit-Hartenberg, que aplica un método matricial que permite establecer de manera ordenada un sistema de coordenadas ligado a cada eslabón de una cadena articulada, pudiéndose determinar las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa [16].

$$\begin{aligned}
A_i &= Rot_{z,\theta_1} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i} \\
&= \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i S\alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.1}
\end{aligned}$$

Cada matriz de transformación en la cadena articulada es un conjunto de cuatro transformaciones básicas como se puede ver en la ecuación 4.1. En esta ecuación los términos referidos como *Rot* representa a la rotación entorno al eje z o x en un ángulo θ_i o α_i , mientras que *Trans* representa a la translación a lo largo del eje z o x en la magnitud d_i o a_i .

Las variables del algoritmo Denavit-Hartenberg θ_i , a_i , d_i y α_i , como se muestra en la figura 4.1, son los parámetros establecidos para cada eslabón individual, donde una vez definidos dichos parámetros, es posible relacionar la cadena articulada completa del robot.

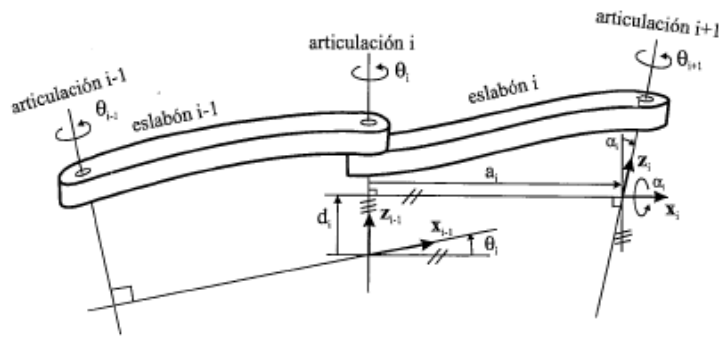


Figura 4.1: Parámetros D-H para un eslabón giratorio. Recuperado de [16]

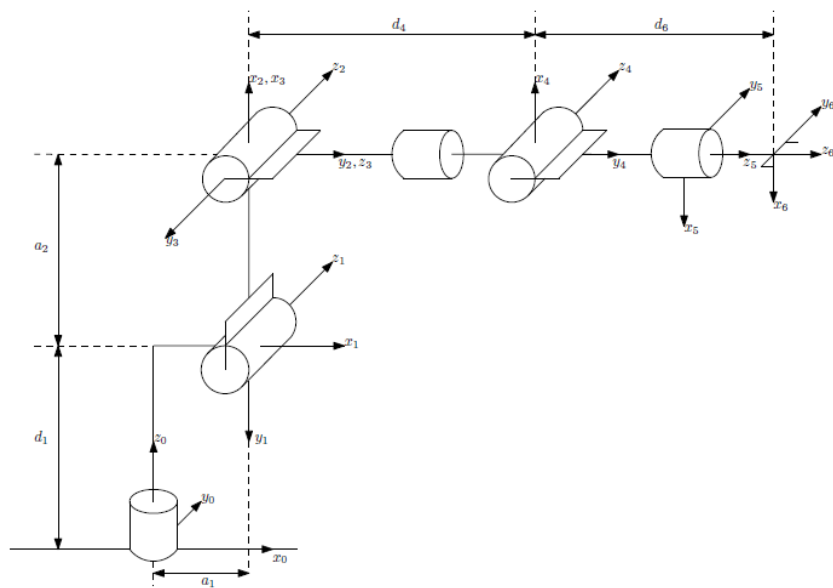


Figura 4.2: Asignación de ejes de referencia para robot de seis grados de libertad. Recuperado de [16]

En la figura 4.2 se presentan los ejes referenciales para un robot de seis grados de libertad siguiendo el algoritmo Denavit-Hartenberg. A partir de estos sistemas de referencia, se determinan los parámetros de dicho manipulador industrial. En la tabla 4.2 se encuentra la relación de parámetros para cada eslabón individual.

Tabla 4.2: Parámetros DH para un robot de 6 grados de libertad

| Eje i | θ_i | d_i | a_i | α_i |
|-------|------------------------|-------|-------|-------------|
| 1 | θ_1 | d_1 | a_1 | -90° |
| 2 | $\theta_2 - 90^\circ$ | 0 | a_2 | 0 |
| 3 | θ_3 | 0 | 0 | -90° |
| 4 | θ_4 | d_4 | 0 | 90° |
| 5 | $\theta_5 + 180^\circ$ | 0 | 0 | 90° |
| 6 | θ_6 | d_6 | 0 | 0 |

Tras obtener los valores de la tabla 4.2, éstos se incluyen en las matrices de desplazamiento listadas a continuación:

$$A_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & -S\theta_1 & a_1 C\theta_1 \\ S\theta_1 & 0 & C\theta_1 & a_1 S\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & a_2 S\theta_2 \\ -C\theta_2 & S\theta_2 & 0 & -a_2 C\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & 0 & -S\theta_3 & 0 \\ S\theta_3 & 0 & C\theta_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} C\theta_4 & 0 & S\theta_4 & 0 \\ S\theta_4 & 0 & -C\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} -C\theta_5 & 0 & -S\theta_5 & 0 \\ -S\theta_5 & 0 & C\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} C\theta_6 & -S\theta_6 & 0 & 0 \\ S\theta_6 & C\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Al sustituir valores y realizar la multiplicación de las matrices de desplazamiento de la ecuación 4.2, se encuentra la expresión 4.3 que describe la posición y orientación del extremo final del robot con respecto a su base.

$$T = {}^0A_6 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 \quad (4.3)$$

4.1.4 Problema cinemático inverso

El problema cinemático inverso tiene como objetivo determinar los valores asignados a las coordenadas articulares del manipulador industrial para lograr que su extremo final alcance una posición y orientación establecida. Existen distintos métodos para solucionar el caso inverso, donde se busca una relación matemática del tipo:

$$q_k = f_k(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \quad k = 1 \dots n \quad (GDL) \quad (4.4)$$

El planteamiento del problema se puede simplificar cuando se conocen previamente los comportamientos cinemáticos del robot, y de este modo realizar una división del análisis con base en sus ejes. Los tres primeros ejes de la cadena articulada definen en gran medida la posición final del extremo; y el segundo grupo de ejes, por su parte, establece la orientación de la herramienta de trabajo del robot. El método de desacoplamiento cinemático utiliza esta partición de objetivos que permite resolver cinemáticamente al primer grupo de ejes con

métodos trigonométricos y geométricos; y al segundo, modificando las ecuaciones del caso cinemático directo que es establecida bajo la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} n & o & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [t_{ij}] \quad (4.5)$$

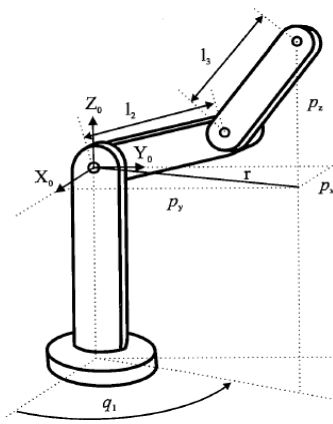


Figura 4.3: Base de robot articular. Recuperado de [16]

De acuerdo con [16], la solución del problema cinemático inverso mediante métodos geométricos, que se aplica a los tres primeros ejes del manipulador industrial, busca relaciones geométricas en las que intervendrán las coordenadas del extremo del robot, sus coordenadas articulares y las dimensiones físicas de sus elementos. La figura 4.3 es una representación del primer conjunto de ejes robóticos a analizar, donde son resaltadas las coordenadas \$(p_x, p_y, p_z)\$ que hacen referencia al sistema de coordenadas donde se pretende ubicar el extremo final.

El valor de θ_1 viene dado por:

$$\theta_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{P_y}{P_x} \right) \quad (4.6)$$

Obteniendo θ_1 y considerando ahora sólo los dos ejes restantes se puede expresar θ_3 :

$$\theta_3 = \operatorname{arctg} \left(\frac{\pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3}}{\cos \theta_3} \right) \quad (4.7)$$

$$\cos \theta_3 = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2 l_2 l_3}$$

En la figura 4.4 se exponen las dos soluciones posibles para θ_3 , en donde el codo dependiendo si se toma el signo positivo o negativo de la ecuación 4.7, es la posición que adoptarán los primeros ejes de la cadena articulada.

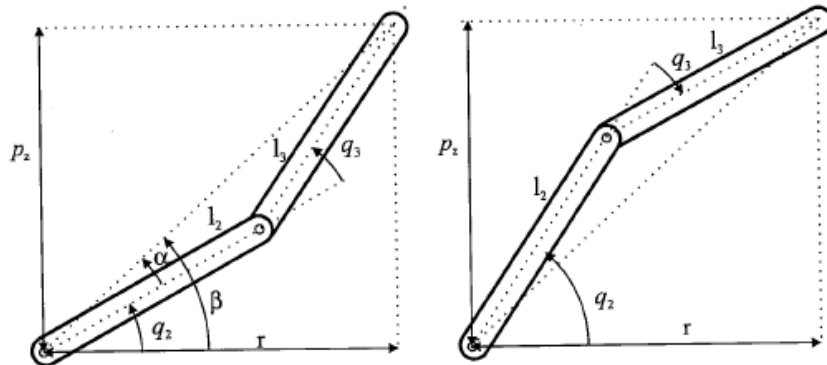


Figura 4.4: Soluciones negativa y positiva para θ_3 . Recuperado de [16]

Finalmente, θ_2 está definido como:

$$\theta_2 = \arctg \left(\frac{p_z}{\pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2}} \right) - \arctg \left(\frac{I_3 \operatorname{sen}\theta_3}{I_2 + I_3 \operatorname{cos}\theta_3} \right) \quad (4.8)$$

Las ecuaciones 4.6, 4.7 y 4.8 resuelven el problema cinemático inverso para los ejes que definen la posición del extremo final del robot.

4.1.5 Matriz Jacobiana

La matriz Jacobiana obtiene la relación entre velocidades de las coordenadas articulares y las de la posición y orientación del robot. Esto permite, de acuerdo con [16], a su sistema de control, establecer qué velocidades debe imprimir a cada articulación para conseguir que el extremo desarrolle una trayectoria temporal concreta, por ejemplo, una línea recta a velocidad constante. Asimismo, el método se divide en matriz Jacobiana directa, señalada en la ecuación 4.9, la cual permite conocer las velocidades del extremo del robot a partir de los valores de las velocidades de cada articulación. Por su parte, la matriz Jacobiana inversa, plasmada en la ecuación 4.10, permitirá conocer las velocidades articulares necesarias para obtener unas velocidades determinadas en el extremo del robot.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = J \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad \text{con } J = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_x}{\delta q_1} & \dots & \frac{\delta f_x}{\delta q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta f_y}{\delta q_1} & \dots & \frac{\delta f_y}{\delta q_n} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \gamma \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} x \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ y \end{bmatrix} \text{ con } J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x} & \dots & \frac{\delta f_1}{\delta y} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta f_n}{\delta x} & \dots & \frac{\delta f_n}{\delta y} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

4.1.6 Dinámica del robot

El modelo dinámico de un robot tiene por objetivo conocer la relación entre el movimiento del robot y las fuerzas implicadas en el mismo según lo plantea [16]. Dicha relación se obtiene mediante el denominado modelo dinámico, que relaciona matemáticamente la localización del robot definida por sus variables articulares o por las coordenadas de localización de su extremo, y sus derivadas: velocidad y aceleración; las fuerzas y pares aplicados en las articulaciones o en el extremo del robot; y los parámetros dimensionales del robot, como longitud, masas e inercias de sus elementos. La obtención del modelo dinámico de un mecanismo, y en particular de un robot, se basa fundamentalmente en el planteamiento del equilibrio de fuerzas establecido en la segunda ley de Newton, o su equivalente para movimientos de rotación, la denominada Ley de Euler representada en la ecuación 4.11. Finalmente, y partiendo del modelo dinámico establecido, se incluye la ecuación 4.12 de potencia y consumo energético para un robot industrial.

$$\sum F = mv \quad \sum T = I\omega + \omega \times (I\omega) \quad (4.11)$$

$$P = \sum_{i=1}^n T_i \omega_i \frac{1}{\prod_{i=n}^1 \eta_{m,i} \eta_{e,i}} \quad W = \int_0^t P dt \quad (4.12)$$

4.2 Metodología Seis Sigma Esbelto

4.2.1 Seis Sigma

La filosofía Seis Sigma fue desarrollada por la empresa estadounidense Motorola en 1987, y se puede definir como: Estrategia de mejora en los negocios que busca identificar y eliminar las causas de defectos o errores en los procesos de la organización, concentrándose en actividades relevantes al cliente de acuerdo con Snee [19]. Los componentes clave para la implementación exitosa de Seis Sigma están relacionados con el compromiso de la alta gerencia, infraestructura de soporte, capacitación y herramientas estadísticas como lo señala Gutiérrez, Buntinza y Barrale [20]. De acuerdo con Nāshund [21] estas características están altamente involucradas en la implementación de Seis Sigma:

1. Entendimiento de las expectativas por el piso de producción.
2. Liderazgo de la alta gerencia de la organización.
3. Correcta aplicación del ciclo de mejora continua.
4. Aplicación rápida del proyecto de 3 a 6 meses.
5. Definición clara de los resultados esperados.
6. Enfoque en el proceso y el cliente.
7. Mejora a través de un acercamiento estadístico.

Algunas de sus herramientas más comunes son el análisis de Pareto, diagrama de Ishikawa, cartas de control y regresión variable o multivariable; éstas se implementan en la organización a través del ciclo de mejora continua DMAIC, Define-Measure,-Analyze,-Improve-Control que se traduce al español como Definir-Medir-Analizar-Mejorar-Controlar,

y pueden tomarse como marco de referencia para la creación de planes de administración energética como lo ha comprobado Lee, Yuvamitra, Guiberteau y Kozman [22].

4.2.2 Manufactura Esbelta

La metodología Manufactura Esbelta fue desarrollada en el Japón posterior a la Segunda Guerra Mundial, donde la productividad y optimización de los recursos eran significativamente necesarios para la supervivencia de la industria automotriz y textil del país asiático. Manufactura Esbelta, remarcado por Staatsa, Brunnerb y Upton [23], busca reducir el esfuerzo humano, inventario, tiempo de entrega, y espacio de producción para cubrir la demanda del mercado, entregando productos de alta calidad al más bajo costo. Tomando como referencia a Thomas, Barton y Chuke-Okafor [24] la metodología contempla cinco principios clave:

1. Entendimiento de los desperdicios
2. Entendimiento de la cadena de valor
3. Mapeo de procesos
4. Producción Pull, traducido al español como Jalar
5. Mejora continua

Una herramienta importante para la implementación de Manufactura Esbelta es el Mapa de Flujo de Valor, el cual identifica y analiza a las actividades que agregan valor al proceso o producto. Este es un primer diagnóstico de las áreas de oportunidad de los recursos asignados por la organización, desde una perspectiva global de la planta productiva hasta un proceso individual de manufactura [3].

4.2.3 Seis Sigma Esbelto

Este modelo híbrido surge de la necesidad de obtener conjuntamente los beneficios analíticos de Seis Sigma con la visión sistémica de Manufactura Esbelta. La integración de ambas metodologías conduce a la reducción de desperdicios, variabilidad de procesos y errores, mientras contribuye a mejoras en los procesos de negocio [25]. Según Snee [26] estos son los objetivos de mejora de Seis Sigma Esbelto:

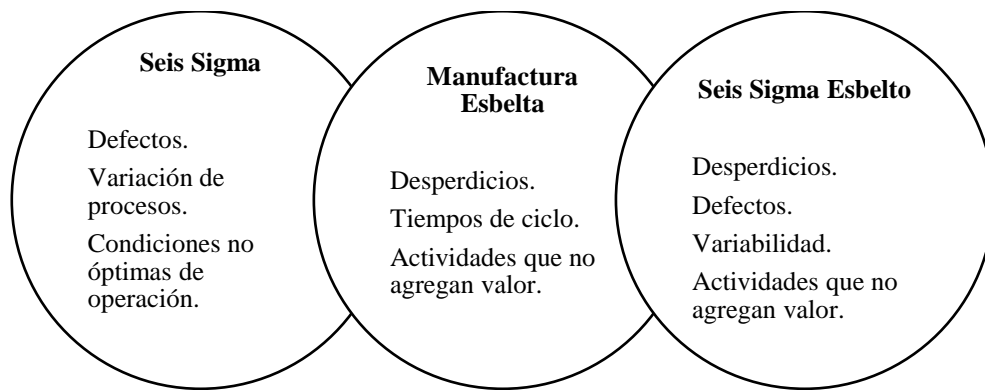


Figura 4.5: Objetivos de mejora Seis Sigma Esbelto

Thomas, Barton y Chuke-Okafor [24] realizaron estudios sobre el impacto de Seis Sigma Esbelto en pequeñas empresas dedicadas a la manufactura, donde se logró una reducción del 55% en costos de desperdicio de materiales, incremento del OEE, Overall Equipment Effectiveness en inglés y que puede ser traducido al español como Eficiencia General de Equipos, de 34% a 55% en su tiempo de disponibilidad para producción, y una reducción del 12% anual en consumo energético. El enfoque integral que Seis Sigma Esbelto ofrece es compatible con el objetivo de este modelo de gestión robótica y sus resultados esperados en áreas de energía, productividad, mantenimiento y control ambiental.

4.2.4 Metodología DMAIC

DMAIC es una metodología estructurada de solución de problemas usada ampliamente en la industria de la manufactura. Las letras son un acrónimo proveniente, del nombre en inglés, de las 5 fases del ciclo de mejora de Seis Sigma: Definir-Medir-Analizar-Mejorar-Controlar. Dichas fases guían a un equipo de trabajo desde la definición del problema, a través de la implementación de soluciones ligadas a causas subyacentes, y estableciendo mejores prácticas para asegurar que las soluciones permanezcan bajo control como lo indican George, Rowlands, Price y Maxey [27].

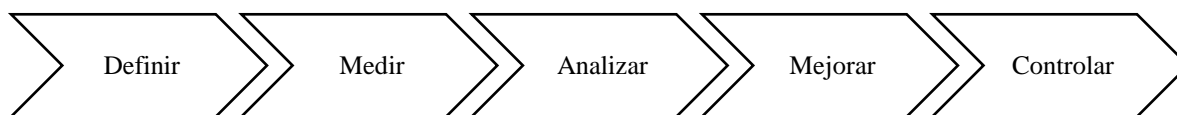


Figura 4.6: Fases de la implementación de Seis Sigma

De acuerdo con estos autores, el propósito de cada fase de la figura 4.6 son los siguientes:

1. Definir - Alcanzar un acuerdo entre el equipo de trabajo y colaboradores sobre el alcance, metas, y objetivos financieros y operativos del proyecto.
2. Medir - Entender completamente el estado actual del proceso y recolectar datos confiables sobre velocidad, calidad y costos asociados al proceso, para exponer las causas subyacentes al problema.
3. Analizar - Precisar y verificar las causas que afectan a las variables de entrada y salida claves ligadas a las metas del proyecto.

4. Mejorar - Aprender de los pilotos de solución seleccionados y ejecutar su implementación a gran escala.
5. Controlar - Finalizar actividades del proyecto y entregar procesos mejorados al dueño de éstos con procedimientos para mantener sus beneficios.

Cada fase de la metodología DMAIC se apoya de herramientas analíticas o estadísticas para su ejecución. La figura 4.7 despliega algunas de las herramientas que comúnmente son seleccionadas para cada momento del proyecto de mejora continua, dependiendo de los recursos y necesidades específicos de la organización.

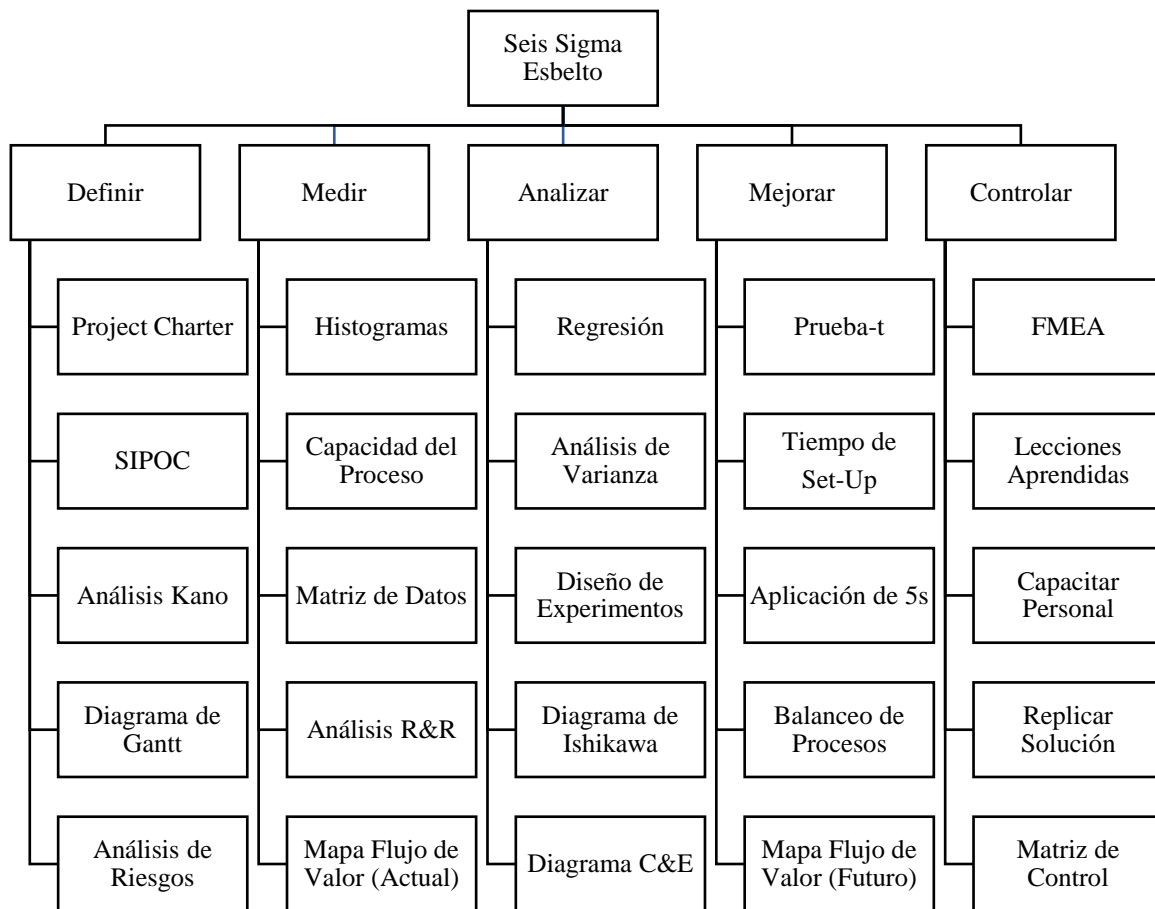


Figura 4.7: Herramientas para cada fase DMAIC

4.2.5 Filosofía Kaizen

Kaizen es un método para acelerar el proceso de mejora continua en cualquier contexto. En un principio aplicado a herramientas de Manufactura Esbelta, para luego ser adaptado a la metodología DMAIC. Kaizen es usado en proyectos intensivos en los que se separa al trabajador de sus actividades cotidianas. Las características más importantes del método según George, Rowlands, Price y Maxey [27] son:

1. El equipo trabaja de 3 a 5 días de tiempo completo.
2. La gerencia se enfoca en actividades de soporte.
3. El proyecto está completamente definido desde el inicio.
4. Los datos básicos ya se han recolectado.
5. La implementación de acciones es inmediata.

En la tabla 4.4 se puede visualizar la planeación y distribución de actividades de un proyecto Kaizen bajo la metodología DMAIC a lo largo de la semana de aplicación.

