



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

Diseño de un sistema mecatrónico de izaje de luminarias de naves industriales

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecatrónico, que presenta el bachiller:

Víctor Sergio Zavaleta Camacho

ASESOR: José Antonio Osada Mochizuki

Lima, agosto del 2014

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una propuesta para optimizar los procedimientos de mantenimiento, reparaciones, ajustes y recambios de luminarias de naves industriales. Los procedimientos tradicionales para realizar estas actividades se caracterizan por su dificultoso acceso a las luminarias, considerables costos de personal y equipamiento necesario; a la vez que en ocasiones suponen suspensiones temporales de los procesos de producción de las empresas. Por ello se propone el diseño de un sistema mecatrónico para el izaje de luminarias de naves industriales, de tal manera que el mantenimiento pueda realizarse de una manera segura, rápida, oportuna y eficiente a nivel del piso, otorgando seguridad y condiciones de trabajo ventajosas a operarios encargados del mantenimiento y limpieza de las luminarias, y eliminando los accidentes ocasionados por caídas de altura.

A través del sistema mecatrónico se podrá acceder de manera rápida y oportuna a la batería de luminarias industriales para solucionar problemas de paradas y fallas imprevistas. Asimismo, se aprovechará la facilidad de acceso para proporcionar mantenimiento y limpieza permanente con la finalidad de conservar la calidad de la iluminación y colaborar con el aumento de la productividad, reduciendo así costos de mantenimiento y reposición, costos de operarios y gastos ocasionados por accidentes.

Un elemento clave para la buena iluminación de naves industriales es la altura de operación de las luminarias. Para asegurar los correctos niveles de iluminación se debe tener en cuenta la normativa para este tipo de instalaciones para evitar una baja iluminación o un exceso de esta. Teniendo los sistemas de iluminación fijos se imposibilita el manejo de diferentes alturas con el objetivo de variar la iluminación más adecuada según la relación potencia – altura. De este modo, a través del sistema mecatrónico, se facilitará el posicionamiento de las luminarias a la altura de óptima iluminación requerida por la nave o el usuario en un momento dado según la naturaleza de los trabajos que se realicen.

En el Capítulo 1 se presenta la problemática con la que cuentan las empresas al no tener un acceso rápido que facilite el mantenimiento y posicionamiento de las luminarias. En el Capítulo 2 se presentan las condiciones y requerimientos que el sistema mecatrónico propuesto debe ser capaz de satisfacer y una introducción acerca del modo en que el sistema logrará cumplir tales requerimientos. En el Capítulo 3, se detalla los elementos mecánicos, componentes electrónicos y red inalámbrica a implementar en la nave industrial propios del sistema mecatrónico; así como la explicación de su funcionamiento a través de ilustraciones, planos y esquemas. En el Capítulo 4 se calcula el costo de operación del sistema y el costo de fabricación. En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo de diseño, así como las recomendaciones pertinentes.

Por último, se ha detallado en los anexos los cálculos de diseño del sistema de carga y los elementos mecánicos que conforman el sistema, la configuración de los elementos de la red inalámbrica, los requerimientos para la selección de los componentes electrónicos, las cotizaciones, las especificaciones técnicas y hojas de datos de las piezas, y los planos de despiece y ensamble.

Índice

Capítulo 1: Presentación de la problemática.....	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Problemas que se presentan	6
Capítulo 2: Requerimientos del sistema mecatrónico y presentación del concepto.....	9
2.1. Requerimientos del sistema mecatrónico.....	9
2.1.1. Requerimientos mecánicos.....	9
2.1.2. Requerimientos electrónicos y de control.....	9
2.2. Concepto de la solución.....	10
Capítulo 3: Sistema mecatrónico.....	15
3.1. Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico.....	15
3.2. Elementos mecánicos y componentes electrónicos.....	16
3.2.1. Elementos mecánicos.....	16
3.2.1.1. Motorreductor.....	17
3.2.1.2. Engranajes.....	17
3.2.1.3. Ejes.....	18
3.2.1.4 Cable eléctrico de izaje.....	18
3.2.1.4 Conector rotativo.....	18
3.2.2. Componentes electrónicos.....	21
3.2.2.1. Encoder.....	21
3.2.2.2. Sensor de fin de carrera.....	22
3.2.2.3. Microcontrolador.....	23
3.2.2.4. Módulos XBee Pro.....	23
3.2.2.5. Controlador de motor.....	24
3.2.2.5. Optoacoplador.....	24
3.2.2.5. Triac.....	25
3.2.2.5. Fuente de poder.....	25
3.2.2.5. Convertidor DC/DC.....	26
3.2.2.5. Regulador LDO.....	26
3.3. Planos del sistema mecatrónico.....	27
3.4. Sistema de comunicación inalámbrica.....	39
3.4.1. Tecnología del sistema de comunicación inalámbrica.....	39

3.4.2. Funcionamiento del sistema de comunicación inalámbrica.....	40
3.4.3. Configuración del sistema de comunicación inalámbrica.....	42
3.4.4 Conexiones del bloque de coordinación	43
3.5. Diagramas esquemáticos de los circuitos del sistema mecatrónico.....	44
3.5.1. Circuito de alimentación.....	44
3.5.2. Circuito de control.....	45
3.6. Diagrama de flujo del sistema mecatrónico.....	47
3.6.1 Diagrama de flujo del programa en computadora.....	47
3.6.2 Diagrama de flujo de los microcontroladores remotos.....	48
Capítulo 4: Presupuesto.....	49
Capítulo 5: Conclusiones.....	51
Bibliografía.....	52
Anexo 1: Diseño del sistema de carga	
Anexo 2: Dimensionamiento y cálculo de engranajes	
Anexo 3: Cálculo y dimensionamiento de ejes	
Anexo 4: Configuración de la red inalámbrica	
Anexo 5: Selección de los componentes electrónicos	
Anexo 6: Cotizaciones	
Anexo 7: Hojas de datos	
Anexo 8: Planos de despiece y ensamble	

Capítulo 1: Presentación de la problemática

1.1 Introducción

Una nave industrial es un edificio de uso industrial que alberga la producción y/o almacena los bienes industriales, junto con los obreros, las máquinas que los generan, el transporte interno, la salida y entrada de mercancías, etc. Mantener estos entornos bien iluminados no es algo que ‘sea bueno tener’ sino una obligación legal. Como indican las normas relativas a los lugares de trabajo, el confort visual de los trabajadores es fundamental. Existen estudios que han demostrado que la productividad aumenta drásticamente con una mejor calidad de luz. Al mismo tiempo, los accidentes laborales y los defectos de producción disminuyen de forma considerable. [1].

La iluminancia inicial proporcionada por la instalación disminuye de manera gradual con el tiempo debido al uso, disminución de los lúmenes de las lámparas, a la suciedad del sistema, etc.

Según la Comisión de Iluminación Internacional [2], los factores que influyen en estas pérdidas son:

- Fallo por mortalidad o mal funcionamiento de los componentes
- Acumulación de polvo y suciedad en el exterior de la luminaria
- Envejecimiento de las lámparas
- Deterioro y envejecimiento de la parte interior de la lámpara debido a la oxidación, efectos del calor, etc.
- Variaciones de temperatura elevadas
- Fallo prematuro del equipo auxiliar
- Voltaje incorrecto entre bornes
- Fallos de la instalación

En la figura 1.1 se observa la depreciación de iluminación que sufren las luminarias con el tiempo. Por ejemplo, el porcentaje de iluminación disminuye hasta un 71% los primeros seis meses, si en este momento se limpia el conjunto, al cabo de un año, el porcentaje de iluminación será del 70%. En cambio, si la limpieza se realiza al año, el porcentaje baja hasta el 62%.

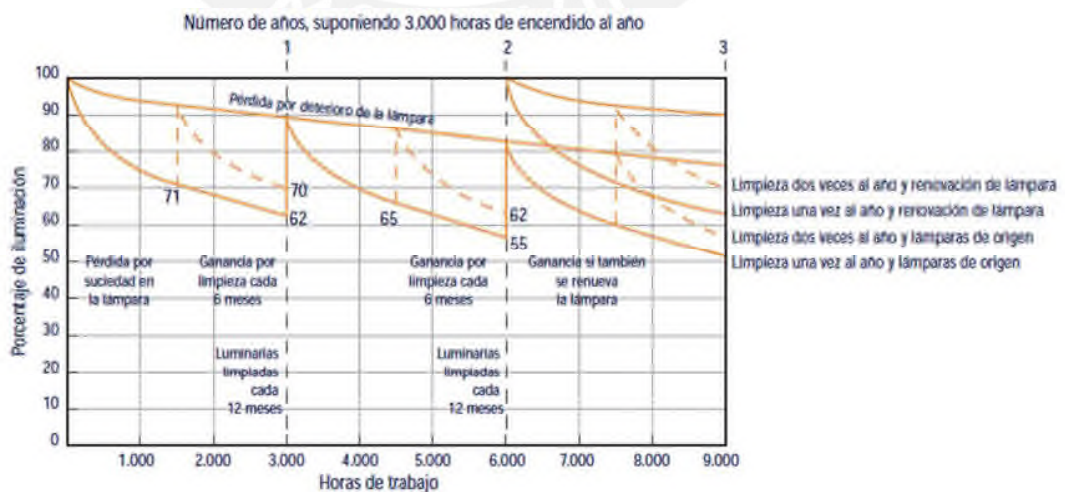


Figura 1.1: Curvas de depreciación luminosa en el tiempo. Fuente: [3] Indal

Para mantener el mínimo valor permitido establecido, es necesario realizar un mantenimiento adecuado a la instalación completa: limpiar el conjunto lámpara-luminaria o cambiar las lámparas que no funcionan con una cierta frecuencia.

A través de un sistema que facilite el acceso a las luminarias, se podría establecer un programa de mantenimiento total de la instalación, tomando en cuenta:

- Limpieza del sistema óptico
- Cambio de lámparas.
- Comprobación de las fijaciones mecánicas.
- Control de las conexiones eléctricas.
- Equipos auxiliares y otros elementos.

Fuente: [4] Grupo de estudios luminotécnicos - Universidad Politécnica de Cataluña

En comparación a los periodos de mantenimiento tradicionales (semestrales, anuales, etc.), realizar los trabajos de mantenimiento sería posible tan frecuentemente como sea requerido (semanal, mensual, bimestral, etc.) gracias a la facilidad de acceso que otorga el sistema mecatrónico a diseñar, disminuyendo en gran medida los costos de reposición y mantenimiento tradicional que demandan las luminarias.

1.2 Problemas que se presentan

Los techos altos llevan asociados tradicionalmente un costoso trabajo de mantenimiento, si añadimos las interrupciones por paradas imprevistas, estaremos hablando de un importante problema para la productividad del negocio. El simple hecho de disponer de un acceso rápido, fácil y seguro puede suponer una importante reducción en los costos operativos y gastos de reposición de lámparas.

1.2.1. Paradas imprevistas

A pesar de la existencia de un plan de mantenimiento programado, suelen ocurrir interrupciones del alumbrado ante las fallas imprevistas de funcionamiento de algún elemento del sistema (lámparas, balastos, reflectores, conectores, cableado, etc.), que influyen negativamente en las labores del área afectada.

1.2.2. Riesgos de accidentes

Las caídas desde lo alto son la causa más común de lesiones y muerte. Entre los motivos, se destaca, el trabajo en andamios o plataformas sin barreras de protección o sin un arnés de seguridad correctamente colocado, así como los techos frágiles y las escaleras en mal estado, mal colocadas o mal aseguradas.

1.2.3. Pérdida gradual de eficiencia

Reparar y limpiar constantemente de la manera tradicional o añadir más luminarias para mantener el estándar de iluminación requerido no es una solución económica. La acción del polvo, impurezas, gases corrosivos, humedad y la basura, en muchas ramas de la industria, deteriorarán permanentemente la capacidad de iluminación del alumbrado. Existen estudios que han demostrado que la productividad aumenta drásticamente con una mejor calidad de luz. [5].

1.2.4. Dificultad en el trabajo de mantenimiento

Existen naves industriales desde seis hasta veinte metros de altura, lo cual implica un difícil acceso a las luminarias. Ya sea en el caso de reparación por paradas imprevistas o aplicación de programas de mantenimiento, estas labores demandan tiempos largos y un considerable grado de dificultad.

1.2.5. Imposibilidad de manejo de niveles de iluminación

Un elemento clave para la buena iluminación de naves industriales es la altura de las luminarias. Gracias a un adecuado nivel de iluminación se logra favorecer la productividad y bienestar de los trabajadores. Para asegurar los correctos niveles de iluminación se debe tener en cuenta la normativa para este tipo de instalaciones para evitar una baja iluminación o un exceso de ésta. Teniendo los sistemas de iluminación fijos se imposibilita el manejo de diferentes alturas con el objetivo de variar la iluminación más adecuada según la relación potencia – altura.

1.2.6. Altos costos de mantenimiento

El nivel de los costos de mantenimiento depende, en gran medida, de la vida útil de las lámparas así como de los ciclos de limpieza de la luminaria, la tasa de fallo de los componentes y la facilidad de mantenimiento de las luminarias.

Reemplazar luminarias industriales periódicamente, cuyo precio oscila 400 y 1000 dólares, representa un costo muy elevado que sea desea evitar.

Según la finalidad del mantenimiento, este se clasifica en: [4]

1. Mantenimiento correctivo: es la acción realizada para mejorar el funcionamiento de un elemento.
2. Mantenimiento preventivo: es la acción tomada para eliminar una causa de una inconformidad o una situación indeseable.
3. Mantenimiento predictivo: percibir síntomas de funcionamiento antes para tomar acciones y evitar paradas no planificadas.



Figura 1.2: Procedimientos tradicionales para acceder a las luminarias. Fuente: Reel Tech.

Capítulo 2: Requerimientos del sistema mecatrónico y presentación del concepto

2.1. Requerimientos del sistema mecatrónico

Para el desarrollo de este trabajo se ha tenido en cuenta los requerimientos del entorno de trabajo de una nave industrial de grandes dimensiones. Además, el sistema mecatrónico deberá contar con tiempos de operación y consumo energético reducidos.

El principal objetivo es transportar las luminarias desde su posición de iluminación, por lo general la altura de la nave industrial, hasta el alcance del usuario a nivel del suelo para su mantenimiento o reposición; posteriormente el sistema deberá retornar las luminarias a su posición inicial. Además, si el usuario así lo requiere, el sistema debe ser capaz de controlar individualmente cada luminaria, llevándola a una posición intermedia entre el techo y el suelo de acuerdo a su necesidad, pudiendo estar encendida o apagada.

2.1.1. Requerimientos mecánicos

El sistema mecatrónico deberá ser capaz de trabajar inclusive en las naves industriales de máxima altura, esto es, hasta 20 metros.

En el mercado se pueden encontrar luminarias para naves industriales de marcas reconocidas como Philips, GE Lighting, Ivalo, Distecsa, etc. Se optó por tomar como referencia a la serie de luminarias Cabana de Philips por su buena relación de intensidad luminosa - peso, por sus prestaciones de facilidad de conexión eléctrica externa y el adicional de poder trabajar con dos haces de luz (estrecho y amplio) utilizando el mismo reflector. El peso de las luminarias Cabana varía según el modelo, desde 7.5 kg hasta 9.8 kg. [5]

Para sujetar a la luminaria, el sistema no deberá requerir un consumo significativo; es decir, la luminaria podrá permanecer inmóvil gracias a una traba mecánica. El consumo energético significativo será requerido únicamente para el movimiento de la luminaria.

2.1.2. Requerimientos electrónicos y de control

Se deberá controlar la velocidad del motor a emplear. Además, se deberá sensar en todo momento la altura a la que se encuentra la luminaria a desplazar, a fin de obtener un control preciso.

Asimismo, se deberá comunicar inalámbricamente las órdenes ingresadas por el usuario en tiempo real dentro de las dimensiones de la nave industrial. El usuario deberá tener acceso a controlar el estado –encendido o apagado– de cada uno de las luminarias de manera inalámbrica.

El sistema mecatrónico propuesto requiere de una toma de 220VAC o 110VAC para su funcionamiento (la misma que para la luminaria); así como un consumo energético reducido, de tal manera que se pueda encontrar encendido junto con la luminaria sin representar un consumo adicional.

El sistema mecatrónico debe trabajar a la par con una interfaz hombre – máquina (HMI) para la interacción con el usuario.

2.2. Concepto de la solución

La luminaria colgará suspendida encendida o apagada mediante un cable eléctrico especial resistente a la tracción; esta irá descendiendo o ascendiendo a medida que el cable se va desenrollando o enrollando en un eje que funcionará como un carrete de cable. El accionamiento de este eje se producirá por la potencia entregada por un motor de corriente continua. Se hará uso de engranajes para que el sistema logre suministrar el torque necesario.

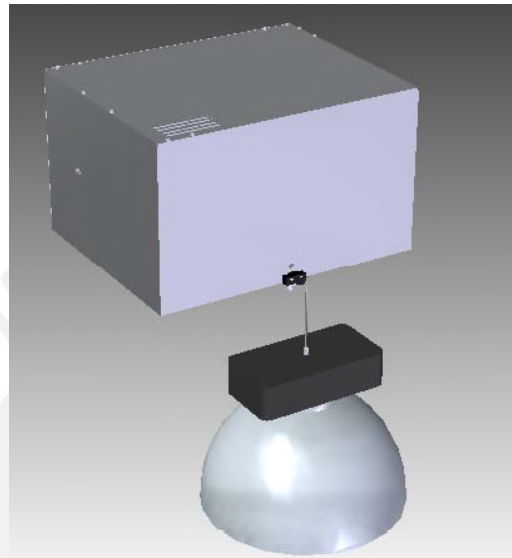


Figura 2.1: Vista general del sistema mecatrónico.
Fuente: Elaboración propia.

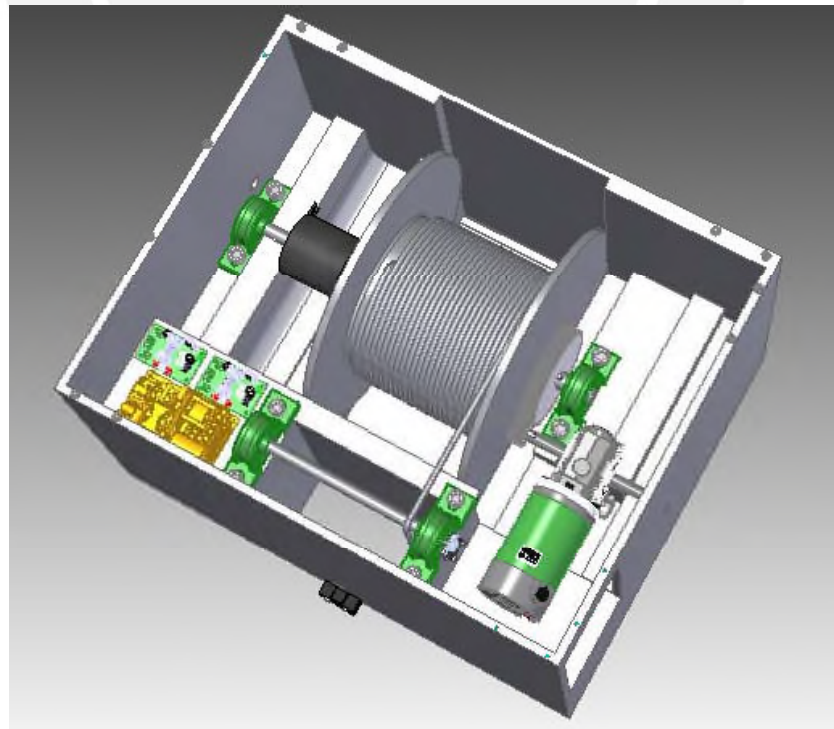


Figura 2.2: Vista interior del sistema mecatrónico. Fuente: Elaboración propia.

