



PONTIFICIA UNIVERSIDAD  
CATOLICA  
DE VALPARAISO



**César Eduardo Cofré Reyes**

# Implementación de una plataforma robótica móvil para la medición de iluminancia horizontal

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Electrónico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica**



PONTIFICIA UNIVERSIDAD  
**CATOLICA**  
**DE VALPARAISO**

# Implementación de una plataforma robótica móvil para la medición de iluminancia horizontal

César Eduardo Cofré Reyes

Tesis para el grado de Ingeniero Electrónico,  
aprobada por la comisión de la  
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
conformada por

Sr. Rodrigo Olgún Concha  
Profesor Guía

Sr. Héctor Vargas Oyarzún  
Segundo Revisor

Sr. Jorge Mendoza Baeza  
Secretario Académico

Valparaíso, 4 de Abril de 2017

*Este trabajo está dedicado a mis padres, Guillermo y Guillermina. Por ellos he escrito esto. Gracias por la espera y todo el apoyo que me han dado, que junto con mis hermanos, han sido el soporte de estos duros años de estudio. A mi pareja, por los días y noches de desvelo, acompañando en mi trabajo y empatizando con todo lo que involucró esto. A mis amigos y familiares.*

*Gracias a todos ellos, la vida es bella.*

# Agradecimientos

Tengo una deuda enorme con todos los que han incidido en este trabajo y en mi largo camino por la universidad. Ellos han influido de cierta manera en la elección de este tema y en que llegara a realizarla.

A mis amigos del Centro de Nuevas Tecnologías, lugar en el cual me inicié en electrónica y robótica, y he aprendido gran parte de lo que sé. Luis, Camilo, Julián, Andrés, Gonzalo, JJ, JP, Marcos, Keno y Daniel. Moisés, Pablo y Rodrigo, mentores y ejemplos a seguir en este laboratorio, que gracias a ellos se inició este lindo sueño llamado CNT.

A mis amigos de la DAE, Carolina, David, Andrea, Ale, Pame, Pedro, Reynaldo y todos los que forman este hermoso equipo de trabajo; al equipo de difusión institucional, que me dieron las herramientas de desplante y la confianza necesaria para el discurso. A todos ellos, que me enseñaron lo que es el trabajo en equipo.

Al equipo de fotometría, por el conocimiento y las experiencias que involucran cada salida a terreno.

A Carmen, Carla, Loreto y al personal administrativo de mi escuela, por tener siempre un consejo y buena disposición.

A don Marcos Chappa, por su sabiduría y buena voluntad, parte de este trabajo pertenece a él.

Al equipo del Valparaíso Maker Space, lugar de desarrollo, amistad y sueños.

Finalmente a mis profesores, gracias por los conocimientos.

# Resumen

El presente texto versa sobre la implementación de una plataforma robótica, móvil, capaz de sensor y almacenar autónomamente datos de medición de iluminancia en un escenario a escala ofreciendo una oportunidad real de mejora y optimización al proceso actual de medición, realizado por el Laboratorio de Fotometría y Control de Calidad de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Primeramente, se expone la situación actual de la medición de iluminancia, esto es la razón, forma y personas que ejecutan la operación, además de señalar las normas técnicas que enmarcan el desarrollo y los resultados de la medición. Una vez contextualizada la forma actual de medición, se identifican las problemáticas y las fuentes de error que conlleva la realización de esta tarea, ofreciendo una oportunidad de mejora y optimización de la operación actual.

Luego, presenta algunos robots que utilizan alguna tecnología pertinente para este trabajo y además, se indaga sobre las formas de posicionamiento en robótica, para luego, presentar las alternativas tecnológicas que son consideradas viables para el trabajo. Finalmente, se plantean los requisitos básicos que debe poseer la plataforma, con ello, se opta por las tecnologías, arquitectura y componentes capaces de resolverlos. Lo anterior, da paso a la implementación del trabajo, señalado en el capítulo 3.

Continúa con el planteamiento de la forma en la cual operará la plataforma, ayudando en el ordenamiento de las tareas que realizará el robot y facilitando la confección del programa fuente. Ya en el capítulo quinto, se da cuenta de las pruebas realizadas en vacío y con un escenario controlado, obteniendo resultados de desempeño de la plataforma, en cuanto a componentes electrónicos específicos, como tiempos de ejecución y distancias recorridas por la plataforma.

Al finalizar, se hace un análisis desde el punto vista económico del proyecto, enfatizando en la reducción de costos y optimización del proceso. Realizando un análisis de costos de construcción de la plataforma y las horas hombre involucradas en la implementación. Posteriormente se realiza una proyección de venta de la plataforma como también de la recuperación de la inversión de capital con el uso de ella.

Palabras claves: Plataforma, robótica móvil, automatización, almacenamiento, iluminancia, reducción de costos, optimización de procesos.

# Abstract

The present document refers to the implementation of a robotic platform, mobile, able to sample and autonomously store illuminance measurement data at a scale setting by offering an actual opportunity for improvement and optimization to the current measurement process, carried out by Laboratorio de Fotometría y Control de Calidad of Pontificia Universidad Católica of Valparaíso.

Firstly, the current illuminance measure is presented, i.e. the grounds, means and people executing the operation, apart from indicating the technical standards comprising the development and results. Once contextualized the current process of measurement, problems and error sources are identified which lead to the execution of this task, by offering an opportunity for improvement and optimization to the current process.

Then, some robots which use part of the relevant technology for this work are presented and also, robotic positioning is addressed for then presenting technological alternatives that are regarded as viable to this work. Finally, the basic requirements that the platform must hold are stated, and technologies, architecture and components for settling such are selected. The foregoing gives way to the work implementation, as stated in Chapter 3.

The approach referring to the way the platform works is presented, assisting in the order of tasks the robot will perform and by facilitating the creation of the source code. Chapter fifth presents vacuum tests conducted under a controlled setting, by getting performance results of the platform regarding the operation of specific electronic components, and run time and distance covered by the platform.

Finally, an analysis from the project economic standpoint is made, placing emphasis on the cost reduction and process optimization. Later, a sale projection of the platform and investment principal return with the use of such is proposed.

Key words: Platform, robotic mobile, automation, data logging, illuminance, costs reduction, process optimization.

# Índice general

Introducción.....	1
1 Contexto del proyecto .....	4
1.1 Importancia de la iluminación en las vías públicas .....	4
1.2 Normativas y estándares usados en iluminación de alumbrado público .....	5
1.3 Fundamentos de la medición .....	6
1.3.1 Definición de iluminancia .....	6
1.3.2 Matriz de puntos de medición de iluminancia.....	9
1.3.3 Operación actual .....	11
1.4 Errores en el proceso de medición .....	14
1.5 Solución actual y solución propuesta .....	15
1.5.1 Objetivo general.....	17
1.5.2 Objetivos específicos.....	17
2 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma.....	18
2.1 Robótica e iluminación .....	18
2.2 Tecnologías para el proyecto .....	20
2.2.1 Sistemas de posicionamiento y tecnologías para el control de movimiento.....	20
2.2.2 Movimiento: actuadores.....	31
2.2.3 Procesadores y placas de desarrollo .....	35
2.2.4 Medición de iluminancia: Luxómetro .....	38
2.3 Disposiciones típicas para la locomoción en robótica móvil .....	40
2.4 Evaluación de arquitecturas de posicionamiento .....	44
2.4.1 Plataforma de cuatro ruedas .....	44
2.4.2 Plataforma de tres ruedas tipo impresora.....	49
2.5 Requisitos físicos de la plataforma robótica.....	53
2.6 Selección de la arquitectura, hardware y método de posicionamiento.....	53
3 Diseño y fabricación de la plataforma.....	57
3.1 Componentes y diseño de hardware electrónico seleccionados.....	57
3.1.1 Actuadores de la plataforma.....	57
3.1.2 Drivers para motores.....	59

---

3.1.3 Sensores .....	61
3.2 Manipulación de datos y procesamiento .....	64
3.2.1 Módulo para tarjeta SD .....	64
3.2.2 Procesador: Arduino Mega 2560 .....	65
3.2.3 Comunicación con luxómetro .....	67
3.2.4 Interfaz de operación .....	69
3.3 Herramientas de diseño. ....	72
3.4 Diseño e impresión de las piezas de la plataforma. ....	73
<b>4 Desarrollo del algoritmo .....</b>	<b>83</b>
4.1 Sistema general .....	83
4.2 Procesamiento y almacenamiento de datos.....	84
4.2.1 Interfaz .....	86
4.2.2 Ingreso de medidas a la plataforma.....	86
4.3 Sistema de locomoción y posicionamiento.....	88
4.3.1 Seguidor de línea .....	88
4.4 Medición de grilla .....	94
<b>5 Pruebas y resultados.....</b>	<b>96</b>
5.1 Pruebas de componentes electrónicos .....	96
5.2 Pruebas de locomoción .....	101
5.3 Prueba de almacenamiento de datos medidos.....	109
<b>6 Análisis económico.....</b>	<b>113</b>
6.1 Costos de la implementación del proyecto .....	113
6.1 Importancia de la optimización de recursos y procesos productivos.....	116
6.2 Valoración de la plataforma en operación.....	117
<b>Conclusión.....</b>	<b>120</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>124</b>

# Introducción

Desde el inicio de los tiempos, pasando por el mito de la caverna de Platón hasta la actualidad, la luz ha sido el descubridor de todo lo oculto en las sombras, iluminando el camino del hombre en su paso por el mundo. En la prehistoria el hombre descubrió el fuego y lo utilizó para obtener calor y cocinar alimentos, y no tardó mucho en usarlo para la iluminación de sus cavernas, mientras que la luz solar se aprovechaba durante el día.

De este modo la llama fue la primera forma de iluminación artificial usada por el hombre. El primer candil, probablemente, haya aparecido hace 50.000 años, usando como combustible aceite o grasa de origen animal del que además se utilizaba el cráneo para colocar en su interior estos combustibles.

Hace unos 4.500 años, en la zona de Ur, Mesopotamia, se utilizaban valvas de moluscos marinos como lámparas, o se fabricaban con formas similares en oro o alabastro.

Candiles llamados luchnoi se usaron en la antigua Grecia. Estaban realizados con una variedad de materiales como ser metales y cerámica. La vela se inventó en Egipto alrededor del siglo XIV A.C.

En Cártago y Fenicia se encontraron lámparas de aceite fabricadas en cerámica que datan del siglo X A.C. y que se dispersaron por todo el Mediterráneo.

En la antigua Roma se utilizaban como iluminación las lámparas de aceite que se colgaban al techo con una cadena, que a lo largo del tiempo se iban decorando con labrados y ornamentos de metal.

Más tarde, en la Edad Media aparecieron otros tipos de iluminación, como las linternas con pabilos internos. La iluminación de amplios recintos se realizaba con hacheros y candelabros de hierro forjado.

A comienzos del siglo XIX, la mayoría de las ciudades de Europa y Norteamérica tenían calles con iluminación a gas. Este desarrollo, propició la iluminación con sodio de baja presión y mercurio de alta presión en la década de los 30. Luego el desarrollo de la luz eléctrica la reemplazó en

hogares y calles con distintas tecnologías, que han dado lugar a distintos comportamientos en función a materiales, eficiencia energética y apreciación visual.

La iluminación en calles, lo cual interesa para este trabajo, es de suma importancia como medio de prevención de accidentes de tráfico en la vía pública. Algunas personas incluso opinan que los conductores se sienten más seguros en las carreteras mejor iluminadas. Los accidentes de tráfico no son tan sólo desafortunadas consecuencias del azar, sino que también constituyen eventos que pueden ser analizados de forma que se identifiquen los factores de riesgo, por ejemplo, la oscuridad. Estos factores, han impulsado estándares y normativas que se deben cumplir dependiendo del tipo de calle, flujo vehicular, número de vías, importancia de la ruta. En Chile, se consideran normas y estándares internacionales ya probadas en el resto del mundo. Por lo antes mencionado, existe una entidad encargada de fijar los parámetros en cuanto a la calidad de los caminos y carreteras en Chile, esta es, la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), con lo respectivo a las normativas de instalaciones eléctricas e iluminación y por otra parte está el Ministerio de Obras Públicas (MOP), como principal ejecutor, fiscalizador y garante de los estándares de calidad de construcción de las carreteras en Chile.

Como existe una normativa, también existen organismos que miden los parámetros involucrados en la norma. Uno de ellos es el Laboratorio de Fotometría y Control de Calidad de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, organismo dependiente de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de dicha casa de estudio, idóneo en la medición de parámetros de iluminación. Este laboratorio, además de promover la docencia y la investigación en el área, realiza mediciones de parámetros eléctricos, fotometrías de luminarias de interior y exterior, análisis de armónicos, espectralradiometrías de fuentes de luz y mediciones en terreno.

Las mediciones en terreno más realizadas por el Laboratorio de Fotometría de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, consisten en la verificación de parámetros de iluminancia vertical en caminos y carreteras, para el cual se realiza una serie de mediciones con un instrumento especial para ello, en distintos puntos de un tramo de la carretera o camino. El proceso de medición es realizado de conformidad a las exigencias de los organismos nacionales y también bajo estándares internacionales. El trabajo se realiza hasta altas horas de la madrugada y muchas veces representa un trabajo tedioso y mecánico para los operarios, por lo cual surge como una necesidad, la oportunidad de mejora en el proceso, ayudado por la robótica.

La robótica ha estado presentes en múltiples ámbitos en los últimas décadas, siendo uno de los principales focos, la industria manufacturera, ayudando en la automatización de los procesos productivos, antes, realizados por personas, pero hoy en día realizados mayormente por máquinas, debido a que se trata de tareas repetitivas o peligrosas. Pasando los años, los robots presentaron soluciones en la vida cotidiana de las personas, así, se llamaron “robots de servicio”.

En iluminación no existen soluciones robóticas disponibles. Los avances existentes se han presentado entorno al almacenamiento de distintos parámetros, por esto surge una oportunidad de mejora de determinados procesos, pudiendo enfocar la robótica a esta área.

El presente trabajo, propone la automatización del proceso de medición, mediante el uso de una plataforma robótica capaz de medir los niveles de iluminancia en puntos determinados y almacenarlos para un posterior procesamiento, dado lo tedioso del procedimiento y el afán de optimizar recursos, tal como se mencionará más adelante.

La creación de un robot requiere conocimientos en física, dinámica, mecánica y electrónica, dependiendo de la tarea que realizará el autómeta. Al momento de diseñar sistemas electrónicos es de suma importancia la realización de múltiples pruebas que permitan visualizar el comportamiento del sistema proporcionando las mejoras pertinentes. Estas pruebas, sean favorables o desfavorables permiten contrastar nuevas propuestas con el trabajo o realización actual de cierta tarea, ofreciendo una mejora constante.