Tabla 4.4: Plan Kaizen

| Momento | Fase DMAIC | Actividades y entregables |
|----------------|-------------------|--|
| Semana previa | Definir | Determinación de proyecto, equipo y material |
| Lunes | Medir | Elaboración de mapa de flujo de valor |
| Martes | Analizar | Identificación y validación de causas raíz |
| Miércoles | Mejorar | Evaluación de alternativas y pilotos de solución |
| Jueves | Control | Documentación y plan de implementación |
| Viernes | - | Presentación de resultados |
| Seguimiento | - | Ajustes e implementación a gran escala |

CAPÍTULO 3

MODELO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y MEJORA CONTINUA

5 Componentes del modelo

5.1 Estrategias de operación energética esbelta

Múltiples antecedentes de estudios y trabajos de investigación, como el realizado por Paryanto, Brossog, Bornschlegl y Franke [1] han desarrollado distintos acercamientos para optimizar el consumo energético de las operaciones de robots industriales añadiendo unidades y variables energéticas desde distintas etapas del ciclo de vida del proyecto.

El modelo de operación esbelta sigue el razonamiento de estos antecedentes y es dividido según la etapa del diseño de producción en el que serán aplicadas las herramientas de mejora. Estas se separan en planeación, puesta en marcha y optimización del proceso. La primera hace referencia al diseño y planeación previa de la organización donde se asignan los recursos y tiempos para cada subproceso. Luego de esto, la puesta en marcha ejecuta la función de poner a prueba y ajustar los subprocesos para su establecimiento en la línea de producción. Finalmente, el enfoque de optimización del proceso hace énfasis en la intervención de procesos vigentes de la organización y lo cuales se encuentran, en todo momento, susceptibles de mejora. Cada etapa, de acuerdo con su nivel de desarrollo, está asociada a un grado de flexibilidad de modificación de procesos, la cual va disminuyendo en función con su avance de implementación en el piso de producción. El modelo de operación esbelta presentado en este trabajo se centra en la etapa de optimización del proceso en entornos de baja flexibilidad.

La figura 5.1 muestra las estrategias de mejora para cada etapa de diseño de procesos productivos. Eficientar trayectorias de movimiento y ajustar tiempos de frenado son acciones efectivas para disminuir el consumo energético de operaciones robóticas. A partir de estas dos acciones se extiende el análisis desde la definición eficiente de trayectorias, secuenciación eficiente de operaciones y la programación eficiente de parámetros de operación. Estas tres aristas que componen al modelo de operación esbelta se integran en la figura 5.2, que adicionalmente incluye las tácticas de análisis y mejora desde el punto de vista dinámico y energético del robot industrial en cuestión.

Modelo de operación energética esbelta



Figura 5.1 Reducción de consumo energético (planeación de la producción)



Figura 5.2 Reducción de consumo energético (programación del robot)

El análisis de la figura 5.2 se ejecuta de arriba hacia abajo considerando deseablemente la mayoría de las tácticas de mejora. El modelo contempla cada uno de los enfoques propuestos y en específico las características físicas de los ejes del robot, los servomotores de cada articulación y su lógica de funcionamiento.

5.2 Herramientas de operación energética esbelta

La estructuración de los formatos de análisis inicia con la realización de un resumen de datos técnicos del robot industrial, como se puede observar en la figura 5.3. Dicho resumen contiene información general sobre las características de trabajo como lo son rangos de dimensión, velocidad y carga. De igual manera, se lleva a cabo un estudio del espacio de trabajo y movimientos primarios de los ejes del robot. La verificación de ambientes libres de colisiones permite al programador tener un mayor abanico de posibilidades en cuanto a los puntos que puede alcanzar el manipulador industrial.

Posteriormente, como se muestra en la figura 5.4, se presentan datos seleccionados para los servomotores que incluyen torque estático, torque nominal, potencia nominal, momento de inercia y energía de frenado de cada una de las articulaciones del robot. Estas variables están directamente relacionadas con las ecuaciones de dinámica y consumo energético en trayectorias de movimiento que se incluyen en el formato. El objetivo es sintetizar e integrar propiedades de trabajo para su consideración inicial en el proceso de programación de tareas. Una trayectoria suave, descrito en el tercer bloque, se define con el tipo de movimiento que se configura en el robot industrial siendo estos lineal, circular y punto a punto. Aunado a esto se consideran a la velocidad y aceleración como variables que afectan presumiblemente a la fluidez del movimiento realizado en la tarea.

Por último, la lógica en términos del comportamiento de los ejes se establece en la figura 5.5, donde se hace una relación de los movimientos programados y las características de los servomotores, con el fin de aprovechar las ventajas operativas de cada articulación. Añadido a esta comparativa se complementa con información sobre la restricción de tiempo de ciclo y paros totales que debe cumplir la trayectoria previo y posterior a la intervención.

Características del robot

Robot: *Modelo*

Alcance máximo: *mm*

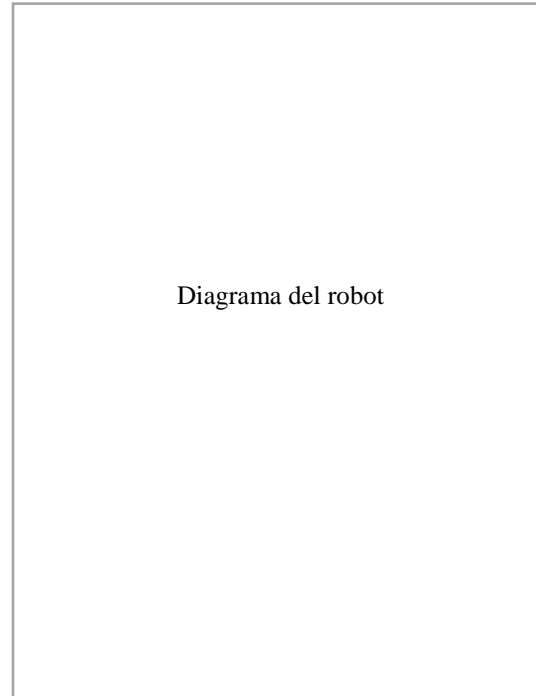
Carga de trabajo: *kg*

Número de ejes: *n grados de libertad*

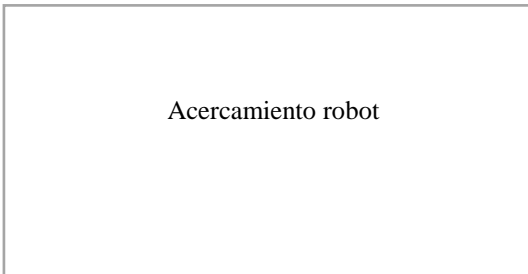
Masa total: *kg*

Especificaciones de trabajo del robot

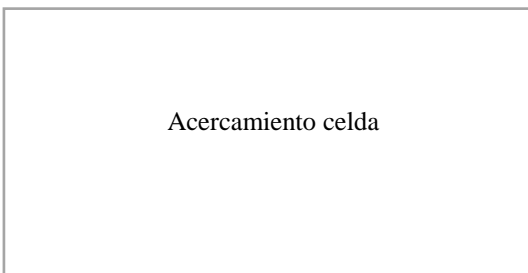
| Eje | Rango de trabajo | Velocidad de trabajo |
|-----|------------------|----------------------|
| 1 | \pm° | $\%/s$ |
| 2 | \pm° | $\%/s$ |
| 3 | \pm° | $\%/s$ |
| 4 | \pm° | $\%/s$ |
| 5 | \pm° | $\%/s$ |
| 6 | \pm° | $\%/s$ |



Verificación de colisiones



Descripción: *Análisis del robot*
Restricciones: *Alcance del robot en la celda*
Dictamen: *¿Ambiente libre de colisiones?*



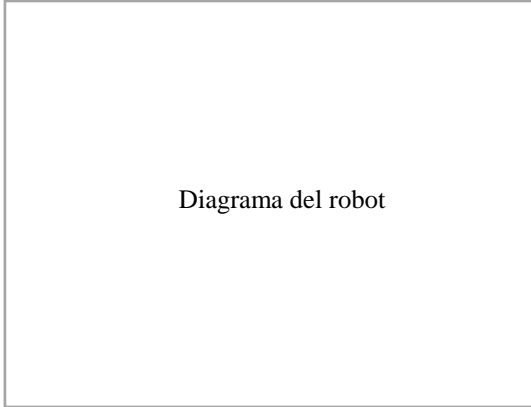
Descripción: *Análisis de la celda*
Restricciones: *Alcance del robot en la celda*
Dictamen: *¿Ambiente libre de colisiones?*

Figura 5.3 Formato de Definición eficiente de trayectorias (Robot)

Distribución de servomotores

Robot: *Modelo*

| Servo | Eje | Modelo |
|-------|-----|-----------------|
| A1 | 1 | Número de parte |
| A2 | 2 | Número de parte |
| A3 | 3 | Número de parte |
| A4 | 4 | Número de parte |
| A5 | 5 | Número de parte |
| A6 | 6 | Número de parte |



Características del servo

| Eje | Torque estático | Torque nominal | M. de inercia | Potencia nominal | Energía de freno |
|-----|-----------------|----------------|--------------------|------------------|------------------|
| 1 | Nm | Nm | kg*cm ² | kW | J |
| 2 | Nm | Nm | kg*cm ² | kW | J |
| 3 | Nm | Nm | kg*cm ² | kW | J |
| 4 | Nm | Nm | kg*cm ² | kW | J |
| 5 | Nm | Nm | kg*cm ² | kW | J |
| 6 | Nm | Nm | kg*cm ² | kW | J |

Modelo dinámico, ecuación de potencia y consumo energético

$$\sum F = mv \quad \sum T = I\omega + \omega \times (I\omega)$$

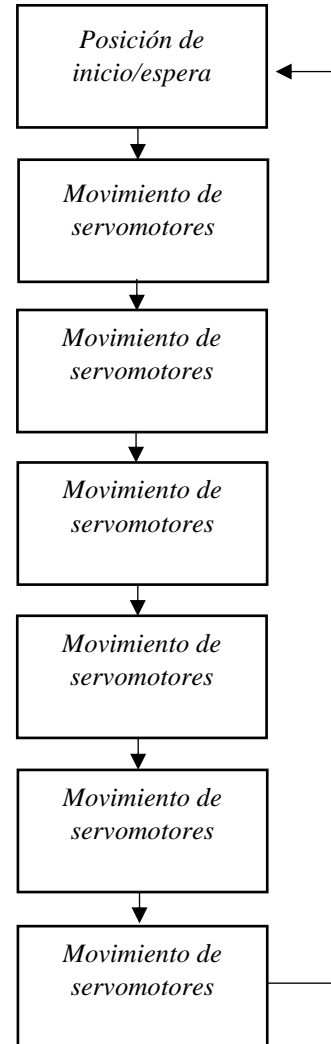
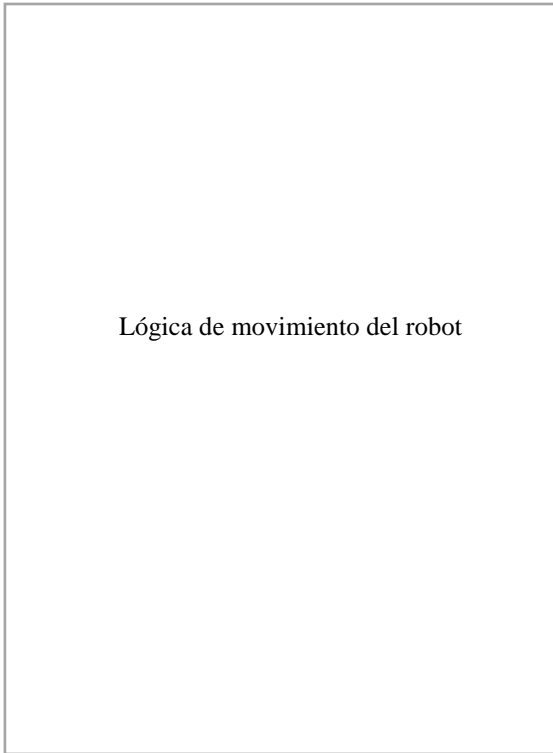
$$P = \sum_{i=1}^n T_i \omega_i \frac{1}{\prod_{i=1}^n \eta_{m,i} \eta_{e,i}} \quad W = \int_0^t P dt$$

Trayectoria suave y óptima

| | | | |
|------------------------|-------------|---------------|----------|
| Tipo de movimiento: | PTP_____ | CIRC_____ | LIN_____ |
| Configuración inicial: | % velocidad | % aceleración | |
| Configuración final: | % velocidad | % aceleración | |

Figura 5.4 Formato de definición eficiente de trayectorias (Servomotores)

Recorrido de la herramienta (TCP)



Relación Arranque-Alto

Puntos totales: # *puntos intermedios*

Altos totales: # *puntos de descanso*

Relación: % *de los puntos son descanso total*

Tiempo de la operación

Tiempo de ciclo asignado: *s*

Tiempo de ciclo inicial: *s*

Tiempo de ciclo final: *s*

*TCP – Tool center point, en español se traduce como punto central de la herramienta

Figura 5.5 Formato de secuenciación eficiente de operaciones

5.3 Métodos de eficiencia energética

Las herramientas integradas en el modelo provienen de la metodología Seis Sigma Esbelto, las cuales han sido modificadas para incluir métricas de variables energéticas en su análisis. En la figura 5.6 se presenta el cuadro con las herramientas desplegadas en cada fase del ciclo de la metodología DMAIC. Asimismo, se presentan y describen las herramientas para cada una de las fases del modelo de operación esbelta para robótica industrial.

Programación eficiente de parámetros de operación



Metodología DMAIC

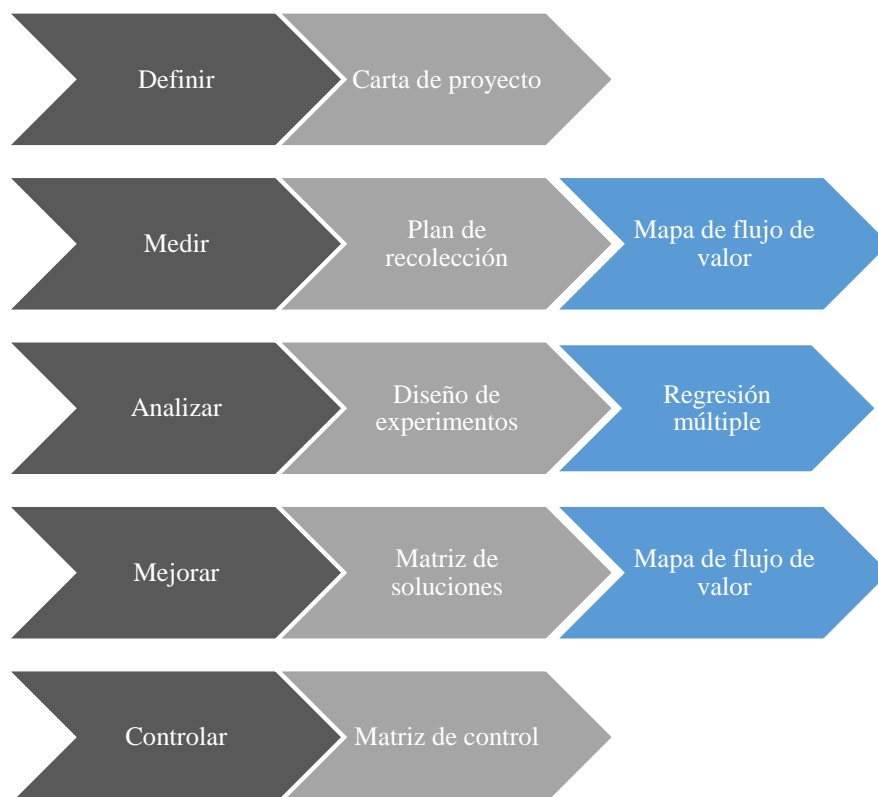


Figura 5.6 Metodología para programación eficiente de parámetros de operación

Definir

Herramienta: Carta de proyecto

Objetivo: Alcanzar un acuerdo dentro el equipo de trabajo en la definición de alcance, metas de desempeño y asignación de recursos desde una perspectiva energética.

Carta de proyecto



Título del proyecto

Nombre del proyecto

Fecha

DD/MM/AA

Necesidad del negocio

Estrategias de la empresa correspondientes a indicadores clave de desempeño y el mercado relacionadas a los objetivos del modelo de operación energética esbelta

Declaración del problema

*Situación actual de la organización en relación con la optimización de consumo energético
Evidencias y prácticas faltantes para el análisis de consumo energético*

Objetivo

*Meta establecida de ahorro de consumo energético para la intervención
Posible ecuación de variables independientes del modelo de operación*

Posibles Xs

Posible lista de variables independientes

Alcance

*Grado de avance hasta donde se planea intervenir la operación
Acciones que no forman parte del proceso de intervención*

Equipo

*Nombre del responsable de la intervención
Nombre del asesor de la intervención*

Programa

*Fecha de inicio
Fecha de cierre*

Figura 5.7 Formato de Carta de proyecto

Medir

Herramienta: Plan de recolección

Objetivo: Realizar una estrategia de obtención de datos especificando métodos y responsables de la medición de variables independientes relacionadas al consumo energético.

| Plan de recolección | | | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Métrica | Definición operativa | Fuente y ubicación | Método de recolección | Responsable de recolección |
| <i>Variable independiente X</i> | <i>Mecanismo para obtener los</i> | <i>Elemento del cual se planean</i> | <i>Dinámica y repositorio de</i> | <i>Nombre del responsable de</i> |
| <i>Variable independiente Y</i> | <i>datos de las variables</i> | <i>extraer los datos</i> | <i>registro de los datos</i> | <i>los datos requeridos</i> |
| <i>Variable independiente Z</i> | <i>independientes</i> | <i>requeridos</i> | <i>requeridos</i> | |

| | |
|---|--|
| ¿Cómo se usarán los datos? | ¿Cómo se mostrarán los resultados? |
| <i>Objetivo para el tratamiento e interpretación de los datos obtenidos</i> | <i>Método de presentación y visualización de los datos obtenidos</i> |



Figura 5.8 Formato de Plan de recolección

Herramienta: Mapa de flujo de valor (estado inicial)

Objetivo: Registrar métricas importantes de cada flujo de trabajo, información, y materiales de un proceso en su estado inicial incluyendo el consumo energético pico y medio de la operación asignada. De igual manera, se presenta el tiempo de ciclo establecido que se debe respetar en el proceso de intervención del proceso.

Mapa de flujo de valor (estado inicial)

IBERO
PUEBLA ®

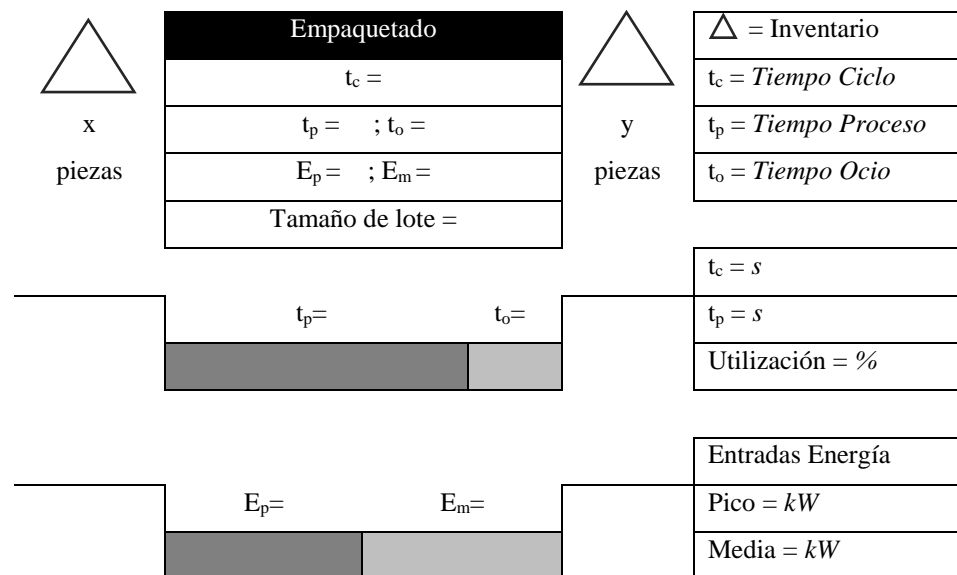


Figura 5.9 Formato de Mapa de flujo de valor (estado inicial)

Analizar

Herramienta: Diseño de experimentos

Objetivo: Identificar y cuantificar las entradas que tienen el impacto más grande en una determinada salida, y así mismo encontrar la combinación de factores que producen resultados optimizados. Las entradas provienen de la Carta del proyecto y son las variables independientes que presumiblemente tienen incidencia significativa en el consumo energético saliente.

Diagrama Factorial

IBERO
PUEBLA®

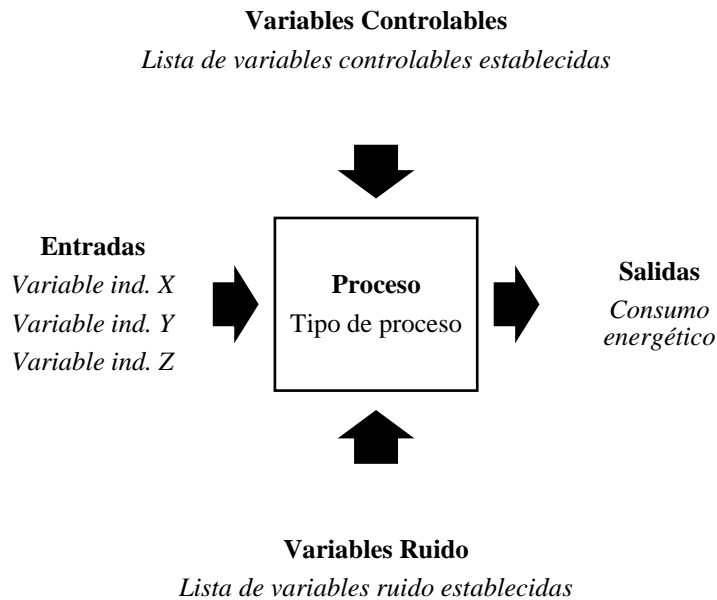


Figura 5.10 Diagrama Factorial del diseño experimental

Herramienta: Regresión Múltiple

Objetivo: Estudiar el impacto de múltiples variables X en una salida Y, y predecir comportamientos futuros con base en resultados pasados. La ecuación resultante ponderará el peso de las variables independientes establecidas en la Carta del proyecto en el consumo energético esperado de acuerdo con el tipo de operación que se ejecute en el robot industrial.

$$Y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_3$$

Donde Y equivale al consumo energético, x_n a las variables independientes estudiadas y B_s al peso de cada una de estas variables tiene en el resultado final.

Mejorar

Herramienta: Matriz de selección de soluciones

Objetivo: Documentar el proceso y criterio de selección de soluciones, y asegurar que las seleccionadas ofrezcan las mayores probabilidades de alcanzar la meta energética propuesta.

Matriz de soluciones

IBERO
PUEBLA ®

| | Impacto | Tiempo | Costo | Otros | Total | Posición |
|-----------|----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| Peso | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | | |
| Arreglo Q | $Q*P_1$ | $Q*P_2$ | $Q*P_3$ | $Q*P_4$ | $\sum Q*P_n$ | 1-3° |
| Arreglo W | $W*P_1$ | $W*P_2$ | $W*P_3$ | $W*P_4$ | $\sum W*P_n$ | 1-3° |
| Arreglo E | $E*P_1$ | $E*P_2$ | $E*P_3$ | $E*P_4$ | $\sum E*P_n$ | 1-3° |

Figura 5.11 Formato de Matriz de soluciones

Herramienta: Mapa de flujo de valor (estado futuro)

Objetivo: Registrar métricas importantes de cada flujo de trabajo, información, y materiales de un proceso en un posible estado futuro incluyendo el consumo energético pico y medio de la operación asignada. De igual manera, se presenta el tiempo de ciclo establecido que se debe respetar en el proceso de intervención del proceso.