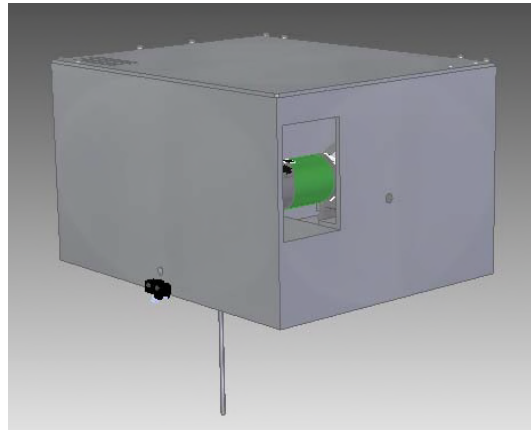


Figura 2.3 Vista exterior del sistema mecatrónico. Fuente: Elaboración propia.

El sistema mecatrónico ha sido diseñado para trabajar con un peso de 9.8 kg, que es la masa de la serie más reciente de luminarias Cabana fabricadas por Philips. El sistema deberá ser capaz de soportar los esfuerzos generados por el izaje de la luminaria. Para el dimensionamiento de las piezas del sistema se realizará el análisis de esfuerzos estáticos y análisis por fatiga del material, ya que estarán sometidas a cargas alternantes y pulsantes.

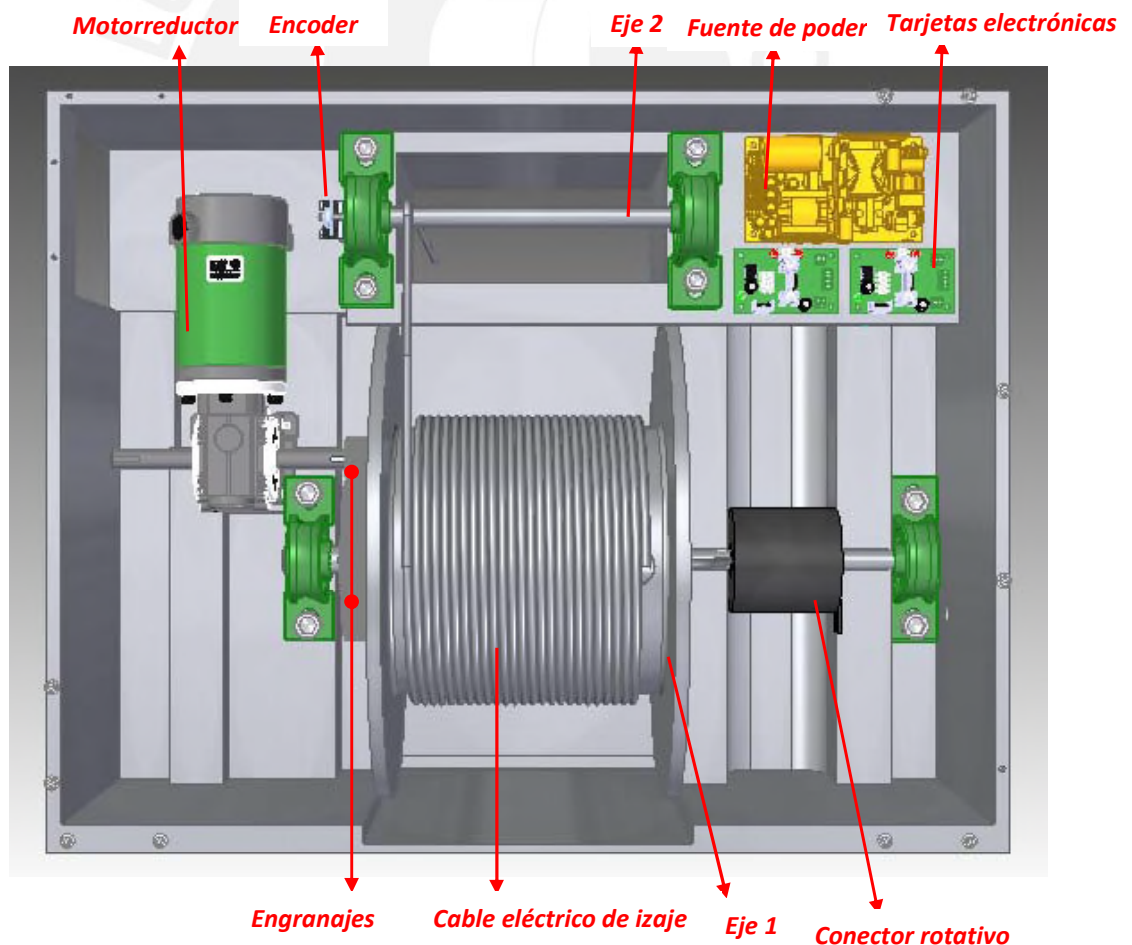


Figura 2.4 Vista interior del sistema mecatrónico. Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, el sistema deberá contar con un seguro mecánico de traba para inmovilizar la luminaria en caso de que el sistema no se encuentre energizado o se produzca un corte eléctrico que detenga el funcionamiento de los circuitos, por ello el motor seleccionado lleva incorporado un reductor de tipo tornillo sinfin – corona. Este reductor se caracteriza por su conducción unidireccional; así, el peso de la luminaria quedará contrarrestado y se evitará un accionamiento indeseado y la caída de la luminaria.

En el eje 1 se producirá el enrollamiento. Este eje cuenta con topes entre los cuales se enrollará el cable, y con un orificio interior para que el extremo del enrollamiento no sea sometido al enrollamiento del resto del cable. De esta manera solo el extremo del cable conectado a la luminaria se enrollará o desenrollará; mientras que el otro extremo permanecerá sin desplazamiento, pero sí girando alrededor de su propio eje, por lo cual no podrá conectarse a la tarjeta electrónica, donde se controla el encendido de la luminaria.

Para poder conectar el cable de izaje a la tarjeta electrónica, se adicionará un conector rotativo, un dispositivo electromecánico conductor de electricidad al cual se conectará el extremo del cable de movimiento giratorio. La explicación de su funcionamiento se detalla en la sección 3.2 Elementos mecánicos y componentes electrónicos. En la figura 2.4 se muestra la ubicación de las tarjetas electrónicas y la fuente de poder (sus dibujos son referenciales) con el fin de asegurar la correcta expulsión del calor disipado por estas a través de la rejilla de la tapa.

Para que el sistema tenga un control preciso sobre la posición de la luminaria, se desea saber cuánta es la distancia que el cable se desplaza. Sin embargo, el enrollamiento del cable muchas veces se produce de forma aleatoria, es decir, sin seguir un patrón uniforme. Por ello no se puede saber con exactitud cuántas capas de cable se enrollarán alrededor del eje, ni en qué momento se creará una nueva capa. Ya que el radio de carga varía en el tiempo no es recomendable medir la velocidad angular del eje para calcular la velocidad del cable. Por ello se propone adicionar otro eje al sistema –eje 2–, por el cual pasará el cable y descenderá por un escape y será conectado a la luminaria. El cable accionará el giro de este eje de sección uniforme. Un encoder permitirá contar el número de vueltas que gira este nuevo eje y se calculará con precisión la distancia del cable desplazada.

Se hará uso de un convertidor de corriente AC/DC, un convertidor DC/DC y un regulador de tensión LDO para la alimentación eléctrica del motorreductor y los componentes electrónicos; de tal manera que el sistema pueda funcionar con una única conexión a la red eléctrica.

El sistema mecatrónico deberá ser instalado en la parte superior del interior de la nave, el cual puede estar fijado al techo mediante un pequeño rack o una placa de sujeción. El tipo de fijación se escogerá en función de la estructura del techo y la resistencia del material que se va a perforar. Hay diferentes tipos de techo y cada uno requiere métodos de suspensión específicos.

El control de posición de cada luminaria de forma individual se logra mediante la creación de una red inalámbrica punto-multipunto; donde cada punto representa una estación remota donde se aloja el sistema mecatrónico descrito. Para ello se usará módulos de radiofrecuencia de tecnología ZigBee.

Asimismo, se contará con tantas estaciones remotas como luminarias con las que cuente la nave industrial. En cada una de estas estaciones remotas se deberá ejecutar las órdenes mediante los elementos mecánicos y componentes electrónicos del sistema.

Se requiere de una estación de coordinación que gestione el direccionamiento y procesamiento de las órdenes ingresadas por el usuario. Se recomienda implementar una aplicación en computadora desarrollada específicamente para el sistema propuesto, a través de la cual el

usuario deberá ser capaz de controlar la posición y el estado de una o varias luminarias. El desarrollo de esta aplicación no es parte del presente trabajo.

En la figuras 2.5, 2.6 y 2.7 se presenta el aspecto que deberá tener la aplicación. De una manera rápida e intuitiva, el usuario podrá tener un control sobre todas las luminarias o una en particular.

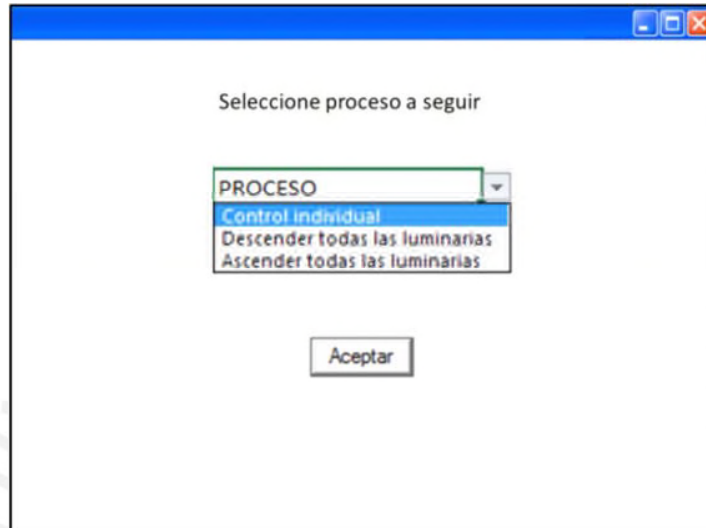


Figura 2.5 Sugerencia de la aplicación para la interacción usuario-sistema. Fuente: Elaboración propia.

Ya sea que el usuario requiera un control individual o total, podrá seleccionar la velocidad de izaje y la distancia exacta del desplazamiento.



Figura 2.6 Sugerencia de la aplicación para la interacción usuario-sistema. Fuente: Elaboración propia.

Cuando el usuario ejecute la instrucción, el sistema deberá realimentar a la aplicación según se desarrollen los eventos de éxito de comunicación a distancia, inicio del proceso y fin del proceso. Además, el usuario será informado en caso que la operación no esté permitida.



Figura 2.7 Sugerencia de la aplicación para la interacción usuario-sistema. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 3: Sistema mecatrónico

3.1 Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico

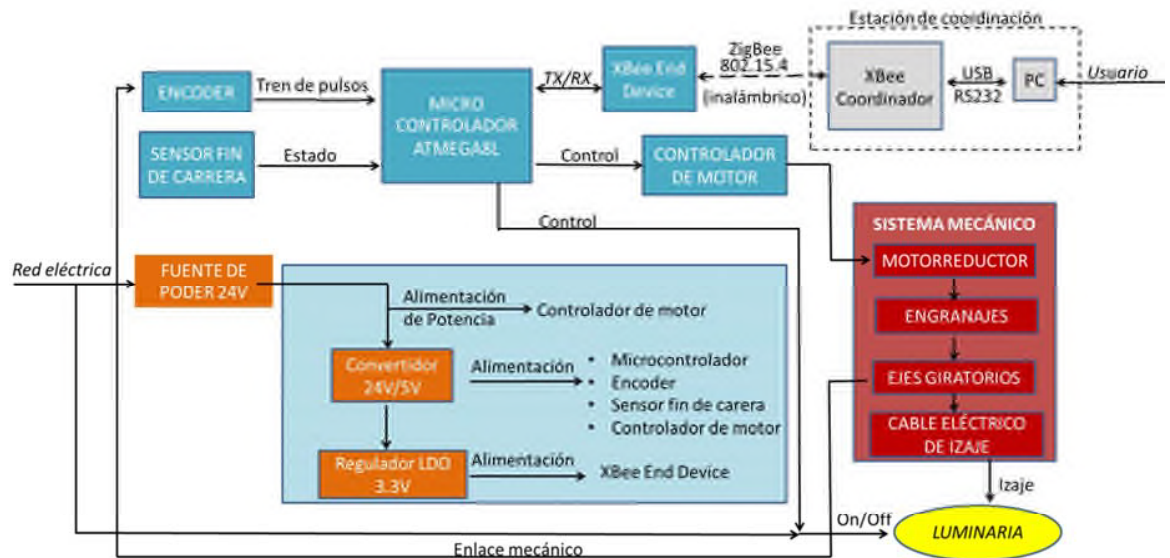


Figura 3.1 Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico. Fuente: Elaboración propia.

Como se explicó en el Capítulo 2, el motorreductor accionará el movimiento de los engranajes. Estos multiplicarán el torque nominal del motor. La potencia transmitida a los ejes será aprovechada por el cable de izaje para desplazar a las luminarias.

Sobre el eje 2 (ver figura 2.4) se agrega una extensión para el montaje del encoder. Este medirá la velocidad exacta del cable. Además, se adiciona un sensor de fin de carrera para reiniciar la posición de la luminaria cada vez que esta entre en contacto con el sensor.

El programa de la PC programa al XBee Coordinador en tiempo real para direccionar las órdenes al sistema mecatrónico asociado a la luminaria elegida por el usuario. Estas órdenes son recibidas por el XBee End Device y comunicadas al microcontrolador ATmega8L. Este último procesará las órdenes y configurará inmediatamente el sentido de giro y velocidad del motor en el controlador del motor. Una vez iniciado el proceso, el microcontrolador contará con la información que le proporciona el encoder y el sensor de fin de carrera para decidir en qué momento se debe finalizar el izaje.

A lo largo del proceso, el microcontrolador reportará a la estación de coordinación el seguimiento del proceso para informar del usuario.

Como se explicó en los requerimientos, el sistema toma la energía de la red eléctrica. Contará con un convertidor AC/DC para acondicionar el voltaje a 24VDC, que es el voltaje nominal del motor, y suministrar la corriente eléctrica requerida. Para la alimentación de los componentes electrónicos se dispondrá de un convertidor DC/DC (*buck*) y un LDO para la alimentación del XBee.

3.2 Elementos mecánicos y componentes electrónicos

3.2.1 Elementos mecánicos

A continuación se presentarán los principales elementos mecánicos que se proponen en el diseño del sistema:

3.2.1.1 Motorreductor

El motorreductor **SM7152W** de la marca **Step Motor** seleccionado para el sistema, se muestra en la figura 3.2. Consiste en un motor DC, con un mecanismo de reducción tornillo sinfín – corona. Los parámetros principales del motorreductor son los siguientes:

- Potencia nominal: 150 W
- Tensión nominal: 24 VDC
- Corriente nominal: 6.25 A
- Velocidad nominal: 49 RPM
- Torque nominal: 104.5 kgf·cm
- Relación de engranaje: 1/50



Figura 3.2 Motorreductor del sistema mecatrónico.
Fuente: Step Motor

Según indicaciones del fabricante no se requiere mantenimiento ni reemplazar nada en este motor. El único requerimiento es que el motor trabaje con las especificaciones de punto de operación, y en un ambiente limpio para asegurar que no falle. [18]

En la figura 3.3 se muestra un ejemplo de un motor de corriente continua trabajando en conjunto con un reductor tornillo sinfín – corona. En este mecanismo el tornillo sinfín va montado en el eje motor, haciendo girar la corona que es el eje de salida. Este mecanismo no puede funcionar en sentido contrario, es decir, es irreversible; con lo cual la luminaria está impedida de accionar el sistema de transmisión por la fuerza de su propio peso y caer al suelo inesperadamente.

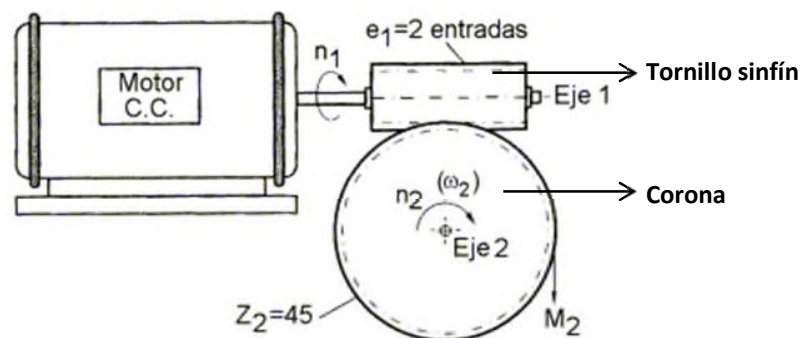


Figura 3.3 Esquema de reducción tornillo sinfín - corona. Fuente: Centro Aragonés de Tecnologías para la Educación

Mientras los tornillos de fuerza son generalmente de rosca simple, los tornillos sinfín tienen usualmente roscas múltiples. Al número de roscas de un tornillo sinfín se le llama número de entradas. Este valor determina la velocidad de giro de la corona de salida. Si el sinfín es de una sola entrada, por cada vuelta que gira el tornillo, la corona avanza un diente. O lo que es igual para que la corona de una vuelta completa el tornillo sinfín ha debido girar tantas vueltas como dientes tiene la corona. En el ejemplo de la figura superior el sinfín es de dos entradas, por lo que cada vuelta de éste, la corona avanza dos dientes.

La velocidad de giro de ambos ejes dependerá del número de dientes de la corona (Z_2) como del número de entradas (e_1) del tornillo sinfín y viene dada por:

$$n_1 * e_1 = n_2 * Z_2$$

Por lo tanto la relación de transmisión del sistema es:

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{e_1}{Z_2}$$

La relación de transmisión de velocidad siempre será menor que la unidad, es decir el mecanismo producirá reducción de velocidad. De esta manera, se consigue transmitir fuerza y movimiento entre dos ejes perpendiculares, con relaciones de transmisión muy elevadas.

3.2.1.2 Engranajes

Los engranajes diseñados para el sistema son de dientes rectos y permiten alcanzar un mayor torque para soportar el peso de la luminaria y del cable de izaje, disminuyendo la velocidad de rotación del eje en que se enrolla el cable. La relación de transmisión de este sistema es 1:4. Los cálculos y dimensionamiento de cada engranaje se encuentran en el Anexo 2: Cálculos y dimensionamiento de engranajes. La interacción de los engranajes con el motorreductor y el eje 1 se muestra en la figura 3.4.