# 1 Contexto del proyecto

El propósito de la iluminación en caminos y carreteras es proporcionar señales visuales y revelar eventuales obstáculos, influyendo en una conducción más segura, una mejor visibilidad a distancia, pudiendo así anticipar ciertas maniobras, y esto, no sólo aplica a caminos y carreteras sino que también a todo sector público, dejando en evidencia conductas delictivas y obviamente otorgando mayor seguridad a las personas. Actualmente con el avance de la tecnología, con la búsqueda de una mejor eficiencia y la necesidad de bajar los costos, se pone atención a la forma de iluminar.

## 1.1 Importancia de la iluminación en las vías públicas

Una revisión sistemática a cargo de investigadores de la Cochrane Collaboration (<http://www.cochrane.org>), organización internacional que evalúa las investigaciones en todos los aspectos de la asistencia médica, muestra que el alumbrado público reduce los accidentes de tráfico y las lesiones sufridas por los implicados.

“Los accidentes de tráfico no son tan sólo desafortunadas consecuencias del azar, sino que también constituyen eventos que pueden ser analizados de forma que se identifiquen los factores de riesgo y luego estos sean afrontados con medidas. La oscuridad es un factor de riesgo; el alumbrado público es por tanto una herramienta valiosa” explica la investigadora Fiona Beyer, de la Universidad de Newcastle.

Los investigadores concluyeron analizando datos de 14 estudios sobre los efectos del alumbrado público en la seguridad vial. Se encontró que el alumbrado público redujo el total de accidentes entre un 32% y un 55%. Además de proporcionar la visibilidad adecuada para el normal desarrollo de las actividades tanto vehiculares como peatonales, es de importancia dotar a las ciudades de una luz suficiente para garantizar la visibilidad y seguridad. El alumbrado es utilizado cada vez con más frecuencia para crear un entorno nocturno que dote de identidad propia a la ciudad.

### 1.2 Normativas y estándares usados en iluminación de alumbrado público

Las normas o estándares pueden usarse mediante su aplicación directa o mediante su adopción, modificando la norma internacional para adaptarla a las condiciones locales. Esta adopción permite crear normas nacionales equivalentes, que son substancialmente las mismas en cuanto al contenido técnico, pero pueden variar en apariencia, uso de símbolos, unidades de medidas o requisitos específicos dependiendo del sector de aplicación. Las normas internacionales son una forma de salvar las barreras técnicas para el comercio internacional derivadas de las diferentes normas y reglamentos desarrollados por cada país, por organizaciones de normalización nacionales o por las empresas.

La Comisión Internacional de la Iluminación, CIE, es la autoridad internacional en luz, iluminación, color y espacios de color. Las normativas actuales usadas en Chile están basadas mayoritariamente en los reglamentos dictados por esta organización.

Existe la necesidad de promulgar un Reglamento de alumbrado público de vías de tráfico vehicular por parte de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, SEC, basado en la experiencia e incorporando los aspectos normativos relevantes, basado en los recientes desarrollos tecnológicos asociados a dichas instalaciones, particularmente en lo que respecta a seguridad, con el fin de prever cualquier hecho que cause o pueda causar daño a las personas. Este reglamento es de aplicación obligatoria para el servicio de alumbrado sean públicas, privadas, urbanas o rurales, con la finalidad de satisfacer, entre otras, las condiciones básicas de iluminación de calzadas. Al cumplir estas cualidades se podrá salvaguardar, facilitar y mejorar tanto el tráfico de vehículos como el de peatones, con el fin de resguardar a las personas y los bienes.

La SEC se basa en normas, códigos, reglamentos, especificaciones extranjeras, así como prácticas recomendadas de ingeniería, internacionalmente reconocidas entre las cuales se encuentran y son de importancia para este trabajo:

1. CIE 140-2000.

Titulado “Road lighting calculations”. Este informe viene a actualizar y reemplazar la CIE 30.2-1982, “Calculation and measurement of illuminance and luminance in road lighting”, el cual incluye el cálculo de iluminancia, luminancia, medida de uniformidad y las convenciones sobre la forma de medir iluminancia y luminancia. Esta norma establece el cálculo de la ubicación de los puntos de medición, formados por una grilla de puntos sobre la calzada.

2. CIE 115-2010.

Titulado “Lighting of roads for motor and pedestrian traffic”. Este informe es una revisión y actualización del informe CIE 115-1995 válida para iluminación de caminos para tráfico motorizado y peatonal. Fue necesaria una revisión y actualización debido a que el

consumo eléctrico y el aspecto ambiental se han hecho cada vez más importantes, ha mejorado el funcionamiento de las luminarias, lámparas y controladores. Además se considera las clases de luminarias, la percepción, volumen de tráfico, condiciones meteorológicas entre otras.

3. NSEG 9. En. 71.

Titulada “Alumbrado público en sectores urbanos”. Esta norma tiene por objeto fijar los niveles mínimos de iluminación de calles y las condiciones en que estos niveles deben ser obtenidos. Estas consideraciones enmarcan el contexto físico en el cual trabajará la plataforma diseñada en este trabajo, influyendo en su forma y modo de operación.

4. CIE 69-1987.

Norma titulada “Methods of characterizing Illuminance meters and luminance meters: Performance, characteristics and specifications”, en la cual se definen las propiedades de los fotómetros y los cabezales de fotómetros para las mediciones de iluminación, esto es, el tipo de sensor idóneo para la medición. Se ofrecen métodos de calibración y se describen las fuentes de error.

### 1.3 Fundamentos de la medición

Debido al mantenido crecimiento del parque automotriz se hace necesario una normativa y estandarización de los caminos y carreteras en Chile, formando un conjunto de normas provenientes de distintos estamentos regularizadores, que deben converger en estándares de calidad proveyendo seguridad y confort para los usuarios. Estos son los componentes de construcción, marcaje y señalización e iluminación. Este trabajo se centra en la iluminación, precisamente, en la medición de iluminancia con una plataforma robótica móvil.

La medición de iluminación tiene como pilar la comprobación de niveles de iluminancia que tiene como base normas y recomendaciones nacionales e internacionales.

#### 1.3.1 Definición de iluminancia

La iluminancia (E) es la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie por unidad de área como se muestra en la ecuación (1-1).

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (1-1)$$

Donde,

E= Iluminancia [Lux].

$\Phi$ = Flujo luminoso [Lumen].

S= Superficie [m<sup>2</sup>].

La iluminancia depende de la distancia del foco al objeto iluminado, la intensidad disminuye a medida que crece la distancia hasta perderse. Lo que ocurre con la iluminancia se conoce por la ley inversa de los cuadrados que relaciona la intensidad luminosa (I) y la distancia de la fuente como se indica en la ecuación (1-2).

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (1-2)$$

Donde,

E = Iluminancia. [Lux]

I = Intensidad luminosa. [Lumen]

r = Distancia entre la fuente de luz y el punto. [m]

Gráficamente esta relación entre iluminancia, intensidad y distancia se puede observar en la Figura 1-1.

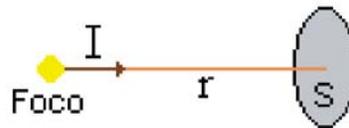


Figura 1-1 Relación de iluminancia y distancia (fuente: <http://recursos.citcea.upc.edu>)

Esta ley es válida sólo si la dirección del rayo de luz incidente es perpendicular a la superficie. Si el rayo no es perpendicular a la superficie, se descompone la iluminancia recibida en una componente de iluminancia horizontal e iluminancia vertical a esta superficie. A grandes rasgos según la gráfica estas componentes se pueden obtener como se indica en la Figura 1-2.

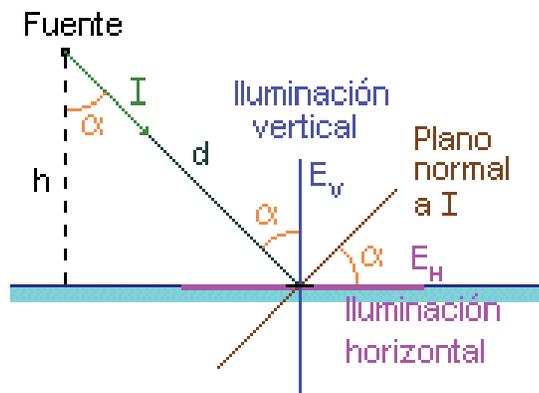


Figura 1-2 Componentes que inciden en la iluminancia (fuente: <http://recursos.citcea.upc.edu>)

Las componentes se muestran en las ecuaciones (1-3) y (1-4).

$$E_H = \frac{I \cos \alpha}{d^2} \quad (1-3)$$

$$E_V = \frac{I \sin \alpha}{d^2} = E_H \tan \alpha \quad (1-4)$$

Donde,

$E_H$  = es la iluminancia horizontal sobre el punto en lux;

$E_V$  = es la iluminancia vertical.

$I$  = es la intensidad medida en  $cd/klm$  en la dirección del punto;

$\alpha$  = es el ángulo de incidencia de la luz en el punto;

$d$  = es la distancia entre la fuente de luz y el punto.

En cuanto a la iluminancia horizontal está se puede precisar de mejor forma, considerando todos los factores que inciden en ella como se indica en la ecuación (1-5).

$$E_H = \sum \frac{I(C, \gamma) * \cos^3 \varepsilon * \emptyset * MF}{H^2} \quad (1-5)$$

Donde,

$E_H$  = es la iluminancia horizontal sobre el punto en lux.

$\Sigma$  = indica la suma de las contribuciones de todas las luminarias.

$I(C, \gamma)$  = es la intensidad medida en  $cd/klm$  en la dirección del punto.

$\varepsilon$  = es el ángulo de incidencia de la luz en el punto.

$\gamma$  = es el ángulo fotométrico vertical.

$H$  = es la altura de montaje en metros de la luminaria.

$\emptyset$  = es el flujo luminoso inicial en  $klm$  de la lámpara o lámparas en la luminaria.

$MF$  = es el producto del factor de mantenimiento del flujo de la lámpara y del factor de mantenimiento de la luminaria.

El informe CIE 140 considera dos formas de calcular la iluminancia. La primera es la antes nombrada, también denominada iluminancia planar sobre un plano horizontal, considerando así la superficie de la calzada o vereda. La otra es la iluminancia semicilíndrica considerando 1,5 metros por sobre la superficie de interés. Este parámetro varía con la dirección de interés. En una calle ésta se toma como dirección longitudinal.

La iluminancia semicilíndrica en un punto puede ser calculado según la ecuación (1-6).

$$E_{sc} = \sum \frac{I(C, \gamma) * (1 + \cos a_{sc}) * \cos^2 \varepsilon * \sin \varepsilon * \Phi * MF}{\pi * (H - 1,5)^2} \quad (1-6)$$

Donde,

$E_{sc}$  = es la iluminancia semicilíndrica mantenida sobre un punto, en lux.

$\Sigma$  = indica la suma de las contribuciones de todas las luminarias.

$I(C, \gamma)$  = es la intensidad medida en  $cd/klm$  en la dirección del punto.

$a_{sc}$  = es el ángulo entre el plano vertical conteniendo el vector de intensidad y el plano vertical en ángulo recto sobre la superficie plana del semicilindro como muestra la siguiente figura.

$\varepsilon$  = es el ángulo de incidencia de la luz en el punto.

$\gamma$  = es el ángulo fotométrico vertical.

H = es la altura de montaje en metros de la luminaria.

$\Phi$  = es el flujo luminoso inicial en  $Klm$  de la lámpara o lámparas en la luminaria.

La ecuación se basa en la Figura 1-3.

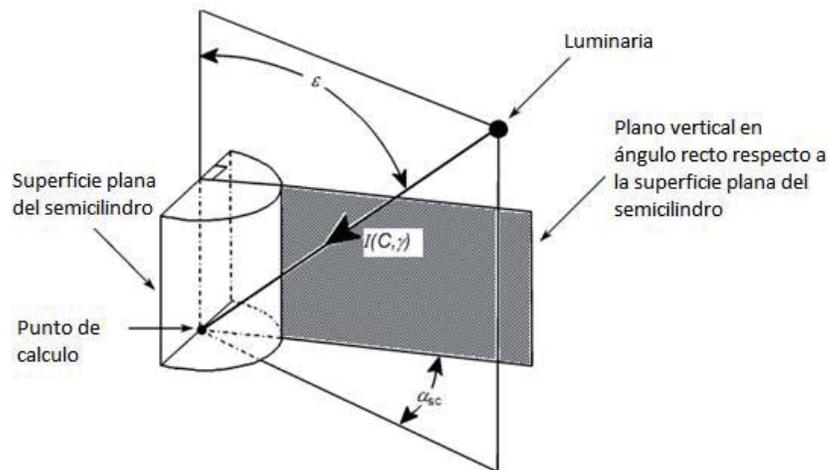


Figura 1-3 Ángulo usado en el cálculo de la iluminancia semicilíndrica (fuente: <http://www.cie.co.at>)

### 1.3.2 Matriz de puntos de medición de iluminancia

La norma CIE 140-2000 se titula “Cálculo de iluminación en carreteras” y es una mejora de la antigua CIE 30.2-1982. Esta incluye las convenciones de cálculo de iluminancia, luminancia y sus medidas de uniformidad. Para este trabajo, la CIE 140-2000 define la forma de calcular cada uno de los puntos de interés respecto a la iluminancia horizontal.

El área de interés debe ser una zona en la cual se requiera una mejora de tecnología respecto a las luminarias instaladas o simplemente para verificar las condiciones actuales en una muestra significativa dentro de una carretera o camino. Esta puede incluir aceras y ciclovías. Como se muestra en la Figura 1-4, esta zona debe estar delimitada por los bordes de la calzada y por líneas transversales entre dos luminarias consecutivas.

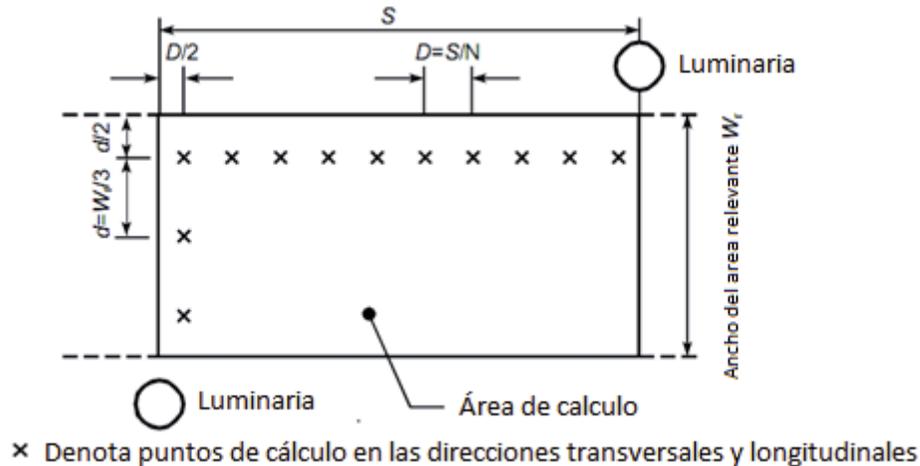


Figura 1-4 Matriz de puntos de medición de iluminancia (fuente: <http://www.cie.co.at>)

El espaciado entre puntos debe ser uniforme y se disponen de manera que la plataforma robótica propuesta por este trabajo, opere tal como lo haría un grupo de operarios asignados para la tarea de forma completamente manual. Cabe destacar que la ubicación y cálculo de cada punto no varía con el uso de la plataforma respecto a la operación convencional.