Mapa de flujo de valor (estado inicial)

IBERO
PUEBLA ®

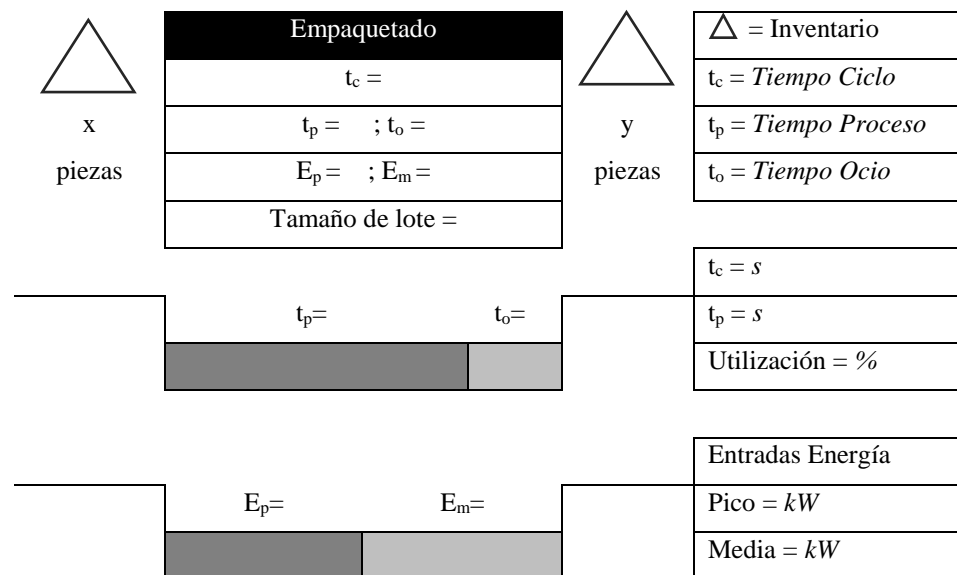


Figura 5.12 Formato de Mapa de flujo de valor (estado final)

Controlar

Herramienta: Matriz de control

Objetivo: Identificar las actividades diseñadas para proteger al proceso y unidad de negocio de riesgos de alta prioridad reflejadas en unidades energéticas.

Matriz de control



Objetivo del proyecto: *Meta de control energético propuesto en unidades energéticas*

Riesgo: *Variable o actividad de alta relevancia que puede afectar el control de la meta establecida*

Suficiencia de Control (x=excesivo, a=adecuado, i=inadecuado)

| Control | Existe | ¿Es suficiente? | Próximos pasos |
|---------------------------------------|---------------|---------------------------------------|--|
| <i>Acción de mitigación de riesgo</i> | <i>Sí/No</i> | <i>Suficiencia de control vigente</i> | <i>Estrategia para mejorar suficiencia</i> |
| <i>Acción de mitigación de riesgo</i> | <i>Sí/No</i> | <i>Suficiencia de control vigente</i> | <i>Estrategia para mejorar suficiencia</i> |
| <i>Acción de mitigación de riesgo</i> | <i>Sí/No</i> | <i>Suficiencia de control vigente</i> | <i>Estrategia para mejorar suficiencia</i> |
| <i>Acción de mitigación de riesgo</i> | <i>Sí/No</i> | <i>Suficiencia de control vigente</i> | <i>Estrategia para mejorar suficiencia</i> |

Fecha: DD/MM/AA

Nombre del responsable

Siguiente actualización: DD/MM/AA

Nombre del revisor

Figura 5.13 Formato de Matriz de control

Se aplica el método Kaizen para llevar a cabo el proyecto de operación esbelta en una semana de trabajo, con dedicación de tiempo completo, como se plasma en la figura 5.7. Esto con el propósito de hacer del modelo una herramienta de intervención y auditoría.

Programación eficiente de parámetros de operación



Metodología Kaizen

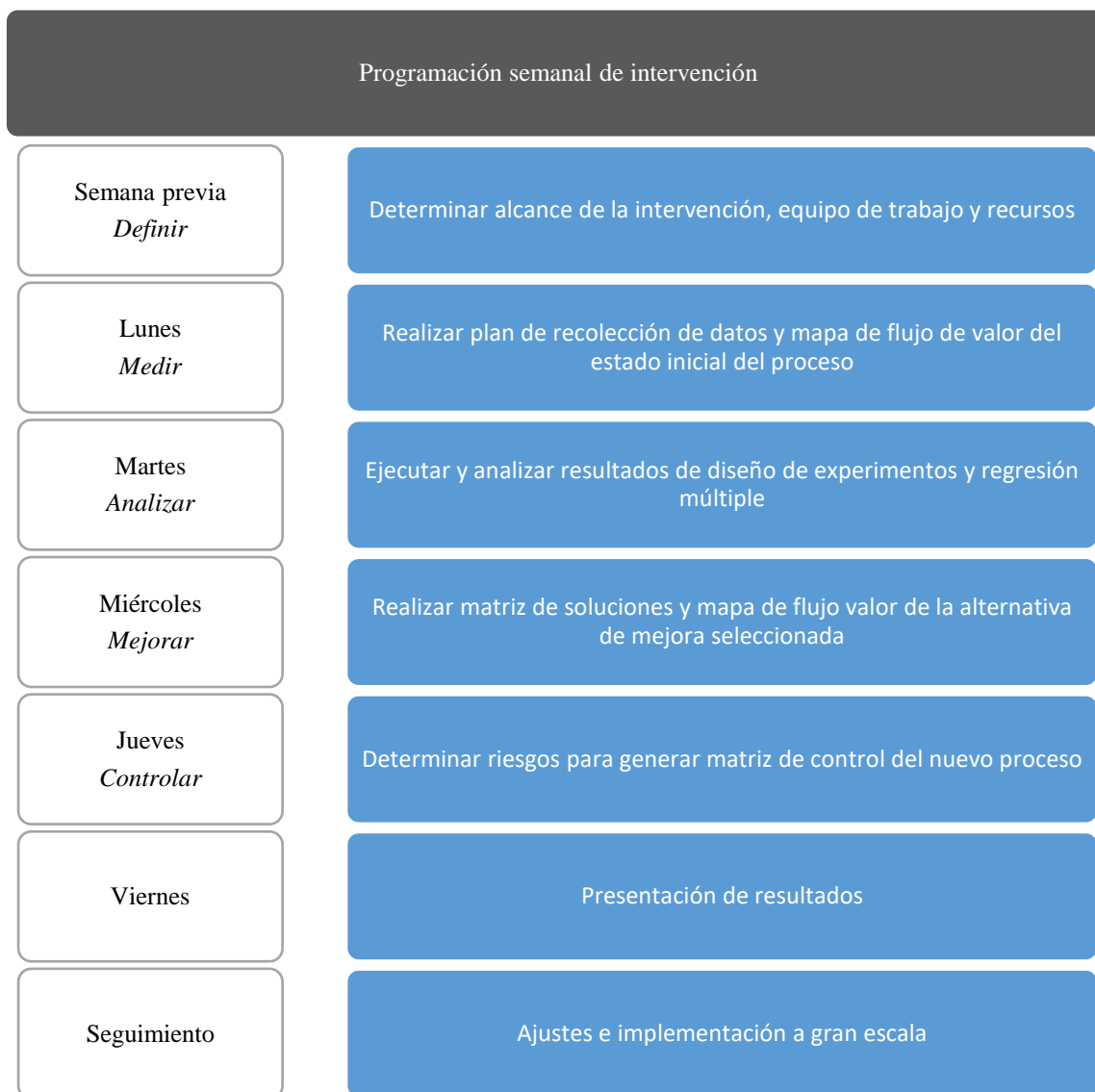


Figura 5.14 Calendario para programación eficiente de parámetros de operación

CAPÍTULO 4

CASO DE ESTUDIO

6 Descripción del caso de estudio

6.1 Resumen

Como ejercicio de validación del modelo de eficiencia energética se presenta un caso de estudio donde se aplican los métodos de Seis Sigma Esbelto y Kaizen mencionados anteriormente. Se pretende observar y analizar los cambios en el consumo energético resultante, dependiendo de la configuración que se le asigne a la misma operación de manipulación de materiales para un robot KUKA KR 16-2. Para tal fin, se hace uso de herramientas digitales de modelación 3D, simulación de operaciones robóticas, y editor de código de lenguaje máquina para previamente validar la trayectoria de movimiento a estudiar. Posteriormente, se exportan las instrucciones y configuración de parámetros de operación al manipulador industrial del laboratorio para monitorear el consumo energético de cada arreglo experimental. Finalmente, se realiza un análisis estadístico con el propósito de obtener una solución optimizada.

6.2 Equipo robótico

6.2.1 KUKA KR 16-2

El robot utilizado en este proyecto de aplicación es manufacturado por la empresa china de origen alemán KUKA AG, en su familia de dispositivos de cargas ligeras, donde el modelo KR 16-2 se encuentra listado. En la figura 6.1 y 6.2 se muestra al robot objeto de estudio en su instrumentación y distribución de servomotores.



Figura 6.1: Visión servomotores



Figura 6.2: Visión instrumentación

6.2.2 Manufactura digital

Siemens Tecnomatix

El software Siemens Tecnomatix es una herramienta de manufactura digital creada por la empresa alemana Siemens AG, la cual integra disciplinas de la manufactura relacionadas con ingeniería de producto, ingeniería de procesos y simulación de operaciones productivas. El módulo de Siemens Tecnomatix seleccionado para el proyecto es Simulación de Procesos que, en el caso de planeación de robótica y automatización, habilita mediante un ambiente virtual la simulación de asignación de tareas y su evaluación dinámica [28].

En este proyecto de aplicación, Siemens Tecnomatix es utilizado como una herramienta de visualización preliminar de las trayectorias de movimiento resultantes del diseño de experimentos. Un monitoreo de la velocidad y aceleración es ejecutado como primer acercamiento al comportamiento cinemático y dinámico del robot; también funciona como referencia del sistema de coordenadas que posteriormente será de importancia para la programación final del dispositivo. Es posible la obtención del consumo energético simulado, sin embargo, no se cuenta con este paquete habilitado; de contar con él, es recomendable utilizar dicho módulo y obtener resultados iniciales desde la fase de simulación.

WorkVisual

El paquete de software WorkVisual es un entorno de ingeniería para celdas de robot controladas por dispositivos KR C4 de KUKA. Dispone de las funcionalidades de programación de robots, configuración de parámetros de operación, edición de código máquina, y monitoreo de diagnóstico del robot industrial [29].

Para el caso de estudio aquí presentado, se dispone de WorkVisual para la importación y visualización de resultados, tanto en forma numérica como gráfica, de los distintos escenarios planteados en el diseño de experimentos. Esto se hace a través de la herramienta osciloscopio que el software tiene integrado, en donde se despliega la información general de la operación como las individuales de cada articulación o servomotor de la cadena articulada.

6.3 Operación robótica

6.3.1 Escenario de trabajo

El caso presentado pertenece a la industria logística, en específico al de paquetería de venta al detalle. Se plantea una operación de manipulación de materiales de recoger & colocar (pick & place en inglés) y empaquetado de dos sobres tamaño carta de papel apilados, uno sobre el otro, y una caja de cartón en un empaque del mismo material cuyas dimensiones están estandarizadas para el envío por correspondencia. El método de manipulación funciona a través de una herramienta del tipo ventosa de elaboración artesanal, con la ayuda de dispositivos neumáticos de distribución de aire comprimido fabricados por la empresa alemana FESTO AG.

La distribución de los componentes a manipular se puede visualizar en la figura 6.3; mientras que en las figuras 6.4 y 6.5 se muestran, en distintas perspectivas, las ubicaciones de los objetos participantes en la operación con el robot KR 16-2. La conexión del sistema neumático se visualiza en las figuras 6.6 y 6.7. mientras que el dispositivo de distribución de aire se detalla en la figura 6.8.



Figura 6.3: Objetos a manipular y contenedor final



Figura 6.4: Perspectiva frontal

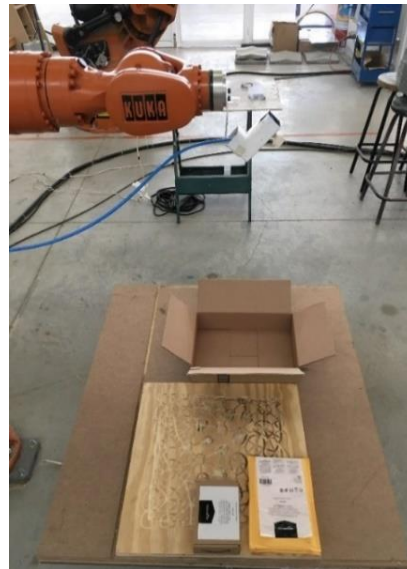


Figura 6.5 Perspectiva lateral



Figura 6.6: Herramienta tipo ventosa

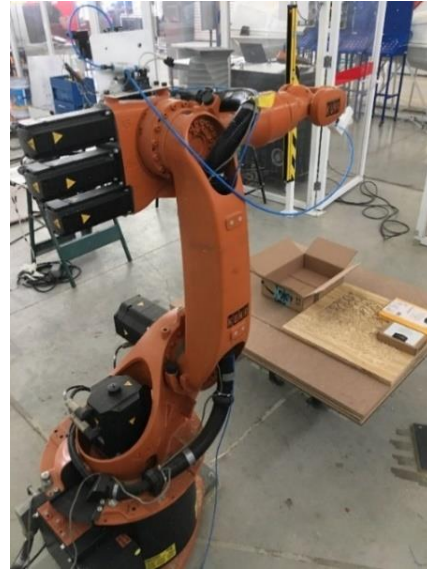


Figura 6.7: Cableado neumático

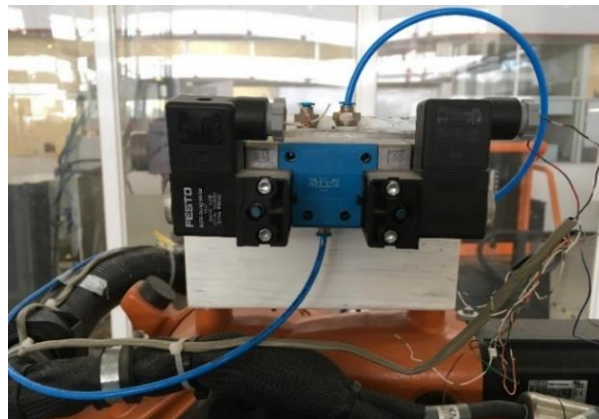


Figura 6.8: Distribuidor neumático FESTO

Este acomodo de robot-objetos permanecerá constante tanto en el escenario original como en los experimentales, que son definidos por los distintos arreglos a partir del diseño de experimentos propuesto dentro del modelo de eficiencia energética.

6.3.2 Digitalización de la celda robótica

Una validación previa a la aplicación del modelo de eficiencia energética es el análisis de la celda robótica en términos de los alcances y posicionamientos de los dispositivos que la conforman. En las figuras 6.9 y 6.10 se muestra el entorno de trabajo digitalizado a través del software Siemens Tecnomatix.

Digitalización Tecnomatix (Robot)

IBERO
PUEBLA ®

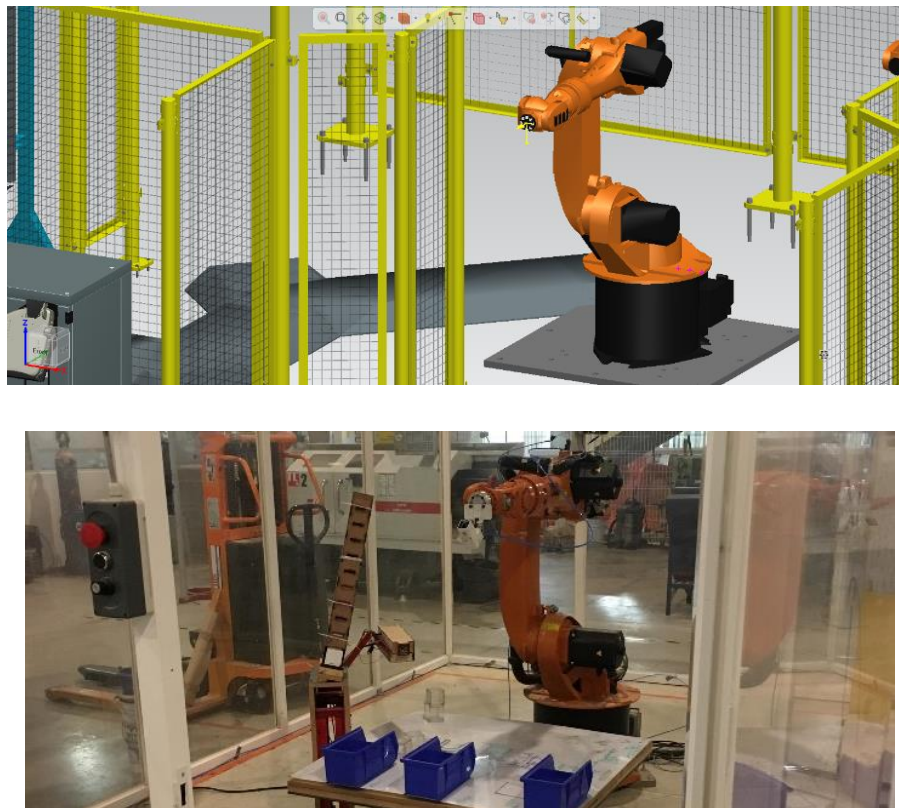


Figura 6.9: Robot KUKA KR16-2 digitalizado

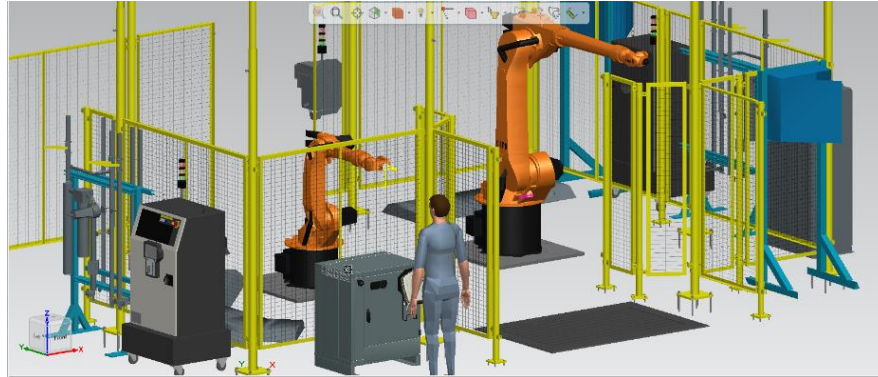


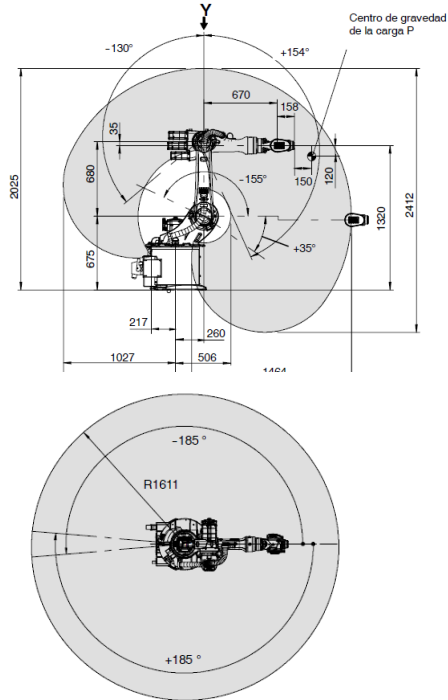
Figura 6.10: Celda robótica digitalizada

6.4 Aplicación del modelo de operación esbelta

6.4.1 Tácticas de reducción de consumo energético

Características del robot

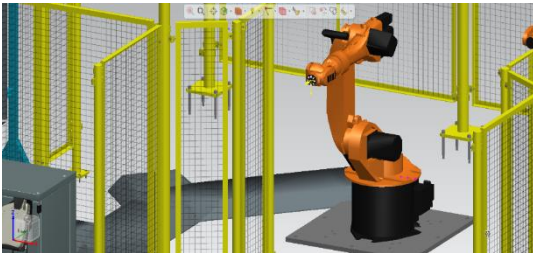
Robot: KUKA KR16-2
 Alcance máximo: 1,611 mm
 Carga de trabajo: 16 kg
 Número de ejes: 6 grados de libertad
 Masa total: 235 kg



Especificaciones de trabajo del robot

| Eje | Rango de trabajo | Velocidad de trabajo |
|-----|------------------|----------------------|
| 1 | ±185° | 156 °/s |
| 2 | ±35°/-155° | 156 °/s |
| 3 | ±154°/-130° | 156 °/s |
| 4 | ±350° | 330 °/s |
| 5 | ±130° | 330 °/s |
| 6 | ±350° | 615 °/s |

Verificación de colisiones



Descripción: Análisis del robot
 Restricciones: Alcance máximo de trabajo del robot no colisiona con otro elemento físico de la celda.
 Dictamen: Únicamente la mesa de trabajo significa un riesgo menor para la programación de la trayectoria.



Descripción: Análisis de la celda
 Restricciones: Alcance máximo de los robots de la celda no colisionan en sus respectivas operaciones.
 Dictamen: El robot que comparte la celda no significa un riesgo para la programación de la trayectoria.