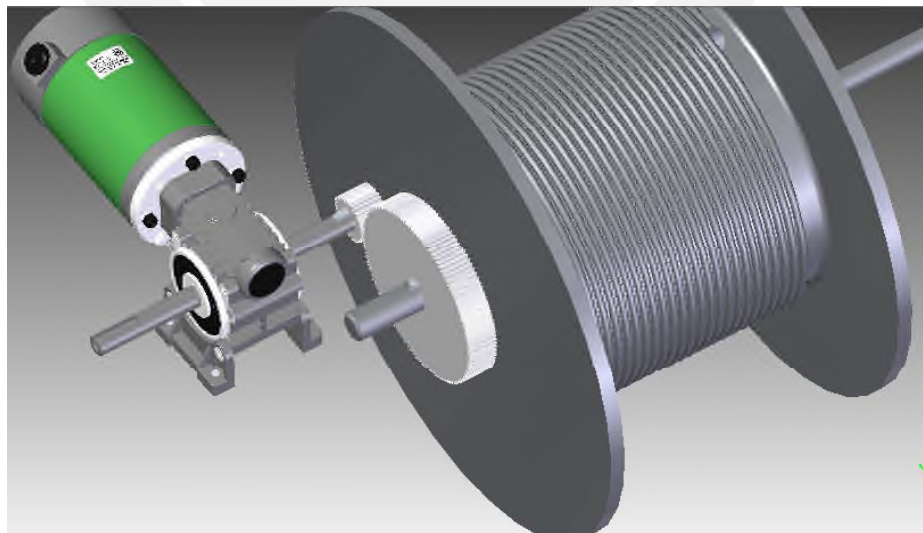


Figura 3.4: Interacción de los engranajes con el motorreductor y el eje 1 del sistema (resto de elementos ocultos).
 Fuente: Elaboración propia

3.2.1.3 Ejes

El sistema cuenta con dos ejes, cada uno cuenta con funciones distintas que se explica a continuación:

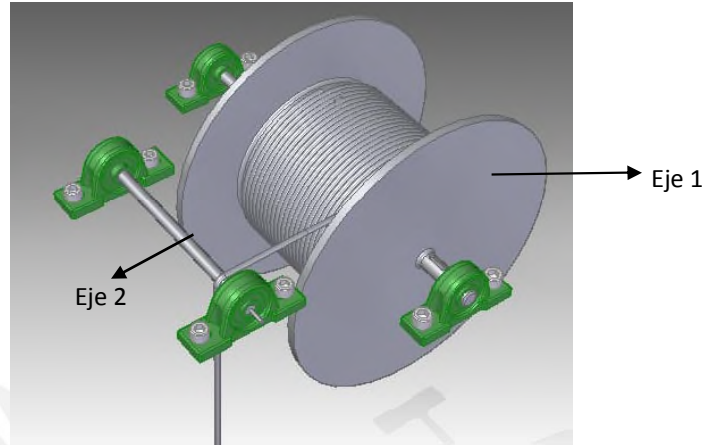


Figura 3.5: Interacción entre los ejes y el cable eléctrico de izaje (resto de elementos ocultos).
Fuente: Elaboración propia

- Eje 1

El primer eje es por donde ingresa la potencia de carga, a través del engranaje E2. Este eje presenta cambios de diámetro para el montaje del conector rotativo y para el enrollamiento del cable, así como topes para mantener el cable enrollado dentro del margen de distancia deseado (20 cm). La salida de la potencia de carga se encuentra en la tracción del cable de izaje.

- Eje 2

El cable de izaje parte desde el eje 1 y rodea al eje 2 cambiando su dirección de horizontal a vertical. Midiendo la velocidad de giro del eje 2, se podrá calcular la velocidad del cable, que también es la velocidad de izaje de la luminaria, ya que ambos están conectados directamente a través de la conexión push-in de tres polos de la luminaria.

Los cálculos y dimensionamiento de los ejes se encuentran en el Anexo 3: Cálculo y dimensionamiento de ejes.

3.2.1.4 Cable eléctrico de izaje

El cable eléctrico de izaje seleccionado es **URSUS 0,6/1 kV** de la marca **ARISTONCAVI**. Proveerá la alimentación eléctrica de 220VAC y el sostenimiento de la luminaria; es capaz de trabajar con una carga máxima de 600N.

El cable URSUS ha sido diseñado para conexiones móviles de señal y potencia, bajo severos esfuerzos mecánicos de tracción y torsión continua, para condiciones de carga pesada y condiciones climáticas de todo tipo. Además, está protegido contra la abrasión y el aplastamiento. Los conductores son flexibles y están hechos de cobre estañado, cubiertos por una trenza antitorsión y recubiertos por un compuesto especial de policopreno.

El cable está especialmente diseñado para su uso en enrolladores de cable, contenedores, transportadores, maquinaria manipuladora, y también en ambientes cerrados gracias a su naturaleza no tóxica. Las dimensiones del cable deben ser calculadas tomando en cuenta la carga de trabajo. Los cálculos y dimensionamiento del cable de izaje se encuentran en el Anexo 1: Diseño del sistema de carga.

El terminal eléctrico push-in de la luminaria no está alineada con eje de su centro de masa. Por lo tanto se recomienda soldar un pequeño gancho en el centro de la superficie superior de la luminaria. El cable deberá sujetar a la luminaria desde el gancho. Se recomienda usar silicona o resina acrílica para pegar el cable y dejar el extremo del cable libre de esfuerzos para hacer la conexión al terminal push-in de la luminaria.



Figura 3.6: Cable de izaje del sistema mecatrónico. Fuente: ARISTONCAVI

3.2.1.5 Conector rotativo

El conector rotativo seleccionado es **SRH 2578-6P** de la marca **Servo Drive**. Los conectores rotativos son sistemas electromecánicos que permiten la transmisión de potencia y señales eléctricas desde un elemento fijo a uno rotativo. Pueden ser utilizados en cualquier sistema electromecánico que requiera giros ilimitados, tanto continuos como intermitentes, mientras se transmite potencia o señales.

Los conectores rotativos pueden mejorar el rendimiento de una aplicación, simplificando el funcionamiento y eliminando cables que cuelguen que puedan ser dañados, bien por fatiga o bien por golpeo con zonas adyacentes.

Los conectores rotativos utilizan una tecnología multicontacto interior oro/oro (varios puntos de contacto por cada anillo colector). Esta tecnología apenas genera partículas debido al desgaste, con lo que se evita que se contaminen los anillos, y se eliminan las operaciones de mantenimiento de cambio de escobillas. Esta tecnología multicontacto permite una perfecta transmisión de señales digitales y analógicas a grandes velocidades de transmisión.



Figura 3.7. Conector rotativo del sistema mecatrónico. Fuente: Servo Drive.

Existen muchos tipos y modelos de conectores rotativos en el mercado, cada uno de ellos orientado a variadas aplicaciones, por ello se cuenta con un amplio rango de precios. Los requerimientos para selección del conector rotativo se encuentra en el Anexo 5: Selección de los componentes electrónicos.

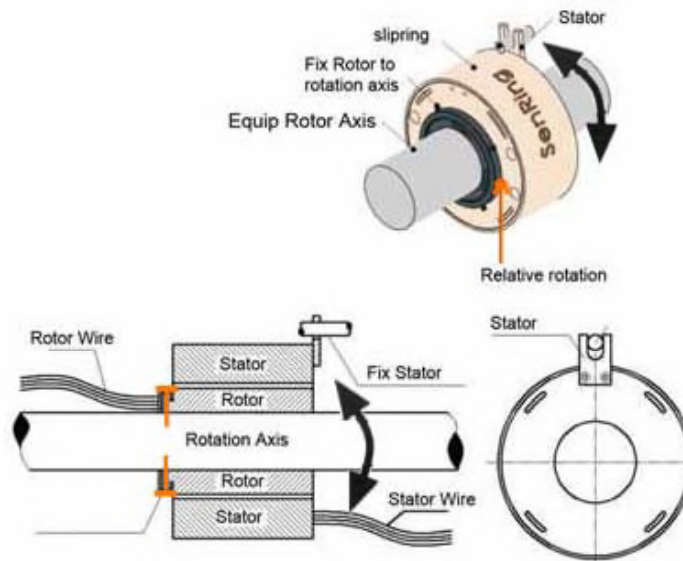


Figura 3.8. Esquema de funcionamiento del conector rotativo. Fuente: Senring Electronics

Como se muestra en la figura 3.8, el conector rotativo consta de un estator y un rotor. El cable de izaje de la luminaria se conecta al rotor, el cable estará girando siguiendo el movimiento rotacional del eje en que se enrolla. A este cable le llamaremos cable rotor. Conectado al estator del conector se encuentra el cable estator, este cable no estará sometido al giro y podrá conectarse directamente a la tarjeta de control.

En la figura 3.9 se muestra la conexión del cable eléctrico al conector rotativo a través de un pequeño agujero de uno de los topes del carrete. El cable seguirá el movimiento giratorio del eje y también lo hará el rotor del conector rotativo.

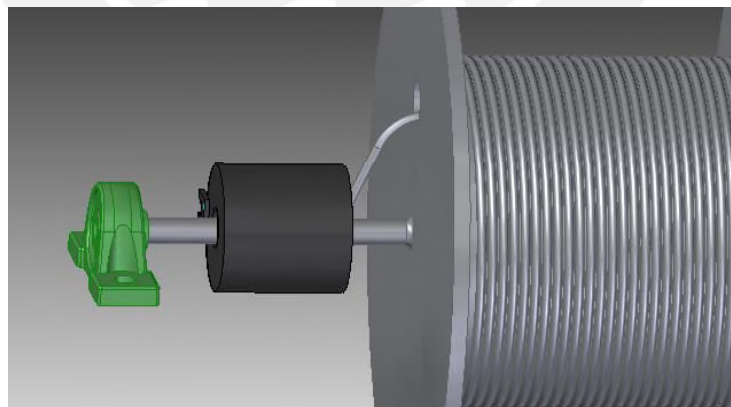


Figura 3.9. Detalle de la conexión del cable eléctrico de izaje al conector rotativo. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Componentes electrónicos

3.2.2.1 Encoder

El encoder óptico seleccionado es **HEDB-9100-K02** de la marca **Avago Technologies**, el cual trabaja de forma incremental. Se utilizará para controlar la posición de la luminaria y se acoplará sobre el eje 2 del sistema, midiendo la velocidad del eje que es accionado por el cable. Se decidió no acoplar el encoder sobre el motorreductor, ya que debido a la aleatoriedad del enrollamiento del cable, no se puede determinar una relación exacta entre el número de vueltas que gira el motorreductor y la cantidad de cable enrollado.



Figura 3.10: Encoder del sistema mecatrónico.
Fuente: Avago Technologies

El encoder es el dispositivo que va a permitir al sistema saber cuánto se ha desplazado la luminaria. Su funcionamiento se basa en la interrupción de un haz de luz por un disco ranurado adosado al eje 2 del sistema, el cual gira junto con el desplazamiento del cable. Internamente consta de un diodo LED emisor de luz y dos fotorreceptores los cuales se encuentran desfasados frente al haz de luz, de manera que al ser cortado el haz de luz y al girar el disco ranurado [6], estos dos sensores den como resultado una señal similar a la que se muestra en la figura 3.12. Basta una de las señales para saber el desplazamiento del disco ya que, sabiendo de antemano cuántas ranuras tiene el disco, podemos contar los pulsos y calcular cuántas vueltas ha dado este. La segunda señal es utilizada en conjunto con la primera para saber en qué dirección gira el disco.

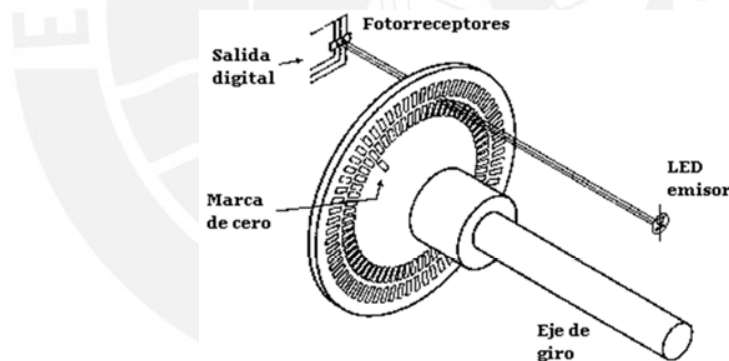


Figura 3.11. Esquema del funcionamiento del encoder incremental. Fuente: [7]



Figura 3.12. Señales de salida del encoder incremental. Fuente: [7]

En la figura 3.13 se muestra el encoder montado a la extensión del eje 2. Además, se dispone de tornillos M3x5 para fijar el estator del encoder a una placa de soporte y un tornillo M5x8 para fijar la placa a la caja.

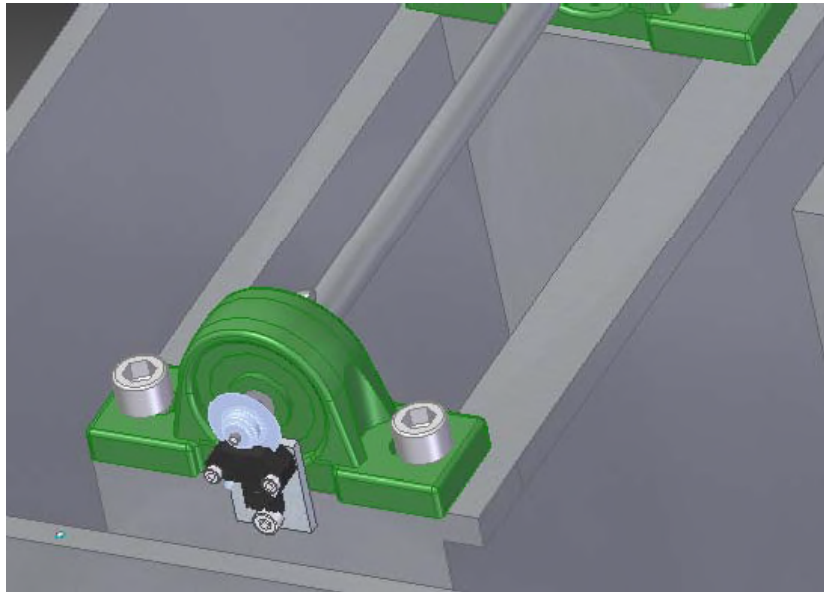


Figura 3.13. Detalle del montaje del encoder. Fuente: Elaboración propia

Los requerimientos para seleccionar el encoder se encuentran en el Anexo 5: Selección de los componentes electrónicos.

3.2.2.2 Sensor de fin de carrera

El sensor de fin de carrera seleccionado **SEN0138** de la marca **DFRobot** es un interruptor de límite que se utiliza para detectar la llegada de la luminaria a la posición superior, es decir, a la altura en la que normalmente funciona. Estos interruptores se activan con una fuerza mínima por lo cual son bastante sensibles.

El sensor se fijará con tornillos M3x25 al exterior de la caja para permitir el contacto con la luminaria. Estará estratégicamente ubicado: centrado respecto a la superficie de contacto de la luminaria; de tal manera que la luminaria siempre pueda hacer contacto con la rueda, ya sea si gira alrededor del eje del cable de izaje y/o se encuentre desplazada horizontalmente en uno de los extremos del eje 2.

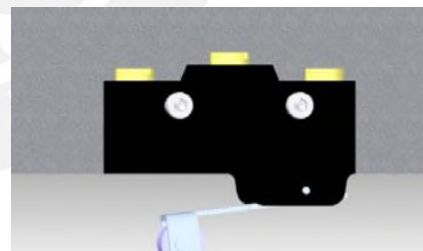


Figura 3.14. Sensor de fin de carrera del sistema mecatrónico. Fuente: Elaboración propia

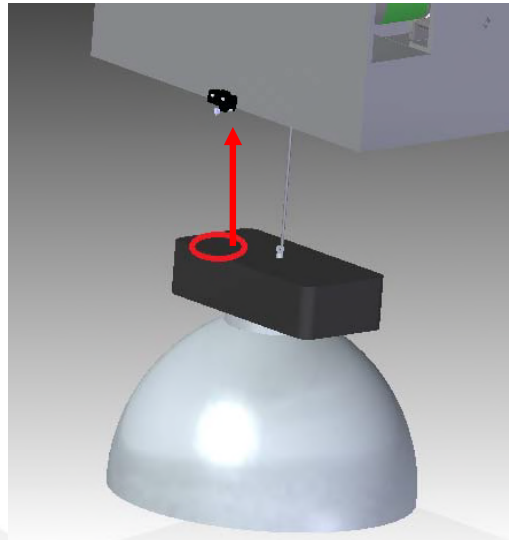


Figura 3.15. Detalle de la activación del sensor de fin de carrera.
Fuente: Elaboración propia

3.2.2.3 Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior las tres principales unidades funcionales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada/salida.

El microcontrolador seleccionado es **ATmega8L** de la marca **Atmel**. Los requerimientos para seleccionar el microcontrolador se encuentran en el Anexo 5: Selección de los componentes electrónicos.

Las características principales de este microcontrolador son:

- 32 registros de 8 bits de propósito general. Todos estos registros están conectados a la unidad aritmética lógica (ALU) para un rápido acceso, una instrucción es ejecutada con uno o dos ciclos de reloj.
- Tipos de memoria: Memoria flash de 8 KBytes, EEPROM de 512 Bytes y SRAM de 1 KBytes.
- Periféricos internos: 2 temporizadores de 8 bits con pre-escalador y comparador, 1 temporizador de 16 bits con pre-escalador, comparador y capturador, 6 canales de entrada para cada convertidor A/D, 1 USART (módulo programable para comunicación serial), puertos programables de entrada/salida (23 pines), velocidad de operación máxima de 8 MHz, voltaje de alimentación 2.7 a 5.5 V, fuentes de interrupción internas y externas, oscilador interno de 1, 2, 4 y 8 MHz.



Figura 3.16. Microcontrolador del sistema mecatrónico. Fuente: Atmel

Este microcontrolador estará a cargo de procesar la información que se envía desde la estación de coordinación y controlar la operación de izaje de la luminaria y reportar al usuario su seguimiento.

Cada vez que el microcontrolador finalice la comunicación inalámbrica, el microcontrolador guardará la posición a la que se encuentra la luminaria en la EEPROM (memoria no volátil) para contar con ella en una próxima operación.

3.2.2.4 Módulos XBee Pro

Los módulos XBee Pro que se utilizarán para conformar la red inalámbrica son módulos de radiofrecuencia que trabajan en la banda de 2.4 GHz con protocolo de comunicación 802.15.4 fabricados por **Maxstream**. Son utilizados en automatización de casas, sistemas de seguridad, monitoreo de sistemas remotos, aparatos domésticos, alarmas contra incendio, plantas tratadoras de agua, etc.

Son módulos microprocesados con lo cual se tienen solucionados los problemas de fallo de trama, ruidos, etc. En la red inalámbrica, uno de estos módulos será el coordinador de red y el resto funcionará como nodos terminales. El coordinador trabajará a la par con la computadora y los nodos terminales con los microcontroladores de las estaciones remotas.

La figura 3.17 muestra un módulo XBee Pro. Estos dispositivos logran un alcance en interiores de hasta 100 metros y en exteriores el alcance es de hasta 1600 metros, con antena dipolo. Se usará un módulo para el bloque de coordinación y tantos módulos remotos como luminarias con las que cuente la nave industrial.

Los módulos líneas de transmisión serial RX y TX para comunicarse con los microcontroladores ATmega8. Generan una red propia a través de la cual, se establecerá la comunicación entre el usuario y las estaciones remotas.