#### 1. Calculo de puntos a lo largo de la calzada

El posicionamiento a lo largo de la calzada es calculado una vez ingresada las medidas de esta, dicho cálculo, basado en la norma CIE 140-2000, es realizado por el procesador que se adoptará para el proyecto.

El espaciado entre puntos debe ser uniforme y se disponen según lo siguiente. El espaciado entre puntos en esta dirección debe ser determinada según la ecuación (1-8).

$$D = \frac{S}{N} \quad (1-8)$$

Donde, D es el espaciado entre los puntos en esa dirección [m], S es el espaciado entre luminarias [m] y N es el número de puntos calculados según los siguientes valores.

Si  $S \leq 30$  metros, se debe considerar  $N=10$ .

Si  $S > 30$  metros, se considera el entero más pequeño tomando  $D \leq 3$  metros.

La primera fila de puntos debe estar espaciada a una distancia de  $D/2$  metros de la primera luminaria.

### 2. Calculo de puntos a lo ancho de la calzada

Se busca eliminar la estimación de movimiento para el desplazamiento entre puntos en el ancho de calzada. Así, el operario podrá disponer la posición de cada uno de ellos, posición que indicará la detención del carro e iniciará el proceso de medición, será una variable que ya no dependerá de la plataforma y el número de pasos de avance sino que del operario pero con un esfuerzo menor. Para lo anterior se investigará más adelante alguna tecnología. La equidistancia entre puntos a lo ancho se define por la Ecuación (1-7).

$$d = \frac{W_r}{3} \quad (1-7)$$

Donde, d es el espaciado en metros entre los puntos en la dirección transversal,  $W_r$  es el ancho en metros de la calzada o área relevante. Además el algoritmo considera el espaciado desde la luminaria al primer punto como d/2 metros como se indica en la Figura 1-4 Matriz de puntos de medición de iluminancia

### 1.3.3 Operación actual

Los fabricantes que disponen de sus luminarias en determinados sectores y/o municipalidades de Chile requieren verificar los estados de iluminación de calles y carreteras para mejorar los estándares. Este servicio lo realizan entidades capacitadas y acreditadas, entre ellas se encuentra el Laboratorio de Fotometría y Control de Calidad de la PUCV. El solicitante, y a veces en conjunto con la entidad que realiza la medición, define el lugar a medir, siendo este un lugar que necesita mejorar las condiciones de iluminación para la posterior implementación de nuevas luminarias o sólo para corroborar que dicho lugar cumple con los estándares mínimos requeridos. En el área de medición, sea vía urbana, residencial o autopista, se define una grilla de puntos de medición a evaluar según lo indica el punto 7 del reporte técnico referido a los cálculos de iluminación en carreteras CIE 140-2000 [1].

Esta medición de iluminancia en una calzada, es realizada por a lo menos tres operarios, ya que implica la corroboración de distancias entre postes, ancho de calzada, luego, el cálculo de la distancia entre cada punto de la matriz a medir, el marcaje de cada uno de estos para la posterior medición. El parámetro de interés de este trabajo, la iluminancia horizontal, es medido con un luxómetro certificado, calibrado periódicamente respecto a un instrumento patrón, y este parámetro debe ser obtenido a ras de piso, la distancia entre la luminaria y el punto de interés es de importancia y afecta en el valor obtenido.

El algoritmo de la medición realizada por operarios se muestra en la Figura 1-5.

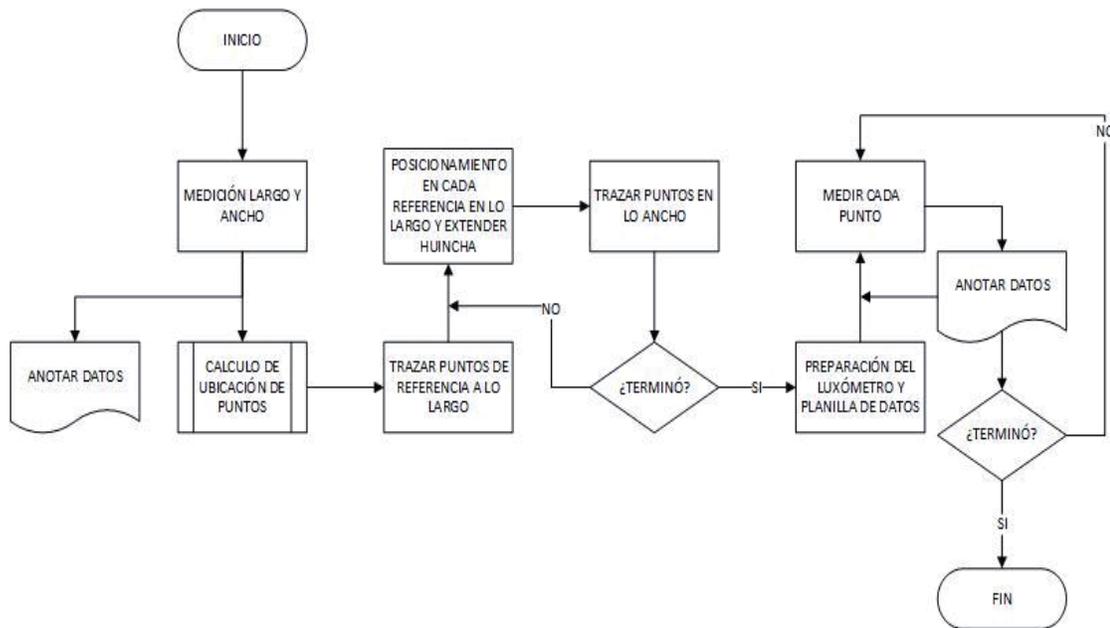


Figura 1-5 Algoritmo de medición actual realizada por operarios

El procedimiento se enlista a continuación.

1. Primero los operarios deben corroborar las medidas de la calzada: largo y ancho.
2. Luego, con las medidas del punto anterior, se calcula la interdistancia entre puntos del largo y del ancho de la calzada (cálculo de matriz de puntos).
3. Una vez obtenido el distanciamiento, se debe marcar la huincha con algún indicador. Esta servirá de patrón para el marcaje de los puntos restantes.
4. Se extiende la huincha a lo largo de la calzada y se marca con tiza en cada indicador de la huincha.
5. Una vez finalizado el marcaje en el largo, se procede a marcar una segunda huincha con la interdistancia entre puntos en el ancho. Esta huincha, servirá de patrón para el marcaje de los puntos a lo ancho.
6. Se extiende la huincha a lo ancho, a la altura del primer punto marcado en el largo y se marca la calzada según los indicadores de la huincha.
7. El paso anterior se repite para cada punto marcado en el largo de la calzada.
8. Finalizado el trazado, se prepara el instrumento de medición y la tabla para la posterior toma de datos.
9. En la operación, un operario “operario 1”, en la Figura 1-6, debe poner el filtro o sensor

del luxómetro en la superficie de la calzada y distanciarse del sensor para que su sombra no interfiera en la medición. Un segundo operario, “operario 2” es el encargado de manejar el instrumento y leer el número indicado en el luxómetro para que un tercer operario, “operario 3”, tome nota de este número.



Figura 1-6 Operarios en terreno

10. El punto anterior se repite para los  $n$  puntos marcados en la calzada. Los puntos de interés de medición no son elegidos al azar, sino más bien, son calculados y dispuestos según lo indica la norma internacional CIE 140-2000.

Al tratarse de un proceso engorroso y que es realizado a la intemperie hasta altas horas de la madrugada, y además, considerando que no existen avances, principalmente en robótica, que puedan facilitar la operación, se hace necesario identificar los factores que inciden en la medición en terreno, como es, identificar una determinada ubicación dentro de un área para luego realizar una medición; el almacenamiento ordenado y autónomo de los datos medidos; por último, el tiempo y los esfuerzos físicos que involucra la operación.

La medición trae consigo el cierre de la calle en la cual se realiza la operación. Si esta medición se realizara en una autopista o vía de alto flujo vehicular, considerando que se debe cerrar la autopista, causaría un atochamiento vehicular importante y dependerá directamente del tiempo que demore la medición.

## 1.4 Errores en el proceso de medición

El proceso que llevan a cabo los operarios en esta medición involucra una componente de error alta debida a la cadena de situaciones que se ejecutan, sumado a que la gran mayoría de estas, se hacen de forma manual y repetitiva hasta llegar a la digitalización de los resultados. En la medición participan a lo menos tres operarios. Se suma un cuarto encargado de la digitalización y procesamiento de los datos obtenidos.

Observando la Figura 1-6, un primer operario, “operario 1” posiciona el sensor o filtro que originará un dato por medio del luxómetro. Es aquí en donde comienza esta cadena de posibles errores; producidos por una mala percepción visual del dato y aproximación del dato por parte de un segundo operario, “operario 2”. Luego, la mala audición del dato y por ende un mal registro por parte del “operario 3”, además del posible truncamiento de este dato. Finalmente se debe considerar las posibles equivocaciones de un cuarto operario, “operario 4” encargado de digitalizar los datos.

Se debe considerar que esta cadena de posibles errores, se multiplicará por la cantidad de datos que haya que tomar, desvirtuando así los resultados obtenidos. Las empresas y organizaciones que se acreditan en un determinado servicio, deben estar conscientes de esta problemática, controlándola y minimizando esta variable. El proceso completo se muestra en la Figura 1-7.

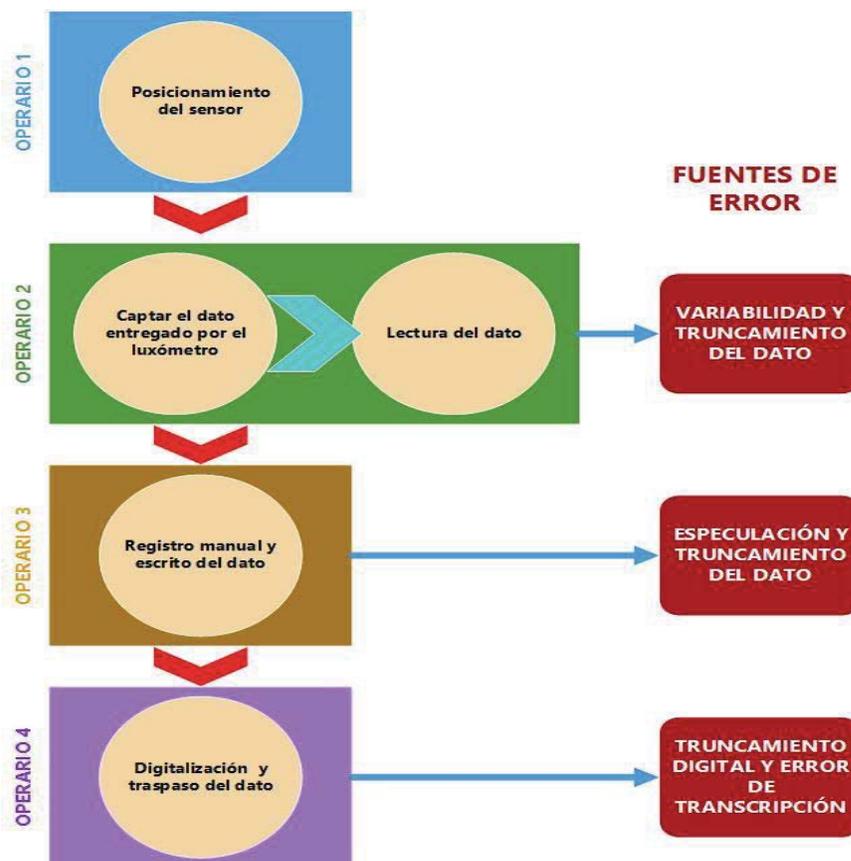


Figura 1-7 Proceso de medición y fuentes de error

### 1.5 Solución actual y solución propuesta

El Chile de hoy crece abruptamente y con ello es necesaria la interconexión entre ciudades y mejora de la calidad en los caminos y carreteras para la disminución de los tiempos de traslado, todo esto considerando el crecimiento exponencial del parque automotriz y de las ciudades. Con todo esto, los estándares en los proyectos de ingeniería se ha elevado y con ello, las exigencias de las entidades garantes y fiscalizadoras. La entidad encargada de fijar las normativas en Chile es la Superintendencia de Electricidad y Combustible, SEC. Ésta, basándose en estándares y recomendaciones internacionales, extiende el “Reglamento de alumbrado público de vías de tráfico vehicular” en el cual enlista los parámetros a respetar en los proyectos eléctricos y de iluminación entorno a caminos y carreteras.

Usualmente empresas privadas y organismos públicos necesitan medir los estándares de iluminación de los caminos y carreteras que administran. Al momento de medir algunos parámetros, como iluminancia, la metodología no es rápida e involucra un mínimo de 3 operarios dependiendo de la tarea. Esta operación se realiza de noche y con los cortes de tránsito pertinentes para la seguridad de los operarios. Cabe destacar las condiciones ambientales a las cuales se exponen los operarios, muchas veces trabajando hasta largas horas de la noche y a la intemperie, influyendo en la precisión del trabajo debido al cansancio y condiciones climáticas.

Primero, se elige una muestra o tramo a medir como se muestra en la Figura 1-8, entre varios kilómetros de camino o carretera.

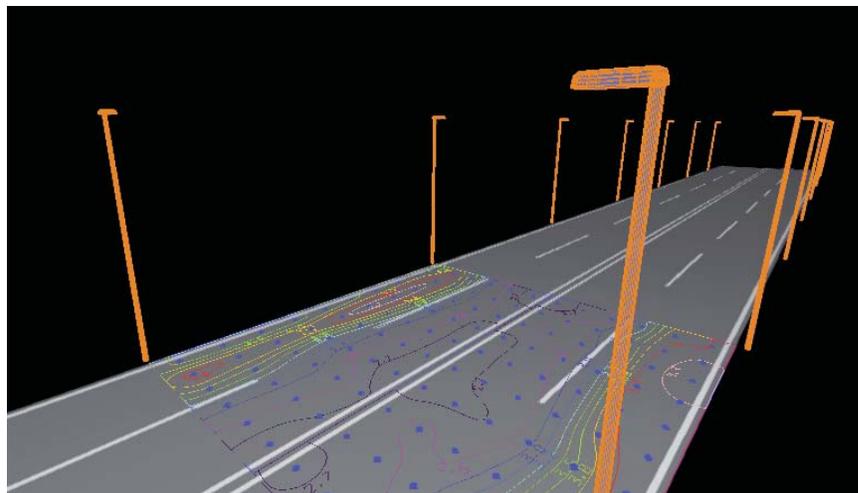


Figura 1-8 Muestra elegida para la medición

La medición se efectúa entre dos postes de alumbrado público y dependiendo del ancho de la calzada y la distancia entre los dos postes se realiza un cálculo según la norma CIE 140-2000. Esto entrega como resultado una grilla de puntos, como se muestra en la Figura 1-9 que deben ser señalizados con tiza o alguna marca notoria para la posterior medición como se indica en la Figura 1-10 .