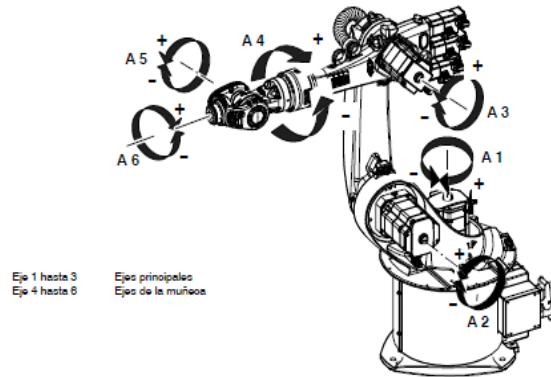
*Imágenes de rango de trabajo por KUKA Deutschland GmbH

Figura 6.11: Definición eficiente de trayectorias (Robot)

Distribución de servomotores

Robot: KUKA KR16-2

| Servo | Eje | Modelo |
|-------|-----|------------------|
| A1 | 1 | MX_110_130_40_S0 |
| A2 | 2 | MX_110_130_40_S0 |
| A3 | 3 | MX_60_110_30_S0 |
| A4 | 4 | MX_16_60_42_S0 |
| A5 | 5 | MX_16_60_42_S0 |
| A6 | 6 | MX_16_60_42_S0 |



Características del servo

| Eje | Torque estático | Torque nominal | M. de inercia | Potencia nominal | Energía de freno |
|-----|-----------------|----------------|-------------------------|------------------|------------------|
| 1 | 11 Nm | 8.2 Nm | 23.5 kg*cm ² | 2.4 kW | 1870 J |
| 2 | 11 Nm | 8.2 Nm | 23.5 kg*cm ² | 2.4 kW | 1870 J |
| 3 | 5.3 Nm | 4.8 Nm | 9.1 kg*cm ² | 0.9 kW | 845 J |
| 4 | 1.6 Nm | 1.4 Nm | 1 kg*cm ² | 0.3 kW | 114 J |
| 5 | 1.6 Nm | 1.4 Nm | 1 kg*cm ² | 0.3 kW | 114 J |
| 6 | 1.6 Nm | 1.4 Nm | 1 kg*cm ² | 0.3 kW | 114 J |

Modelo dinámico, ecuación de potencia y consumo energético

$$\sum F = mv \quad \sum T = I\omega + \omega \times (I\omega)$$

$$P = \sum_{i=1}^n T_i \omega_i \frac{1}{\prod_{i=n}^n \eta_{m,i} \eta_{e,i}} \quad W = \int_0^t P dt$$

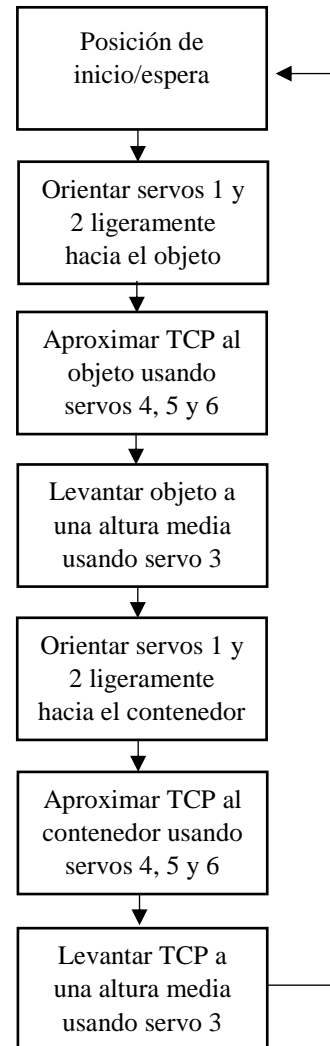
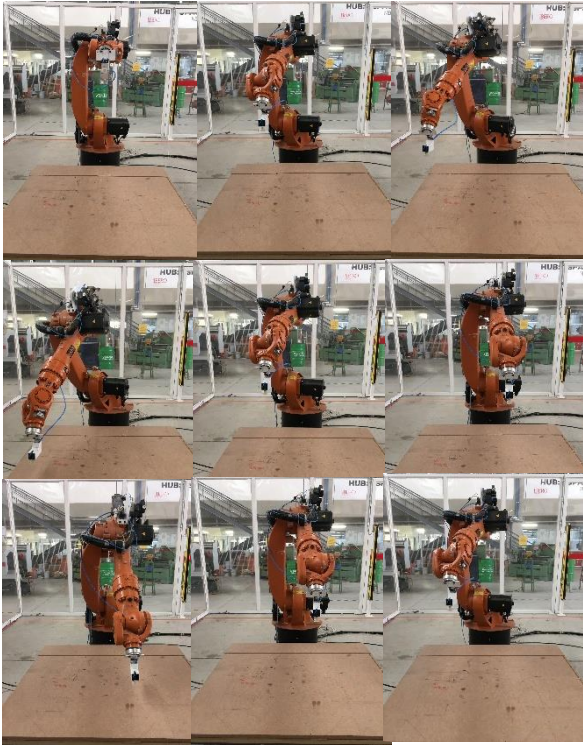
Trayectoria suave y óptima

| | | | |
|------------------------|---------------|-----------------|----------|
| Tipo de movimiento: | PTP_X__ | CIRC_____ | LIN_____ |
| Configuración inicial: | 60% velocidad | 85% aceleración | |
| Configuración final: | 75% velocidad | 50% aceleración | |

*Imágenes de rango de trabajo por KUKA Deutschland GmbH

Figura 6.12: Definición eficiente de trayectorias (Servomotores)

Recorrido de la herramienta (TCP)



Relación Arranque-Alto

Puntos totales: 25 puntos intermedios

Altos totales: 8 puntos de descanso

Relación: 32% de los puntos son descanso total

Tiempo de la operación

Tiempo de ciclo asignado: 16 s

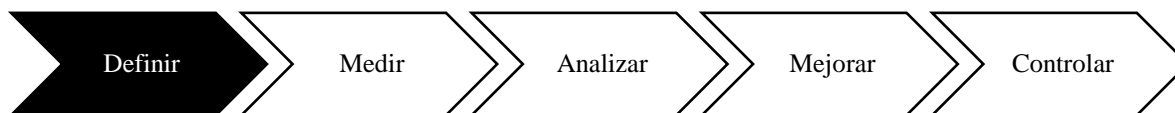
Tiempo de ciclo inicial: 14 s

Tiempo de ciclo final: 15.5 s

*TCP – Tool center point, en español se traduce como punto central de la herramienta

Figura 6.13: Secuenciación eficiente de operaciones

6.4.2 Fase: Definir



Carta de proyecto

IBERO
PUEBLA ®

Título del proyecto

Eficiencia energética en trayectorias de movimiento para robots industriales.

Fecha

01/02/2019

Necesidad del negocio

Optimizar recursos de la organización mediante el ahorro de materias primas e insumos
Obtener certificaciones como empresa sustentable y responsable con el medio ambiente

Declaración del problema

Áreas de oportunidad en el análisis de consumo energético de operaciones robóticas
Falta de un procedimiento para la programación de robots con perspectiva energética

Objetivo

Disminuir el consumo energético (Y) de la operación de manipulación de materiales al menos 15%
Y = (Velocidad) (Aceleración) (Tiempo de Ocio)

Posibles Xs

x_1 = Velocidad
 x_2 = Aceleración
 x_3 = Tiempo de Ocio

Alcance

Optimización de una sección de la operación de empaquetado
Análisis no toma en consideración las masas de los objetos a manipular

Equipo

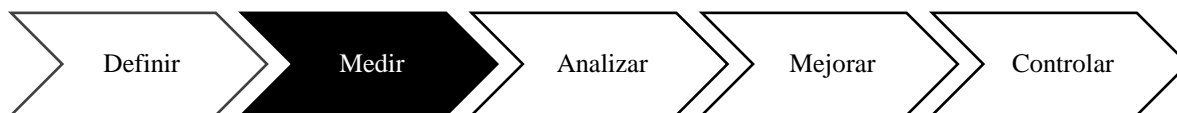
Responsable: Pablo Segura
Asesor: César Ortega

Programa

Inicio: 04/02/2019
Cierre: 08/02/2019

Figura 6.14: Carta de proyecto

6.4.3 Fase: Medir



Plan de recolección



| Métrica | Definición operativa | Fuente y ubicación | Método de recolección | Responsable de recolección |
|--------------------|--|--|--|--|
| Consumo de energía | Habilitar la función de monitoreo en tiempo real del robot previo a la ejecución de la trayectoria de movimiento | Obtener nuevos datos directamente del robot en operación | Almacenar digitalmente archivos de resultados generados por el robot | Programador robótico: Ing. Pablo Segura Parra |
| Velocidad | Asignar desde la programación del robot | | | |
| Tiempo ocio | | | | |

¿Cómo se usarán los datos?

Planteamiento de estado inicial del proceso
 Identificación de relaciones causa-efecto
 Análisis en matriz de resultados

¿Cómo se mostrarán los resultados?

Gráficas en función del tiempo
 Mapa de flujo de valor
 Matriz de resultados

Figura 6.15: Plan de recolección

Tras haber ponderado las variables seleccionadas, se realiza la primera adquisición de datos. En las figuras 6.16 y 6.17 se visualizan el consumo pico y medio alcanzado en la operación inicial, cuyos parámetros de operación son 60% y 85% de la velocidad y aceleración nominal del robot respectivamente.

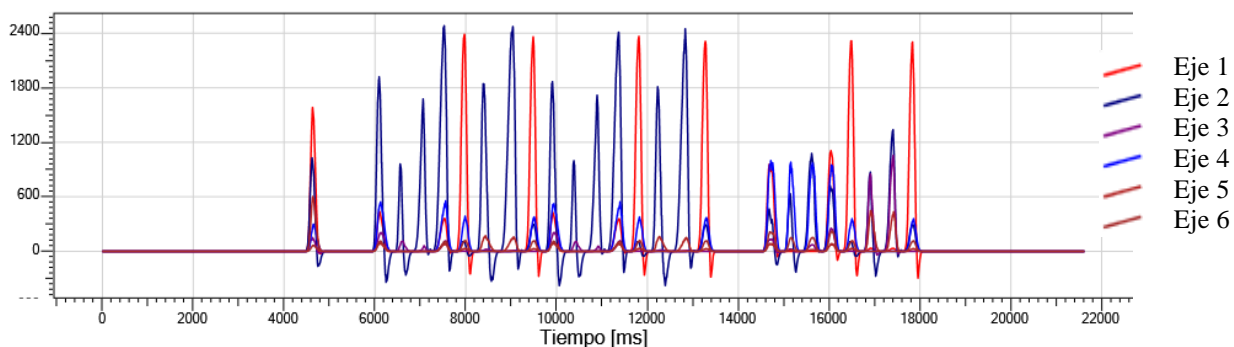


Figura 6.16: Consumo pico del arreglo inicial

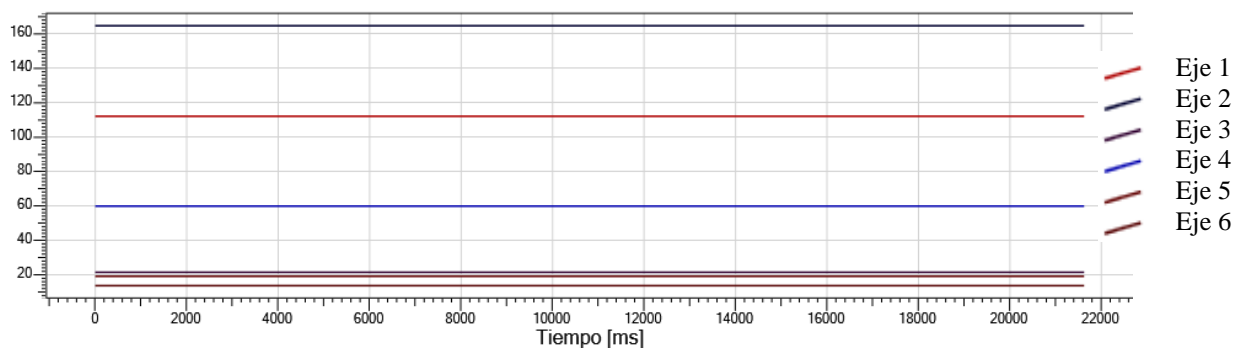


Figura 6.17: Consumo medio del arreglo inicial

La suma del consumo medio de la trayectoria inicial alcanzó los 390.43W, mientras que el pico de consumo, por eje individual, es de 2,481.87W. Estos son los indicadores base a disminuir en la fase de analizar y mejorar. Se puede interpretar la gráfica de la figura 6.13

como tres pares de picos de energía que reflejan cómo el robot recoge y deposita el objeto de la mesa de trabajo a la caja en la que será empaquetado para su posterior envío.

Complementando los gráficos anteriores, en la figura 6.18 se puede ver el comportamiento de la velocidad en toda la secuencia de movimiento. En dicho comportamiento y la figura 6.16, que representa la entrada de energía, se aprecian similitudes entre la velocidad angular de los ejes articulados y los picos de consumo. Especialmente el eje 2 del robot que se encarga principalmente de trasladar lateralmente a los objetos de la mesa hacia la caja; y los ejes 4 y 5 que realizan su colocación precisa en las áreas designadas.

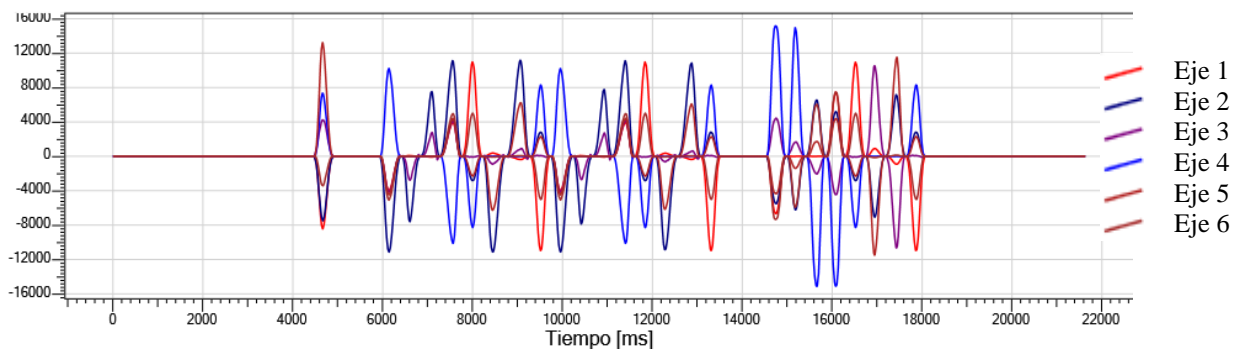


Figura 6.18: Velocidades alcanzadas por el arreglo inicial

La figura 6.19 sigue los resultados de la aceleración dentro de la misma trayectoria donde, de igual manera, existen conductas similares a las ya expuestas. Son más notorios los picos del eje 4 en este caso debido a que esta articulación realiza la orientación del extremo final del robot a lo largo de varios puntos intermedios definidos en la programación del robot.

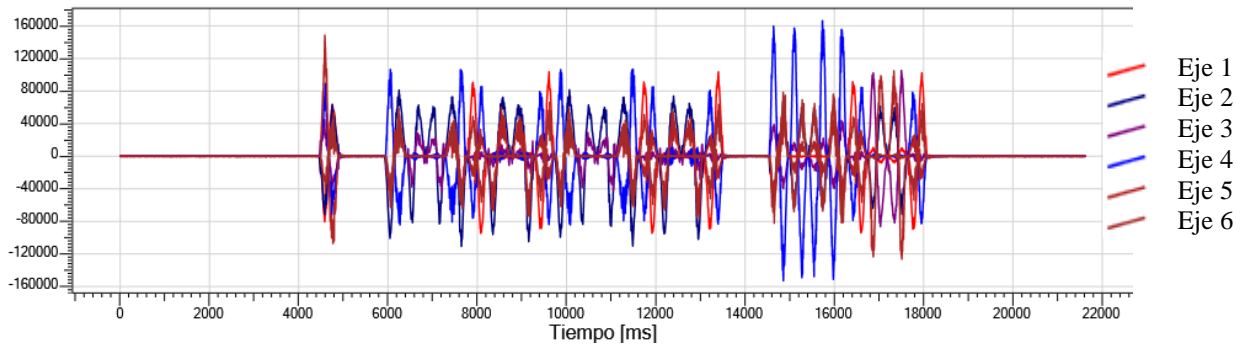


Figura 6.19: Aceleraciones alcanzadas por el arreglo inicial

Mapa de flujo de valor (estado inicial)

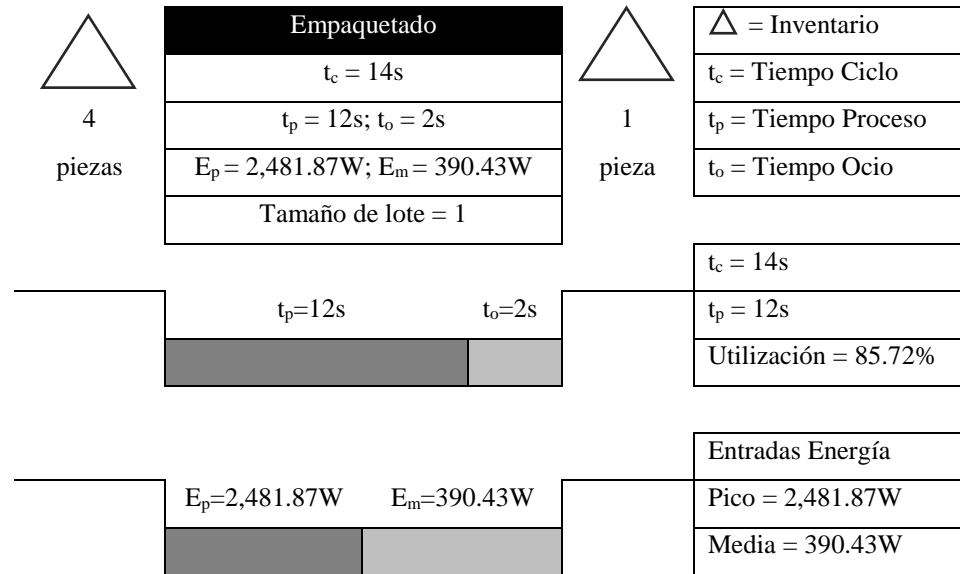


Figura 6.20: Mapa de flujo de valor inicial

Se coloca la información medida del proceso en el mapa de flujo de valor, el cual hace la separación del tiempo efectivo y el tiempo que no agrega valor al proceso, obteniendo un índice de utilización del 85.72%. Los indicadores energéticos alcanzan los 2,481.87W y 390.43W en su consumo pico y medio respectivamente.

6.4.4 Fase: Analizar



Diseño de experimentos

El procedimiento de la Metodología Diseño Factorial Completo 2^K , donde el objetivo es medir cómo influyen k factores en un proceso y descubrir si interaccionan entre ellos [30], se desarrolla a continuación.

Reconocimiento del objetivo

Minimizar el consumo energético de un brazo robótico industrial mediante la manipulación de parámetros de operación y programación de trayectorias de movimiento.

Definición de factores y niveles

Factores primarios

1. Velocidad: Porcentaje de la velocidad nominal del robot, especificada por el fabricante, en operación regular.
2. Aceleración: Razón de incremento de la aceleración nominal del robot, especificada por el fabricante, en operación regular.
3. Tiempo de ocio: Prolongación de paros de espera que realiza el robot en su secuencia de movimiento provocados por secuenciación del proceso.

Factores constantes

1. Tipo de movimiento: Lógica de desplazamiento del robot industrial, siendo estas PTP (punto-a-punto), LIN (lineal) y CIRC (circular). El tipo de movimiento elegido es PTP (punto-a-punto).
2. Posicionamiento aproximado: Parámetro de precisión para los puntos programados dentro de la secuencia de movimientos, cuyas configuraciones son Exacto y Continuo. Para el experimento se ha seleccionado la opción Exacto.
3. Tiempo de proceso: Periodo en el que transcurren los subprocesos de movimiento y accionamiento del robot industrial.
4. Carga soportada: Masa correspondiente a los objetos y herramienta que transporta el robot en su trayectoria.
5. Presión neumática: Parámetro de operación del proceso de succión por ventosa.

Factores molestos

1. Temperatura: Condiciones térmicas del lugar de trabajo que pueden influir en la operación del robot.
2. Vibraciones: Variable proveniente de la operación de otras máquinas y vehículos de transporte dentro del lugar de trabajo.
3. Humedad: Concentración de vapor de agua en el aire del área de trabajo.

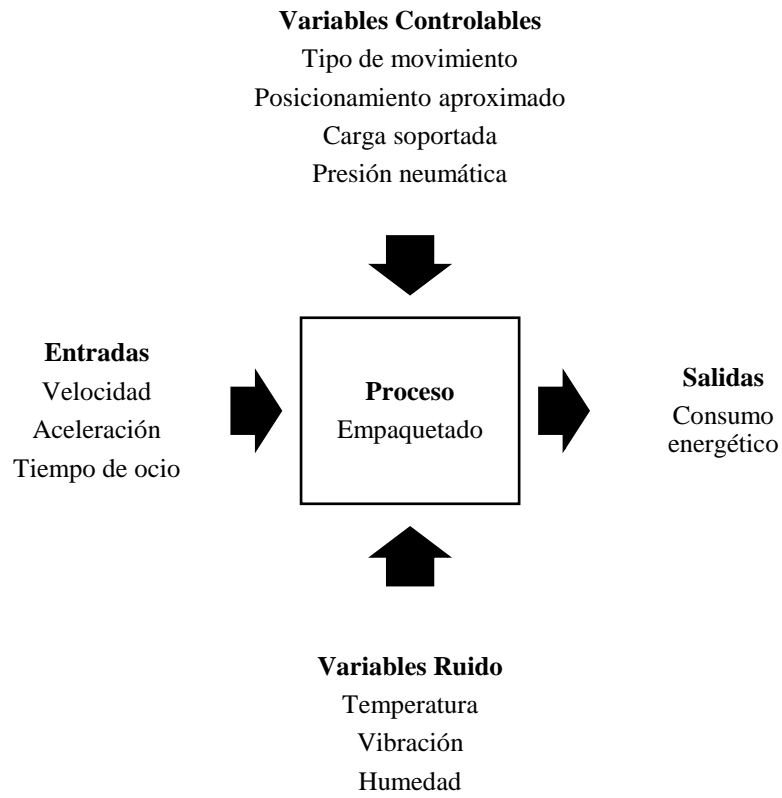


Figura 6.21: Diagrama factorial

Nivel de factores y Plan de experimentos

Se presenta la tabla 6.1 de nivel de factores y dominio experimental, a partir de los factores primarios establecidos en la sección anterior.

Tabla 6.1: Nivel de factores

| Factores Primarios | | Dominio Experimental | |
|--------------------|--------------------|----------------------|-----------|
| | | Nivel (-) | Nivel (+) |
| X ₁ | Velocidad (m/s) | 50% | 75% |
| X ₂ | Aceleración (m/s) | 50% | 75% |
| X ₃ | Tiempo de ocio (s) | 2s | 4s |

Con base en la metodología del diseño experimental se presentan las tablas 6.2 y 6.3 de correspondencia resultante de un diseño factorial completo 2^3 . Esta representa la cantidad de arreglos a realizar, condiciones experimentales para cada arreglo y orden en el que éstos deben ser secuenciados. La finalidad es obtener un modelo matemático que relaciona la respuesta con los factores analizados, con condiciones de réplica, aleatoriedad y análisis por bloques [30].

Tabla 6.2: Matriz de experimentos

| Arreglo | X ₁ | X ₂ | X ₃ |
|---------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | - | - | - |
| 2 | + | - | - |
| 3 | - | + | - |
| 4 | + | + | - |
| 5 | - | - | + |
| 6 | + | - | + |
| 7 | - | + | + |
| 8 | + | + | + |

Tabla 6.3: Plan de experimentos

| Arreglo | X ₁ | X ₂ | X ₃ |
|---------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 50% | 50% | 2s |
| 2 | 75% | 50% | 2s |
| 3 | 50% | 75% | 2s |
| 4 | 75% | 75% | 2s |
| 5 | 50% | 50% | 4s |
| 6 | 75% | 50% | 4s |
| 7 | 50% | 75% | 4s |
| 8 | 75% | 75% | 4s |

El orden de ejecución de los arreglos experimentales se realiza de manera aleatoria, como se enumera en la tabla 6.4, para disipar el efecto de variables ruido en el resultado de la variable dependiente que hace referencia al consumo energético.

Tabla 6.4: Orden de experimentos

| Orden | 1ero | 2do | 3ero | 4to | 5to | 6to | 7mo | 8vo |
|----------------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Arreglo | 7 | 1 | 4 | 3 | 6 | 8 | 2 | 5 |

Resultados experimentales

Tras completar la serie de experimentos, se despliegan los resultados de la variable de respuesta en las tablas 6.5 y 6.6. En la primera, se hace mención del resultado en términos del pico de consumo alcanzado durante la trayectoria de movimiento; y en la segunda, se muestran los valores de consumo promedio de la misma. El análisis estadístico se lleva a cabo desde ambas perspectivas del consumo energético.

Tabla 6.5: Pico de consumo energético

| Arreglo | Consumo energético |
|----------------|---------------------------|
| 1 | 1979.13 W |
| 2 | 2036.73 W |
| 3 | 2038.41 W |
| 4 | 2898.38 W |
| 5 | 1881.56 W |
| 6 | 2055.40 W |
| 7 | 2148.40 W |
| 8 | 2830.27 W |

Tabla 6.6: Media de consumo energético

| Arreglo | Consumo energético |
|---------|--------------------|
| 1 | 378.42 W |
| 2 | 328.10 W |
| 3 | 404.52 W |
| 4 | 452.32 W |
| 5 | 333.53 W |
| 6 | 343.97 W |
| 7 | 359.58 W |
| 8 | 413.06 W |

Como se aprecia en las tablas 6.5 y 6.6, el menor consumo energético en su pico y media proviene de los arreglos 5 y 2 respectivamente, los cuales están representados en las figuras 6.19 y 6.20. Así mismo, el mayor consumo alcanzado, tanto en su pico como en su media, es el arreglo experimental 4. En las figuras 6.21 y 6.22 se muestran los comportamientos por eje de esta trayectoria de movimiento.