Figura 3.17. Módulo XBee Pro del sistema mecatrónico. Fuente: Digi International

3.2.2.6 Controlador de motor

El controlador de motor seleccionado es **VNH3SP30-E** de la marca **STMicroelectronics**, está constituido por transistores MOSFET en configuración puente H. A través del controlador, el microcontrolador podrá configurar el sentido de giro y la velocidad de giro del motor de 24V. La corriente máxima que es capaz de entregar este controlador es de 30A. Los requerimientos para la selección del controlador se encuentran en el Anexo 5: Selección de los componentes electrónicos.



Figura 3.18. Controlador del motor del sistema mecatrónico. Fuente: STMicroelectronics

3.2.2.7 Optoacoplador

Se usará un optoacoplador para controlar el encendido o apagado de la luminaria (de carga inductiva) desde el microcontrolador. Un optoacoplador combina un dispositivo semiconductor formado por un fotoemisor, un fotorreceptor y entre ambos hay un camino por donde se transmite la luz. Todos estos elementos se encuentran dentro de un encapsulado.

La señal de entrada es aplicada al fotoemisor y la salida es tomada del fotorreceptor. Los optoacopladores son capaces de convertir una señal eléctrica en una señal luminosa modulada y volver a convertirla en una señal eléctrica. La gran ventaja de un optoacoplador reside en el aislamiento eléctrico que puede establecerse entre los circuitos de entrada y salida.

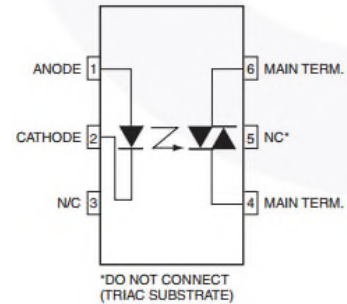


Figura 3.19. Optoacoplador del sistema mecatrónico. Fuente: Fairchild Semiconductor.

El optoacoplador utilizado será de tipo fototriac, en el cual la etapa de salida está formada por un triac. El optoacoplador seleccionado es **MOC3021M** de la marca **Fairchild Semiconductor**, el cual cuenta con un voltaje de bloqueo V_{off} de 400V. Los requerimientos para la selección del optoacoplador se encuentra en el Anexo 5: Selección de los componentes electrónicos.

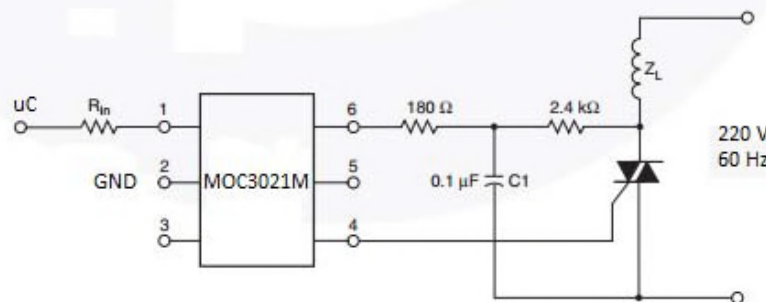


Figura 3.20. Esquemático del circuito de control del balasto de la luminaria. Fuente: Fairchild Semiconductor.

3.2.2.8 Triac

Un triac o triodo para corriente alterna es un dispositivo semiconductor, de la familia de los tiristores. La diferencia con un tiristor convencional es que éste es unidireccional y el triac es bidireccional. El disparo del triac se realiza aplicando una corriente al electrodo puerta. El triac funcionará como un interruptor electrónico.

El triac seleccionado es **Q4N3CT** de la marca **Littlefuse Inc.** Cuenta con un voltaje de bloqueo V_{off} de 600V y una intensidad de corriente admisible de 20A: ideales para un trabajo en frío sobre el balasto de la luminaria. Los requerimientos para la selección del triac se encuentra en el Anexo 5: Selección de los componentes electrónicos.

3.2.2.9 Fuente de poder



La fuente de poder seleccionada es **USP-350-24** de la marca **Mean Well**. Se trata de un convertidor AC/DC, que suministrará la alimentación necesaria para el funcionamiento del motor, a partir de la energía proveniente de la red eléctrica. La fuente seleccionada cuenta con una eficiencia de 88% y entrega 24V y un máximo de 12.5A, para un trabajo en frío sobre la alimentación del sistema mecatrónico. Los requerimientos para la selección de la fuente de poder se encuentra en el Anexo 5: Selección de los componentes electrónicos.

Figura 3.21. Fuente de poder del sistema mecatrónico. Fuente: Mean Well.

3.2.2.10 Convertidor DC/DC (Buck)

El convertidor Buck es un convertidor de potencia DC/DC, que obtiene en su salida un voltaje continuo menor que en su entrada. La forma más simple de reducir una tensión continua (DC) es usar un circuito divisor de tensión, pero los divisores gastan mucha energía en forma de calor. Un convertidor Buck puede tener una alta eficiencia y autorregulación.

El convertidor suministrará 5V, a partir de los 24V que entrega la fuente de poder, para la alimentación del microcontrolador, encoder, sensor de fin de carrera y controlador de motor. El convertidor seleccionado es **PYB10-Q24-S5** de la marca **CUI INC**. Entrega una corriente máxima de 2A y su eficiencia de 82%.



Figura 3.22. Convertidor Buck del sistema mecatrónico. Fuente: Cui Inc.

3.2.2.11 Regulador LDO

Son dispositivos que permiten obtener una tensión regulada con una caída de tensión interna menor que los reguladores estándar, lo que trae como beneficio menor disipación de energía. Operan con un pequeño diferencial de voltaje entrada – salida. El regulador suministrará los 3.3V, a partir de los 5V que entrega el convertidor DC/DC, necesarios para la alimentación del XBee End Device de la estación remota. El regulador seleccionado es **TLV70233** de la marca **Texas Instrument**, suministra 300mA.

3.3: Planos del sistema mecatrónico

A continuación se presentarán los planos de despiece y ensamble correspondientes al sistema mecatrónico planteado. Los planos en tamaño completo se encuentran en el Anexo 8: Planos de despiece y ensamble. Las dimensiones del sistema mecatrónico son 644mm x 515mm x 380 mm de altura. En la figura 3.23 se muestra la vista interior del ensamble del sistema mecatrónico. No se incluye la tapa ni el cable eléctrico de izaje.

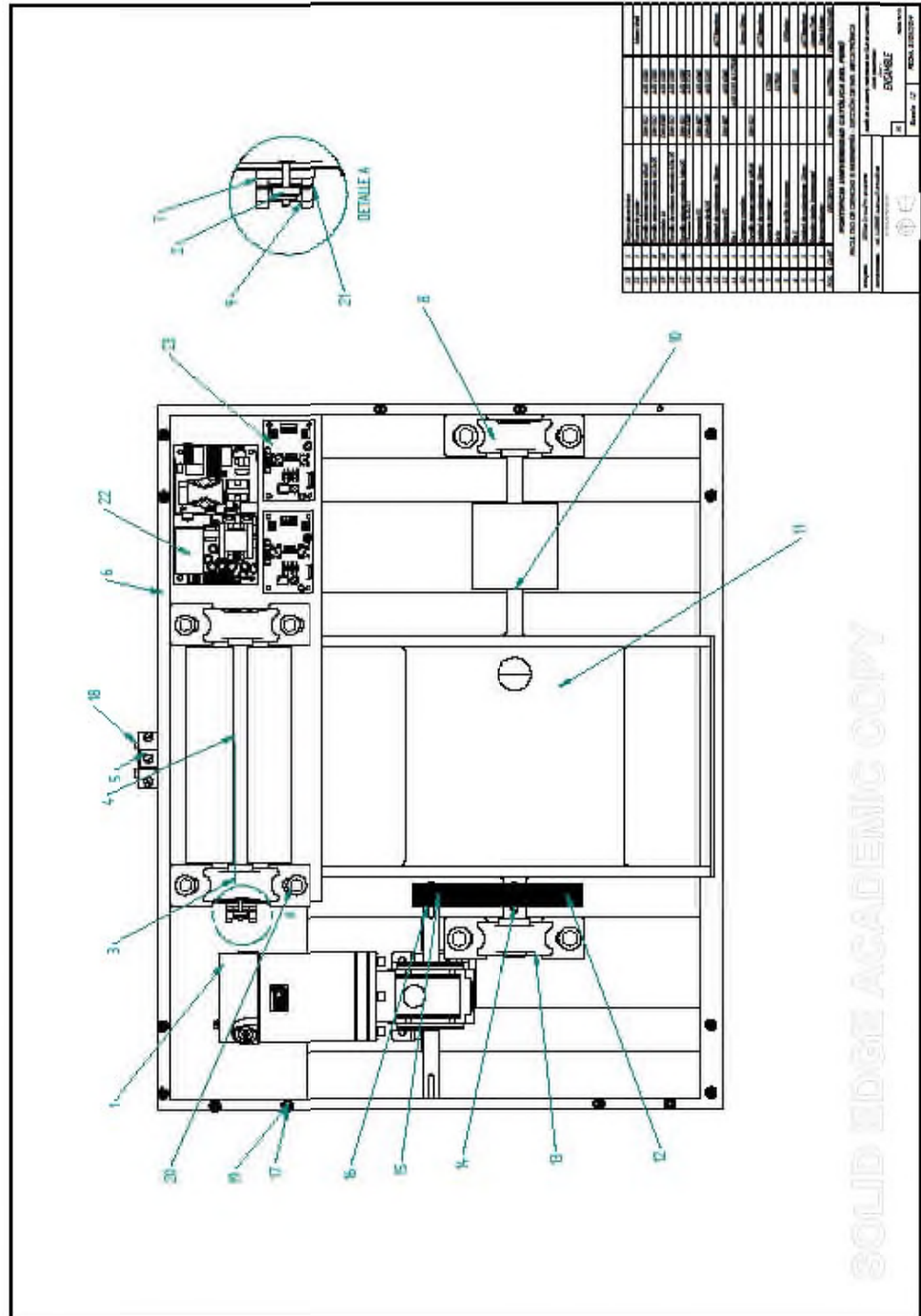


Figura 3.23: Plano de ensamble del sistema mecatrónico. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.1 se muestra los elementos del plano de ensamble, con sus respectivas normas de diseño y material de fabricación o nombre del fabricante.

23	2	Tarjeta electrónica			
22	1	Fuente de poder			Mean Well
21	2	Tornillo cabeza redonda M3x5	DIN 912	AISI 1020	Allen
20	8	Tornillo cabeza redonda M12x25	DIN 912	AISI 1020	Allen
19	14	Arandela 14	DIN 6903	AISI 1020	
18	2	Tornillo de cabeza redonda M3x25	DIN 912	AISI 1020	Allen
17	14	Tornillo cabeza redonda M4x20	DIN 912	AISI 1020	Allen
16	1	Chaveta 5x5x32	DIN 6885	AISI 3215	
15	1	Engranaje E1	DIN 867	AISI 4340	
14	1	Chaveta 6x6x26	DIN 6885	AISI 3215	
13	1	Unidad de rodamiento 20mm			AST Bearings
12	1	Engranaje E2	DIN 867	AISI 4340	
11	1	Eje 1		AISI 3215 & S275JR	
10	1	Conector rotativo			Servo Drive
9	1	Tornillo cabeza redonda M5x8	DIN 912		Allen
8	1	Unidad de rodamiento 15mm			AST Bearings
7	1	SopORTE encoder		S725JR	
6	1	Caja		S275JR	
5	1	Sensor de fin de carrera			DFRobot
4	1	Eje 2		AISI 3215	
3	2	Unidad de rodamiento 12mm			AST Bearings
2	1	Encoder óptico incremental			Avago Tech.
1	1	Motorreductor			Step Motor
POS.	CANT.	DESCRIPCION	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

Tabla 3.1: Lista de elementos del ensamble del sistema mecatrónico. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.2 se muestra el peso de los elementos del sistema mecatrónico. Para este cálculo no se tuvo en cuenta el peso del encoder, resistencias eléctricas, condensadores y circuitos integrados.

Elemento	Material	Densidad (g/cm ³)	Volumen (cm ³)	Peso (kg)
Eje 1 (lateral)	AISI 3215	7.85	57.100	0.448
Eje 1 (central)	S275JR	7.85	18.835	0.148
Eje 2	AISI 3215	7.85	29.770	0.234
Engranaje 1	AISI 4340	7.85	2.765	0.022
Engranaje 2	AISI 4340	7.85	54.980	0.432
Chaveta 5x5x32	AISI 3215	7.85	0.800	0.006
Chaveta 6x6x26	AISI 3215	7.85	0.940	0.007
Tapa	S275JR	7.85	96.338	0.756
Caja	S275JR	7.85	414.252	3.252
Soporte encoder	S275JR	7.85	3.780	0.030
Rodamiento 12mm (2 un.)				1.270
Rodamiento 15mm				0.640
Rodamiento 20mm				0.680
Motorreductor				2.000
XBee Pro				0.004
Sensor de fin de carrera				0.005
Fuente de poder				1.100
Convertidor DC/DC				0.022
Tornillo M12x25 (8 un.)				0.200
Tornillo M3x5 (2 un.)				0.012
Arandela 14 (8 un.)				0.040
Tornillo M3x25 (2 un.)				0.024
Tornillo M4x20 (14 un.)				0.029
Tornillo M5x8				0.003
Cable (20 metros)				13.600
TOTAL				24.963

Tabla 3.2: Peso del sistema mecatrónico. Fuente: Elaboración propia.

Los laterales del eje 1 serán fabricados de acero AISI 3215, comúnmente usado para este tipo de elementos. La parte central donde se almacena el enrollamiento será fabricada en chapa S725JR, a fin de otorgar ligereza a la pieza. El canal chavetero tiene las tolerancias recomendadas por la norma DIN 6885.

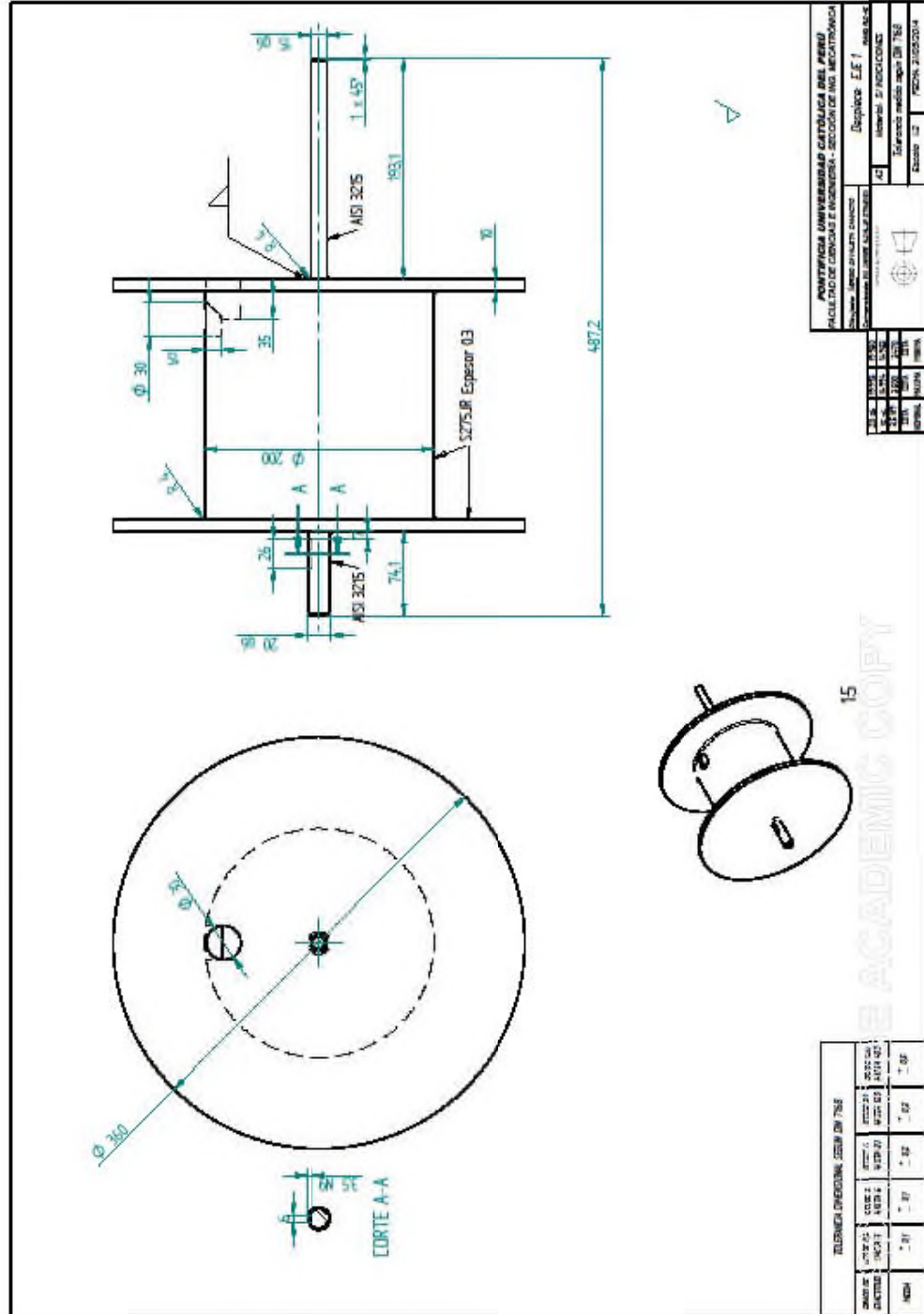


Figura 3.24: Plano de despiece del eje 1. Fuente: Elaboración propia

El eje 2 será fabricado en acero AISI 3215. Cuenta con una extensión para el montaje del encoder y un ligero cambio en el diámetro de la sección para que los asientos de rodamientos impidan el desplazamiento horizontal del eje. Los planos de los ejes también se encuentran en el Anexo 8: Planos de despiece y ensamble. El cálculo para el dimensionamiento de todos los ejes se encuentra en el Anexo 4: Cálculos y dimensionamiento de ejes.