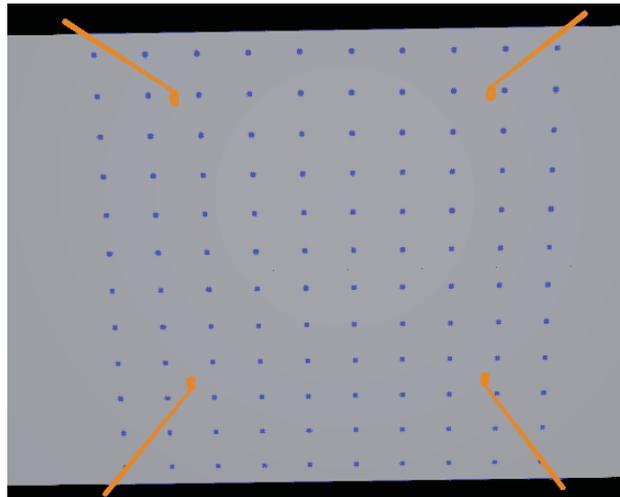


Figura 1-9 Grilla de medición



Figura 1-10 Marcaje grilla de medición

Una vez marcada la calzada en cada punto, se procede a la medición. Los operarios recorren cada uno de estos puntos tomando la medición de iluminancia. Esta medición se debe realizar con un foto sensor ubicado a ras de piso por lo cual, el operario que manipula el instrumento debe acucillarse en cada punto procurando no interferir en la medición, leer el valor indicado por el instrumento para ser anotado a mano por el segundo operario en una planilla dedicada para la tarea. Una vez finalizada la medición, estos datos deben ser digitalizados y estudiados para la presentación en el respectivo informe.

El problema que se detecta en la medición radica en la metodología. El esfuerzo físico, sobre todo a altas horas de la noche, condiciones medioambientales y lo tedioso que es el proceso, da como resultado la necesidad de optimizar el procedimiento de esta tarea debido a que es engorrosa y repetitiva. Además, el recurso humano en todas las organizaciones es valioso, no obstante siempre se busca optimizar y reducir recursos de todo tipo. Hoy, en la industria, independiente del rubro, se prefiere la automatización de los procesos, debido a que conlleva un error menor y la fatiga de los recursos no es un factor a considerar. La medición de iluminancia, por otro lado, aunque no escapa de lo anterior, no ha tenido una mayor atención por parte de las empresas dedicadas a la automatización.

Expuestos anteriormente los factores que inciden en la medición de parámetros de iluminancia, normativas y problemática, se propone mejorar los procesos de fotometría en alumbrado público, optimizando recursos, implementando una plataforma inteligente para la medición de los parámetros de interés y verificación de los estándares de iluminación.

La plataforma propuesta debe ser móvil por lo cual está dotada de actuadores, sensores de posicionamiento y debe ser capaz de obtener y almacenar las mediciones de iluminancia obtenidas desde un instrumento que cumple con la norma exigida.

Es importante mencionar que esta solución no es para los fabricantes de productos de alumbrado público ni para los organismos solicitantes del servicio sino que para el organismo ejecutor del servicio, pudiendo optimizar el recurso humano, tiempo de ejecución, resguardar la seguridad de los operarios, tiempo de procesamiento de los datos medidos y fidelidad de las mediciones obtenidas.

Describiendo el procedimiento realizado por los operarios, el escenario y las condiciones medio ambientales involucradas se ha identificado una oportunidad de mejora para el proceso de medición de iluminancia y surgen los objetivos que debe cumplir este trabajo.

### 1.5.1 Objetivo general

- Diseñar y construir una plataforma móvil con instrumentación que mida parámetros de iluminación en un escenario a escala, controlado, fácilmente proyectado para un escenario real, y se posicione automáticamente en los puntos de interés de medición.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- Implementar una plataforma móvil autónoma portátil para la adquisición de datos de iluminación.
- Diseñar un algoritmo de movimiento, basado en una matriz de coordenadas para el posicionamiento de la plataforma móvil en la matriz de medición.
- Optimizar los procesos de medición de iluminancia corrigiendo el error de la operación humana y ayudando en el proceso de medición.

## 2 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

Todo proyecto de desarrollo requiere un estudio previo del marco teórico involucrado. La solución que se propone en este informe, requiere información respecto al posicionamiento de robots, almacenamiento de datos y comunicación serial. Con respecto a cada temática, se investigan las tecnologías usadas actualmente y la factibilidad técnica de cada una de ellas con respecto a este proyecto.

### 2.1 Robótica e iluminación

La robótica ha desempeñado una labor importante en los procesos industriales y en el avance científico de vanguardia. Protagonistas, son los robots de expedición desarrollados por la NASA que básicamente son laboratorios móviles, a prueba de fallas y autorreparables mediante comunicación inalámbrica. Este es un ejemplo claro, de la medición de variables físicas.

En cuanto a la luz, se ha hecho poco al respecto. Recordando la importancia de que los instrumentos sean certificados, no hay avances desde la robótica, pero si desde la instrumentación. Hoy en día, los luxómetros ya disponen de almacenamiento inalámbrico y con una interfaz amigable que gráfica y dispone en formato de informe, los datos muestreados. Antiguamente se utilizaban instrumentos análogos que requerían anotar manualmente dato a dato.

A continuación se presenta un proyecto desarrollado por Angel Parra Rueda de la Universidad Politécnica de Madrid que utiliza como pilar fundamental el posicionamiento de un robot en un entorno determinado pero para la medición de sonido.

#### 1. Vladbot: Robot para el posicionamiento de medida.

Este proyecto busca diseñar un robot autónomo para el posicionamiento de un micrófono en espacios interiores. Utiliza un software libre como base del sistema y ofrece comunicación inalámbrica vía bluetooth para poder controlarlo. Este robot puede llevar a cabo mediciones acústicas en una habitación sin necesidad de estar entrando y saliendo

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

constantemente a esta, pudiendo ahorrar tiempo, no obstante, no es objetivo del proyecto realizar mediciones acústicas, sino que transportar un micrófono a medida. Este robot implementa un sistema de posicionamiento a corta distancia mediante odometría. El robot se presenta en la Figura 2-1.



Figura 2-1 Vladbot (fuente: <http://oa.upm.es>)

#### 2. Roomba iRobot

Según la revista “The Economist” del año 2014 es el robot más famoso del mundo. Este robot limpiador de espacios, está dotado por múltiples sensores, entre ellos; táctiles, ópticos y acústicos y que permiten detectar obstáculos, acumular residuos y sortear desniveles. Utiliza dos ruedas independientes una de otra, que facilitan los giros en 360 grados. El robot se muestra en la Figura 2-2.

A través de los años y la experiencia, se han mejorado las versiones como por ejemplo, su algoritmo de movimiento, este hace que el robot realice un patrón de limpieza habitual y vuelva solo a la base de carga cuando detecte niveles bajos de energía y no como las versiones anteriores que ejecutaban un movimiento sin ningún patrón determinado.



Figura 2-2 Robot limpiador Roomba iRobot (fuente: <https://www.irobot.es/>)

Si bien, ninguno de los dos proyectos anteriormente descritos realiza medición de niveles de iluminación, no obstante, si utilizan geo-posicionamiento y odometría para la ubicación y visión artificial para la busca de patrones. Estos factores, pueden ayudar en un proyecto orientado a esta área, para la medición en puntos precisos de alguna zona determinada.

## 2.2 Tecnologías para el proyecto

### 2.2.1 Sistemas de posicionamiento y tecnologías para el control de movimiento

Para todo proyecto de robótica móvil la piedra angular es el posicionamiento. El problema de la localización no se responde con saber la ubicación actual, ¿dónde estoy?. Localización es más que una posición absoluta, más bien, significa conocer el entorno e identificar la posición relativa de la plataforma en ese entorno en cada momento. Este problema dista mucho de estar resuelto y no existe una única solución, lo más usual es la combinación de un método de posicionamiento relativo y otro absoluto basado en distintas tecnologías dependiendo de la precisión requerida.

#### 1. Posicionamiento relativo (dead-reckoning)

El posicionamiento relativo, se basa en el conocimiento de la posición actual respecto de una posición inicial realizando mediciones en cada cambio de ubicación. Esta metodología conlleva problemas de error acumulativo pero con una clara facilidad de implementación y procesamiento.

La odometría y la navegación inercial componen este tipo de posicionamiento. La odometría utiliza sensores en las ruedas del robot llamados encoders, estos miden el giro de cada rueda y lo extrapolan a una determinada distancia de recorrido. Dentro de sus ventajas ofrece buena precisión a corto plazo, precio reducido y facilidad de implementación comparado con otros métodos, alta velocidad de muestreo y no necesita referencias externas, pero sus desventajas radican en el error acumulativo y la inconsistencia de movimiento causado principalmente por derrapes, por lo cual se necesita otro sistema de posicionamiento que lo complemente.

Por otro lado, el sistema de navegación inercial es un conjunto de sensores empleados para obtener la aceleración en cada uno de los tres ejes de movimiento, X, Y y Z. A partir de unos sensores de movimiento (acelerómetros), unos sensores de rotación (giroscopio) y un pequeño computador es capaz de estimar la posición, orientación y velocidad de un objeto sin necesidad de una referencia externa.

A continuación se describirá cada uno de estos sensores en detalle.

#### a. Encoders

Los encoders, en español codificador o decodificador, pueden monitorear electrónicamente la posición de un disco conectado a un eje giratorio. Este disco está hecho de vidrio o plástico y se encuentra codificado con partes transparentes

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

y otras opacas bloqueando o dejando pasar la luz emitida comúnmente por emisores infrarrojos como se muestra en la Figura 2-3.

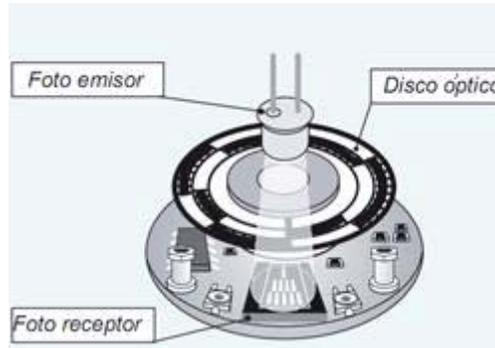


Figura 2-3 Composición de un encoder (fuente: Adrian Fernandez S.)

A medida que el eje rota, el emisor infrarrojo emite luz que es recibida por el sensor óptico o foto transistor del otro lado, generando pulsos digitales a medida que la luz cruza a través del disco. Esto produce una secuencia que puede ser usada para controlar el radio de giro, dirección de movimiento e incluso velocidad.

Existen básicamente dos tipos de encoders según su diseño básico y funcionalidad: encoder incremental y encoder absoluto.

#### b. Acelerómetros

Estos sensores están pensados para medir la aceleración o vibración, proporcionando una señal eléctrica según la variación física de estas magnitudes. La aceleración es la tasa de cambio de la velocidad de un objeto. Los acelerómetros pueden medir en uno, dos o tres ejes (x,y,z) como se ilustra en la Figura 2-4.

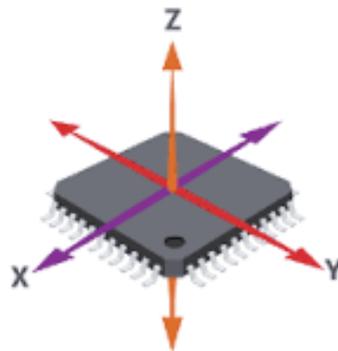


Figura 2-4 Ejes de medición de un acelerómetro (fuente: <http://diwo.bq.com>)

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

Generalmente, los acelerómetros contienen placas capacitivas internas. Algunas de estas son fijas, mientras que otras están unidas a resortes minúsculos que se mueven internamente conforme las fuerzas de aceleración actúan sobre el sensor. Como estas placas se mueven en relación el uno a la otra, la capacitancia entre ellas cambia y a partir de este cambio se puede determinar la aceleración.

#### c. Giroscopios

Son dispositivos que miden el movimiento de rotación. Estos se encuentran en la mayoría de los sistemas de navegación autónomos como aviones y barcos.

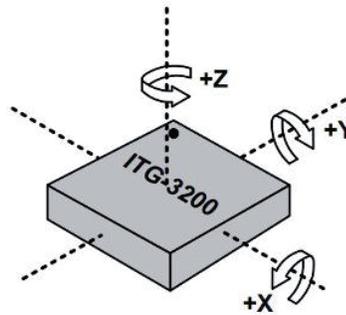


Figura 2-5 Ejes de giro del giroscopio (fuente: <http://cursos.olimex.cl>)

Cuando un objeto gira alrededor de un eje obtiene una magnitud llamada velocidad angular. Generalmente se utilizan en objetos que no están girando muy rápido y pueden medir en los tres sentidos como muestra la Figura 2-5.

Hay muchas especificaciones que influyen en la elección de un giroscopio como lo es el alcance, sensibilidad y off set.

#### 2. Posicionamiento absoluto (reference – based systems)

Se puede calcular la posición de un robot o sistema inteligente con la ayuda de un sistema de referencia externo, por esto se consideran tres métodos para este tipo de posicionamiento.

##### a. Marcas naturales y artificiales (landmarks).

Son diferentes elementos que un robot puede reconocer con un sensor. Pueden ser formas geométricas (rectángulos, líneas, círculos, etc) y estas pueden incluir información extra. Estas marcas tienen una posición conocida de forma que el robot pueda posicionarse. Deben poder identificarse en el entorno, considerando el contraste con el terreno.

Las marcas naturales pueden ser puertas, esquinas, baldosas, etc. y los sensores a utilizar generalmente son para el uso de visión artificial por lo cual requieren un

robusto algoritmo de visión y suele ser más compleja la implementación, no obstante, el uso de sensores infrarrojo permite un algoritmo más simple.

Un tipo de navegación por marcas es la navegación de línea, donde el robot sigue una línea dispuesta en el piso y que puede ser electromagnética, reflectante o con alto contraste con el piso pero este sistema restringe la libertad de movimiento sólo al camino demarcado por la línea.

Dentro de las ventajas de la navegación por marcas, se ofrece una gran flexibilidad y economía en la implementación de marcas artificiales además de contener más información por ejemplo usando etiquetas o tags.

Contrapuesto a lo anterior, la distancia de las marcas al robot deben ser lo suficientemente cortas, la precisión dependerá de esta distancia. También, las condiciones climáticas influirán en un entorno con baja visibilidad. Las marcas deben ser conocidas para conseguir un buen posicionamiento.