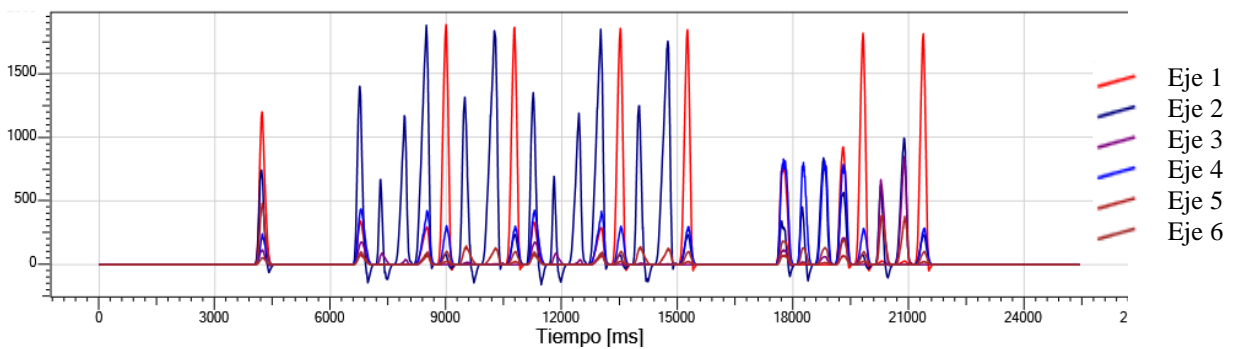


Figura 6.22: Consumo pico del arreglo 5

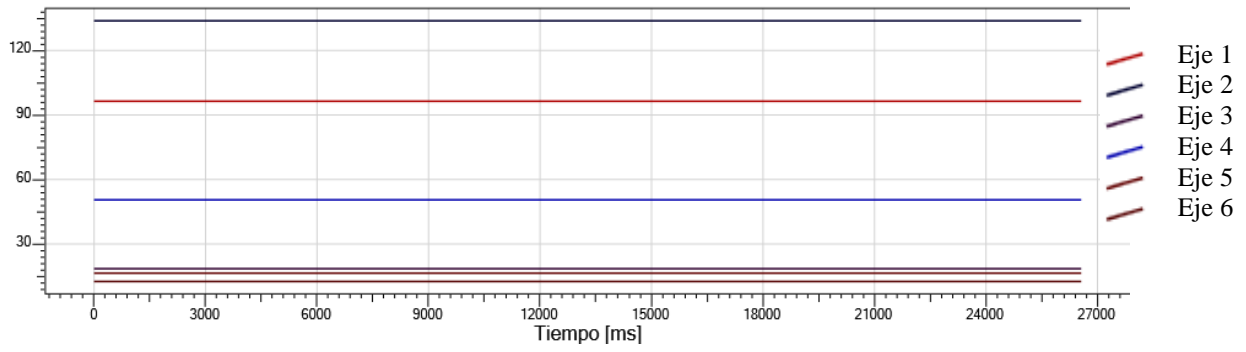


Figura 6.23: Consumo medio del arreglo 2

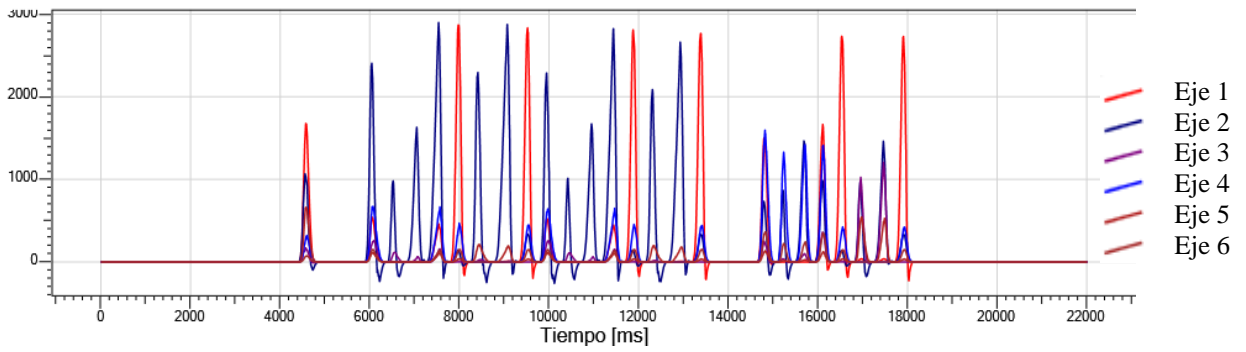


Figura 6.24: Consumo pico del arreglo 4

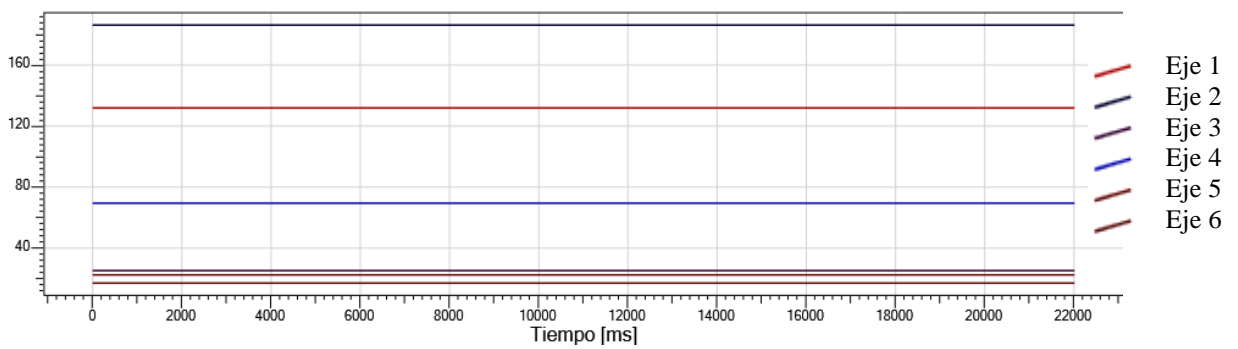


Figura 6.25: Consumo medio del arreglo 4

Análisis estadístico (Pico de consumo energético)

Utilizando un nivel de confianza del 90% obtenemos los resultados de la figura 6.26 sobre picos de consumo energético. La sección de análisis de varianza señala a las variables velocidad y aceleración como significativas del modelo propuesto, al tener un Valor p menor a 0.1. El tiempo de ocio, en este caso, no es representativo en el análisis estadístico. En la sección resumen del modelo, el indicador R^2 tiene un valor de 79.34% queriendo decir que ese porcentaje de variación es explicado por el modelo.

Pico de Consumo Energético



Análisis de varianza

| Fuente | GL | SC (A) | MC (A) | Valor F | Valor p |
|-------------|----|---------|--------|---------|---------|
| Modelo | 3 | 874731 | 291577 | 5.12 | 0.074 |
| Lineal | 3 | 874731 | 291577 | 5.12 | 0.074 |
| Velocidad | 1 | 393065 | 393065 | 6.90 | 0.058 |
| Aceleración | 1 | 481494 | 481494 | 8.46 | 0.044 |
| Ocio | 1 | 171 | 171 | 0.00 | 0.959 |
| Error | 4 | 227775 | 56944 | | |
| Total | 7 | 1102506 | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuad. | R-cuad. (A) | R-cuad. (P) |
|---------|---------|-------------|-------------|
| 238.629 | 79.34% | 63.85% | 17.36% |

Figura 6.26: Cuadro estadístico de consumo pico

Pico de Consumo Energético

Coefficientes codificados

| Término | Efecto | Coef | EE coef. | Valor T | Valor p | FIV |
|-------------|--------|--------|----------|---------|---------|------|
| Constante | | 2233.5 | 84.4 | 26.47 | 0.000 | |
| Velocidad | 443.3 | 221.7 | 84.4 | 2.63 | 0.058 | 1.00 |
| Aceleración | 490.7 | 245.3 | 84.4 | 2.91 | 0.044 | 1.00 |
| Ocio | -9.3 | -4.6 | 84.4 | -0.05 | 0.959 | 1.00 |

Ecuación de regresión

$$\text{Consumo Pico} = - 88 + 1773 \text{ Velocidad} + 1963 \text{ Aceleración} - 4.6 \text{ Ocio}$$

Figura 6.27: Cuadro de regresión de consumo pico

Así mismo, en la figura 6.27 se encuentran los resultados referentes a la regresión múltiple de los datos generados por el modelo. En la primera parte se muestran los coeficientes y efectos de las variables independientes en la variable de respuesta. Posteriormente se presenta la ecuación de regresión desde el enfoque de picos de consumo energético. Se obtiene una constante negativa de 88, seguido por los coeficientes asignados a la velocidad y aceleración que son 1773 y 1963 respectivamente, por su parte el tiempo de ocio sólo recibe un peso negativo de 4.6.

En las figuras 6.28 y 6.29 se encuentran las representaciones gráficas de los efectos que tienen las variables independientes en el modelo general. Se establece la significancia de los parámetros velocidad y aceleración en el resultado de picos de consumo energético, tanto en el gráfico de efectos principales, como en el diagrama de Pareto a 90% de confianza.

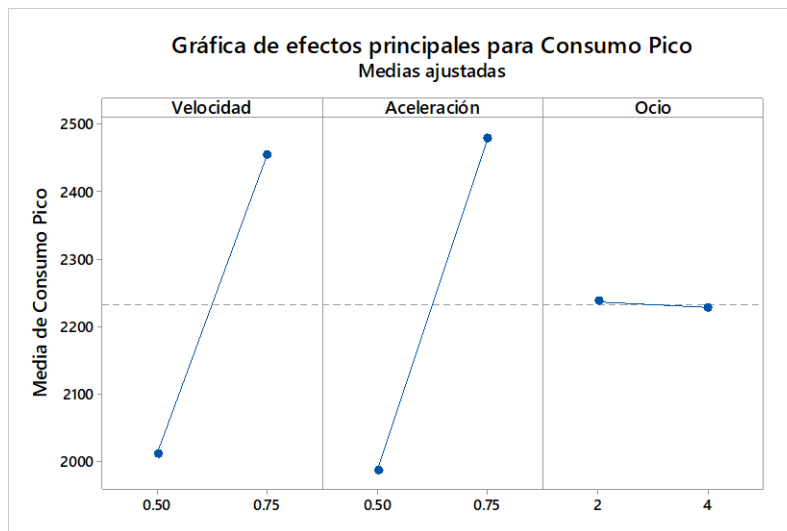


Figura 6.28: Efectos principales de consumo pico

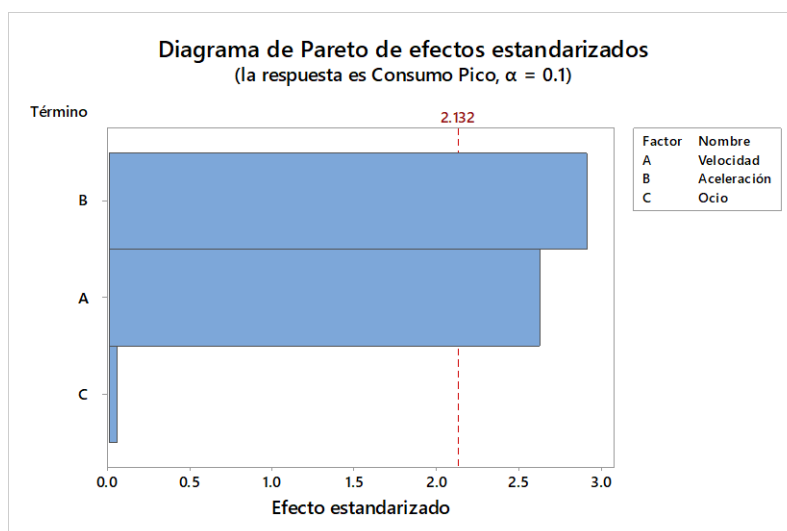


Figura 6.29: Diagrama de pareto de consumo pico

Para evaluar la adecuación del modelo se hace uso de gráficas de residuales. En la figura 6.30 se agrupan las cuatro representaciones de residuales. El primer cuadro muestra indicios de la normalidad en los datos, mientras que el segundo representa una varianza similar dentro de éstos mismos. Los gráficos de la parte inferior demuestran parcialmente normalidad presumiblemente por el peso específico que tiene el tiempo de ocio, con una significancia mínima en el resultado final. Finalmente, el último cuadro muestra el patrón del orden de los ocho arreglos experimentales realizados.

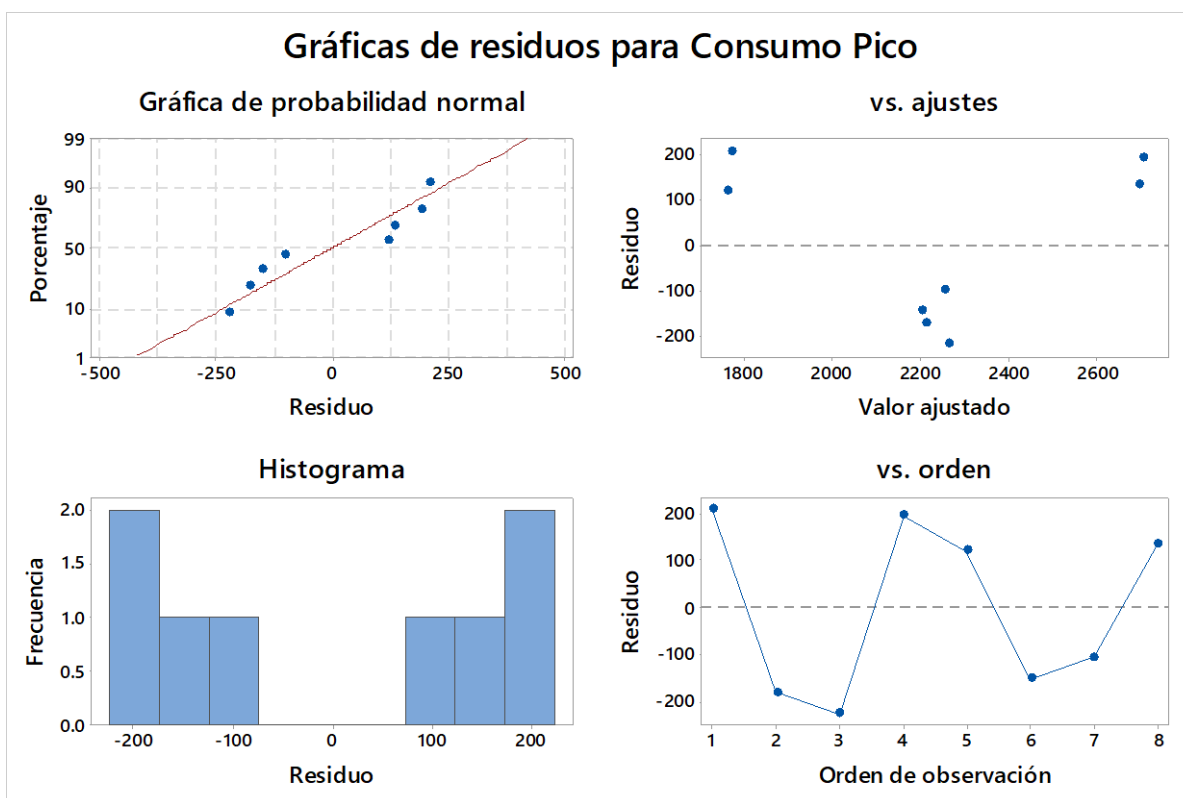


Figura 6.30: Gráficas de residuales de consumo pico

Análisis estadístico (Media de consumo energético)

El mismo análisis estadístico que se realiza para los picos de consumo energético en la trayectoria de movimiento del robot, se replica en sus datos de consumo medio. Utilizando, del mismo modo, un nivel de confianza del 90% obtenemos los resultados de la figura 6.31. A diferencia del análisis anterior, este caso sólo toma a la aceleración como variable significativa del modelo con un Valor p de 0.048. Por otro lado, el indicador R^2 disminuyó a 71.64%, ocho puntos porcentuales menor al de pico de consumo; describiendo en menor proporción la variación de los resultados del modelo.

Media de Consumo Energético



| Análisis de varianza | | | | | |
|-----------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
| Modelo | 3 | 9604.9 | 3201.6 | 3.37 | 0.136 |
| Lineal | 3 | 9604.9 | 3201.6 | 3.37 | 0.136 |
| Velocidad | 1 | 471.2 | 471.2 | 0.50 | 0.520 |
| Aceleración | 1 | 7531.3 | 7531.3 | 7.92 | 0.048 |
| Ocio | 1 | 1602.3 | 1602.3 | 1.69 | 0.264 |
| Error | 4 | 3802.4 | 950.6 | | |
| Total | 7 | 13407.3 | | | |

| Resumen del modelo | | | |
|---------------------------|---------|-------------|-------------|
| S | R-cuad. | R-cuad. (A) | R-cuad. (P) |
| 30.8317 | 71.64% | 50.37% | 0.00% |

Figura 6.31: Cuadro estadístico de consumo medio

Media de Consumo Energético

| Coefficientes codificados | | | | | | |
|----------------------------------|--------|-------|--------------|---------|---------|------|
| Término | Efecto | Coef | EE del coef. | Valor T | Valor p | FIV |
| Constante | | 376.7 | 10.9 | 34.56 | 0.000 | |
| Velocidad | 15.4 | 7.7 | 10.9 | 0.70 | 0.520 | 1.00 |
| Aceleración | 61.4 | 30.7 | 10.9 | 2.81 | 0.048 | 1.00 |
| Ocio | -28.3 | -14.2 | 10.9 | -1.30 | 0.264 | 1.00 |

Ecuación de regresión

$$\text{Consumo pico} = 227.4 + 61.4 \text{ Velocidad} + 245.5 \text{ Aceleración} - 14.2 \text{ Ocio}$$

Figura 6.32: Cuadro de regresión de consumo medio

En la figura 6.32, se muestran los coeficientes para cada una de las tres variables elegidas para el modelo. Enseguida se encuentra la ecuación de regresión que pondera a la aceleración con un peso cuatro veces mayor que la velocidad. La constante ahora es de signo positivo y tiene un valor de 227.4, por su lado, el tiempo de ocio mantiene un comportamiento similar al del análisis anterior.

En el gráfico de efectos principales y diagrama de Pareto representados en las figuras 6.33 y 6.34, se indica de manera visual la significancia de únicamente la aceleración en el valor final del consumo energético medio para la operación de empaquetado.

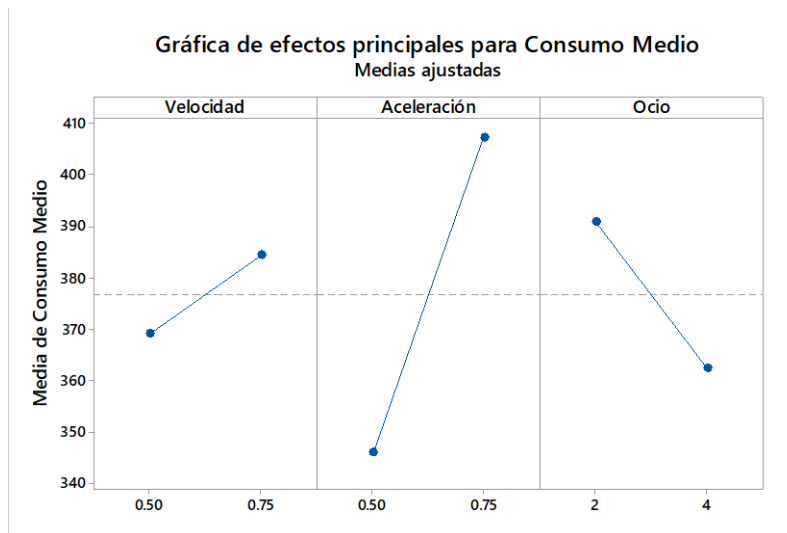


Figura 6.33: Efectos principales de consumo medio

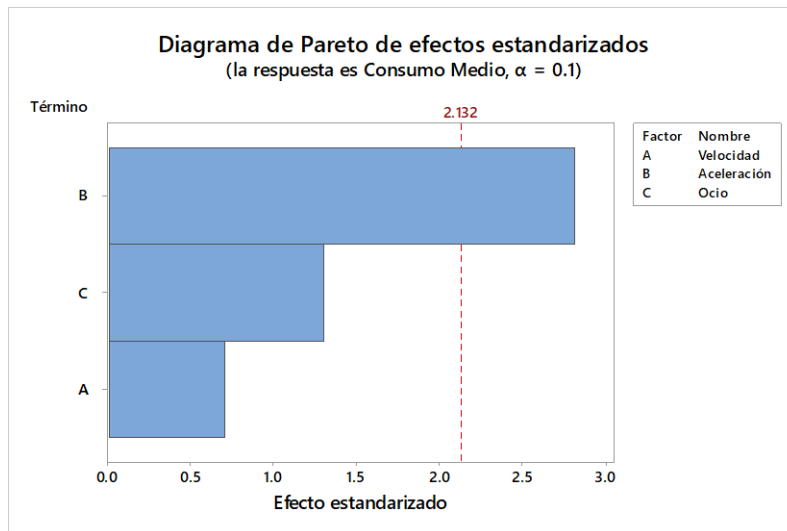


Figura 6.34: Diagrama de Pareto de consumo medio

El comportamiento de los residuales se señala en los cuatro gráficos de la figura 6.35, al igual que en el enfoque energético anterior, se encuentran indicios de normalidad de los datos obtenidos; con una varianza cercana a ser equivalente. El histograma muestra parcialmente la normalidad del modelo, el cual puede necesitar más puntos de medición para fortalecer dicho comportamiento.

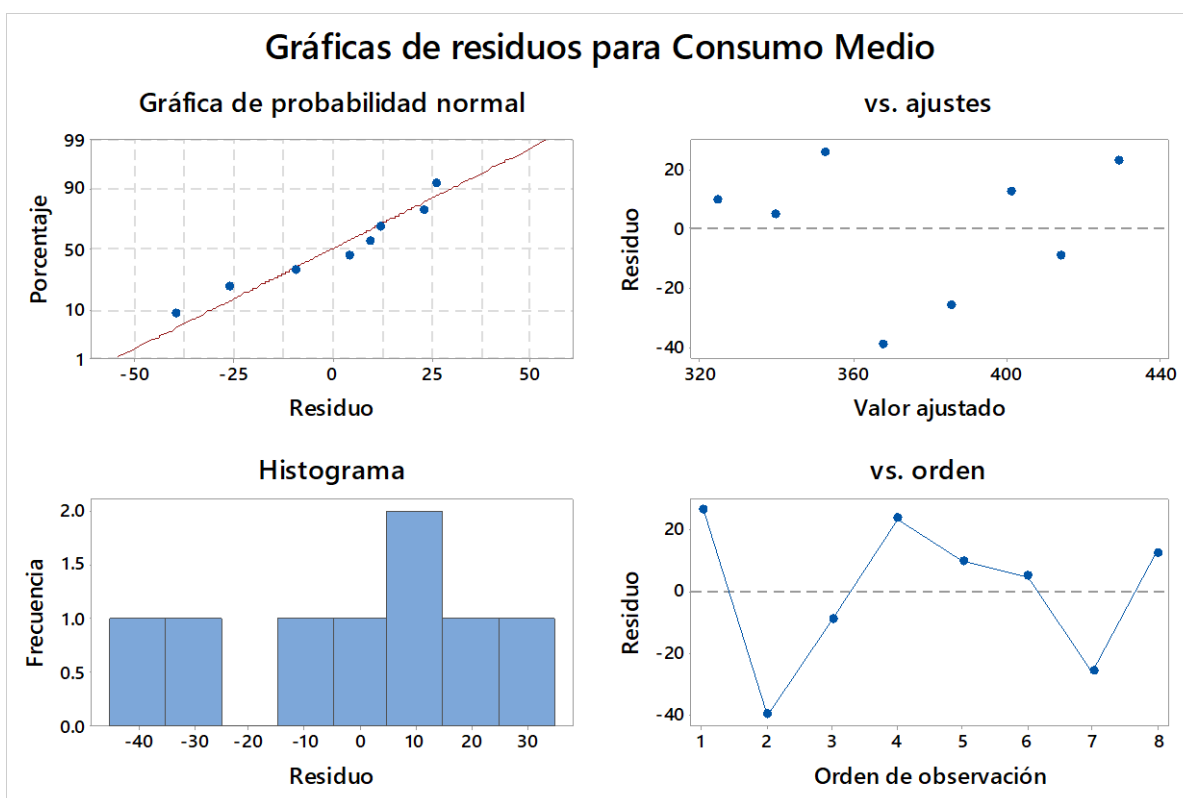
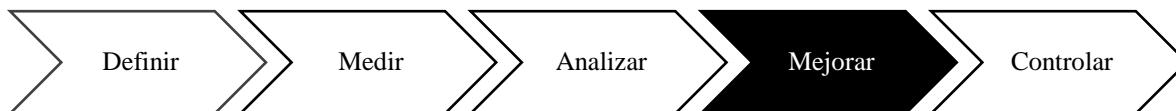


Figura 6.35: Gráficas de residuales de consumo medio

6.4.5 Fase: Mejorar



Como paso previo se genera un gráfico con todos los resultados obtenidos en el diseño de experimentos, y se verifica si estos cumplen con el objetivo propuesto en la carta de proyecto de una disminución del 15% del consumo energético. En las figuras 6.36 y 6.37 se incluyen los datos de la trayectoria inicial en su consumo original (línea punteada roja) y el ahorro propuesto (línea punteada azul) en consumo pico y medio.