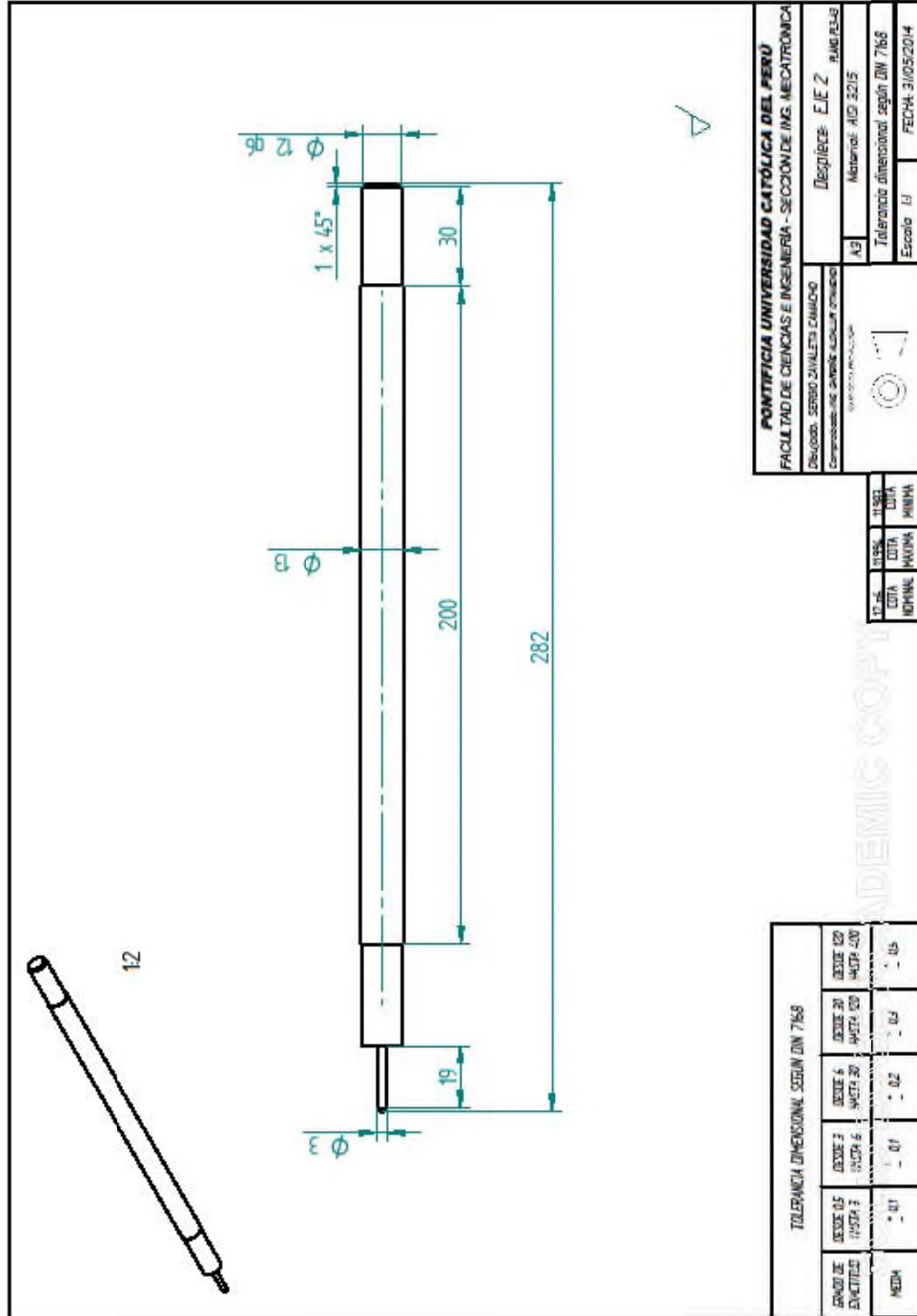


Figura 3.25: Plano de despiece del eje 2. Fuente: Elaboración propia

Los engranajes serán fabricados de acero AISI 4340, comúnmente usado para este tipo de elementos. En las figura 3.26 y 3.27 se muestra los engranajes del sistema mecatrónico. El engranaje E1 es el conductor y transmite la potencia del motor al eje 1.

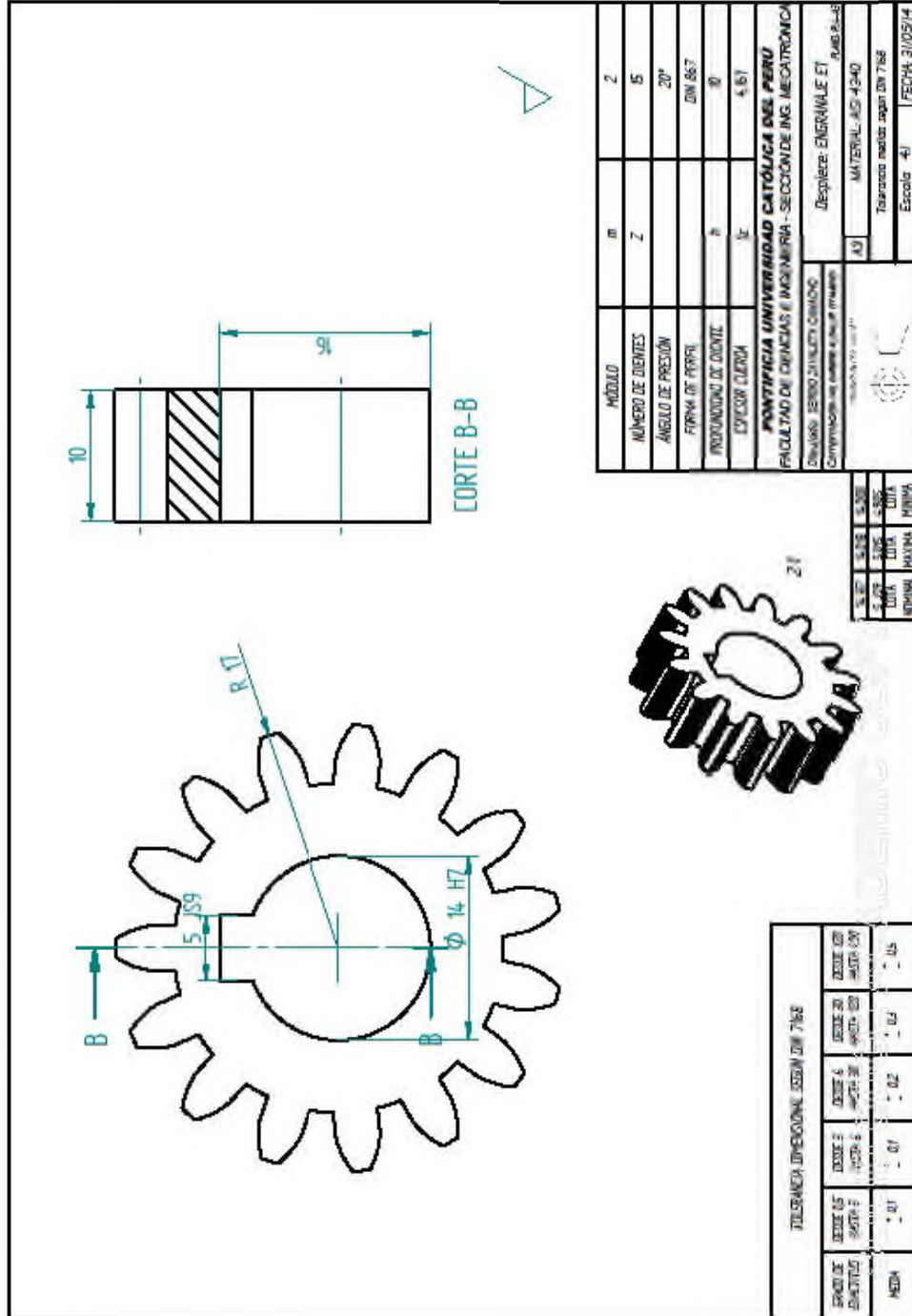


Figura 3.26: Plano de despiece del engranaje E1. Fuente: Elaboración propia

El engranaje E2 es el conducido y suministra la potencia al eje 1. Los planos de los engranajes también se encuentran en el Anexo 8: Planos de despiece y ensamble. El cálculo para el dimensionamiento de todos los engranajes se encuentra en el Anexo 4: Cálculos y dimensionamiento de ejes.

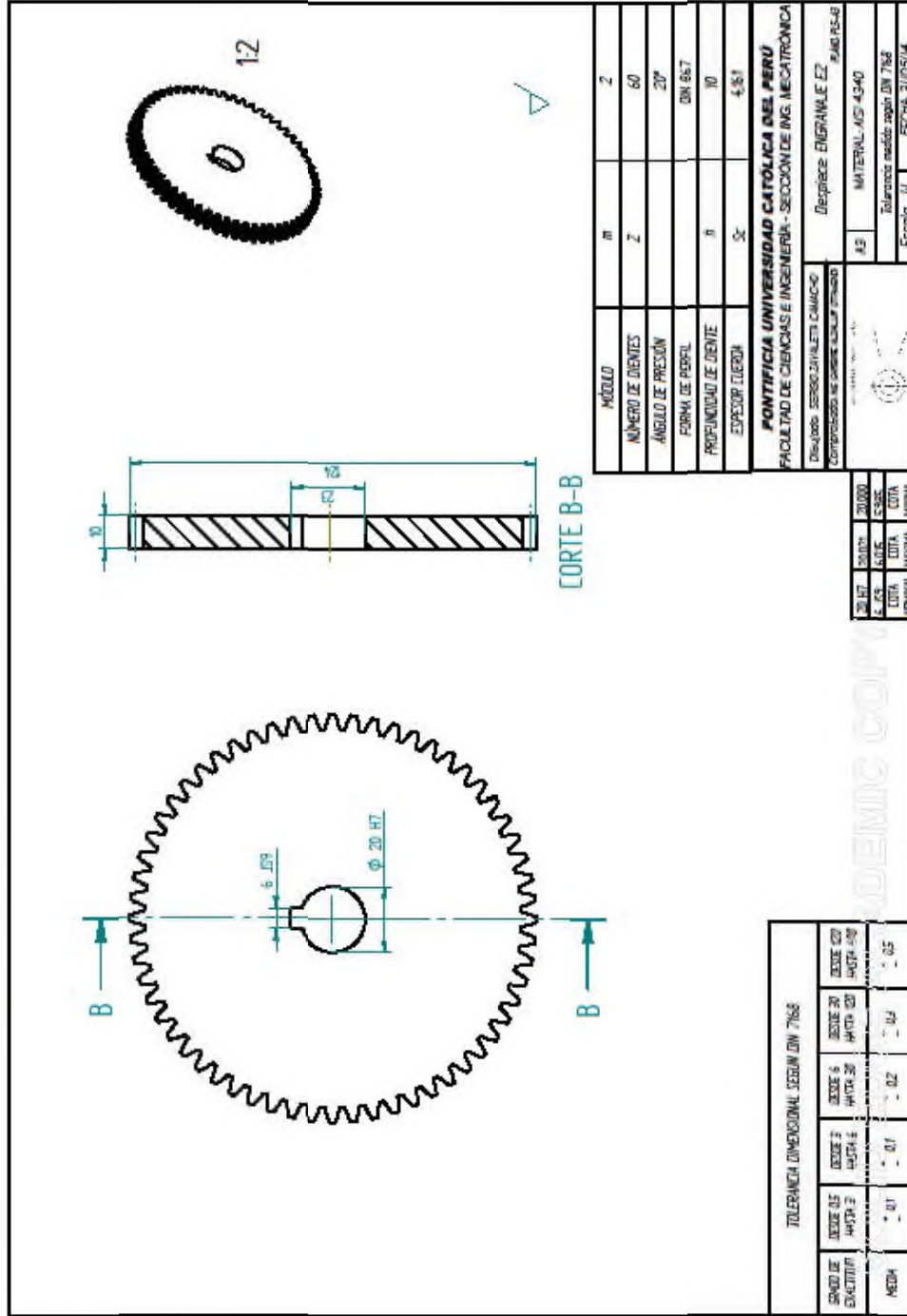


Figura 3.27: Plano de despiece del engranaje E2. Fuente: Elaboración propia

Las chavetas serán fabricadas de acero AISI 3215. Se usó la norma DIN 6885 para el dimensionamiento de las chavetas. A continuación se muestra el plano de despiece de la chaveta del engranaje E1, la cual irá acoplada dentro del canal chavetero del eje del motorreductor. Los planos de ambas chavetas se muestran en el Anexo 8: Planos de despiece y ensamble.

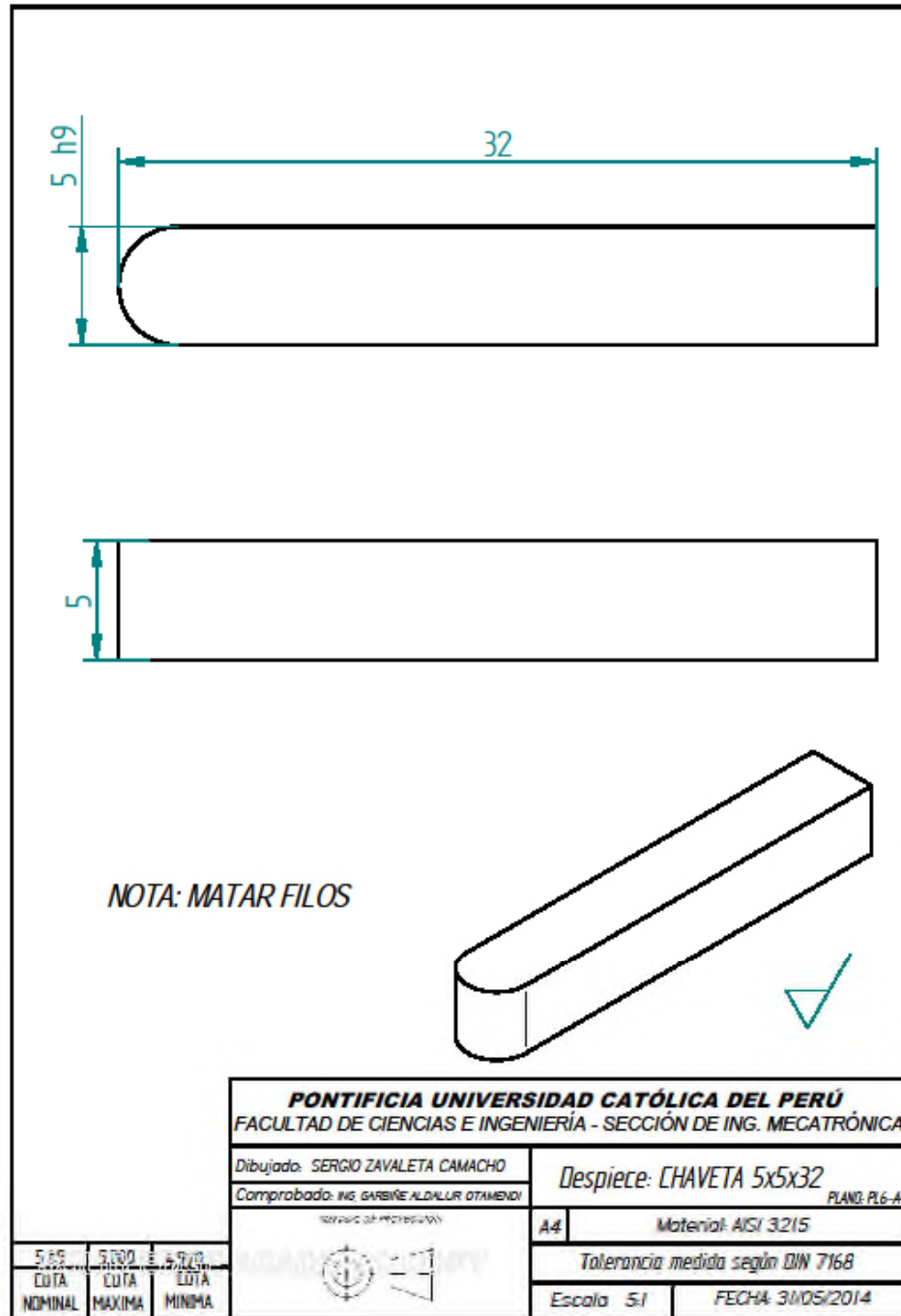


Figura 3.28: Plano de despiece de la chaveta del engranaje E1. Fuente: Elaboración propia.

La chaveta 6x6x26 irá alojada dentro del canal chavetero del engranaje E2 y el canal chavetero del eje 1.

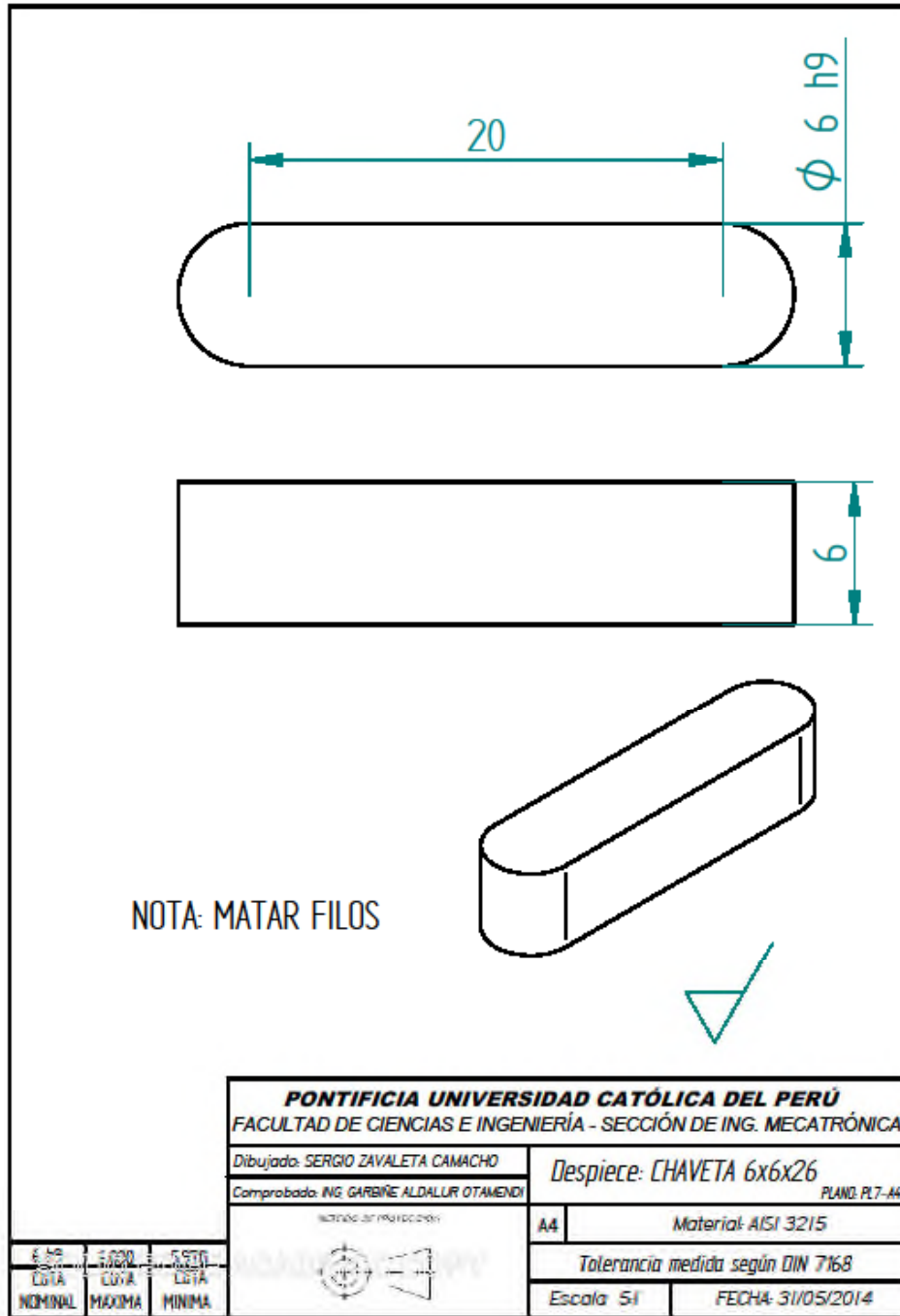


Figura 3.29: Plano de despiece de la chaveta del engranaje E2. Fuente: Elaboración propia.

La caja donde se alojara el sistema mecatrónico cubre del polvo y la humedad al motorreductor, engranajes, ejes, conector rotativo, fuente de poder y tarjetas electrónicas. Cuenta con un escape lateral para evitar el calentamiento del motor. La caja será fabricada en chapa S725JR. Este tipo de chapa se emplea para piezas de resistencia media y es de fácil conformado (curvado y plegado). El plano de la caja se encuentra en el Anexo 8: Planos de despiece y ensamble.