#### i. Basada en mapas (map matching)

El robot puede ser capaz de generar mapas del entorno por medio de sus sensores y los compara con un mapa almacenado en su memoria, pudiendo así calcular la posición actual en base a una información previa.

Dentro de las ventajas se encuentra que no es prescindible modificar el entorno, puede crear un mapa de un lugar desconocido y permite al robot aprender sobre su entorno.

Por otro lado el entorno debe ser estacionario para su reconocimiento y es necesaria una buena cantidad de sensores de alta resolución y un excelente algoritmo y procesamiento.

#### ii. Basada en balizas

Es uno de los métodos de posicionamiento más utilizados, para barcos y aviones. Las balizas pueden ser detectadas con precisión y permite una alta frecuencia de muestreo.

Una baliza puede ser activa si emite una señal, sea del tipo que sea, o pasiva, si no emite. Esta navegación logra alta precisión y fiabilidad acompañado de una buena velocidad de respuesta, pero es necesario modificar el entorno y requerir alimentación eléctrica para las balizas. Además, debe mantener visibilidad con las balizas (línea vista) y es necesario tomar en cuenta las tecnologías que trabajan en la zona de aplicación, ya que estas son vulnerables a la radiación.

- Balizas ultrasónicas

Emiten una señal de tipo ultrasónico. Poseen un emisor y un transmisor de señal. El transmisor emite un pulso de ultrasonido que rebota sobre un objeto sólido y la reflexión de ese pulso es detectada por el receptor.

En el caso de las balizas, el transmisor está en la baliza y el receptor en el robot. Generan un pulso con un campo de acción cónico, por lo que puede dar errores si se coloca a un nivel muy cercano al suelo. Midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del pulso y la recepción del eco se puede establecer la distancia a la que se encuentra el objeto.

Si se utilizan varias balizas simultáneamente, lo común es asignar un periodo de repetición de señal distinto para así poder diferenciarlas.

- Balizas de radio

Son transmisores no direccionales que normalmente transmiten una señal constante a una frecuencia específica. Actualmente se usan para el reconocimiento de mapas de robots y para guías de interiores con sistemas de localización en tiempo real (RTLS).

- Balizas luminosas

Emiten un tipo de señal en base a luz, por lo cual el robot se debe encargar de buscar los puntos de mayor intensidad. Para este proyecto, esta opción es totalmente descartable debido a que se necesita medir iluminancia por lo cual, estas marcas, pueden alterar la medición.

- Balizas de infrarrojos

Una baliza infrarroja es un dispositivo que contiene un emisor de luz infrarroja. Este haz de infrarrojos es proyectado de forma que dependerá de la baliza que se esté utilizando, pudiendo ser percibido por el robot dotado con algún sensor de infrarrojo. El infrarrojo muestra cuanto calor posee algún objeto. Los objetos calientes brillan más luminosamente en el infrarrojo porque irradian más calor y más luz infrarroja.

El problema principal de este tipo de balizas es el corto alcance y la precisión necesaria de visión entre el emisor y el receptor, lo cual lo hace descartable para este proyecto.

#### 3. Otros sensores y formas de posicionamiento

##### a. Sistema de posicionamiento global, GPS

Los sistemas de posicionamiento mediante estaciones móviles operando desde satélites son hoy en día los de mayor interés para robots móviles. El GPS (Global Positioning System) emplea una constelación de 24 satélites orbitando la tierra. Empleando al menos tres satélites como se muestra en la Figura 2-6, el receptor calcula por trilateración la altitud, latitud y longitud del vehículo de forma “instantánea y continua” (30 y 60 nseg).

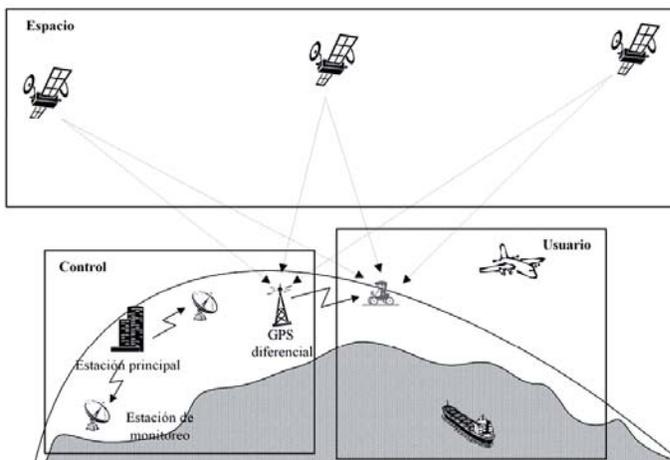


Figura 2-6 GPS y sus componentes: Espacio, control y usuario (fuente: Ricardo Galvo)

La precisión del GPS depende de numerosos factores, algunos comunes a otros sistemas de posicionamiento mediante radio- frecuencias como por ejemplo la línea de visión. Esta precisión llega a ser inferior a 20 metros para vehículos con movimiento e inferior a 10 metros para medidas estacionarias. Sin embargo el empleo del GPS diferencial, basado en el empleo de una estación terrena fija de coordenadas conocidas permite el incremento de la precisión. En el mercado existe una variada gama de GPS dependiendo de la precisión.

##### i. Piksi

Es un producto creado por Swift Navigation, ilustrado en la Figura 2-7, que además de usar el algoritmo común de todos los GPS del mercado, utiliza RTK (Real Time Kinematics) con una precisión de centímetros. Pero esta precisión de centímetros no se puede obtener con un sólo receptor, por lo que el uso de dos tarjetas Piksi, una en la estación base y la otra en el vehículo, ambas conectadas por radio, pueden hacer una lectura mucho más exacta.

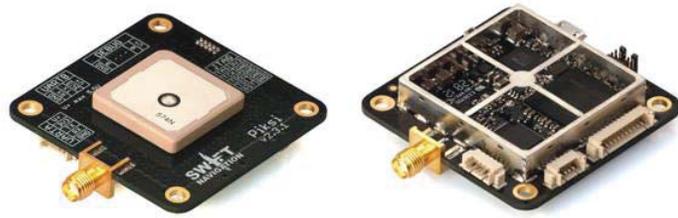


Figura 2-7 Piksi de Swift navigation (fuente: <https://www.swiftnav.com>)

Pese a promocionarse como un GPS de alta precisión y bajo costo, actualmente una de estas antenas tiene un valor de 495 dólares. Pues claro, el valor es bajo para las tecnologías que habían hasta hace un par de años con esta precisión.

#### ii. GPS L80

Actualmente disponible en Chile, es una placa de bajo costo y de fácil implementación. Una de las desventajas que posee, y como muchas otras placas GPS, es que necesita trabajar en un lugar abierto, sin techo, además de la precisión de varios metros, factor determinante en este proyecto. Este dispositivo se muestra en la Figura 2-8.



Figura 2-8 Tarjeta GPS L-80 (fuente: <https://www.olimex.cl>)

Si bien el precio de este módulo es bajo (alrededor de 30 mil pesos) la precisión no es buena para este proyecto.

#### b. LIDAR y escáner láser

LIDAR es el acrónimo de Light Detection and Ranging (Detección por luz y distancia) y es el resultado de la integración de tecnologías como la unidad de medición inercial y un sensor láser.

Con este completo sensor se generan mapas de terrenos representando distancias reales y el error en su medición es de unos pocos milímetros, pero tienen un elevado costo.

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

Su medida se basa en la medida del tiempo de vuelo según lo indica la Figura 2-9. Este sensor hace un barrido angular para detectar objetos y además es capaz de generar mapas del terreno que ha sido sentido.

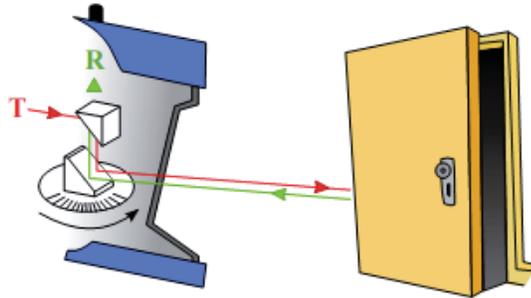


Figura 2-9 Principio de funcionamiento interno del láser.

En el mercado existen sensores láser, LIDAR, muy avanzados y dependiendo de las prestaciones, estas serán proporcional al valor. Por ejemplo, el sensor TIM551 de la marca SICK, en la Figura 2-10, es uno de los más pequeños de la marca, con buen rendimiento y un hardware sólido. Posee detecciones hasta los 10 metros con una resolución de 1 grado y más menos 60 mm de exactitud. Posee un campo visual de 270 grados y conexión Ethernet y USB. El valor actual es de aproximadamente 2000 dólares.



Figura 2-10 Sensor Sick Tim 551 (fuente: <http://robotsforroboticists.com>)

Otro sensor LIDAR en el mercado es el ofrecido por la empresa norteamericana Sparkfun. El modelo LIDAR-Lite v2 es un sensor muy compacto que funciona con protocolo I2C o señales PWM, perfectamente compatible con la tarjeta Arduino y tiene un rango de emisión de hasta 40 metros y un costo cercano a los 120 dólares, el cual se muestra en la Figura 2-11.



Figura 2-11 Sensor Lidar Lite V2 (fuente: <https://www.sparkfun.com>)

#### c. RTLS

Del acrónimo Real Time Location System (sistema de localización en tiempo real), es el uso de la tecnología RFID (Identificación por radiofrecuencia) para localizar la ubicación específica de un objeto, utilizando un tag activo para triangular la posición, esto es, la medición de distancia desde tres puntos de acceso situados en un área específica. En primer lugar, una señal es enviada desde el tag a un punto de acceso en la antena, luego la distancia se calcula a partir del tiempo de vuelo de la señal. Conocer la distancia respecto a tres puntos conocidos le permite triangular la posición con excelente precisión.

A pesar de sus ventajas no es fácil de implementar debido a las diversas anomalías RF que pueden sesgar la medición (reflexiones, refracciones, absorción e interferencia). Tiene un alcance de 2 a 5 metros y el costo del tag activo y el hardware RTLS es muy elevado. Otra forma de realizarlo es mediante Wi-Fi pero esto requiere un proveedor para cada modem y la implementación en terreno es poco viable.

El sistema ofrecido por Nanotron es muy preciso y consta de varias “anclas” que pueden ser instaladas en los dispositivos a localizar, como se muestra en la Figura 2-12. Previo a esto es necesario tener una red instalada, como Ethernet. La precisión es de 1 a 2 metros dependiendo si se encuentra en interior o exterior. El costo de cada tag bordea los 700 euros y un kit RTLS puede llegar a la suma de 4000 euros.

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma



Figura 2-12 Tags y anclas Nanotron (kit RTLS). (fuente: <https://www.nanotron.com>)

La implementación de tags de cualquier tipo requiere un preciso posicionamiento de cada una de ellas ya que la plataforma debe trabajar con ubicaciones conocidas.

Las tecnologías mencionadas se enlistan y resumen en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1 a Características de las tecnologías

Tecnolog.	Ventajas	Desventajas	Error	Alcance	Costo
Encoders	Precisión a corta distancia. Fácil procesamiento. Fácil implementación.	Error acumulativo. Error por derrapes.	<500 rpm	1024 puls/rot	\$38.990
IMU	No necesita información física del exterior.	Error acumulativo.	1 mradian por mili-g de error	----	\$34.990

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

Tabla 2-1 b Características de las tecnologías

Tecnolog.	Ventajas	Desventajas	Error	Alcance	Costo
Landsmark	No requiere modificar entorno. Proporciona más info.	Necesita una posición definida. Deben diferenciarse del entorno. Algoritmo robusto de visión. Interpolar imagen a distancia.	Depende del algoritmo de visión.	Depende del algoritmo de visión	\$5.000
Map matching	No necesita modificar el entorno. Aprende del entorno. Genera un mapa del entorno.	Requiere visión u otra tecnología avanzada. Necesita entorno estacionario. Algoritmo robusto.	Depende del algoritmo de visión	Depende del algoritmo de visión	>\$500.000
Balizas	Velocidad de respuesta. Fiabilidad	Modificar el entorno. Alimentación externa. Necesita línea vista. Vulnerable a la radiación (radio).	----	US= 30 cms Radio= 100 mts IR= 24 cms	US=\$50.000 Radio= \$7000 IR=\$11.000
GPS (L80,Piksi)	Ubicación en cualquier lugar del globo.	Trabaja en exterior.	L80 = 10mts Piksi= 1 mt	----	L80 = \$30.000 Piksi= 500 USD.

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

Tabla 2-1 c Características de las tecnologías.

Tecnol.	Ventajas	Desventajas	Error	Alcance	Costo
LIDAR	Genera un mapa del entorno. Alto alcance	Alta capacidad de procesamiento.	Entre 2 y 6 cm	10 a 40 mt	Entre 120 y 2000 USD
RTLS	Alcance	Reflexión, refracción, etc. Vulnerable a interferencias. Requiere una red instalada (ej: Ethernet) Requiere posicionamiento conocido.	1 mt	1000 mts	700 Euros por tag

## 2.2.2 Movimiento: actuadores

### 1. Servomotores

Un servomotor es un tipo de servomecanismo o dispositivo que tiene un sistema de corrección con retroalimentación para el control de un parámetro específico. Están compuestos por un motor eléctrico, un juego de engranes y una tarjeta de control, todo confinado dentro de una carcasa de plástico tal como está señalado en la Figura 2-13.

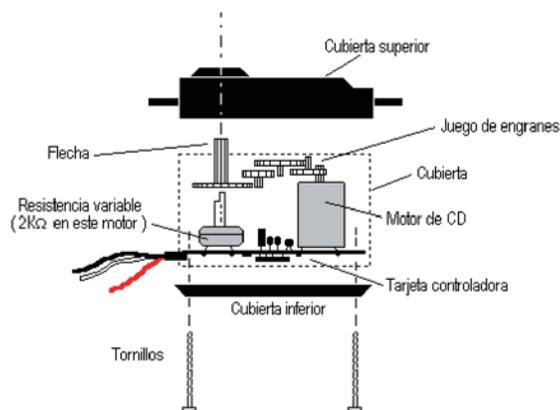


Figura 2-13 Composición interna de un servomotor (fuente: Cristian Davis)

Estos funcionan por medio de modulación de ancho de pulso (PWM). Las duraciones de cada pulso se interpretan como comandos de posicionamiento del motor, mientras que

los espacios entre cada pulso son despreciados, por lo cual, el ángulo de giro está determinado por el ancho de pulso según lo indicado como ejemplo en la Figura 2-14.