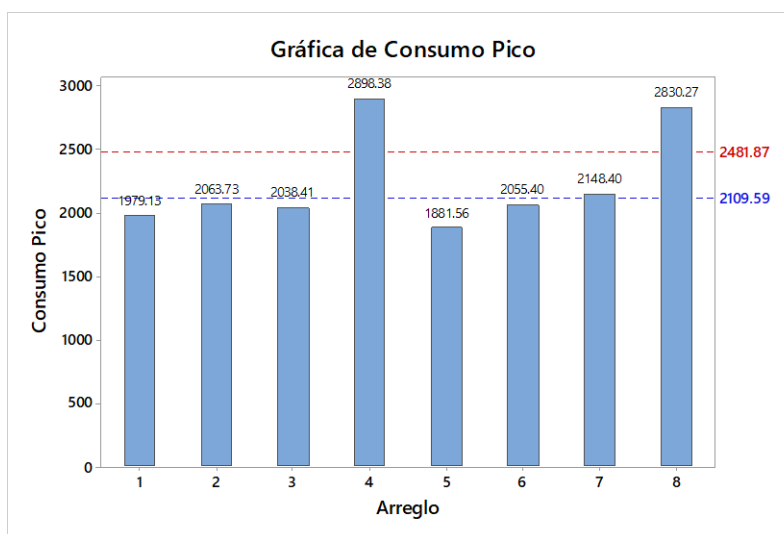


Figura 6.36: Meta de ahorro en consumo pico

A excepción de los arreglos 4, 7 y 8, las demás propuestas cumplen con la meta de disminuir el pico de consumo energético en 15%, por lo que cualquiera de éstas es una solución factible para su aplicación final.

En el caso de consumo medio generado, sólo el arreglo 2 alcanza totalmente la meta de 15% de ahorro, los arreglos 5, 6 y 7 están cercanos al objetivo, por lo que también se considerarán como alternativas viables en la matriz de soluciones.

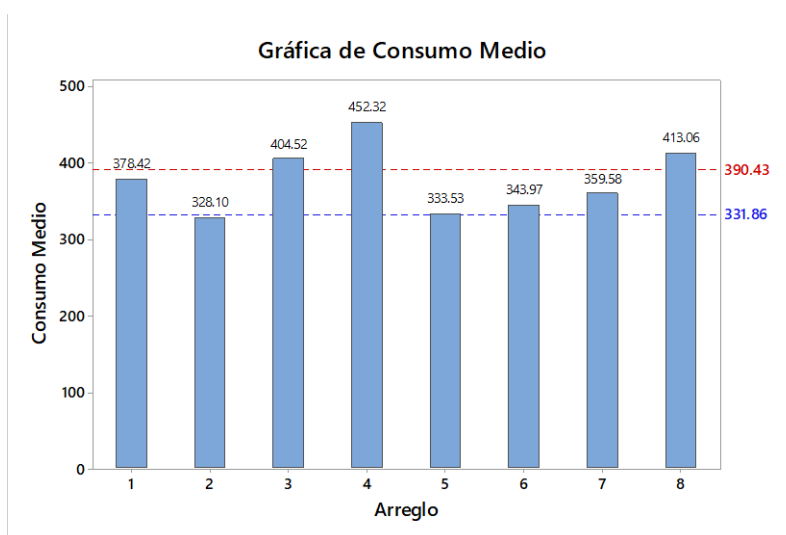


Figura 6.37: Meta de ahorro en consumo medio

Considerando los resultados obtenidos en los gráficos anteriores, la matriz de soluciones será utilizada para ponderar a los arreglos 2, 5 y 6 como una lista final de alternativas de mejora. Los cinco criterios por evaluar tienen asignado un peso cualitativo que va del 1 al 5, dependiendo de su relación con el proceso, el cual será multiplicado por una puntuación base propia de cada alternativa que oscila del 1 al 10. En ambos casos entre mayor sea el número seleccionado, mayor es su importancia. En la figura 6.38 se muestra el cuadro ponderado completo, identificando la solución final a adoptar.

| | Impacto | Tiempo | Costo | Otros | Total | Posición |
|-----------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------|-----------------|
| Peso | 3 | 2 | 5 | 2 | | |
| Arreglo 2 | $9 \times 3 = 27$ | $8 \times 2 = 16$ | $9 \times 5 = 45$ | $8 \times 2 = 16$ | 104 | 1 |
| Arreglo 5 | $8 \times 3 = 24$ | $6 \times 2 = 12$ | $10 \times 5 = 50$ | $8 \times 2 = 16$ | 102 | 2 |
| Arreglo 6 | $7 \times 3 = 21$ | $6 \times 2 = 12$ | $9 \times 5 = 45$ | $8 \times 2 = 16$ | 94 | 3 |

Figura 6.38: Matriz de soluciones

El arreglo 2 es la alternativa con mayor puntuación, haciéndola la configuración más conveniente del diseño experimental, y con la cual se deberán fijar los parámetros de operación de la trayectoria de movimiento. Tomando como criterio no sólo el consumo energético resultante sino su impacto al proceso, tiempo de adopción y relación costo-beneficio de la propuesta de mejora.

La solución elegida tiene un consumo energético pico de 2,036.73W, y una media de 328.10W. En las figuras 6.39 y 6.40 se exponen los gráficos para cada una de estas perspectivas de análisis.

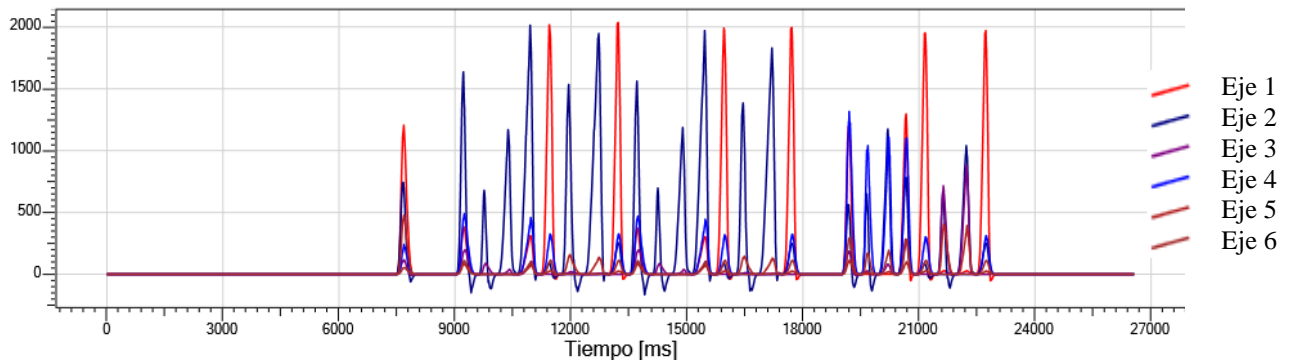


Figura 6.39: Consumo pico de la solución

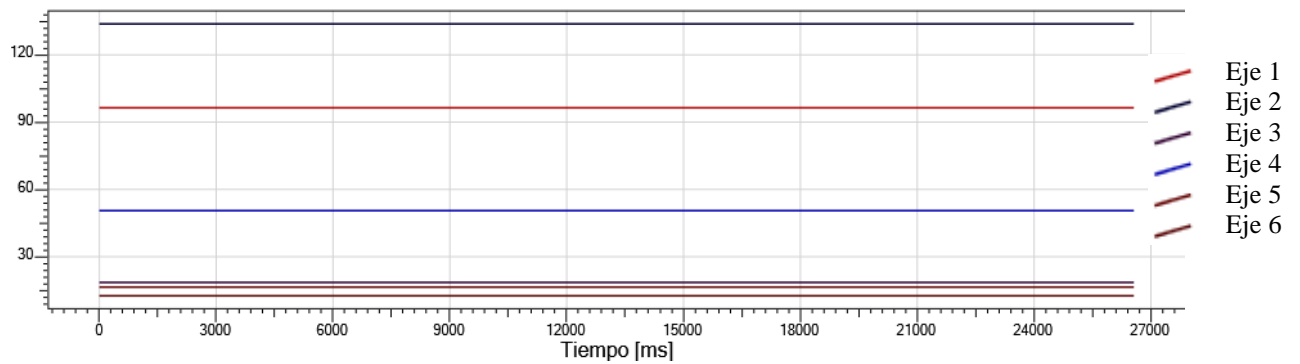


Figura 6.40: Consumo medio de la solución

En las figuras 6.41 y 6.42 se encuentran los gráficos de la velocidad y aceleración correspondientes a la solución. En general se presentan comportamientos similares a las demás trayectorias de movimiento, pero la interacción de velocidad con aceleración, en este caso, realiza transiciones más suaves y armónicas que no generan alzas o picos críticos de consumo energético.

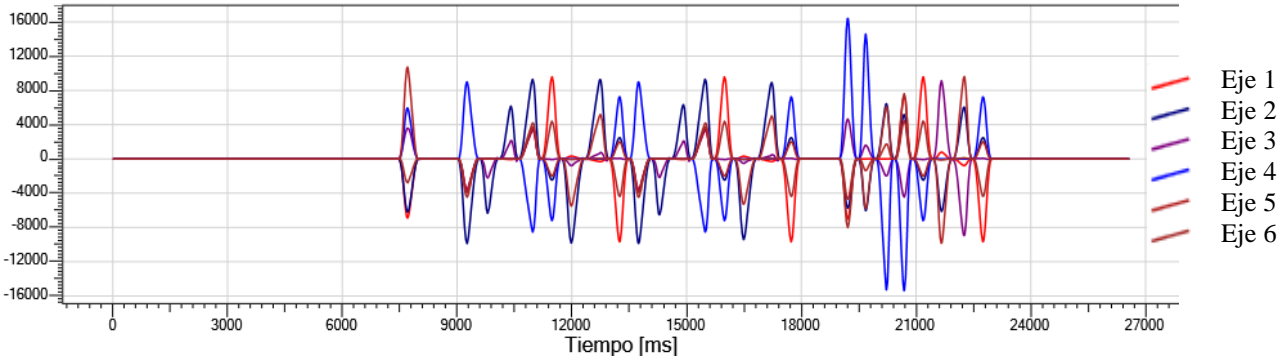


Figura 6.41: Velocidades alcanzadas por la solución

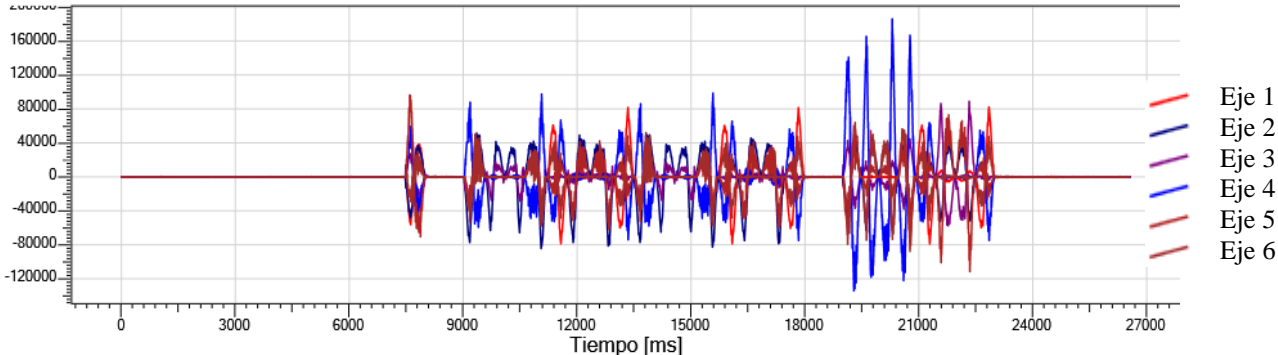


Figura 6.42: Aceleraciones alcanzadas por la solución

Al igual que la trayectoria inicial, se crea un mapa de flujo de valor para señalar los insumos destinados a la operación en términos de tiempo y energía. En la figura 6.43 se puede ver una mejora en el índice de tiempo de utilización llegando éste a 86.66%, una disminución del consumo pico en 16.85%, y 15.96% en el consumo medio cumpliendo lo prospectado en la carta de proyecto en la fase de definir.

Mapa de flujo de valor (estado final)

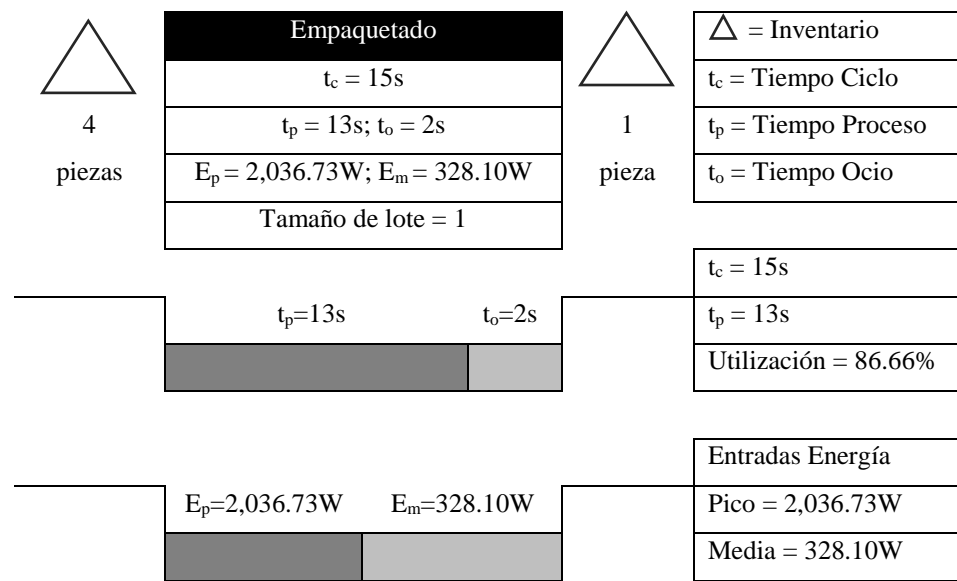
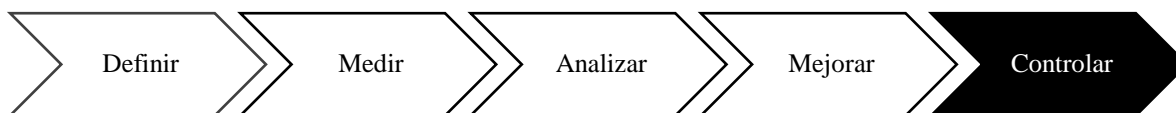


Figura 6.43: Mapa de flujo de valor final

6.4.6 Fase: Controlar



Matriz de control



Objetivo del proyecto: Disminuir el consumo energético de la operación de manipulación de materiales al menos 15%.

Riesgo: Adoptar deficientemente la configuración de parámetros de operación elegida.

Suficiencia de Control (x=excesivo, a=adecuado, i=inadecuado)

| Control | Existe | ¿Es suficiente? | Próximos pasos |
|--|--------|--|---|
| a) Oficializar configuración del robot industrial | No | a - Parámetro base de análisis y validación. | Carta de control de consumo energético. |
| b) Revisar configuración en simulación. | No | i - Revisión inicial de asignación de parámetros. | Trazabilidad de configuraciones. |
| c) Revisar código programado en el robot industrial. | Sí | a - Comprobación real de asignación de parámetros. | Hoja de control de revisión de parámetros. |
| d) Analizar gráficos de monitoreo | Sí | a - Revisión final de resultados reales. | Análisis R&R para validación de mediciones. |

Fecha: 07/02/2019

Preparado por: Ing. Pablo Segura

Siguiente actualización: 07/05/2019

Revisado por: Mtro. César Ortega

Figura 6.44: Matriz de control

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

7 Eficiencia energética y trabajo futuro

7.1 Eficiencia energética

La selección de herramientas de la metodología Seis Sigma Esbelto utilizadas en el modelo de eficiencia energética han sido de gran ayuda para el profundo análisis mostrado en el proyecto Kaizen. Permiten desmenuzar operaciones robóticas enteras y ponderar el valor que agrega cada subproceso, movimiento o configuración que se haya programado. Dependiendo de dicha operación es factible valorizar la inclusión de herramientas adicionales a las mostradas en este documento, cubriendo las necesidades específicas de cada organización. Se recomienda, por ejemplo, el aprovechamiento de Cartas de Control, Análisis R&R, Diagramas de Ishikawa, o Análisis de Modo y Efecto de Fallos.

El modelo ha permitido encontrar numerosas alternativas de configuración de parámetros de operación que mejoran los índices del estado inicial. La meta propuesta dentro de la Carta de Proyecto fue alcanzada, en gran medida, por las combinaciones que la variable aceleración fue adoptando en relación a las demás variables independientes. Arreglos con porcentajes nominales medios de aceleración y velocidad realizan secuencias más suaves que, en la mayor parte de los casos, originan un menor consumo energético por parte de los servomotores del manipulador industrial. Esto aunado a la aceleración como una variable de alta significancia en el modelo dinámico y, por ende, en el desempeño energético general.

En el caso de estudio presentado el tiempo de ocio no fue un factor determinante en la meta seleccionada, pero esto no quiere decir que lo sea así en todos los casos. Los servos consumen energía sólo por el hecho de soportar el peso que tienen asignado, si estos se encuentran cercanos a los límites de carga especificados por el fabricante, el tiempo de ocio puede llegar a ser relevante en la ecuación del modelo energético. Así mismo, cualquier paro total causado por tiempo de ocio o espera genera importantes picos de aceleración, y por ende picos de consumo energético. Por lo tanto, es altamente recomendable la abstención del uso de segmentos de tiempo que no agregan valor al proceso desde el diseño de trayectorias de movimiento en las fases de planeación de la producción y puesta en marcha del proceso.

7.2 Trabajo futuro

Se pretende ampliar el alcance del modelo de una sola unidad robótica a celdas o líneas de producción robotizadas, incrementando los ahorros por concepto de desempeño energético. El enfoque de este análisis robótico general es la simulación, donde es posible replicar los dispositivos a estudiar y realizar diseños, iteraciones e incluso la aplicación del modelo de eficiencia energética, sin la necesidad de utilizar un robot físicamente. Los beneficios de adoptar herramientas de manufactura digital en términos de tiempo y capital son de consideración. La información resultante de este nuevo alcance puede ser de gran utilidad en la concepción de políticas de control e indicadores de gestión ambiental de la empresa industrial.

REFERENCIAS

- [1] Paryanto, M. Brossog, M. Bornschlegl y J. Franke, «Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1315-1328, 2015.
- [2] M. Joon-Yung y J. Park, «Smart production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost by considering distributed energy resources and energy storage,» *International Journal of Production Research*, pp. 3922-3939, 2014.
- [3] B. Micieta, J. Markovic y V. Binasova, «Advances in Sustainable Energy Efficient Manufacturing System,» *MM Science Journal*, pp. 918-926, 2016.
- [4] K. Schwab, *The Fourth Industrial Revolution*, Ginebra: World Economic Forum, 2016.
- [5] Universidad Iberoamericana Puebla, «www.iberopuebla.mx,» Diciembre 2018. [En línea].
- [6] Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, «Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2014-2018,» Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Ciudad de México, 2014.
- [7] United Nations, «Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development,» United Nations, New York, 2015.
- [8] International Federation of Robotics, «Executive Summary World Robotics 2017, Industrial Robots,» IFR Press Conference, Frankfurt, 2017.
- [9] A. Burghardt, K. Kurc, D. Szybicki, M. Muszyńska y T. Szczęch, «Monitoring the Parameters of the Robot-Operated Quality Control Process,» *Advances in Science and Technology Research Journal*, pp. 232-236, 2017.

- [10] M. Bornschlegl, Paryanto, M. Spahr, S. Kreitlein, M. Bregulla y J. Franke, «Energy Planning of Manufacturing Systems with Methods-Energy Measurement (MEM) and Multi-Domain Simulation Approach,» *Applied Mechanics and Materials*, pp. 53-59, 2014.
- [11] E. Mariano, F. Nucci, A. Del Prete y A. Grieco, «Minimization of energy consumptions by means of an intelligent production scheduling,» *Key Engineering Materials*, pp. 525-532, 2015.
- [12] F. Rubio, C. Llopis-Albert, F. Valero y J. L. Suñer, «Assembly Line Productivity Assessment by Comparing Optimization-Simulation Algorithms of Trajectory Planning for Industrial Robots,» *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-10, 2015.
- [13] F. J. Abu-Dakka, I. F. Assad, R. M. Alkhdour y M. Abderahim, «Statistical evaluation of an evolutionary algorithm for minimum time trajectory planning problem for industrial robots,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 389-406, 2017.
- [14] A. Pandian y A. Ali, «The Effects of System Failures in a Robotic Assembly Line-Simulation Modeling and DOE Analysis,» de *Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Bali, Indonesia, 2014.
- [15] P. Nganga Muchiri, L. Pintelon, H. Martin y P. Chemweno, «Modelling maintenance effects on manufacturing equipment performance: results from simulation analysis,» *International Journal of Production Research*, pp. 3287-3302, 2014.
- [16] A. Barrientos, L. F. Peñín, C. Balaguer y R. Aracil, «Fundamentos de Robótica,» McGraw-Hill, Madrid, 1997.
- [17] International Organization for Standardization, ISO, «ISO 8373:2012,» International Organization of Standardization, Geneva, 2012.

- [18] T. Kansel, «Robotics 2,» North-Holland, 1986.
- [19] R. D. Snee, Impact of Six Sigma on Quality Engineering, Quality Engineering, 2000.
- [20] L. Gutiérrez, O. Buntinza y M. Barrale, «Six Sigma, Absorptive Capacity and Organizational Learning Orientation,» *International Journal of Production Research*, pp. 661-675, 2012.
- [21] D. Näshund, «Lean, Six Sigma and Lean Sigma: Fads or Real Process Improvement Methods?,» *Business Process Management Journal*, pp. 269-287, 2008.
- [22] J. Lee, K. Yuvamitra, K. Guiberteau y T. Kozman, «Six-Sigma Approach to Energy Management Planning,» *Strategic Planning for Energy and the Environment*, pp. 23-40, 2014.
- [23] B. R. Staatsa, D. J. Brunnerb y D. M. Upton, Lean Principles, Learning, and Knowledge Work: Evidence from a Software Service Provider, *Journal of Operations Management*, 2011.
- [24] A. Thomas, R. Barton y C. Chuke-Okafor, «Applying Lean Six Sigma in a Small Engineering Company – A Model for Change,» *Journal of Manufacturing Technology Management*, pp. 113-129, 2009.
- [25] T. Bendel, «A Review and Comparison of Six Sigma and the Lean Organizations,» *The TQM Magazine*, pp. 255-262, 2006.
- [26] R. D. Snee, «Lean Six Sigma – Getting Better all the Time,» *International Journal of Lean Six Sigma*, pp. 9-29, 2010.
- [27] M. George, D. Rowlands, M. Price y J. Maxey, *The Lean Six Sigma Pocket Toolbook*, McGraw-Hill, 2005.
- [28] Siemens Inc., «Tecnomatix,» Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2017.

[29] Kuka Deutschland GmbH, «KST WorkVisual 5.0,» Kuka Deutschland GmbH, Augsburg, 2018.