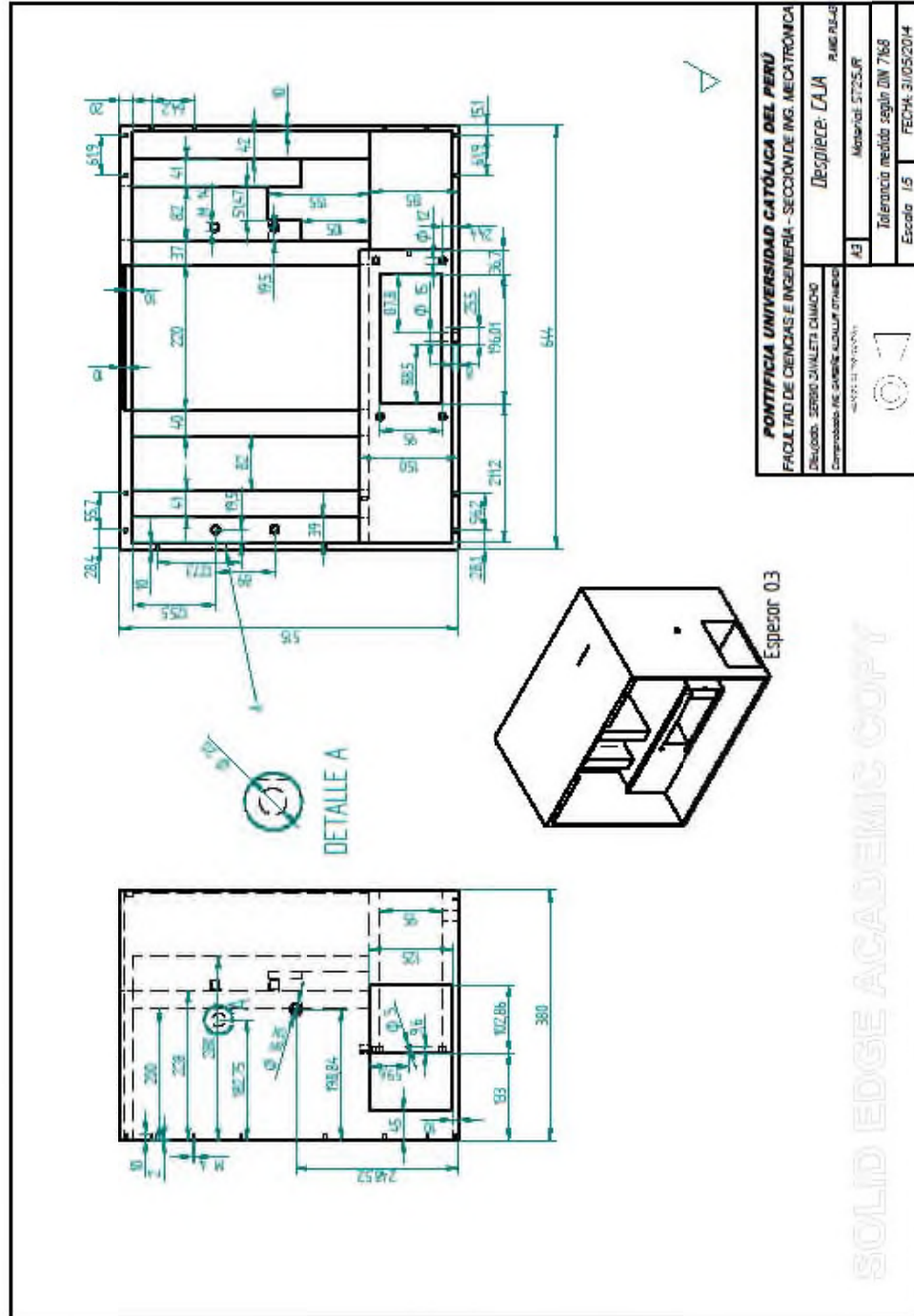


Figura 3.30: Plano de despiece de la caja. Fuente: Elaboración propia

La tapa del sistema mecatrónico será fabricada en chapa S275JR. La tapa superior cuenta con una rejilla para expulsar el calor disipado por la fuente de poder. El plano de la tapa se encuentra en el Anexo 8: Planos de despiece y ensamble.

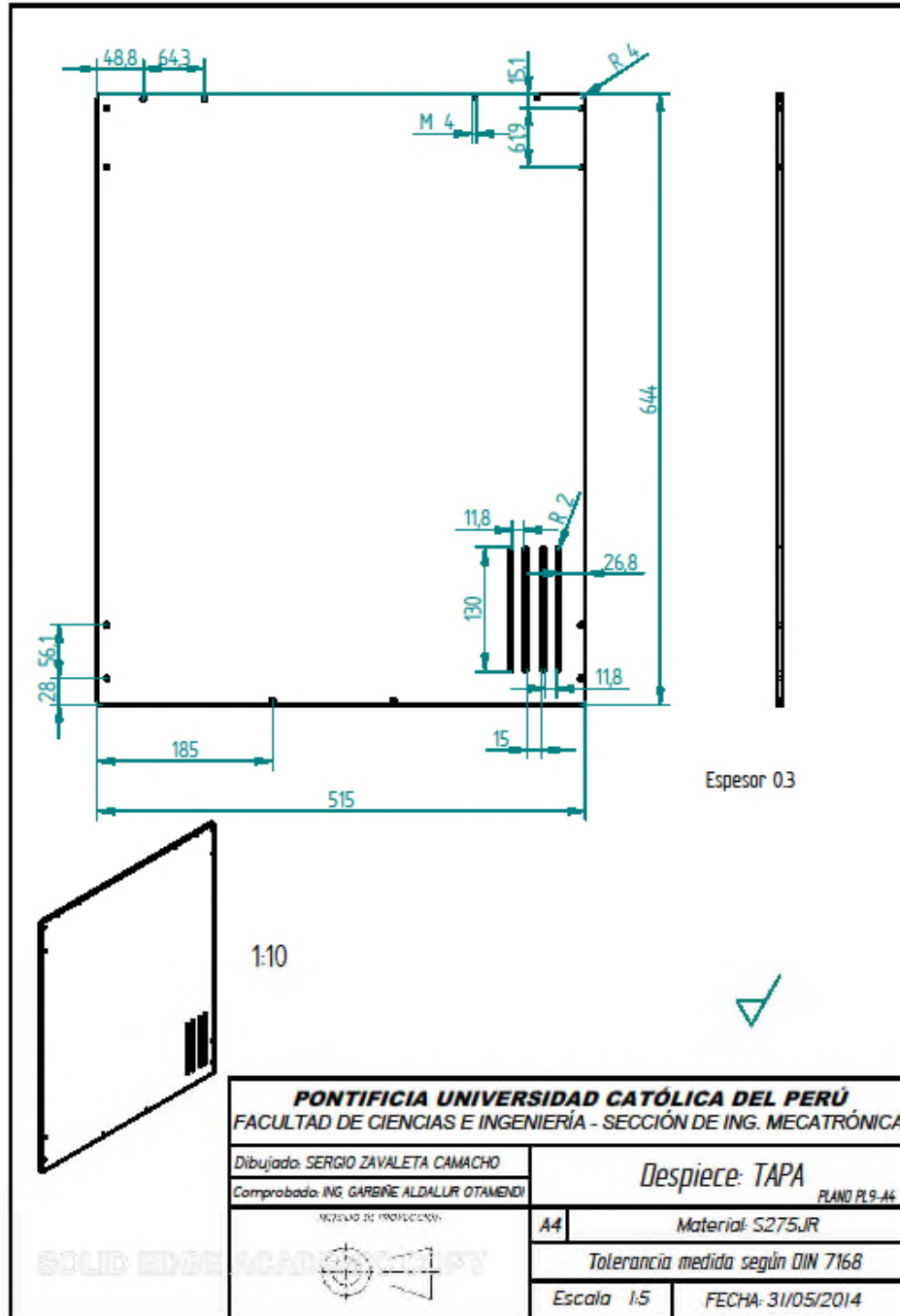


Figura 3.31: Plano de despiece de la tapa. Fuente: Elaboración propia.

El soporte para el montaje del encoder será fabricado en chapa S275JR. El plano del soporte del encoder se encuentra en el Anexo 8: Planos de despiece y ensamble.

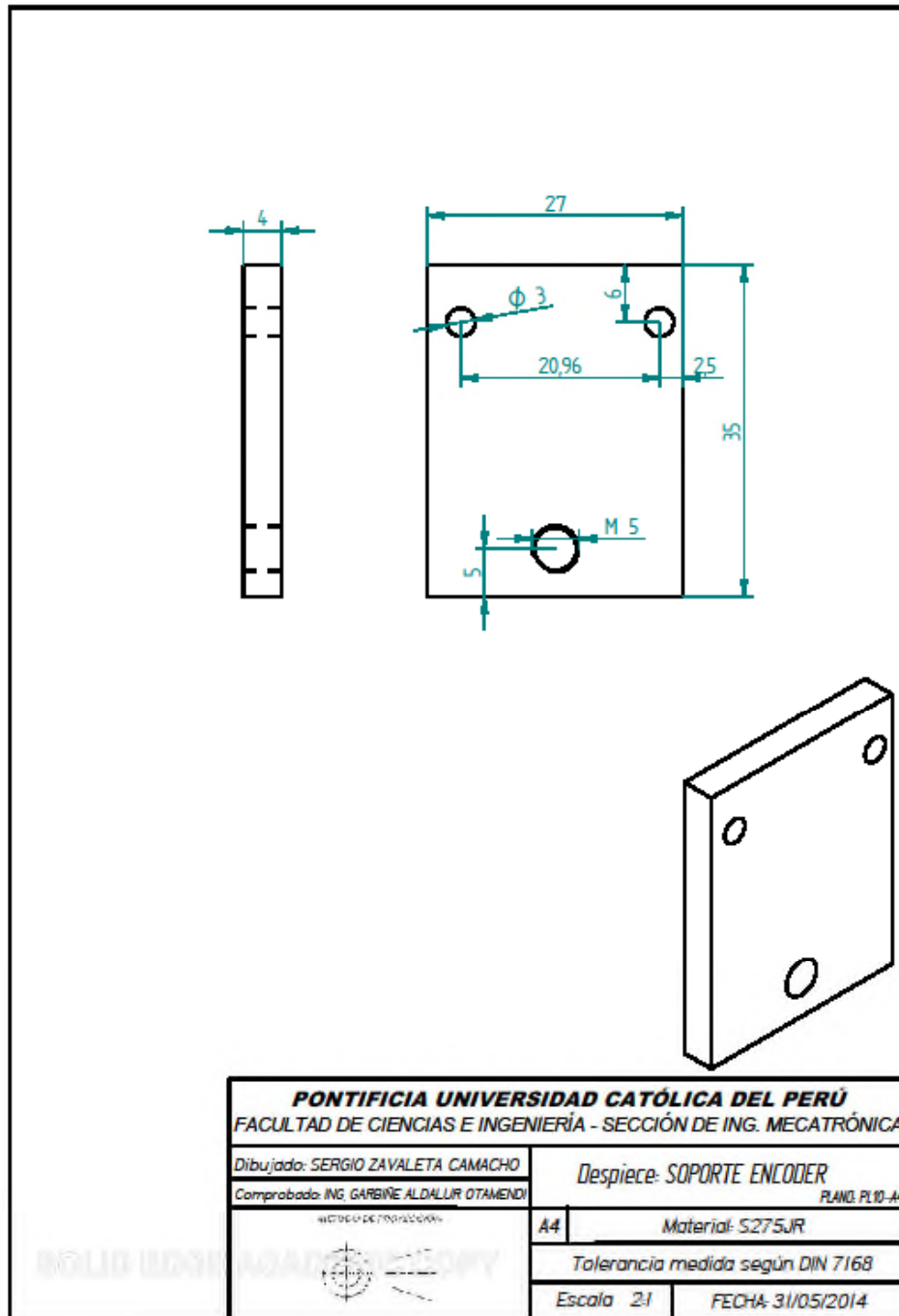


Figura 3.32: Plano de despiece del soporte del encoder. Fuente: Elaboración propia.

3.4 Sistema de comunicación inalámbrica

3.4.1 Tecnología de comunicación inalámbrica del sistema mecatrónico

Se requiere de una estación de coordinación que gestione el direccionamiento y procesamiento de las órdenes ingresadas por el usuario. Asimismo, se requiere de tantas estaciones remotas como luminarias con las que cuente la nave industrial, ubicadas en la parte superior de la misma. En cada una de estas estaciones remota se deberá ejecutar las órdenes mediante los elementos mecánicos y componentes electrónicos del sistema.

Cuando lo que se necesita es enviar una gran cantidad de información, la alternativa es WiFi. Sin embargo, cuando la velocidad de transmisión requerida es baja, y lo que se busca es reducir consumo energético y costos, la alternativa adecuada es ZigBee (IEE 802.15.14).

Utilizar con la computadora el protocolo inalámbrico de comunicación ZigBee es muy sencillo, siempre y cuando se tenga el hardware adecuado para las conexiones. ZigBee hace posible enviar datos de un punto a otro o a toda una red de nodos inalámbricos. El protocolo ZigBee se implementa mediante el uso de módulos XBee: pequeños dispositivos que incluyen todo lo necesario para enviar y recibir datos. Los módulos XBee están hechos para conectarse directamente a las tomas de otros módulos haciendo posible construir un proyecto ZigBee sin tener que soldarlo.

ZigBee es un protocolo de comunicaciones de radio, no un dispositivo específico. XBee es una gama de pequeños dispositivos fáciles de usar que implementan el protocolo. El XBee está diseñado para que se conecte directamente en el enchufe de la tarjeta del adaptador. Incluye todos los circuitos externos necesarios para hacer funcionar el dispositivo y dejar en fácil acceso los pines que se necesiten.

En toda comunicación presente entre dos o más XBee, debe existir un módulo con una configuración especial, el cual se denomina coordinador. El coordinador es el responsable de formar una red, la entrega de direcciones, y la gestión de otras funciones que definen la red. Cada red debe tener únicamente un módulo coordinador.

En la comunicación presente entre estos dispositivos, también existen otros dos módulos con configuraciones específicas. El primero es el Router, quien está encargado de recibir y re-direccionar los paquetes de datos a otros dispositivos, y el segundo es el End Device quien puede recibir y enviar información, que será la configuración que usaremos en los nodos terminales de la red. Cabe aclarar que el Router siempre debe estar disponible en la red para recibir los datos, ya que juega un papel importante en la formación de redes, en cambio el End Device, puede estar presente en un estado de suspensión mientras espera recibir algún dato.

El alcance de la señal de los XBee en entornos urbanos tiene un máximo de 100 metros. Este radio de comunicación permite el funcionamiento de la red inalámbrica de, por ejemplo, 20 metros de altura y 70x70 m² de superficie. Usar repetidores en configuración Router no será necesario a menos que la superficie de la nave sea considerablemente grande.

3.4.2 Funcionamiento del sistema de comunicación inalámbrica

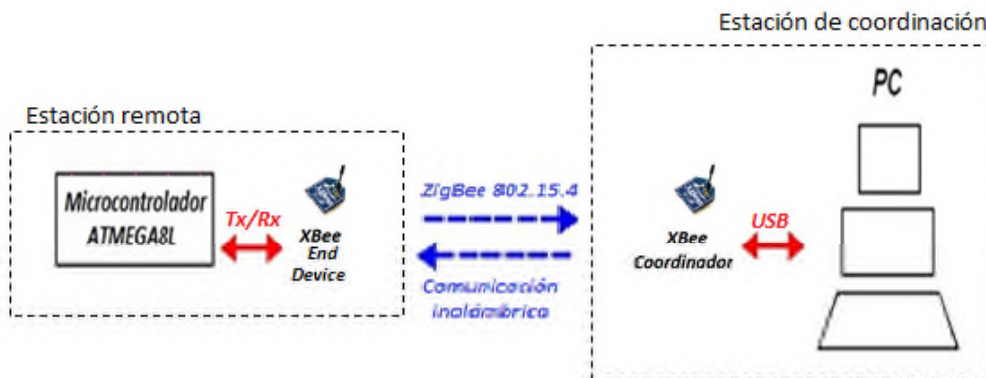


Figura 3.33. Esquema de funcionamiento del sistema de comunicación inalámbrica. Fuente: Elaboración propia.

El usuario, a través de una aplicación en la computadora desarrollada específicamente para el sistema mecatrónico, seleccionará la luminaria que desee cambiar de posición. Si el usuario así lo desea podrá ordenar que la luminaria descienda totalmente hasta una posición inferior a la altura del piso, para brindarle el mantenimiento de rutina. En caso que la luminaria ya se encuentre en esta posición, el usuario podrá ordenar que la luminaria vuelva a ascender totalmente hasta la posición inicial. Además, el usuario tendrá la libertad de desplazar verticalmente la luminaria la distancia que él requiere en ascenso o descenso, ya sea mediante un dato de la distancia de recorrido deseada ya sea de ascenso o de descenso.

Los parámetros de operación con las que contará el usuario son:

- Control de una luminaria de manera individual o todas a la vez.
- Descenso total o ascenso total.
- Distancia de descenso o ascenso deseada
- Velocidad de izaje

El XBee Coordinador debe ser configurado mediante comandos AT para enviar las órdenes a la dirección IP del XBee remoto ubicado en la estación de la luminaria elegida por el usuario, así como la información de los parámetros de la operación. Esta tarea deberá ser administrada por la aplicación de la computadora. A través de la antena de radiofrecuencia y siguiendo el protocolo de comunicación ZigBee (802.15.4) se establecerá la comunicación inalámbrica entre XBee Coordinador y XBee End Device.

El XBee End Device se comunicará con el microcontrolador y le enviará los parámetros de operación a través de los pines de comunicación serial.

El microcontrolador según las instrucciones recibidas, configura el sentido de giro y velocidad del motor, y calcula el número de pulsos que deberá contar en la señal proveniente del encoder. Además proporciona el seguimiento del proceso al XBee End Device para ser enviadas a la estación de coordinación según el protocolo previsto, de manera que el usuario cuente con esta información.