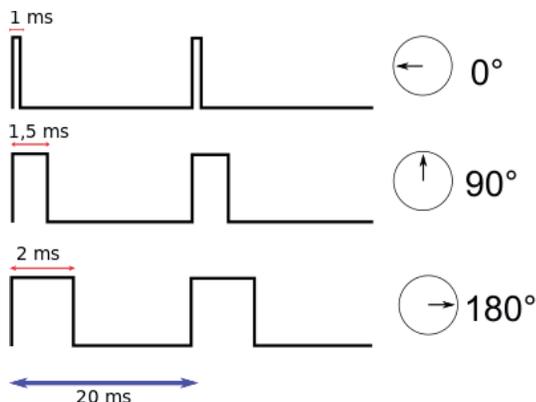


Figura 2-14 Control por PWM de un servomotor (fuente: <https://learn.adafruit.com>)

La tarjeta electrónica dentro de la carcasa interpreta las instrucciones de un controlador externo. El código de comando especifica el ángulo de rotación deseado medido como un offset en ambos lados de la posición central del rango del motor. El motor gira rápidamente a la posición específica y se detiene en ese punto. Si bien son muy precisos al momento de posicionarse con un determinado ángulo, carecen de torque para aplicaciones que requieren tracción o movilizar una mayor masa.

## 2. Motores DC

Un motor eléctrico de corriente continua o dc, en la Figura 2-15, es esencialmente una máquina que convierte energía eléctrica en movimiento o trabajo mecánico, a través de medios electromagnéticos.



Figura 2-15 Motor DC (fuente: <http://www.superrobotica.com>)

El movimiento giratorio de los motores dc se basa en el empuje derivado de la repulsión y atracción entre polos magnéticos. Creando campos constantes convenientemente orientados en estator y rotor, se origina un par de fuerzas que obliga a que la armadura o rotor gire buscando la posición de equilibrio.

No es posible controlar la posición de giro del motor, pero si su velocidad y sentido.

#### 3. Motores paso a paso

La característica principal de estos motores, ilustrado en la Figura 2-16, es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique, de ahí su nombre. Poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres. Si una o más de sus bobinas están energizadas, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas.



Figura 2-16 Motor paso a paso de uso común. (fuente: <http://www.electan.com>)

Básicamente están constituidos por un rotor sobre el que se aplican distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras bobinadas en su estator. Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Toda la conmutación o excitación de las bobinas debe ser externamente manejada por un controlador. Existen dos tipos de motores paso a paso de imán permanente: unipolares y bipolares.

Hay tres secuencias posibles para este tipo de motores. Todas las secuencias comienzan nuevamente por el paso 1 una vez alcanzado el paso final (4 u 8). Para revertir el sentido de giro, la secuencia se debe ejecutar en el sentido inverso.

La secuencia normal, mostrada en la Figura 2-17, y la más usada, el motor avanza un paso por vez y debido a que siempre hay al menos dos bobinas activadas, se obtiene un alto torque de paso y de retención.

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

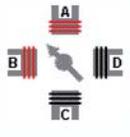
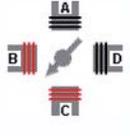
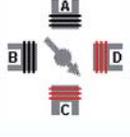
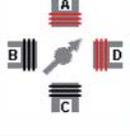
PA-SO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	ON	OFF	OFF	
2	OFF	ON	ON	OFF	
3	OFF	OFF	ON	ON	
4	ON	OFF	OFF	ON	

Figura 2-17 Secuencia de control normal de motores PAP unipolares.  
(fuente: <http://www.monografias.com>)

La secuencia del tipo wave drive es en la cual se activa sólo una bobina por vez, esto conlleva un funcionamiento más suave por ende, el torque es menor.

La tercera y última forma de controlar este tipo de motores es la del tipo medio paso en la cual se activan las bobinas de tal manera de brindar un movimiento igual a la mitad del paso real y para ello se activan primero dos bobinas y luego sólo una y así sucesivamente.

La siguiente tabla, Tabla 2-2, resume las ventajas y desventajas principales de los actuadores comúnmente usados.

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

Tabla 2-2 Ventajas y desventajas de los actuadores de común uso.

Tecnolog.	Ventajas	Desventajas
Servomotor	Exactitud de posición. No consume mucha energía.	Poco torque para esta aplicación.
Motor DC	Alta velocidad de giro.	Necesita un encoder para el control de posición.
Paso a paso	Alto torque.	Alto consumo de corriente. Necesita una fuente externa.

#### 2.2.3 Procesadores y placas de desarrollo

Debido a que este proyecto automatiza el procedimiento de medición de iluminancia, es preciso indagar en las formas de almacenamiento de los datos medidos. Para esto, es necesario controlar en qué momento se debe realizar una toma de datos, acción que requiere cierta inteligencia, control y coordinación de tareas, noción espacio-temporal y orden en el almacenamiento.

##### 1. Microcontrolador PIC

Hace unos años, al momento de pensar en un proyecto a baja escala y asequible era inevitable pensar en trabajar con estos circuitos. Los microcontroladores son computadores digitales integrados en un chip que cuenta con un microprocesador o unidad de procesamiento central, una memoria para almacenar el programa, una memoria para almacenar datos y puertos de entrada y salida. A diferencia de los microcontroladores de propósito general, como los usados en los PC, los microcontroladores son unidades autosuficientes y más económicas.

El funcionamiento los microcontroladores, en la Figura 2-18, está determinado por el programa almacenado en su memoria. Este puede escribirse en distintos lenguajes de programación y pueden reprogramarse repetidas veces. Dadas las características y su alta flexibilidad, los microcontroladores son ampliamente utilizados como la base de una gran variedad de sistemas embebidos que controlan componentes de sistemas complejos, como aplicaciones industriales de automatización y robótica, domótica, equipos médicos e incluso dispositivos de la vida diaria.



Figura 2-18 Microcontrolador de la familia 16F de Microchip (fuente: <http://www.microchip.com>)

A pesar de ser un sistema muy robusto, hoy en día, el problema que presentan es que trabajar con estos chips requiere de un extenso montaje de los circuitos debido a que es necesario, en primera instancia, un circuito para su programación, en la Figura 2-19, además de los componentes requeridos para ejecutar la aplicación para el cual fue pensado, lo cual implica un gasto de tiempo mayor, considerando que hoy existen otras tarjetas de desarrollo que proponen únicamente problemáticas entorno a la programación y no al hardware.

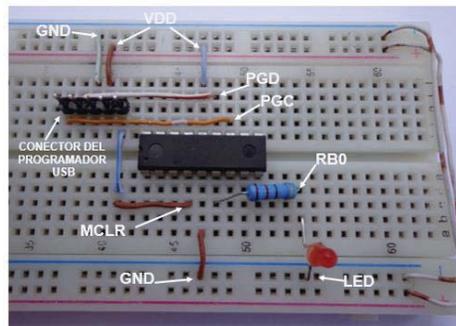


Figura 2-19 Montaje necesario para su programación (fuente: <http://tecdigitaldelbajio.com>)

## 2. Arduino

Es una de las tarjetas de desarrollo más populares en la actualidad, ya que está enfocada a todo usuario. Además tiene el respaldo de contar con muchos sensores adaptados para el uso en conjunto, lo cual es muy útil a la hora de llevar a cabo proyectos basados en mediciones físicas y de automatización doméstica.

Es una plataforma de muy bajo costo, debido a que se trata de una plataforma de hardware libre. La compañía dispone de diferentes modelos enfocados a distintas tareas pero con el mismo denominador común, son placas pequeñas, compactas y con gran capacidad de llevar a cabo tareas que van desde encender un simple led hasta el control de motores trifásicos.

Arduino es una placa basada en un microcontrolador, marca Atmel. Posee entradas y salidas digitales y analógicas. Arduino cuenta con todos los elementos necesarios para conectar periféricos a las entradas y salidas del microcontrolador, además de contar con

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

una amplia gama de modelos que resuelven distintas necesidades. Se muestran algunos modelos en la Figura 2-20.

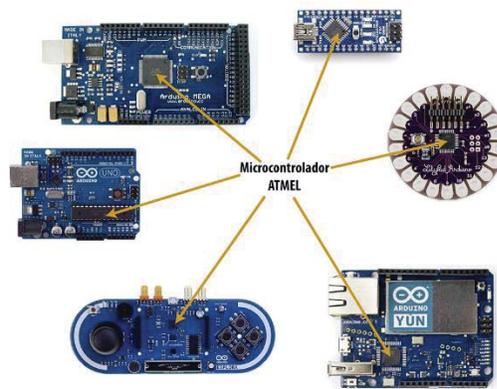


Figura 2-20 Diferentes modelos de Arduino. (fuente: <http://panamahitek.com>)

Arduino vino a presentar una solución a la problemática del hardware presente en los microcontroladores.

#### 3. Raspberry pi

Es un ordenador del tamaño de una tarjeta de crédito, que se conecta a una pantalla y a un teclado a modo de interfaz. En el modelo 2 de Raspberry se aloja un chip Broadcom BCM2835 con procesador ARM hasta a 1 Ghz de velocidad, GPU videoCore IV y hasta 512 Mbytes de memoria RAM.

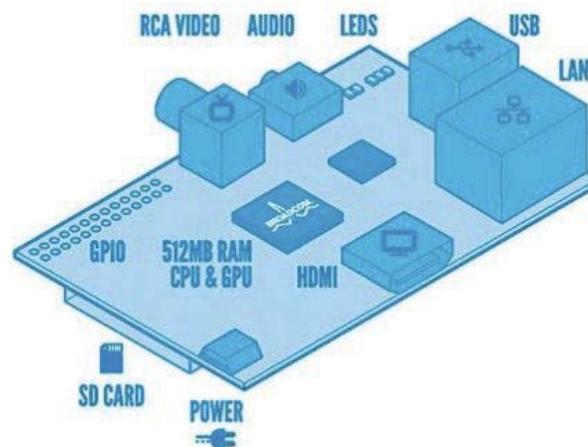


Figura 2-21 Componentes de la tarjeta Raspberry pi (fuente: <http://computerhoy.com>)

Para que funcione, basta con añadir un medio de almacenamiento como una tarjeta SD y conectarle una fuente de energía gracias a cualquier cargador de tipo microUSB. Previo a todo, es necesario instalar un sistema operativo, a modo de interfaz, generalmente basado en Linux.

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

También dispone de conexión de puertos de salida de video HDMI y otro de tipo RCA, minijack de audio y un puerto USB 2.0 al que se debe conectar un teclado y un mouse, como muestra la Figura 2-21. Tiene conexión a internet mediante cable de red Ethernet o de un adaptador inalámbrico de WiFi.

Uno de los usos más habituales es convertirlo en un media center para reproducir películas, reproducción musical e incluso hacer que ejerza de centro de control doméstico en cualquier hogar.

La siguiente tabla, Tabla 2-3, resume las principales ventajas y desventajas de los procesadores y controladores usados en proyectos electrónicos.

Tabla 2-3 Ventajas y desventajas de los procesadores de uso común.

Tecnolog.	Ventajas	Desventajas
PIC	Mucha información disponible. Muchísimos modelos que satisfacen diversas necesidades.	Necesidad de hardware previo para la programación.
Arduino	Facilidad en la implementación. No necesita hardware previo para su programación.	Procesamiento limitado para algoritmos que involucren imagen, audio y video.
Raspberry	Alta capacidad y rapidez de computo. Tiene las mismas capacidades que un PC común.	Necesita periféricos y sistema operativo para funcionar.

#### 2.2.4 Medición de iluminancia: Luxómetro

La iluminancia es la densidad de flujo luminoso incidente sobre un punto determinado de una superficie y la unidad de medida es en Lux. Este parámetro es medido por un luxómetro mediante un filtro fotosensible o coseno corrector.

Las tecnologías entorno a esta medición sólo han avanzado respecto al instrumento con el cual se mide, el luxómetro. En el mercado ya existen luxómetros que envían los datos medidos a una computadora mediante cable o inalámbricamente, entregando gráficas en una interfaz y otros resultados importantes que posteriormente facilitan el análisis al momento de estudiar el comportamiento de la luz.

Actualmente el más utilizado es el luxómetro digital por sobre el análogo, debido a las prestaciones que ofrece, el factor de corrección dependiendo de la fuente de luz a medir y las funciones de auto-rango y auto-cero. Tanto el instrumento análogo como el digital funciona con

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

una célula de silicio como sensor que es de alta precisión y estable, y con una exactitud entre el +/- 2 al 7 %.

En la oferta, este tipo de instrumento se diferencia entre sus pares por su resolución, capacidad de medición de otras variables físicas, por ejemplo temperatura, almacenamiento de datos e interfaz, luxómetros que disponen de datalogger o almacenamiento de datos funcionan con comunicación serial. Este tipo de comunicación servirá en el momento de implementar la plataforma para la recolección de datos y posterior procesamiento.

A continuación se presentan algunos instrumentos que cumplen los requerimientos para este proyecto considerando la disponibilidad en el mercado como también las prestaciones que ofrece cada uno de ellos.

#### 1. Luxómetro Extech, heavy duty light meters

Este luxómetro puede ser conectado a un PC a través de su interfaz USB. El software, que se muestra en la Figura 2-22, permite al usuario:

- Transferir memorias previamente guardadas en la memoria interna.
- Ver, trazar, analizar, guardar e imprimir los datos de la lectura.
- Control remoto del medidor a través de los botones virtuales del software.
- Registro de lectura en tiempo real. Imprime y almacena las lecturas realizadas.

El software permite al usuario ver las lecturas en tiempo real en el PC pudiendo analizar, guardar e imprimirlas.

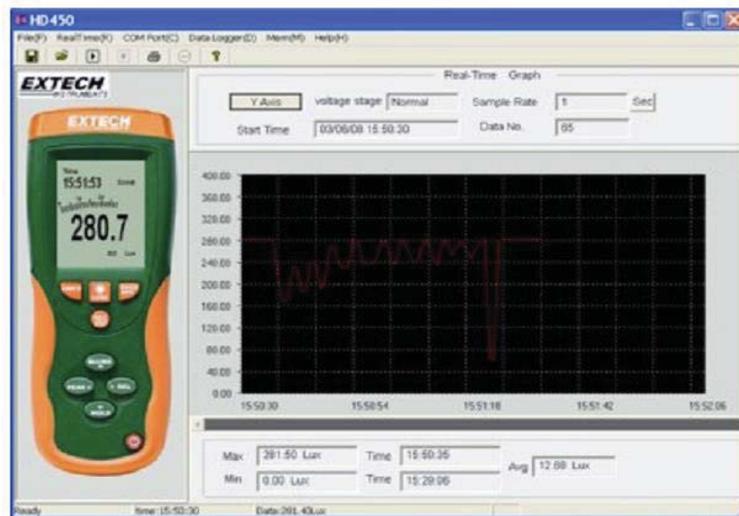


Figura 2-22 Interfaz datalogger luxómetro Extech. (fuente: <http://www.extech.com/>)

Como se ha mencionado, los luxómetros más avanzados ofrecen un software en donde se pueden visualizar los datos en tiempo real mediante un cable USB, este factor puede ayudar en la obtención de datos por parte del procesador de la plataforma.