[30] J. Ferré, «El Diseño Factorial Completo 2k,» *Revista Técnicas de Laboratorio*, pp. 1-10, 2004.

LISTADO DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 4.1 Generaciones de la robótica industrial | 14 |
| Tabla 4.2 Parámetros DH para un robot de seis grados de libertad | 18 |
| Tabla 4.3 Parámetros DH para robot KUKA KR 16-2 | 18 |
| Tabla 4.4 Plan Kaizen | 30 |
| Tabla 6.1 Niveles de factores | 69 |
| Tabla 6.2 Matriz de experimentos | 70 |
| Tabla 6.3 Plan de experimentos | 70 |
| Tabla 6.4 Orden de experimentos | 71 |
| Tabla 6.5 Pico de consumo energético | 72 |
| Tabla 6.6 Media de consumo energético | 73 |

LISTADO DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1: Métodos de ingeniería industrial en robótica industrial | 2 |
| Figura 2.1 Número de robots industriales en operación | 6 |
| Figura 2.2 Robots industriales por cada 10,000 empleados | 7 |
| Figura 2.3 Distribución de robots por tipo de industria | 8 |
| Figura 2.4 Proyección de ventas | 8 |
| Figura 3.1 Áreas de investigación documental | 11 |
| Figura 4.1 Parámetros D-H para un eslabón giratorio | 16 |
| Figura 4.2 Asignación de ejes de referencia para robot de seis grados de libertad | 17 |
| Figura 4.3 Base de robot articular | 20 |
| Figura 4.4 Soluciones negativa y positiva para θ_3 | 21 |
| Figura 4.5 Objetivos de mejora Seis Sigma Esbelto | 26 |
| Figura 4.6 Fases de la implementación de Seis Sigma | 27 |
| Figura 4.7 Herramientas para cada fase DMAIC | 29 |
| Figura 5.1 Reducción de consumo energético (planeación de la producción) | 33 |
| Figura 5.2 Reducción de consumo energético (programación del robot) | 34 |
| Figura 5.3 Formato de Definición eficiente de trayectorias (Robot) | 36 |
| Figura 5.4 Formato de Definición eficiente de trayectorias (Servomotores) | 37 |
| Figura 5.5 Formato de Secuenciación eficiente de operaciones | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.6 Metodología para programación eficiente de parámetros de operación | 39 |
| Figura 5.7 Formato de Carta de proyecto | 40 |
| Figura 5.8 Formato de Plan de recolección | 41 |
| Figura 5.9 Formato de Mapa de flujo de valor (estado inicial) | 42 |
| Figura 5.10 Diagrama factorial del diseño experimental | 43 |
| Figura 5.11 Formato de Matriz de soluciones | 44 |
| Figura 5.12 Formato de Mapa de flujo de valor (estado final) | 45 |
| Figura 5.13 Formato de Matriz de control | 46 |
| Figura 5.14 Calendario para programación eficiente de parámetros de operación | 47 |
| Figura 6.1 Visión instrumentación | 50 |
| Figura 6.2 Visión servomotores | 50 |
| Figura 6.3 Objetos a manipular y contenedor final | 53 |
| Figura 6.4 Perspectiva frontal | 53 |
| Figura 6.5 Perspectiva lateral | 53 |
| Figura 6.6 Herramienta tipo ventosa | 54 |
| Figura 6.7 Cableado neumático | 54 |
| Figura 6.8 Distribuidor neumático FESTO | 54 |
| Figura 6.9 Robot KUKA KR 16-2 digitalizado | 55 |
| Figura 6.10 Celda robótica digitalizada | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 6.11 Definición eficiente de trayectorias (Robot) | 57 |
| Figura 6.12 Definición eficiente de trayectorias (Servomotores) | 58 |
| Figura 6.13 Secuenciación eficiente de operaciones | 59 |
| Figura 6.14 Carta de proyecto | 60 |
| Figura 6.15 Plan de recolección | 61 |
| Figura 6.16 Consumo pico del arreglo inicial | 62 |
| Figura 6.17 Consumo medio del arreglo inicial | 62 |
| Figura 6.18 Velocidades alcanzadas por el arreglo inicial | 63 |
| Figura 6.19 Aceleraciones alcanzadas por el arreglo inicial | 64 |
| Figura 6.20 Mapa de flujo de valor inicial | 65 |
| Figura 6.21 Diagrama factorial | 68 |
| Figura 6.22 Consumo pico del arreglo 5 | 73 |
| Figura 6.23 Consumo medio del arreglo 2 | 74 |
| Figura 6.24 Consumo pico del arreglo 4 | 74 |
| Figura 6.25 Consumo medio del arreglo 4 | 74 |
| Figura 6.26 Cuadro estadístico de consumo pico | 75 |
| Figura 6.27 Cuadro de regresión de consumo pico | 76 |
| Figura 6.28 Efectos principales de consumo pico | 77 |
| Figura 6.29 Diagrama de Pareto de consumo pico | 77 |
| Figura 6.30 Gráficos de residuales de consumo pico | 78 |

| | |
|---|----|
| Figura 6.31 Cuadro estadístico de consumo medio | 79 |
| Figura 6.32 Cuadro de regresión de consumo medio | 80 |
| Figura 6.33 Efectos principales de consumo medio | 81 |
| Figura 6.34 Diagrama de Pareto de consumo medio | 81 |
| Figura 6.35 Gráficos de residuales de consumo medio | 82 |
| Figura 6.36 Meta de ahorro en consumo pico | 83 |
| Figura 6.37 Meta de ahorro en consumo medio | 84 |
| Figura 6.38 Matriz de soluciones | 85 |
| Figura 6.39 Consumo pico de la solución | 86 |
| Figura 6.40 Consumo medio de la solución | 86 |
| Figura 6.41 Velocidades alcanzadas por la solución | 87 |
| Figura 6.42 Velocidades alcanzadas por la solución | 87 |
| Figura 6.43 Mapa de flujo de valor final | 88 |
| Figura 6.44 Matriz de control | 89 |

ANEXOS

Información técnica de servomotores KUKA KR 16-2.

| Servo - Eje 1 | |
|-----------------------|---------------------------|
| Modelo | MX_110_130_40_S0 |
| Artículo | 0000-115-925 |
| Torque estático | 11 Nm |
| Corriente en descanso | 9.2 A |
| Torque constante | 1.2 Nm/A |
| Velocidad nominal | 2750 rpm |
| Torque nominal | 8.25 Nm |
| Potencia nominal | 2.4 kW |
| Momento de inercia | 23.5 kg x cm ² |
| Energía de frenado | 1870 J |
| Voltaje del circuito | 560 V |
| Masa | 13.8 kg |
| Número de polos | 4 |

| Servo - Eje 2 | |
|-----------------------|---------------------------|
| Modelo | MX_110_130_40_S0 |
| Artículo | 0000-115-925 |
| Torque estático | 11 Nm |
| Corriente en descanso | 9.2 A |
| Torque constante | 1.2 Nm/A |
| Velocidad nominal | 2750 rpm |
| Torque nominal | 8.25 Nm |
| Potencia nominal | 2.4 kW |
| Momento de inercia | 23.5 kg x cm ² |
| Energía de frenado | 1870 J |
| Voltaje del circuito | 560 V |
| Masa | 13.8 kg |
| Número de polos | 4 |

| Servo - Eje 3 | |
|-----------------------|--------------------------|
| Modelo | MX_60_110_30_S0 |
| Artículo | 000-115-926 |
| Torque estático | 5.3 Nm |
| Corriente en descanso | 4.0 A |
| Torque constante | 4.8 Nm/A |
| Velocidad nominal | 1800 rpm |
| Torque nominal | 4.8 Nm |
| Potencia nominal | 0.9 kW |
| Momento de inercia | 9.1 kg x cm ² |
| Energía de frenado | 845 J |
| Voltaje del circuito | 325 V – 560 V |
| Masa | 8.1 kg |
| Número de polos | 4 |

| Servo - Eje 4 | |
|-----------------------|------------------------|
| Modelo | MX_16_60_42_S0 |
| Artículo | 000-120-420 |
| Torque estático | 1.6 Nm |
| Corriente en descanso | 2 A |
| Torque constante | 0.8 Nm/A |
| Velocidad nominal | 2000 rpm |
| Torque nominal | 1.42 Nm |
| Potencia nominal | 0.3 kW |
| Momento de inercia | 1 kg x cm ² |
| Energía de frenado | 114 J |
| Voltaje del circuito | 325 V – 560 V |
| Masa | 3.7 kg |
| Número de polos | 3 |

| Servo - Eje 5 | |
|-----------------------|------------------------|
| Modelo | MX_16_60_42_S0 |
| Artículo | 000-120-420 |
| Torque estático | 1.6 Nm |
| Corriente en descanso | 2 A |
| Torque constante | 0.8 Nm/A |
| Velocidad nominal | 2000 rpm |
| Torque nominal | 1.42 Nm |
| Potencia nominal | 0.3 kW |
| Momento de inercia | 1 kg x cm ² |
| Energía de frenado | 114 J |
| Voltaje del circuito | 325 V – 560 V |
| Masa | 3.7 kg |
| Número de polos | 3 |

| Servo - Eje 6 | |
|-----------------------|------------------------|
| Modelo | MX_16_60_42_S0 |
| Artículo | 000-120-420 |
| Torque estático | 1.6 Nm |
| Corriente en descanso | 2 A |
| Torque constante | 0.8 Nm/A |
| Velocidad nominal | 2000 rpm |
| Torque nominal | 1.42 Nm |
| Potencia nominal | 0.3 kW |
| Momento de inercia | 1 kg x cm ² |
| Energía de frenado | 114 J |
| Voltaje del circuito | 325 V – 560 V |
| Masa | 3.7 kg |
| Número de polos | 3 |

Código de la trayectoria de movimiento estudiada (SmartPad)

```
DEF A1 ( )

;FOLD PTP HOME Vel=100 % DEFAULT;{%PE}%R 8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P
1:PTP, 2:HOME, 3:, 5:100, 7:DEFAULT
;FOLD OUT 1'' State=FALSE ;{%PE}%R 8.2.24,%MKUKATPBASIS,%COUT,%VOUTX,%P 2:1, 3:,
5:FALSE, 6:
;FOLD PTP P1 Vel=50 % PDAT1 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P1, 3:, 5:50, 7:PDAT1
;FOLD WAIT Time=1 sec;{%PE}%R 8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CWAIT,%VWAIT,%P 3:1
;FOLD PTP P2 Vel=50 % PDAT2 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P2, 3:, 5:50, 7:PDAT2
;FOLD PTP P3 Vel=50 % PDAT3 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P3, 3:, 5:50, 7:PDAT3
;FOLD OUT 1'' State=TRUE ;{%PE}%R 8.2.24,%MKUKATPBASIS,%COUT,%VOUTX,%P 2:1, 3:,
5:TRUE, 6:
;FOLD PTP P4 Vel=50 % PDAT4 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P4, 3:, 5:50, 7:PDAT4
;FOLD PTP P8 Vel=50 % PDAT5 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P8, 3:, 5:50, 7:PDAT5
;FOLD PTP P9 Vel=50 % PDAT6 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P9, 3:, 5:50, 7:PDAT6
;FOLD PTP P10 Vel=50 % PDAT7 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P10, 3:, 5:50, 7:PDAT7
;FOLD OUT 1'' State=FALSE ;{%PE}%R 8.2.24,%MKUKATPBASIS,%COUT,%VOUTX,%P 2:1, 3:,
5:FALSE, 6:
;FOLD PTP P11 Vel=50 % PDAT8 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P11, 3:, 5:50, 7:PDAT8
;FOLD PTP P12 Vel=50 % PDAT9 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P12, 3:, 5:50, 7:PDAT9
;FOLD PTP P13 Vel=50 % PDAT10 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P13, 3:, 5:50, 7:PDAT10
;FOLD PTP P14 Vel=50 % PDAT11 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P14, 3:, 5:50, 7:PDAT11
;FOLD OUT 1'' State=TRUE ;{%PE}%R 8.2.24,%MKUKATPBASIS,%COUT,%VOUTX,%P 2:1, 3:,
5:TRUE, 6:
;FOLD PTP P15 Vel=50 % PDAT12 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P15, 3:, 5:50, 7:PDAT12
;FOLD PTP P16 Vel=50 % PDAT13 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P16, 3:, 5:50, 7:PDAT13
;FOLD PTP P17 Vel=50 % PDAT14 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P17, 3:, 5:50, 7:PDAT14
;FOLD PTP P18 Vel=50 % PDAT15 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P18, 3:, 5:50, 7:PDAT15
;FOLD OUT 1'' State=FALSE ;{%PE}%R 8.2.24,%MKUKATPBASIS,%COUT,%VOUTX,%P 2:1, 3:,
5:FALSE, 6:
;FOLD PTP P19 Vel=50 % PDAT16 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P19, 3:, 5:50, 7:PDAT16
;FOLD PTP P20 Vel=50 % PDAT17 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P20, 3:, 5:50, 7:PDAT17
;FOLD WAIT Time=1 sec;{%PE}%R 8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CWAIT,%VWAIT,%P 3:1
;FOLD PTP P21 Vel=50 % PDAT18 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P21, 3:, 5:50, 7:PDAT18
;FOLD PTP P22 Vel=50 % PDAT19 Tool[11]:ventosa psp Base[0];{%PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P22, 3:, 5:50, 7:PDAT19
;FOLD OUT 1'' State=TRUE ;{%PE}%R 8.2.24,%MKUKATPBASIS,%COUT,%VOUTX,%P 2:1, 3:,
5:TRUE, 6:
```

```
;FOLD PTP P23 Vel=50 % PDAT20 Tool[11]:ventosa psp Base[0];%{PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P23, 3:, 5:50, 7:PDAT20
;FOLD PTP P24 Vel=50 % PDAT21 Tool[11]:ventosa psp Base[0];%{PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P24, 3:, 5:50, 7:PDAT21
;FOLD PTP P25 Vel=50 % PDAT22 Tool[11]:ventosa psp Base[0];%{PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P25, 3:, 5:50, 7:PDAT22
;FOLD PTP P26 Vel=50 % PDAT23 Tool[11]:ventosa psp Base[0];%{PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P26, 3:, 5:50, 7:PDAT23
;FOLD OUT 1'' State=FALSE ;%{PE}%R 8.2.24,%MKUKATPBASIS,%COUT,%VOUTX,%P 2:1, 3:,
5:FALSE, 6:
;FOLD PTP P27 Vel=50 % PDAT24 Tool[11]:ventosa psp Base[0];%{PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P27, 3:, 5:50, 7:PDAT24
;FOLD PTP P28 Vel=50 % PDAT25 Tool[11]:ventosa psp Base[0];%{PE}%R
8.2.24,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P28, 3:, 5:50, 7:PDAT25
END
```

Código de la trayectoria de movimiento estudiada (Lenguaje máquina)

```
DEFDAT A1 PUBLIC

DECL BASIS_SUGG_T LAST_BASIS={POINT1[] "P28", POINT2[] "P28",
CP_PARAMS[] "CPDAT28", PTP_PARAMS[] "PDAT0",
CONT[] "CP_VEL[] "2", PTP_VEL[] "100", SYNC_PARAMS[] "SYNCDAT", SPL_NAME[] "S0"}
DECL E6POS XP1={X 1094.86694,Y -218.085007,Z 783.755676,A -70.5391312,B -55.7380981,C 22.3692398,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP1={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT1={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL 100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK 50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP2={X 1221.80798,Y -393.639404,Z 585.160522,A -74.4854584,B -59.9616699,C 29.5816803,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP2={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT2={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL 100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK 50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP3={X 1232.81299,Y -394.920288,Z 433.747009,A -65.6365891,B -55.4042282,C 19.2567291,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP3={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT3={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL 100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK 50.0,EXAX_IGN 0}
DECL LDAT LCPDAT4={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL 100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK 50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP4={X 1221.80298,Y -393.636993,Z 585.157288,A -74.4851913,B -59.9614792,C 29.5812397,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP4={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT5={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL 100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK 50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP5={X 1221.80103,Y -393.638214,Z 585.155273,A -74.4849777,B -59.9613686,C 29.5809593,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP5={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT6={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL 100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK 50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP6={X 1094.86694,Y -218.085007,Z 783.755676,A -70.5391312,B -55.7380981,C 22.3692398,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP6={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT7={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL 100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK 50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP7={X 1094.86694,Y -218.085007,Z 783.755676,A -70.5391312,B -55.7380981,C 22.3692398,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP7={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT8={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL 100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK 50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP8={X 1094.86694,Y -218.085007,Z 783.755676,A -70.5391312,B -55.7380981,C 22.3692398,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP8={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL E6POS XP9={X 1144.71399,Y 92.1584167,Z 724.939209,A -72.3110733,B -53.4367599,C 22.7779903,S 2,T 35,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
```

```

DECL FDAT FP9={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT9={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP10={X 1224.42505,Y 116.088898,Z 437.263489,A -70.0273285,B -
52.8001709,C 21.6431503,S 2,T 35,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP10={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT10={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL LDAT LCPDAT11={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP11={X 1144.71399,Y 92.1584167,Z 724.939209,A -72.3110733,B -
53.4367599,C 22.7779903,S 2,T 35,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP11={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT12={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP12={X 1094.86694,Y -218.085007,Z 783.755676,A -70.5391312,B -
55.7380981,C 22.3692398,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP12={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT13={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP13={X 1221.80798,Y -393.639404,Z 585.160522,A -74.4854584,B -
59.9616699,C 29.5816803,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP13={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT14={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP14={X 1230.38098,Y -394.052002,Z 423.005493,A -65.0241165,B -
54.9867592,C 18.5078602,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP14={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT15={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP15={X 1221.80298,Y -393.636993,Z 585.157288,A -74.4851913,B -
59.9614792,C 29.5812397,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP15={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT16={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP16={X 1094.86694,Y -218.085007,Z 783.755676,A -70.5391312,B -
55.7380981,C 22.3692398,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP16={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT17={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP17={X 1144.71399,Y 92.1584167,Z 724.939209,A -72.3110733,B -
53.4367599,C 22.7779903,S 2,T 35,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP17={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT18={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP18={X 1215.724,Y 113.880501,Z 453.750793,A -69.5984573,B -
52.7266617,C 20.9563599,S 2,T 35,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP18={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT19={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP19={X 1144.71399,Y 92.1584167,Z 724.939209,A -72.3110733,B -
53.4367599,C 22.7779903,S 2,T 35,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}

```



```

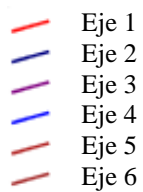
DECL FDAT FP19={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT20={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP20={X 1094.86694,Y -218.085007,Z 783.755676,A -70.5391312,B -
55.7380981,C 22.3692398,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP20={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT21={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP21={X 1060.297,Y -428.355988,Z 585.158325,A -74.4838486,B -
59.9622116,C 29.5808105,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP21={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL E6POS XP22={X 1060.297,Y -428.355896,Z 442.740997,A -74.4838562,B -
59.962101,C 29.58078,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP22={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT22={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL LDAT LCPDAT23={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP23={X 1060.28406,Y -428.347687,Z 611.645203,A -74.4826736,B -
59.9601784,C 29.5787907,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP23={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT24={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP24={X 1094.86694,Y -218.085007,Z 783.755676,A -70.5391312,B -
55.7380981,C 22.3692398,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP24={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT25={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP25={X 1144.71399,Y 92.1584167,Z 724.939209,A -72.3110733,B -
53.4367599,C 22.7779903,S 2,T 35,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP25={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL E6POS XP26={X 1067.10901,Y 117.760803,Z 441.35379,A -70.6849899,B -
52.8230591,C 23.6721497,S 6,T 51,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP26={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT26={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL LDAT LCPDAT27={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP27={X 1144.71399,Y 92.1584167,Z 724.939209,A -72.3110733,B -
53.4367599,C 22.7779903,S 2,T 35,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP27={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT28={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST 100.0,APO_FAC 50.0,AXIS_VEL
100.0,AXIS_ACC 100.0,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0,GEAR_JERK
50.0,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP28={X 1094.86694,Y -218.085007,Z 783.755676,A -70.5391312,B -
55.7380981,C 22.3692398,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP28={TOOL_NO 11,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPDAT1={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT2={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT3={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT4={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}

```

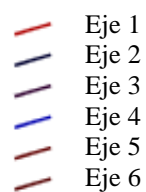
```
DECL PDAT PPDAT5={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT6={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT7={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT8={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT9={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT10={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT11={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT12={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT13={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT14={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT15={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT16={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT17={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT18={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT19={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT20={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT21={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT22={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT23={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT24={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
DECL PDAT PPDAT25={VEL 100.0,ACC 50.0,APO_DIST 100.0,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0}
ENDDAT
```