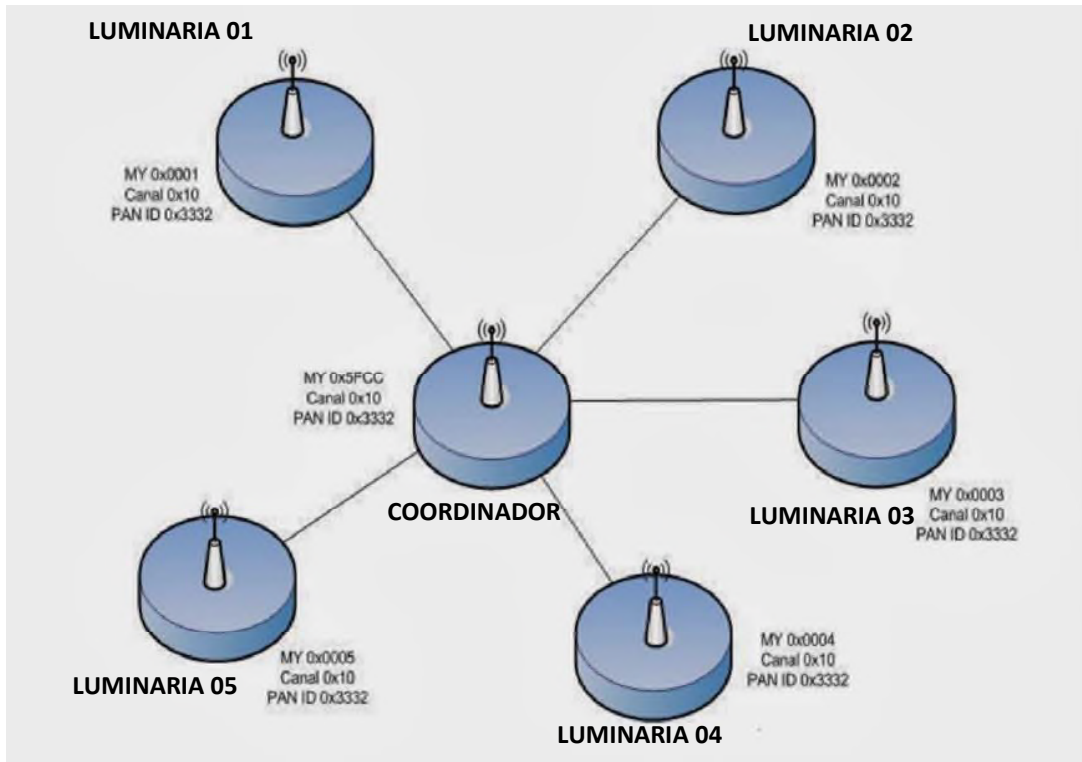


Figura 3.34. Topología del sistema de comunicación inalámbrica. Fuente: Elaboración propia.

Los datos se reciben en módulo UART de los XBee a través del pin *DI* como una señal serial asíncrona. La señal debe permanecer en alta cuando no existen datos que estén siendo transmitidos. Cada byte de datos consiste en un bit de inicio en baja, 8 bits de datos, donde el primero bit menos significativo, y un bit de parada en alta. La figura ilustra el patrón de bits de los datos que se reciben en el módulo. La comunicación serial depende de los UARTs del microcontrolador y de los módulos Xbee; por ello el ratio de baudios, la paridad, los bits de inicio, los bits de parada y los bits de datos deben ser compatibles.

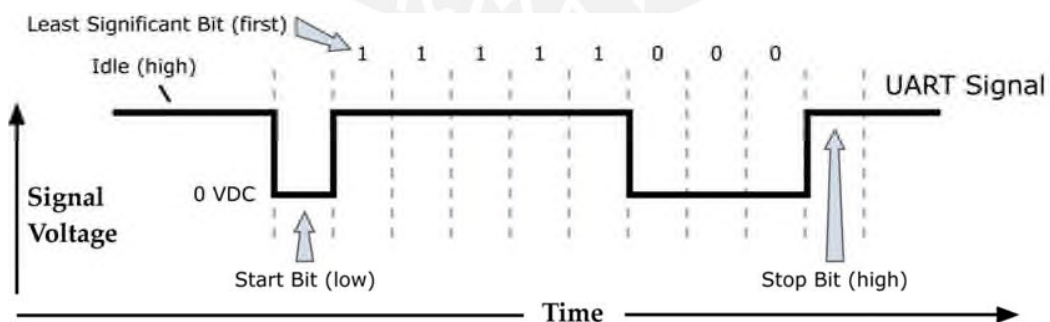


Figura 3.35. Paquete de datos UART 0x1F (número decimal 31) transmitido a través del módulo XBee. Fuente: Digi International.

3.4.3 Configuración del sistema de comunicación inalámbrica

Los módulos XBee ofrecen una velocidad de comunicación desde 1200 hasta 115.200 baudios pasando por todos los valores convencionales. El fabricante facilita al usuario un software de programación llamado X-CTU que puede ser descargado junto con la documentación necesaria desde la página web: <http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3352>. Con este software se pueden definir de una forma rápida todos los parámetros que se requieran modificar en los módulos.

En la figura se puede observar la ventana del software X-CTU, con el cual se programan los módulos XBee, basta con hacer clic sobre cualquiera de los parámetros para introducir el valor deseado. Una de las ventajas de utilizar estos módulos es que se puede tener hasta 65000 combinaciones distintas de red y se puede hacer redes de punto a punto y punto a multi-punto. El protocolo 802.15.4 pertenece a las redes PAN (Personal Area Network). Para utilizar los módulos con cualquier microcontrolador que incorpore comunicación serial, basta con configurar unos cuantos parámetros.

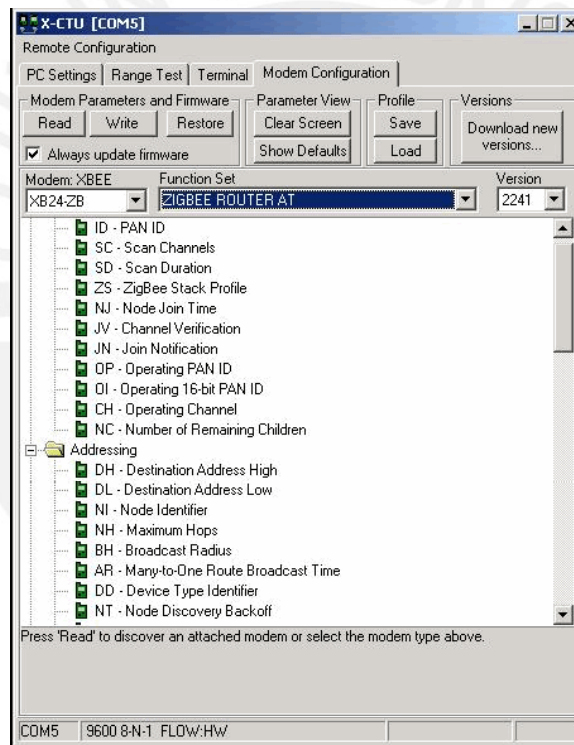


Figura 3.36. Entorno de configuración de los módulos XBee
. Fuente: Digi International

Para crear una red punto a multipunto será necesario configurar los siguientes datos:

- PAN ID: Es identificación de la red. Todos aquellos módulos que tengan el mismo PAN ID pertenecerán a la misma red. En el ejemplo de la figura el PAN ID es 0x3332.
- CH: Es el canal de la red. Todos los módulos que conforman la red requieren de contar con el mismo canal para recibir información. En el ejemplo de la figura el canal es 0x10.

- DH-DL: Es la dirección del módulo de destino. Para los Xbee End Device, la dirección de destino será la dirección del Xbee Coordinador. Para el Xbee Coordinador, la dirección de destino es aquella dirección del Xbee End Device relativo a la luminaria que el usuario ordene movilizar. La aplicación en computadora que sirve de interfaz con el usuario se encargará de recibir las instrucciones en tiempo real y configurar inmediatamente su direccionamiento al Xbee Coordinador a través del adaptador USB/serial.

La configuración de la red inalámbrica mediante el software del fabricante se encuentra en el Anexo 4: Configuración de la red inalámbrica.

3.4.4 Conexiones del bloque de coordinación

La figura muestra las conexiones mínimas que necesita el módulo Xbee para poder ser utilizado. El módulo requiere una alimentación de 3.3V, la conexión a tierra y las líneas de transmisión de datos por medio del UART (*Tx* y *Rx*) para comunicarse con la computadora.

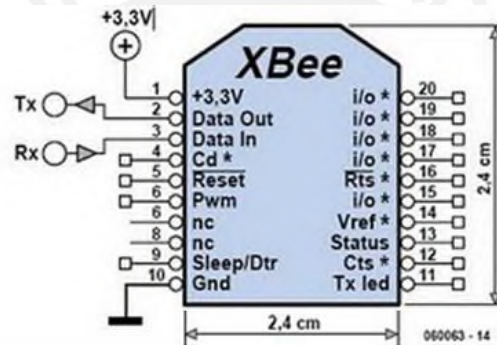


Figura 3.37. Pines del Xbee. Fuente: Digi International

Los Xbee se comunican con un dispositivo RS232 a niveles TTL. En el caso del Xbee Coordinador, necesita un adaptador intermedio para comunicarse con la computadora, para ello se usará un cable USB a mini USB basado en niveles TTL para señales UART y una tarjeta adaptadora. A través de este cable también es posible configurar los módulos Xbee de la red inalámbrica.



Figura 3.38. Conexión cable USB - adaptador Figura 3.39. Cable USB a mini USB

3.5 Diagramas esquemáticos del circuito del sistema mecatrónico

En cada estación remota de luminaria se debe implementar los siguientes circuitos:

3.5.1 Circuito de alimentación

En la figura 3.40 se muestra el diagrama esquemático para la alimentación de todos los componentes electrónicos.

- La entrada a este circuito son los 24VDC provenientes de la fuente de poder
- A este circuito se debe conectar el convertidor DC/DC para obtener los 5V que alimentarán al microcontrolador, al controlador del motor, al sensor de fin de carrera y al encoder. Por recomendación del fabricante, se colocan condensadores de 10 μF .
- Se usa un último regulador de tensión LDO para obtener los 3.3V que requiere la alimentación del XBee End Device.

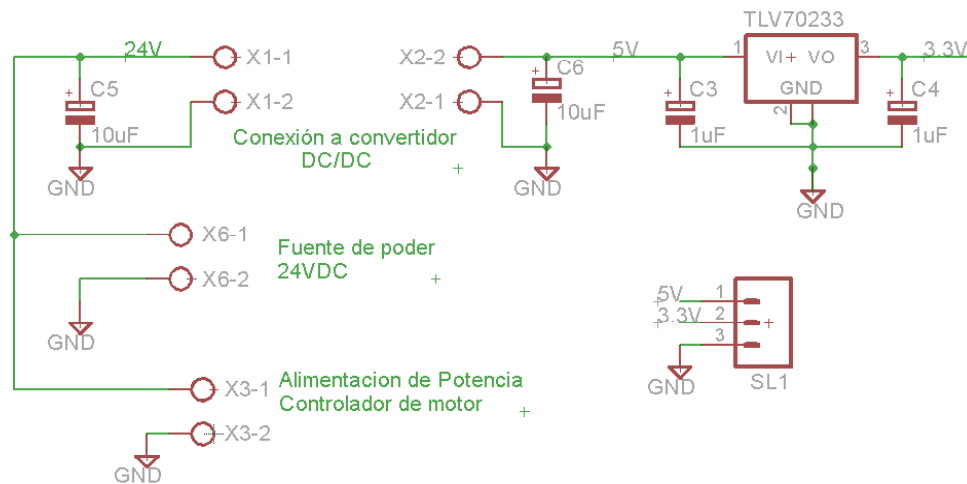


Figura 3.40. Diagrama esquemático del circuito de alimentación. Fuente: Elaboración propia.

3.5.2 Circuito de control

En la figura 3.41 se muestra el diagrama esquemático del circuito de control. Todos los voltajes de alimentación provienen del circuito de alimentación, excepto los 220V provenientes de la red eléctrica.

- Desde el microcontrolador *ATmega8L* se controla la dirección de giro (pines *PB2* y *PB3*) y velocidad del motor (pin *OC1A*) a través del controlador del motor, de configuración puente H. Este controlador es capaz de suministrar los 24V requeridos y hasta 30A de intensidad de corriente. Por recomendación del fabricante del controlador, se colocan resistencias de 1k y 3.3k en las líneas de control.
- La señal PWM del encoder (pin *INT1*) y la señal lógico del sensor de fin de carrera (pin *INT0*) son entradas del microcontrolador. El microcontrolador puede manejar estas señales a través de subrutinas por interrupción. Con esta data se puede controlar la posición de la luminaria, así como conocer el instante en que la luminaria regresa a la posición superior. Será necesario contar con el número de pulsos proveniente del encoder, mas no con la señal de dirección puesto que se sabe de antemano.
- Se dispone de una señal (pin *PB4*) para encender o apagar la luminaria. Para ello se emplea un circuito de control sobre una carga inductiva (el balasto de la luminaria). Se utiliza un fototriac y un triac. Para un trabajo en frío, cuentan con un voltaje de bloqueo V_{off} de 400V y 600V respectivamente.
- El sistema mecatrónico y la luminaria compartirán la misma conexión de tomacorriente. Las líneas de fase, tierra y neutro deben conectarse en esta tarjeta. La salida de las líneas AC deben conectarse al estator del conector rotativo.
- El XBee intercambiará información con el microcontrolador mediante las líneas de comunicación serial (pines *DIN - DOUT* y *TXD - RXD* del XBee y del microcontrolador respectivamente). El rango de voltajes de entrada en alta que reconoce el microcontrolador es entre $0.6V_{cc}$ y $V_{cc} + 0.5V$ ($V_{cc} = 5.0V$), esto es entre 3.0 y 5.5 V, por ello está asegurada la correcta comunicación con el XBee que emite 3.3V. [29] Por su parte, el voltaje de entrada en alta que reconoce el XBee debe ser mayor o igual $0.7V_{cc}$ ($V_{cc} = 3.3V$), esto es 2.31V, por ello los 5V que emite el microcontrolador se encuentran en el rango aceptado. [25]
- El XBee se encarga de recibir inalámbricamente la información en cadenas de texto sobre el sentido de giro y velocidad del motor y posición de la luminaria que son ingresadas por el usuario. Además, reportará al XBee Coordinador de la red la información acerca del proceso de izaje del para el conocimiento del usuario.

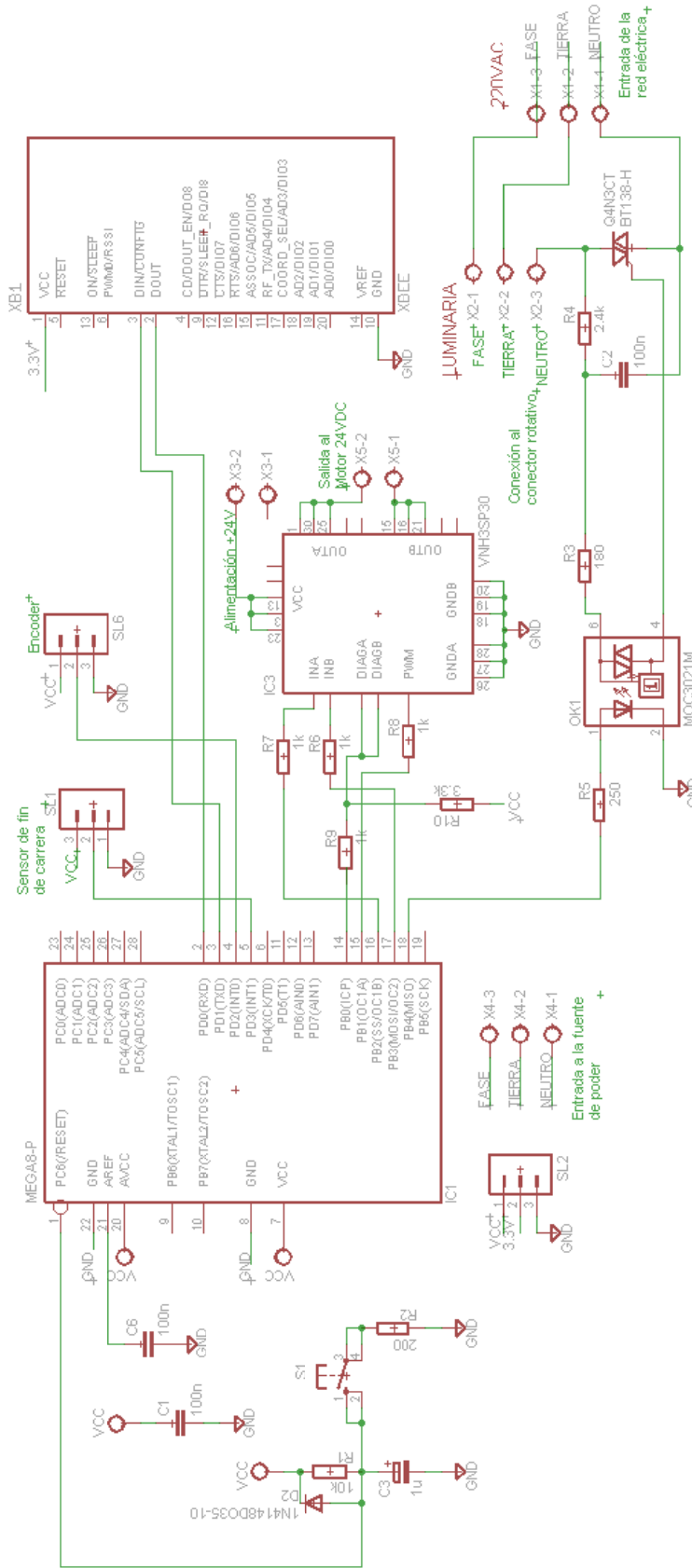
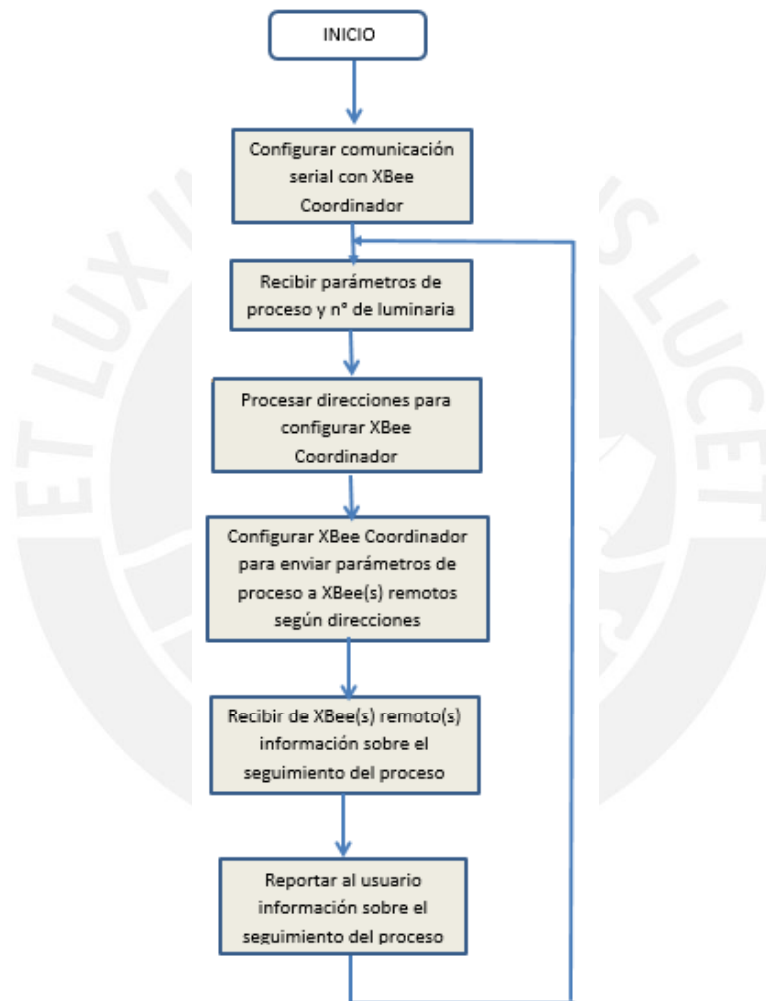


Figura 3.41. Diagrama esquemático del circuito de control. Fuente: Elaboración propia.