#### 2. Luxómetro Tektronic, LumaColor Photometer J17

El instrumento se muestra en la Figura 2-23 y tiene algunas características como:

- Auto rango.
- Auto cero.
- Lectura en unidades inglesas o métricas.
- Comunicación RS-232D.
- Cabezales o filtros intercambiables.



Figura 2-23 Luxómetro Tektronix con filtro de medición. (fuente: <http://www.tek.com>)

El luxómetro marca Tektronic será el utilizado en este proyecto ya que es el instrumento disponible en el Laboratorio de Fotometría y posee las certificaciones y calibraciones requeridas por las normas que rigen el procedimiento de la medición de iluminancia.

### 2.3 Disposiciones típicas para la locomoción en robótica móvil

Los robots móviles se pueden clasificar por el tipo de locomoción utilizada, en general se pueden movilizar de tres formas: Ruedas, patas y orugas.

El mayor desarrollo se ha hecho en los RMR (Robot móvil con ruedas) es por esto que se centrará la atención en el estudio de los RMR para luego poder definir como se movilizará la plataforma de medición de iluminancia.

Es importante tener clara la tarea que realizará la plataforma para poder dirimir la configuración cinemática que permitirá una óptima locomoción, considerando también las condiciones medio-ambientales del trabajo.

Se puede definir un RMR como un sistema electrónico-mecánico que utiliza como locomoción ruedas de algún tipo y es capaz de trasladarse de manera autónoma por una determinada zona de trabajo. Estos se componen por un sistema cinemático y un sistema de actuadores.

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

Se tienen las siguientes configuraciones en la distribución de las ruedas con distintos comportamientos dependiendo del terreno y la tarea a realizar. Estos son:

#### 1. Ackerman

A pesar de ser fácil de implementar, puede ser más compleja que otras configuraciones debido al control necesario en la zona de direccionamiento. Los automóviles poseen esta configuración y para efectos de este proyecto, es necesario una precisión en el posicionamiento, factor que no ayudaría al momento de realizar cada giro. La disposición de las ruedas y transmisión se muestran en la Figura 2-24.

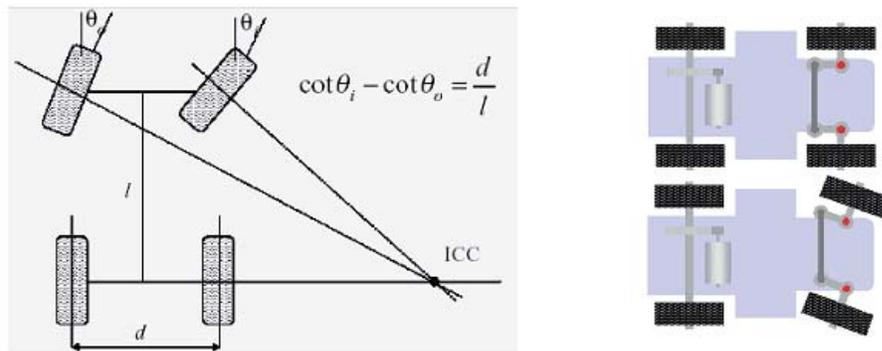


Figura 2-24 Configuración Ackerman (fuente: <http://docplayer.es>)

#### 2. Triciclo

Fácil de implementar, requiere un control desde los actuadores para un posicionamiento exacto.

Según la Figura 2-25, los actuadores estaría dispuestos en las ruedas de color verde, ya que la tercera rueda, de color rojo, es una rueda de castor o pivote, por lo cual, el control del posicionamiento lo administran las ruedas de color verde.

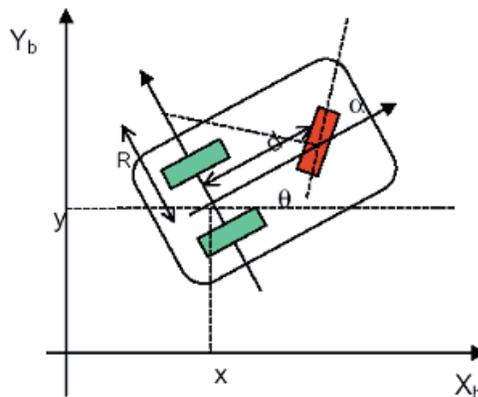


Figura 2-25 Configuración tipo triciclo. (fuente: <http://docplayer.es>)

3. Diferencial

Esta configuración no posee ruedas directrices como se muestra en la Figura 2-26. Los giros son controlados modificando la velocidad de cada actuador. Es un sistema barato y sencillo de implementar pero requiere un control de corrección de trayectoria para movimientos rectos.

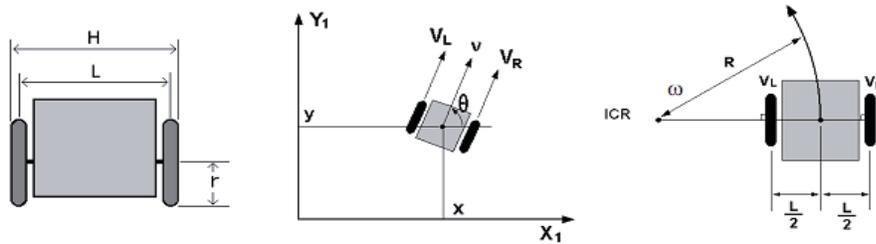


Figura 2-26 Configuración diferencial. (fuente: <http://docplayer.es>)

4. Síncrona

Se garantiza un movimiento recto pero requiere un mayor control en los actuadores. Es de difícil implementación debido a que requiere un actuador bien centrado que guiará mediante una polea y una correa de transmisión la dirección de cada rueda como se muestra en la Figura 2-27.

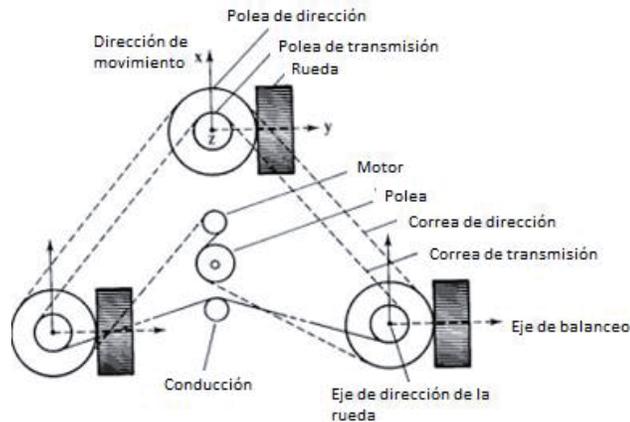


Figura 2-27 Configuración síncrona. (fuente: <http://docplayer.es>)

5. Omnidireccional

Es un diseño complejo dado que requiere un actuador por rueda como se muestra en la Figura 2-28 pero que permite mayor libertad en el movimiento sin necesidad de un giro del móvil. Posee mucho roce por ende no garantiza un movimiento recto.

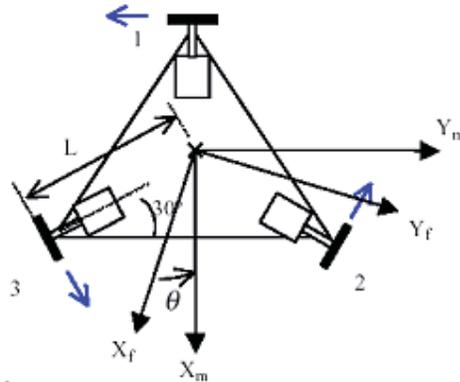


Figura 2-28 Configuración omnidireccional. (fuente: <http://docplayer.es>)

#### 6. Por deslizamiento u oruga

Dada la naturaleza de su configuración, necesita de mucho roce y esto le permite movilizarse en escenarios complejos debido a su tracción. En cuanto a los actuadores, estos realizan un excesivo consumo de corriente y la implementación es compleja debido a que necesita un diseño rueda-oruga muy preciso determinado por el número de dientes de la oruga como se ilustra en la Figura 2-29. En este caso se recomienda la compra de una plataforma base para luego implementar la electrónica, de otro modo, será dificultoso el diseño y preparación de materiales.

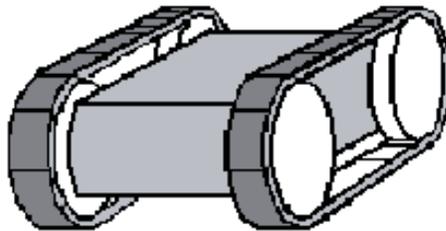


Figura 2-29 Configuración de orugas. (fuente: <http://docplayer.es>)

Dependiendo de la configuración a usar, es el tipo de rueda que se debe emplear: Rueda tipo castor, orientable centrada, fija u omnidireccional Figura 2-30.

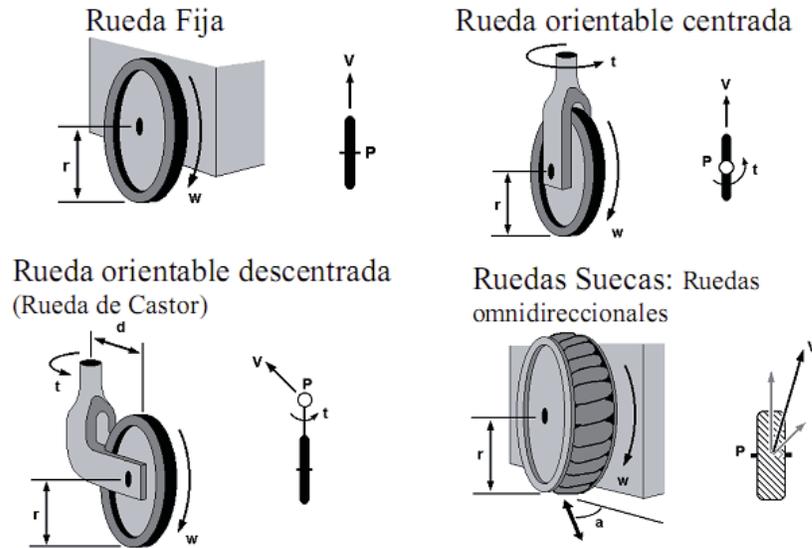


Figura 2-30 Disposición de ruedas. (fuente: <http://docplayer.es>)

Considerando la maniobrabilidad necesaria que debe poseer la plataforma se evalúan modelos con 3 y 4 ruedas ya que los modelos cinemáticos de disposición de ruedas oruga, síncrona y omnidireccional son complejos de implementar. En cuanto a los tipos de rueda, se descarta el uso de la rueda de tipo omnidireccional ya que estas son necesarias sólo para esa disposición cinemática.

## 2.4 Evaluación de arquitecturas de posicionamiento

Se propondrán dos modelos o arquitecturas para la plataforma encargada de medir iluminancia, estas, en tamaño y forma totalmente distinta una de otra. Dependiendo de la arquitectura se requerirán diferentes sensores, que se han revisado en este capítulo. Estas dos arquitecturas mutarán creando distintas formas de trabajo, medición y movimiento, implicando así, en diversas implementaciones de sensado y posicionamiento. Además se mencionan los algoritmos de movimiento y, ventajas y desventajas del modelo.

Previo a esto se han descartado el posicionamiento utilizando balizas activas debido a su corto alcance y difícil implementación.

### 2.4.1 Plataforma de cuatro ruedas

Esta plataforma es de fácil implementación pero con una compleja capacidad de posicionamiento debido a que al desplazarse a otro punto, eventualmente necesita girar en su eje, lo cual predispone a la pérdida de orientación y el avance en línea recta. La disposición de las ruedas, cuatro (dos o cuatro motores de tracción), se relaciona con la implementación de sensores, dispositivos de medición y procesamiento.

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

Se propone una plataforma cuadrada de un diámetro de 40 x 40 x 10 cms aproximadamente debido a que debe contener motores, sensores, placas de procesamiento y lo de mayor tamaño, el luxómetro.

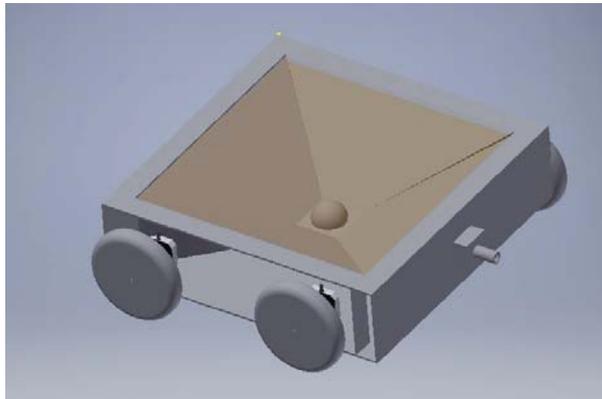


Figura 2-31 Plataforma de cuatro ruedas.

La carcasa superior de esta plataforma es una pirámide invertida, como se grafica en la Figura 2-31, que en el vértice, se encuentra el filtro de medición de iluminancia. La forma piramidal responde a obtener un mayor espacio dentro de esta, para el montaje del luxómetro y los demás componentes, además de evitar la reflexión de luz afectando con ello a las mediciones.

Además de analizar la arquitectura de la plataforma, es necesario tener en cuenta las tecnologías que dotarán de inteligencia al sistema.

#### 1. Método de posicionamiento

##### a. Posicionamiento basado en marcas o tótems

Esta metodología busca posicionar a la plataforma mediante un algoritmo de visión artificial respaldado por dos cámaras digitales, una dispuesta en la parte trasera y la otra en la parte delantera de la plataforma, usando como referencia pilares en los extremos del área a medir como se indica en la Figura 2-32. Estos pilares o tótems deben destacar por sobre el entorno. De ninguna manera pueden ser luminosos debido a que esto puede afectar en la medición, pero si, de un color llamativo, por ejemplo naranja. Los giros que realice el robot serán medidos con un giroscopio y con encoders en las ruedas.

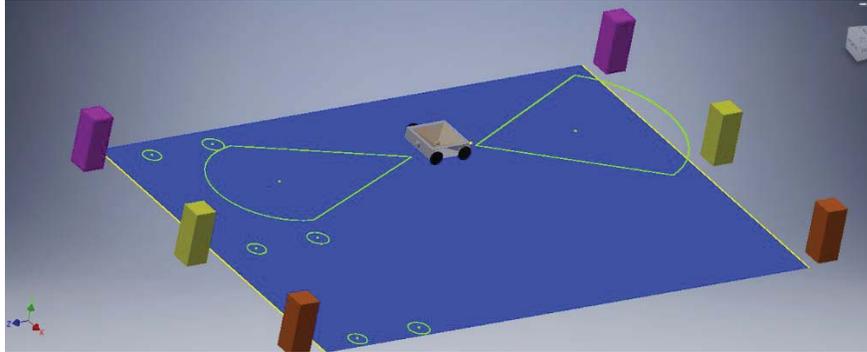


Figura 2-32 Posicionamiento con cámaras y marcas artificiales.