Gráficas de consumo energético

Ejes consumo pico

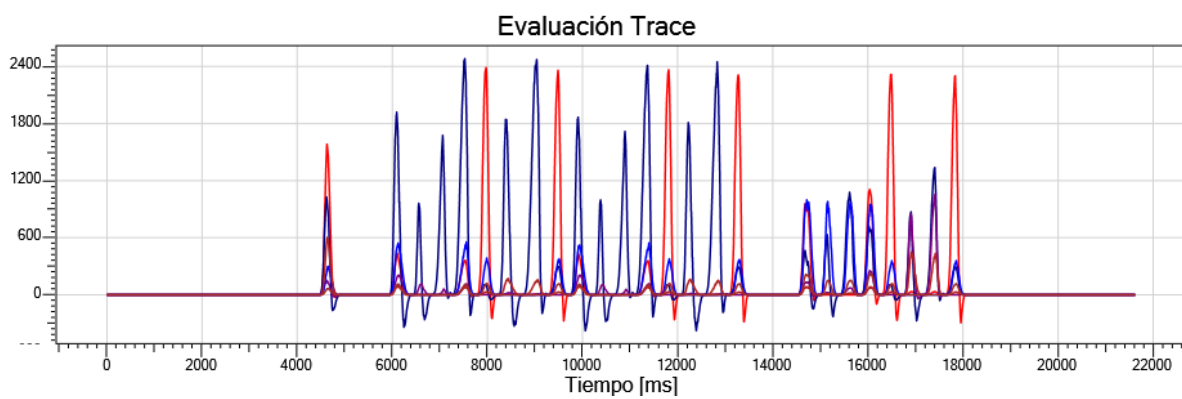


Ejes consumo medio

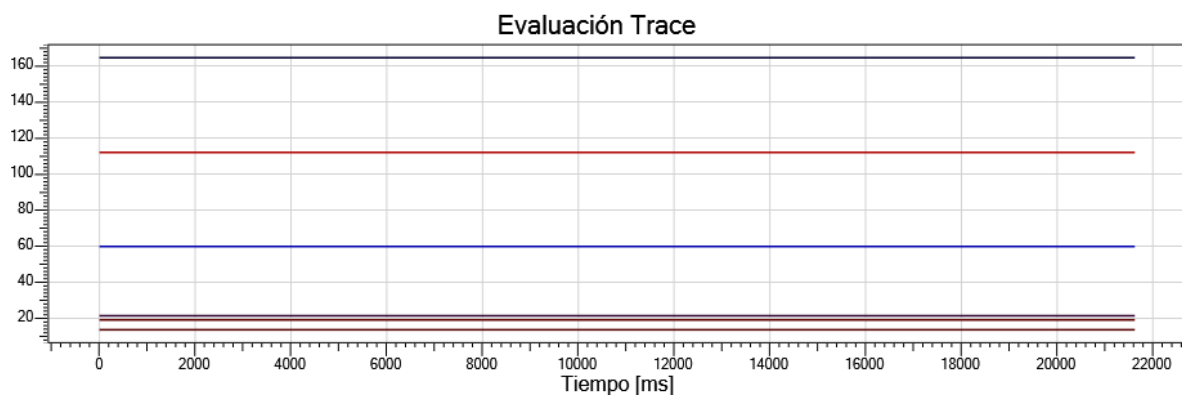


Arreglo inicial

Consumo pico

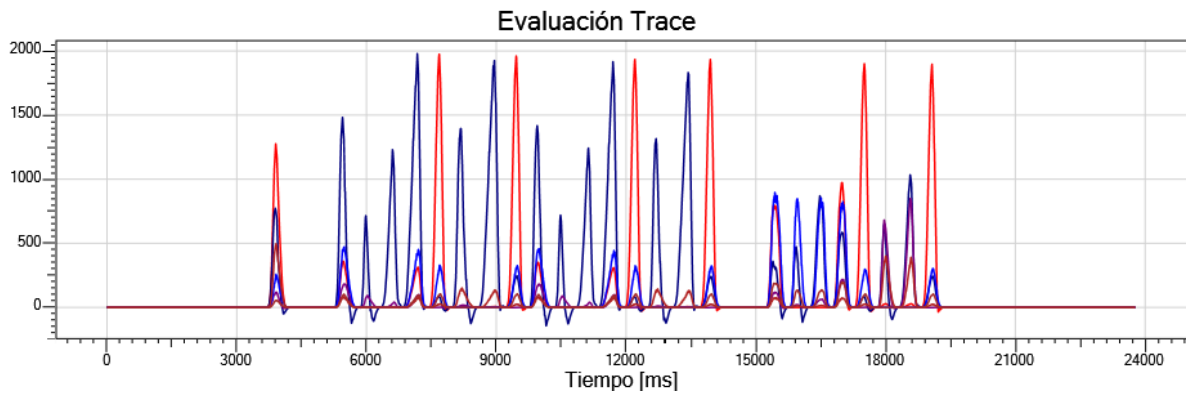


Consumo medio

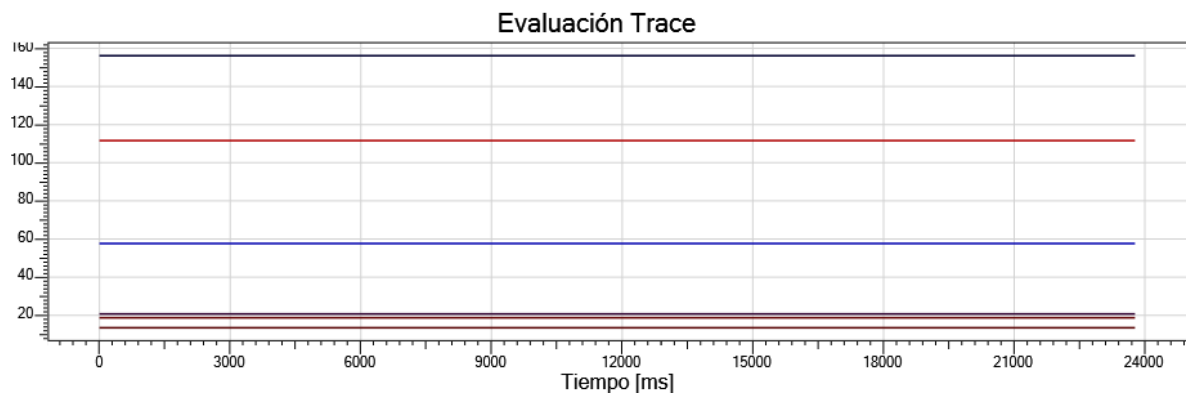


Arreglo 1

Consumo pico

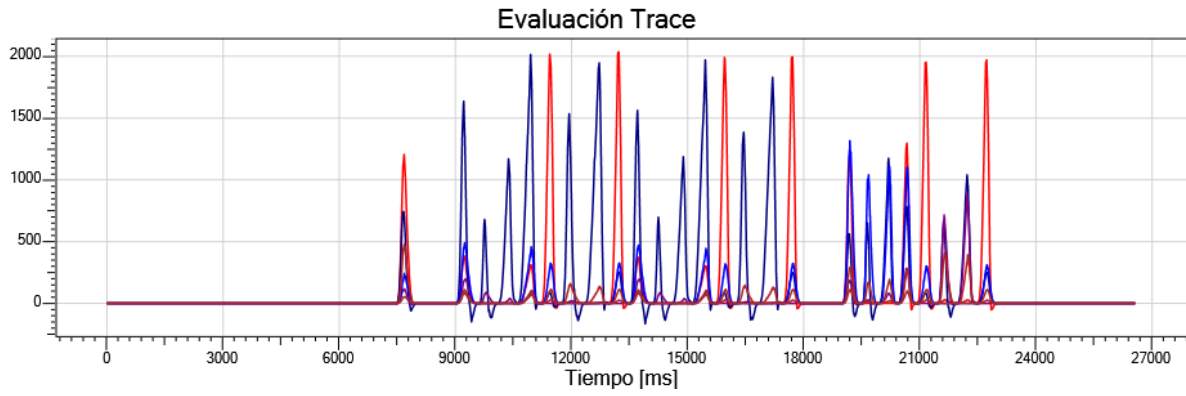


Consumo medio

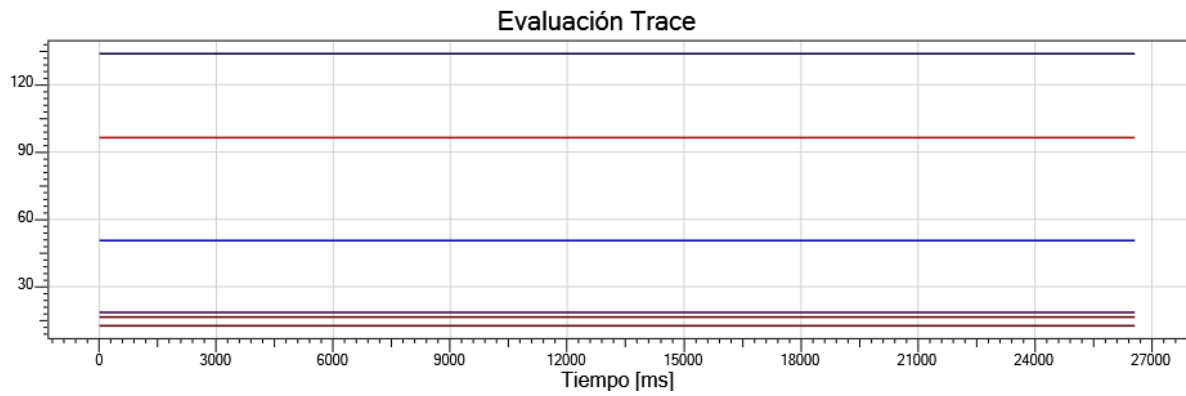


Arreglo 2

Consumo pico

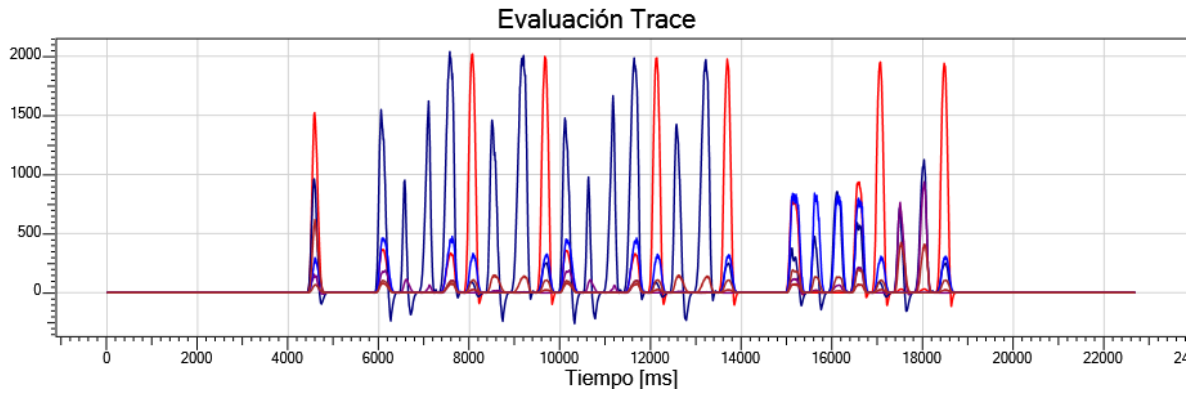


Consumo medio

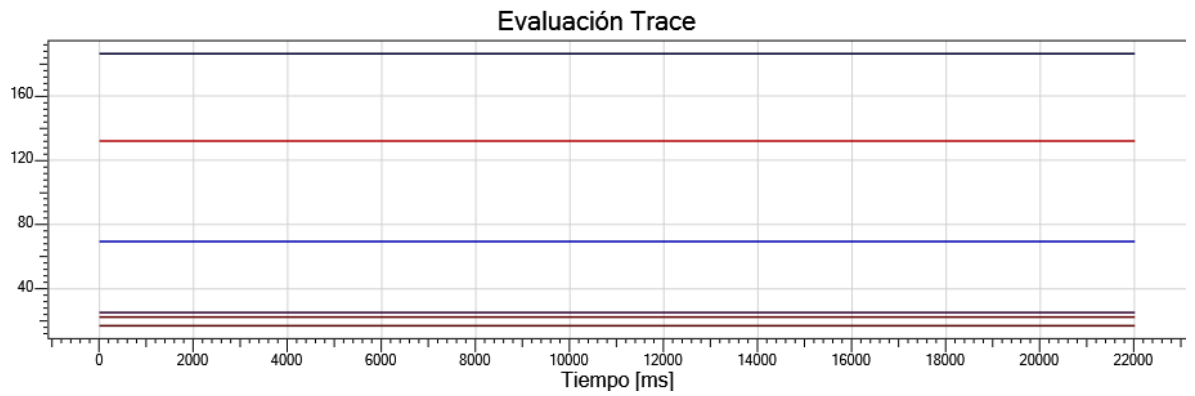


Arreglo 3

Consumo pico

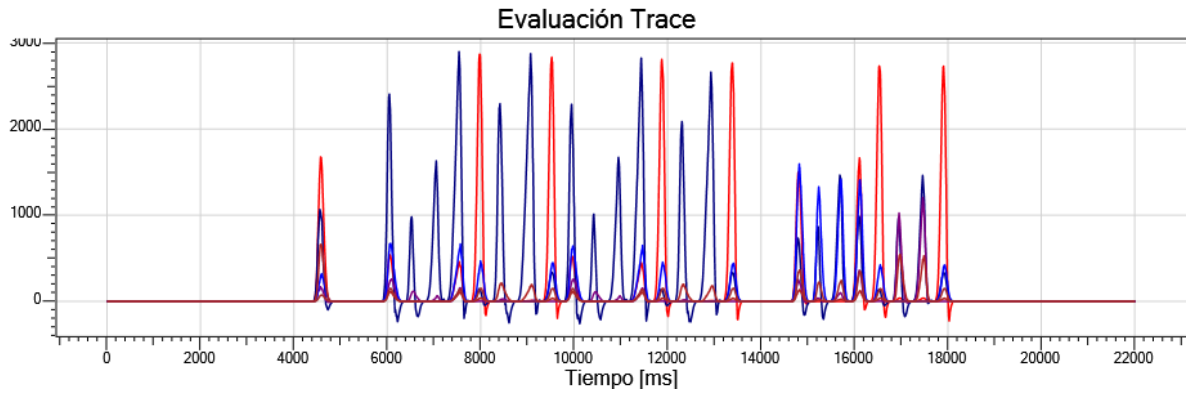


Consumo medio

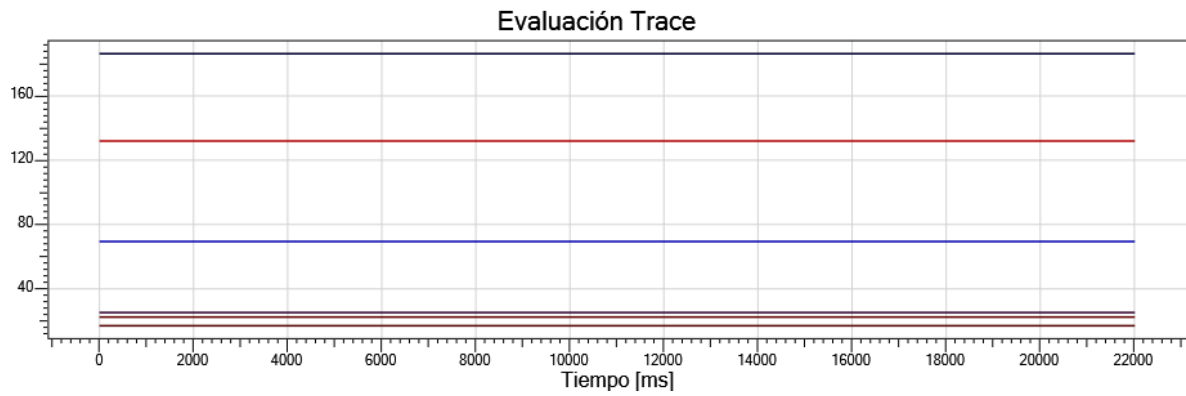


Arreglo 4

Consumo pico

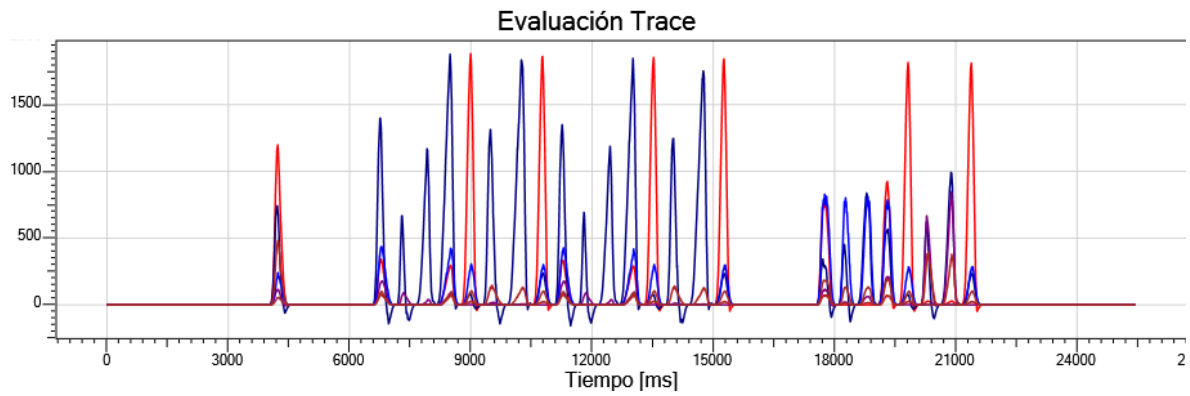


Consumo medio

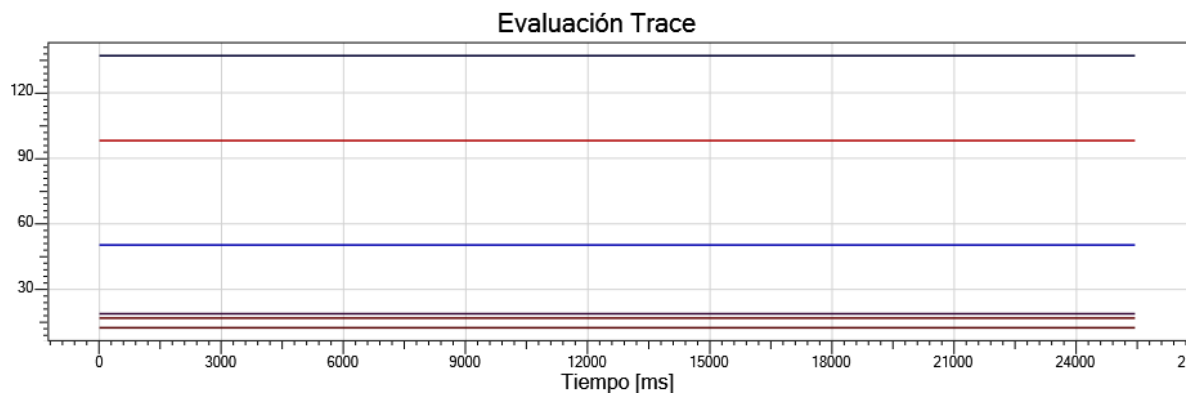


Arreglo 5

Consumo pico

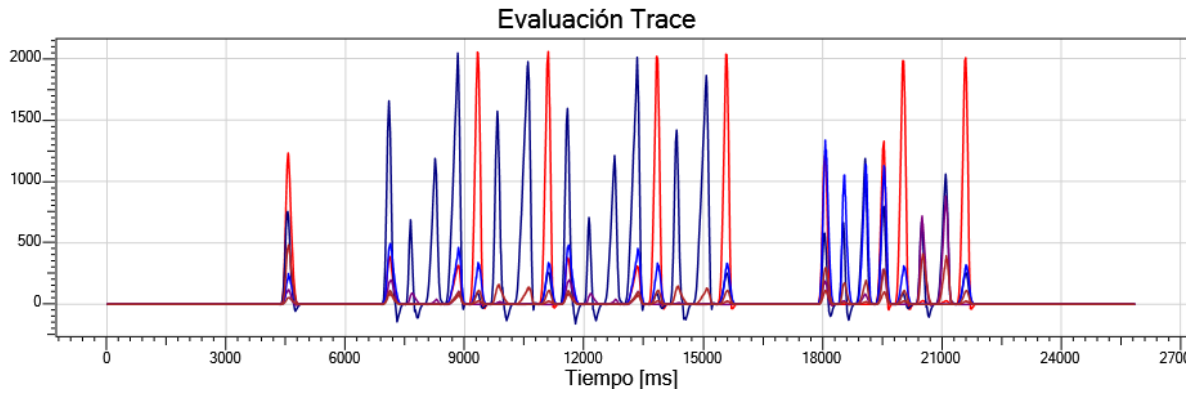


Consumo medio

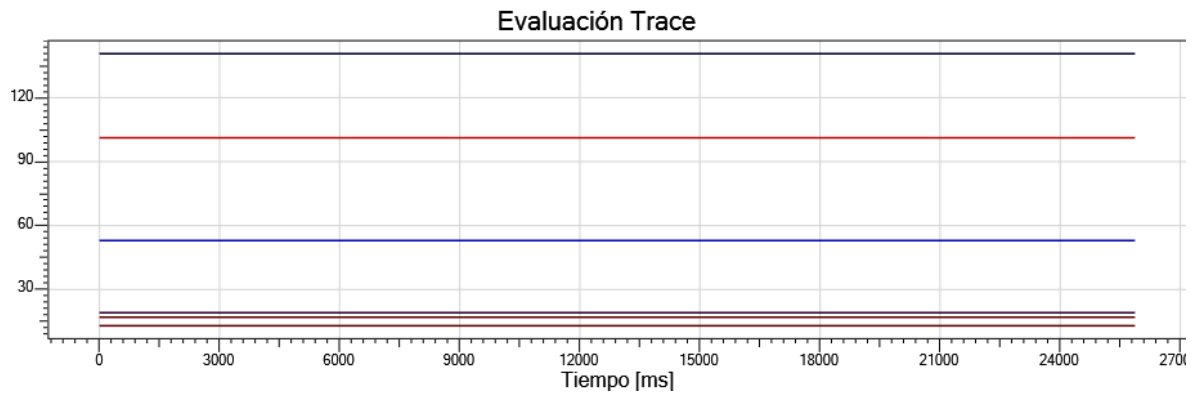


Arreglo 6

Consumo pico

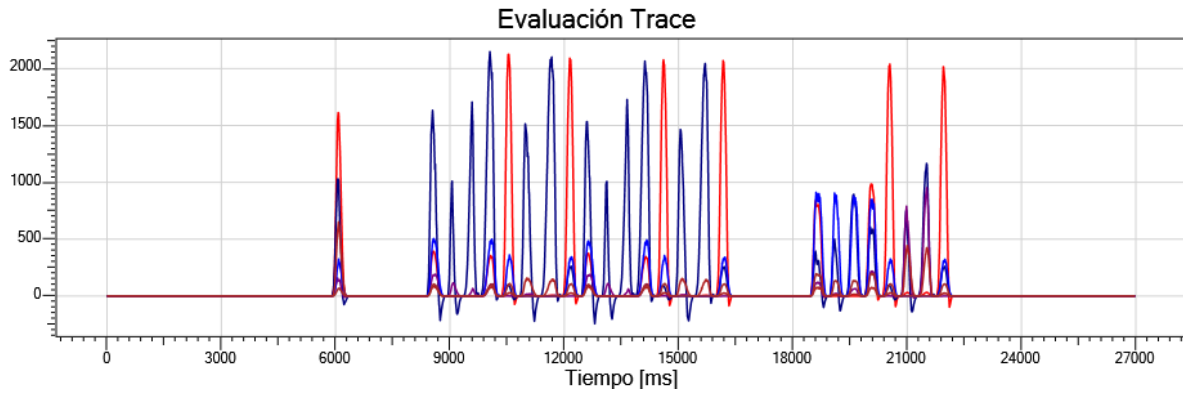


Consumo medio

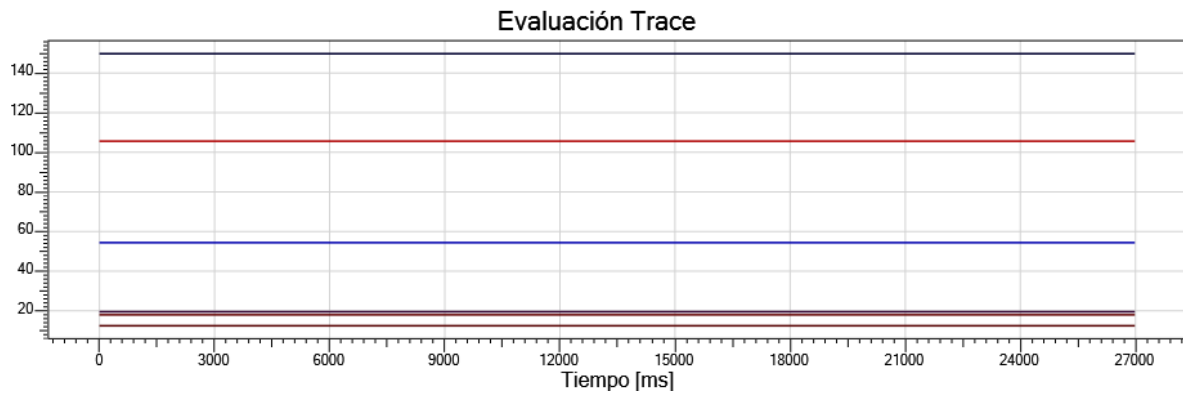


Arreglo 7

Consumo pico

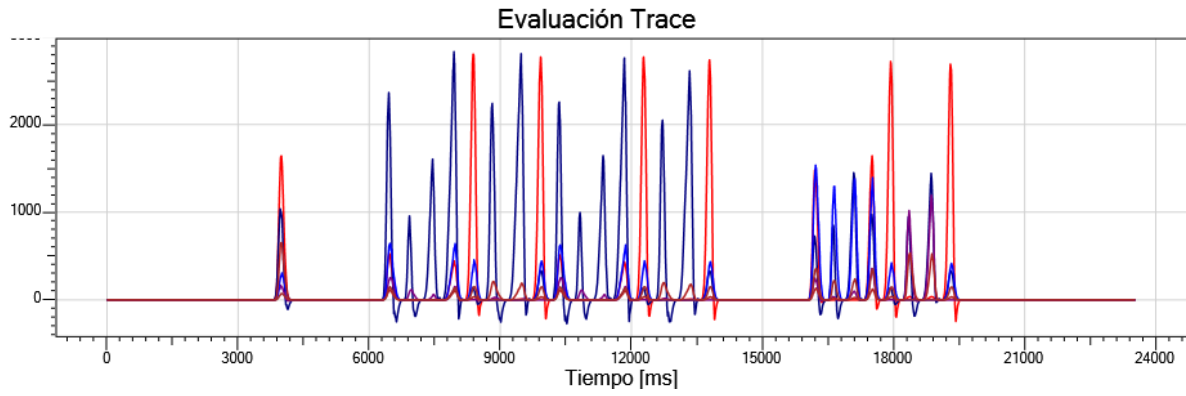


Consumo medio



Arreglo 8

Consumo pico



Consumo medio