3.6 Diagramas de flujo del sistema mecatrónico

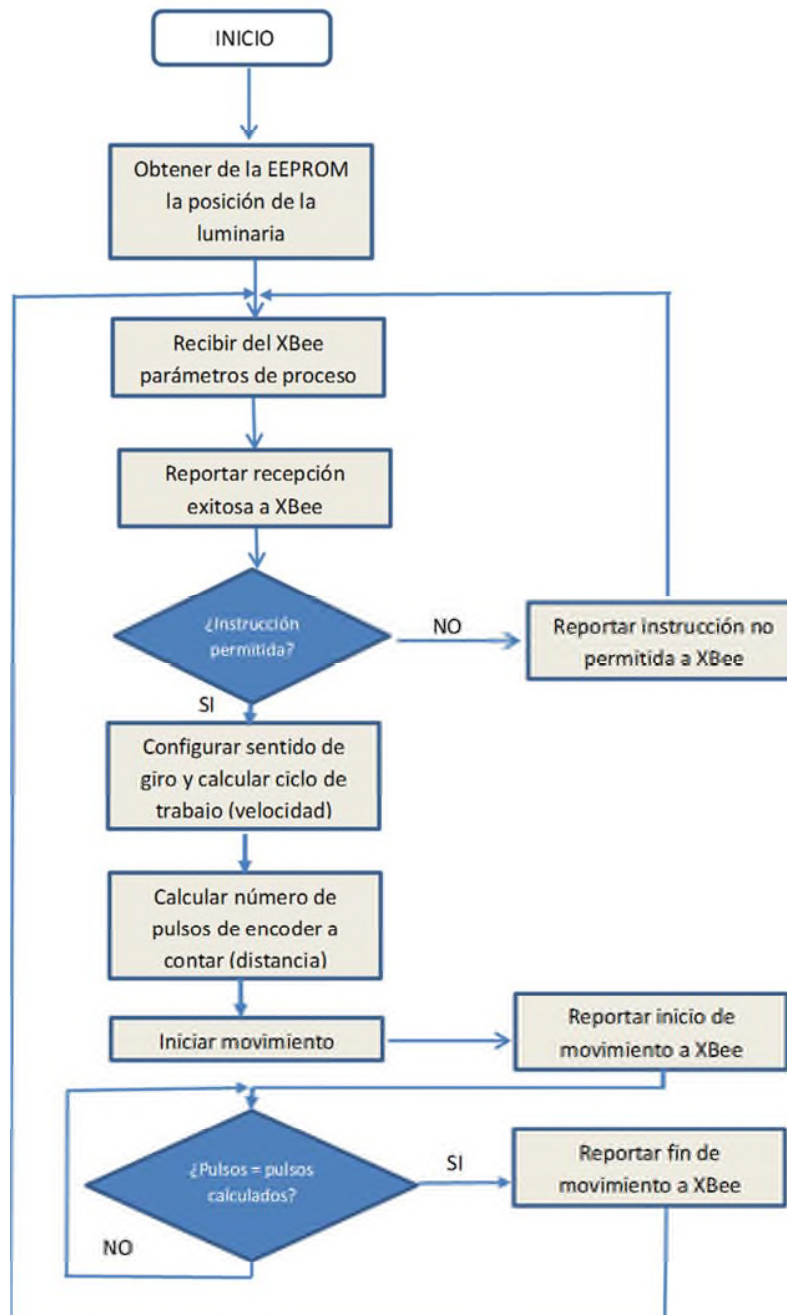
3.6.1 Diagrama de flujo de la aplicación en computadora

La aplicación se encargará de configurar en el XBee Coordinador los parámetros y direccionamiento de las órdenes ingresadas por el usuario en tiempo real; y recibir el seguimiento del proceso e informarle al usuario.



3.6.1 Diagrama de flujo del programa de los microcontroladores remotos

Los microcontroladores ATmega8 de los bloques de operación controlarán la ejecución del proceso de izaje de su respectiva luminaria, reportando al XBee el seguimiento del proceso a través de las líneas de comunicación serial.



Capítulo 4: Presupuesto

4.1 Presupuesto del sistema mecatrónico

Se presupuestó todas las piezas del sistema mecatrónico para instalar en una nave industrial de 20 luminarias. La realización del presente diseño del sistema mecatrónico requiere de un presupuesto de S/. 49,909.43, o un costo prorrateado de S/. **2,495.47** por luminaria.

Este presupuesto tiene servicios y componentes adquiridos en Perú y componentes importados del extranjero. Se utilizó la tasa de cambio vigente al día 22 de Junio de 2014: 1 USD = S/. 2.79, 1€ = S/. 3.78 y un recargo del 18 % por el IGV. Finalmente, a los productos importados se les aplicó un recargo por los gastos de envío.

Componentes electrónicos:

Componente	Cantidad	P. Unit	P. Total	Referencia
MODULE ZIGBEE-PRO W/WIRED ANT	21	28.00	\$588.00	Figura A.5.7
ATMEGA8L IC MCU 8BIT 8KB FLASH 28DIP	20	3.86	\$77.26	Figura A.5.7
CAP ALUM 0.1UF 50V 20% RADIAL	80	0.10	\$8.32	Figura A.5.7
DIODE SMALL SIG 100V 0.2A DO35	20	0.06	\$1.16	Figura A.5.7
RES 10K OHM 1/4W 5% CARBON FILM	20	0.05	\$1.06	Figura A.5.7
CAP ALUM 1UF 50V 20% RADIAL	20	0.21	\$4.16	Figura A.5.7
RES 200 OHM 1/4W 5% CARBON FILM	20	0.05	\$1.06	Figura A.5.7
CAP ALUM 0.33UF 50V 20% RADIAL	20	0.21	\$4.16	Figura A.5.7
TERMINAL BLOCK 3.5MM 2POS PCB	120	0.24	\$28.57	Figura A.5.7
IC REG LDO 3.3V 0.5A SOT223	20	0.54	\$10.84	Figura A.5.7
CABLE USB EMBD UART 3.3V .1"HDR	1	20.00	\$20.00	Figura A.5.7
DC/DC CONVERTER 5V 10W UFRM	20	34.61	\$692.16	Figura A.5.7
IC MOTOR DRIVER PAR 30MULTIPWRSO	20	8.76	\$175.12	Figura A.5.7
CAP ALUM 10UF 50V 20% RADIAL	40	0.20	\$8.00	Figura A.5.7
RES 180 OHM 1/2W 5% CARBON FILM	20	0.10	\$1.90	Figura A.5.7
RES 2.4K OHM 1W 5% AXIAL	20	0.26	\$5.10	Figura A.5.7
TERM BLOCK 5.08MM VERT 3POS PCB	40	0.48	\$19.20	Figura A.5.7
CONN HEADER FEMALE 3POS .1" GOLD	80	0.33	\$26.00	Figura A.5.7
OPTOCOUPLER TRIAC OUT 400V 6DIP	20	0.57	\$11.46	Figura A.5.7
TRIAC SENS GATE 400V 1A DO214	20	1.07	\$21.30	Figura A.5.7
RES 1K OHM 1/4W 5% CARBON FILM	80	0.03	\$2.30	Figura A.5.7
XBEE USB ADAPTER BOARD	1	24.99	\$24.99	Figura A.5.7
CBL USB A-MINI B CON 3' 28/28 AWG	1	1.94	\$1.94	Figura A.5.7
ENCODER MODULE 2CH 96CPR 3MM	20	23.45	\$468.97	Figura A.5.7
COSTO DE ENVÍO			\$100.00	Figura A.5.7
FUENTE DE PODER 350.4W PFC 24V @14.6A	20	94.95	\$1899.00	Figura A.5.3
COSTO DE ENVÍO			\$252.35	Figura A.5.3
SENSOR DE FIN DE CARRERA	20	2.85	\$57.00	Figura A.5.4
SUBTOTAL			\$4,441.38	
IMPUESTOS DE ADUANA			\$666.21	
TOTAL (IMPUESTOS ADUANEROS)			\$5,107.59	

Tabla 4.1: Presupuesto de los componentes electrónicos

Elementos mecánicos:

Elemento	Unidades	P. Unit	Procedencia	C. Envío	Total	Total (S/.)	Referencia
Motorreductor*	20	€ 153.00	Estonia	Incluido	€ 2,601.00	S/. 9,831.78	Figura A.5.1
Fabricación de piezas	20		Local			S/. 18,998.00	Figura A.5.2
Rodamiento UCP 201	40	\$ 6.21	EE.UU.	\$ 78.52	\$ 617.52	S/. 1,722.88	Figura A.5.5
Rodamiento UCP 202	20	\$ 6.55					
Rodamiento UCP 204	20	\$ 7.98					
Conector rotativo	20	\$ 59.00	Alemania	Incluido	\$ 1,180.00	S/. 3,292.20	Figura A.5.6
Cable eléctrico de izaje	20	€ 24.00	Italia	Incluido	€ 480.00	S/. 1,814.40	Figura A.5.11
TOTAL						S/. 35,659.26	

Tabla 4.2: Presupuesto de los elementos mecánicos

*El fabricante de los manorreductores ofreció un descuento del 15% sobre el precio total.

Presupuesto general:

Presupuesto general	
Componentes electrónicos	S/. 14,250.17
Elementos mecánicos	S/. 35,659.26
Total	S/. 49,909.43
Costo prorrateado por luminaria	S/. 2,495.47

Tabla 4.3: Presupuesto general

4.2 Costo por funcionamiento

El consumo del motor es de 150W (24V, 6.25A). La eficiencia de la fuente de poder es de 88%. El XBee Pro consume 165mW (3.3V, 50mA) y el microcontrolador 18mW (5V, 3.6mA). Para efectos de cálculo, solo se considera el consumo del motor cuando se produzca el izaje de la luminaria: 170.45W.

Asumiendo que el tiempo de funcionamiento de una estación es no mayor a 5 min (ascenso y descenso, el cálculo se encuentra en el Anexo 1: Diseño del sistema de carga) y que el periodo de mantenimiento es de un mes, el consumo anual sería 0.17 kW-h. En el Perú, el costo del kW-h es de S/. 0.278 [17], lo que supondría un costo de S/. 0.047 anual por estación incorporada en una luminaria. En caso que 20 luminarias de la nave industrial tengan incorporado el sistema mecatrónico presentado, el costo anual sería de S/. 0.95.

El resto del tiempo el sistema se encontrará encendido con un consumo mínimo de los componentes electrónicos, estimado en 207.95mW. A 24 horas de funcionamiento durante un año se calcula un consumo de 1.797kW-h por luminaria. El costo por consumo en caso que 20 luminarias cuenten con el sistema mecatrónico sería de S/.9.99.

Sumando ambos montos se obtiene un costo por funcionamiento anual de S/. 10.94.

Capítulo 5: Conclusiones

1. Se logró diseñar una solución que permita un fácil acceso al mantenimiento preventivo, inspecciones y reparaciones de luminarias de una nave industrial de 20 metros de altura máxima.
2. Se diseñó el sistema de carga tomando como referencia las dimensiones y peso de las luminarias para naves industriales de la serie Cabana de Philips. El sistema de carga es capaz de trabajar con luminarias de 9.8 kg con un factor de seguridad de 2.61.
3. Se logró establecer tiempos de izaje sumamente reducidos, de tal manera que el mantenimiento de las luminarias sea un proceso breve y no repercuta en las actividades realizadas dentro de la nave industrial.
4. Se logró diseñar un sistema de control preciso sobre la posición de la luminaria para adecuarla a los niveles de iluminación requeridos dentro de la nave industrial según la naturaleza de los trabajos que se realicen.
5. La simplificación del acceso al mantenimiento de las luminarias, garantiza una reducción de costos en personal de servicio y equipamiento, así como reducir a cero el índice de accidentes producido por trabajos a gran altura.
6. El costo por funcionamiento del sistema mecatrónico es sumamente reducido. Se calculó que la suma asciende a un costo anual de S/. 10.94 por un total de 20 luminarias, realizando mantenimientos periódicos mensuales.
7. Se realizó una búsqueda de sistemas de aplicación similar en el mercado global y se encontró solamente un fabricante de elevadores de luminarias: Reel Tech, de procedencia coreana. A diferencia del sistema mecatrónico propuesto, el sistema de Reel Tech solo permite el izaje de la luminaria cuando esta se encuentra apagada [28], por tanto no se podría emplear para regular el nivel de iluminación en la nave industrial.
8. El costo de fabricación del sistema mecatrónico asciende a S./ 2495.47 por luminaria. Se solicitó una cotización de un elevador Reel Tech para luminarias de 10kg. de peso máximo y 15 metros de altura máxima. El precio propuesto fue de \$730.00 (S/. 2033.77), sin incluir impuestos. La cotización se encuentra en el Anexo 5: Cotizaciones. Por tanto se concluye que el costo de fabricación del sistema mecatrónico es adecuado y sería factible su comercialización, previa optimización del diseño y reducción del costo de fabricación.

5.1 Recomendaciones

Las corrientes de aire no son deseables dentro de la nave industrial, puesto que estas ejercerían fuerzas sobre las luminarias produciendo oscilaciones mecánicas, lo cual podría repercutir negativamente en los niveles de iluminación de la nave.

Bibliografía

- [1] CRUZZOLIN MATERIALES ELÉCTRICOS
2014 *Iluminación industrial.*
<<http://www.cruzzolin.com.ar/downloads/archivos/facalu/industrias.doc>>
Consulta: 13/06/2014
- [2] COMISIÓN INTERNACIONAL DE ILUMINACIÓN
2014 *Estándares Internacionales*
<<http://www.cie.co.at/Publications/Standards>> Consulta: 06/06/2014
- [3] LUMINARIAS INDAL
2013 *Tarifa iluminación Indal.*
<http://www.indal-lighting.com/catalogo/file_ext/ctlgs/es/merc21/cat6/6-21-es.pdf> Consulta: 30/06/2014
- [4] GRUPO DE ESTUDIOS LUMINOTÉCNICOS, Universidad Politécnica de Cataluña.
2014 *Mantenimiento – Cursos de iluminación.*
<<http://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-luminarias-mantenimiento.php>> Consulta: 05/07/2014
- [5] PHILIPS
2014 *Industrias.*
<http://www.lighting.philips.com/pwc_li/es_es/connect/tools_literature/assets/pdfs/Folleto%20Industria.pdf> Consulta: 15/05/2014
- [6] MUHAMMAD H., Rashid
1973 *Electrónica de Potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones.* Segunda edición.
México: Prentice Hall Hispanoamericana. ISBN: 968-880-586-6.
- [7] MOHAN, Ned, UNDELAND, Tore y ROBBINS, William
2009 *Electrónica de Potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño.* Segunda edición.
México: Mc Graw Hill. ISBN: 978-970-10-7248-6.
- [8] GIESECKE, Fredercik, MITCHELL, Alva, SPENCER, Henry y Hill, Ivan
1979 *Dibujo técnico.* Sexta edición. México: Editorial Limusa. ISBN: 968-18-0963-7.
- [9] BOLTON, William
2006 *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica.* Tercera edición. México: Alfaomega. ISBN: 970-15-1117-4
- [10] RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, Jorge
2003 *Resistencia de materiales 2.* Material de enseñanza. Lima: Pontificia Universidad católica del Perú, Ciencias e Ingeniería.
- [11] OSADA MOCHIZUKI, José
2003 *Implementación de un vehículo de pruebas para el desarrollo de un sistema de estacionamiento autónomo mediante visión robótica.* Lima, 2012. Pontificia Universidad Católica del Perú, Escuela de Posgrado.

- [12] HALL, Allen, Alfred HOLOWENKO y Herman LAUGHLIN
1971 *Teoría y problemas de diseño de máquinas*. Serie de compendios Schaum.
México: McGraw-Hill.
- [13] ÁREA DE DISEÑO, Sección de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica del Perú
2003 *Dibujo Mecánico I*. Material de enseñanza. Lima: PUCP. Ciencias e Ingeniería.
- [14] HIBBELER, R.C.
2006 *Mecánica de Materiales*. Sexta Edición. Traducción: José de la Cera Alonso.
México: Pearson Educación. ISBN: 970-26-0654-3.
- [15] PORRAS, Andrés y SORIANO, María Luisa
2001 *Tema 8 - Engranajes*. Material de enseñanza. Castilla: Cátedra de Motores y Máquinas – Universidad de Castilla La Mancha.
- [16] IVALO
2014 *Luminarias industriales IVALO*. <<http://www.eltacnet.com/industriales.pdf>>
Consulta: 15/05/2014
- [17] OSINERGMIN
2014 *¿Cómo se calculan las tarifas eléctricas?*
<<http://www.osinergmin.gob.pe/newweb/uploads/facebook/tarifaselectricas.pdf>>
> Consulta: 14/06/2014
- [18] CENTRO ARAGONÉS DE TECNOLOGÍAS PARA LA EDUCACIÓN
2010 *Elementos mecánicos transformadores de movimiento – Tornillo sinfín - corona*
<http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio//1000/1102/html/2_tornillo_sinfcorona.html> Consulta: 16/06/2014
- [19] STEP MOTOR
2010 *Smart Moto Devices – Drivers and controllers for electromotors*
<<http://stepmotor.biz/es/sm7152w.htm>> Consulta: 16/06/2014
- [20] ARISTONCAVI
2014 *Cables for special applications*
<<http://www.aristoncavi.com/pdf/applicazioni%20speciali.pdf>>
Consulta: 16/06/2014
- [21] AVAGO TECHNOLOGIES
2014 *2-Channel encoder and codewheel, 11mm Optical Radius bundled pack*
<http://www.avagotech.com/pages/en/motion_control_encoder_products/incremental_encoders/incremental_encoders_and_code_wheels/hedb-9100-k02/>
Consulta: 16/06/2014
- [22] DFROBOT
2014 *Crash sensor*
<http://www.dfrobot.com/index.php?route=product/product&filter_tag=crash&product_id=763#.U583qv15Mpo> Consulta: 16/06/2014
- [23] SERVO DRIVE
2014 *Rotary Slip Rings*
<http://www.servo-drive.com/rotary_slip_rings.php> Consulta: 22/06/2014

- [24] MEAN WELL
2014 *PPS-200 Series - 200W Single Output with PFC Function*
<<http://www.meanwell.com/search/PPS-200/PPS-200-spec.pdf>>
Consulta: 16/06/2014
- [25] DIGI INTERNATIONAL
2007 *XBee™/XBee-PRO™ OEM RF Modules*
<http://ftp1.digi.com/support/documentation/manual_xb_oem-rf-modules_802.15.4_v1.xAx.pdf> Consulta: 16/06/2014
- [26] UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
2006 *Documento básico SE-A. Seguridad estructural Acero*. España, Marzo 2006.
<http://www.upct.es/~minaees/codigo_tecnico_acero.pdf> Consulta:
18/06/2014
- [27] SENRING ELECTRONICS
2011 *Slip rings with Trough-Bore*.
<<http://www.senring.com/guokong.html>>Consulta: 19/06/2014
- [28] REEL TECH
2014 *Remote lightning lifter*
<http://www.lightcraft.com.sg/images/ReelTech_2012.pdf>
Consulta: 05/07/2014
- [29] ATMEL
2014 *ATmega8L*
<http://www.atmel.com/images/atmel-2486-8-bit-avr-microcontroller-atmega8_1_datasheet.pdf> Consulta: 05/07/2014