El algoritmo de visión provisto por una cámara delantera y otra trasera será el encargado de posicionar a la plataforma. A grandes rasgos se revisará la imagen actual, esto es, lo que observa cada cámara. Esta imagen será cuadrículada para tener noción del posicionamiento actual respecto al área de medición. Las marcas pueden ser de distinto color, identificando determinada zona, como se indica en la Figura 2-33. Por ejemplo, si ambas cámaras tienen la imagen de las tres marcas o tótems, en la parte superior de la imagen y todas centradas en un determinado cuadrante significará que la plataforma está ubicada en el centro del área de medición.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									

Figura 2-33 Imagen de una de las cámaras enfocando las marcas artificiales.

En cambio, si en la cámara frontal la imagen recibida es como se muestra en la Figura 2-34 a) y la cámara trasera muestra como se indica en la Figura 2-34 b) la plataforma está de frente a la marca violeta en el límite del área de medición

pudiendo visualizar los tres tótems con la cámara posterior como indica la Figura 2-34 c).

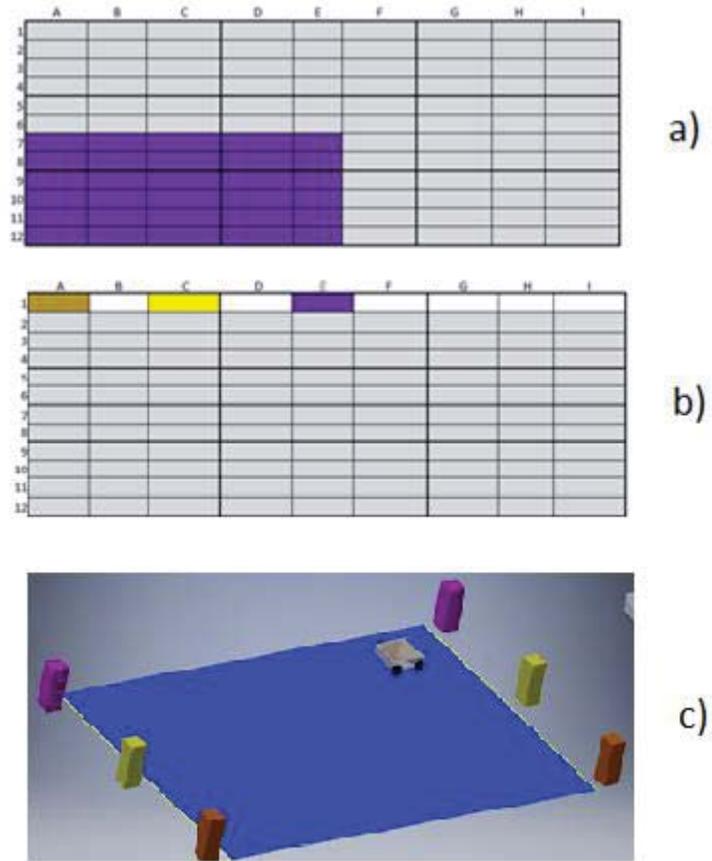


Figura 2-34 a) Vista cámara frontal b) Vista cámara trasera c) Posición actual

Dentro de las ventajas que presenta esta forma de posicionamiento se encuentra lo compacto de la plataforma y su principal desventaja es que se debe implementar una tarjeta con una capacidad de procesamiento elevada para poder trabajar en tiempo real con imágenes, quizás un pequeño laptop con un software similar a Matlab ejecutando el algoritmo y el proyecto cambiaría el enfoque de la problemática, asumiendo una complejidad entorno a la visión artificial. Además el algoritmo requerirá de robustez al momento de trabajar en entornos con distintos niveles de iluminación, presencia de neblina y otros factores propios que caracterizan cada medición.

#### b. Posicionamiento basado en marcas en el piso

Un cambio a la configuración anterior, es el direccionamiento de las cámaras, ahora hacia el piso, pudiendo detectar marcas dispuestas en la calzada como se indica en la Figura 2-35.

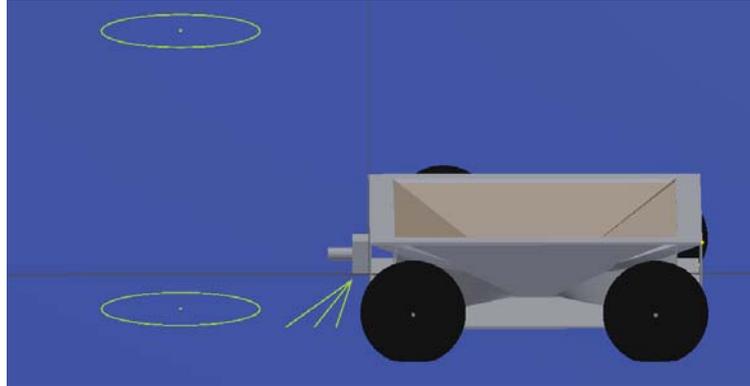


Figura 2-35 Plataforma con sensor o cámara frontal direccionada al piso.

El mismo algoritmo puede ser usado con un LIDAR, obviando así las cámaras, pudiendo obtener un mapa del área a medir, pero debido a los altos costos, que escapan al proyecto, es de compleja implementación, sumado a un algoritmo robusto de mapeo.

Las cámaras pueden ser reemplazadas por algún sensor seguilinea o de color, deteniéndose en cada marca que encuentre en el área de medición.

Este diseño sería de menor costo si se reemplazan las cámaras por un sensor de línea o de color, pero estaría a expensas de los giros sin tener una referencia del campo de medición y agregando el previo marcaje de la calzada, ahorrando pocos pasos en el algoritmo actual de medición.

Es posible utilizar tres robots como se indica en la Figura 2-36, del mismo tipo, que trabajen coordinadamente midiendo punto a punto y avanzando en conjunto. Se considera esta forma de trabajo dentro de este apartado ya que se trata de la misma arquitectura de la plataforma.

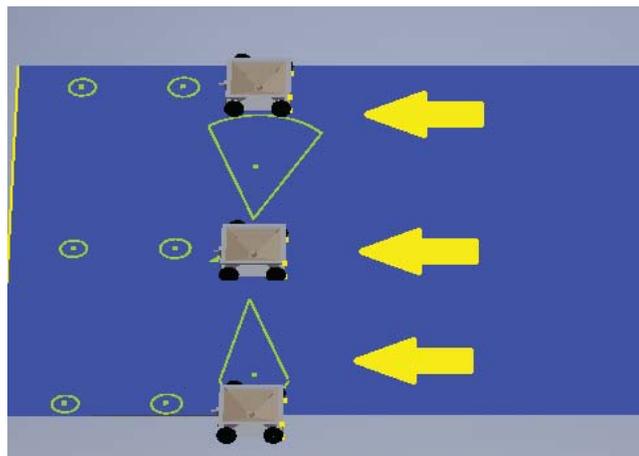


Figura 2-36 Tres robots trabajando en equipo.

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

Los móviles deben identificar las marcas en el piso, manteniendo la distancia y avanzando hasta la siguiente marca para realizar una nueva medición. Es importante que cada plataforma mantenga la orientación y la distancia con las otras.

La ventaja de este sistema es que para cada plataforma se elimina el giro, ya que sólo será necesario mantener una determinada orientación, pero la desventaja radica en construir tres plataformas idénticas, con tres luxómetros para cada una de ellas considerando el costo de este medidor.

#### 2.4.2 Plataforma de tres ruedas tipo impresora

Esta plataforma, inspirada en la mecánica de trabajo de cualquier impresora indicado en la Figura 2-37, posee una estructura de base con rieles, los cuales servirán de guía de desplazamiento de un carro encargado de realizar la medición. Lo importante de esta arquitectura es la eliminación de una componente de movimiento, el giro, desplazándose en un sólo sentido (a lo largo de la calzada).

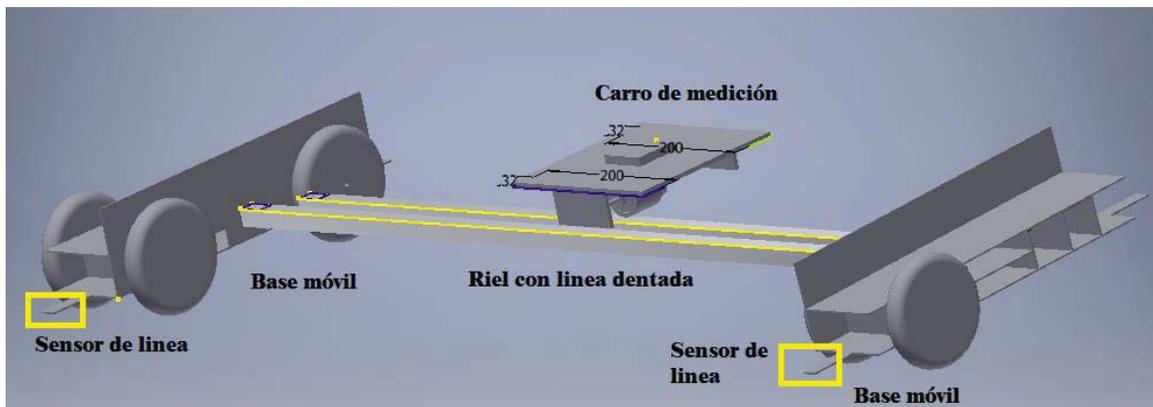


Figura 2-37 Plataforma basada en impresora 3D.

#### 1. Método de posicionamiento

##### a. Plataforma guiada por un seguidor de línea

El recorrido de la plataforma, es guiado por un seguidor de línea dispuesto en la parte delantera de esta. La línea que seguirá la plataforma debe ser implementada por 2 operarios, aprovechando la cinta de medir utilizada en la medición inicial del largo de la calzada, esta servirá como marca de referencia como muestra la Figura 2-38.

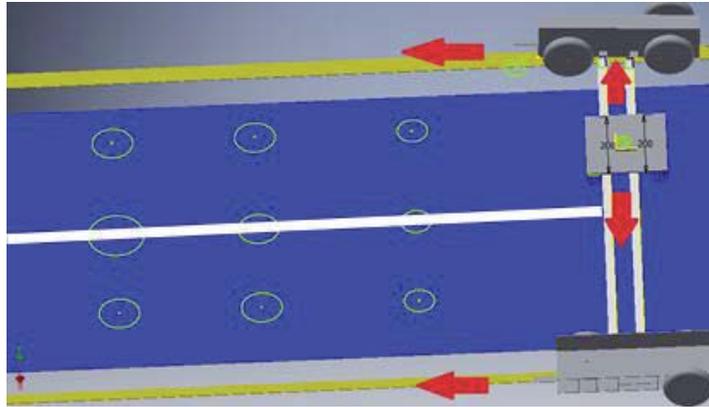


Figura 2-38 Movimiento de la plataforma guiado por sensores de línea.

La otra componente de movimiento, ancho de la calzada, es cubierta por un carro provisto de un sensor fotosensible, encargado de realizar la medición de iluminancia. Dicho carro, en la Figura 2-39, está dotado con un motor que en su rotor descansa un engrane que moverá el carro, a medida que el motor gire, avanzando por el riel o cremallera situado en las bases del móvil.

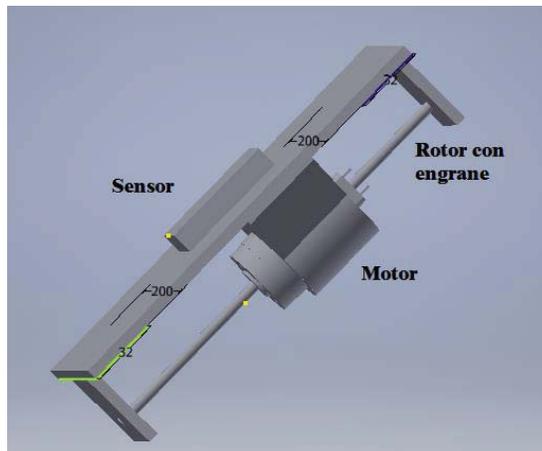


Figura 2-39 Carro de medición

El riel tendrá el ancho de una calzada (aproximadamente 3 metros) y unirá las bases laterales compuestas por los actuadores, ruedas y electrónica necesaria.

El algoritmo de medición de esta plataforma se ilustra en la Figura 2-40. La plataforma estará dispuesta para medir los puntos de la línea número 1 (puntos A1, B1 y C1). La plataforma en color rojo, tiene la capacidad de desplazarse según lo indican las flechas de color rojo. El carro se posicionará en primera instancia en el punto A1, luego en B1 y posteriormente en C1. Finalizada la medición de los primeros 3 puntos, la plataforma se desplaza hacia el siguiente trio de puntos ubicados en la línea 2 (A2, B2 y C2). El carro de medición se posiciona en A2, realiza la medición, luego se desplaza a B2 y finalmente a C2. Realizada la

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

medición del segundo trio de puntos, la plataforma se desplaza al siguiente trio de puntos, ubicados en la línea 3. Se ejecuta la medición del trio de puntos, en orden A3, B3 y C3; y la plataforma se desplaza al cuarto trio de puntos. Estos pasos se realizan repetidas veces según cuantos tríos de puntos haya.

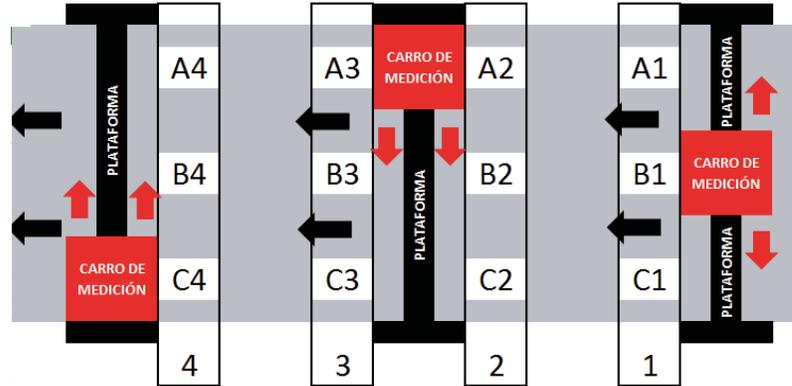


Figura 2-40 Ilustración del algoritmo de medición de la plataforma

Esta plataforma está pensada para tener una envergadura de aproximadamente 3 mts, que es el ancho de una vía de la calzada.

La desventaja de esta plataforma es el tamaño, ya que no es cómoda al transportar. Además del problema de traslado, es probable presentar problemas de torsión en las partes centrales del perfil dado el peso del carro y la extensión de la plataforma.

Las dos propuestas y sus variaciones satisfacen la problemática, pero conlleva menor o mayor implementación. Resumiendo las ventajas y desventajas de las arquitecturas mencionadas en este capítulo se presenta la Tabla 2-4.

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

Tabla 2-4 Comparación de las arquitecturas propuestas

	Plataforma 4 ruedas	3 plataformas	Tipo impresora
Medidas (cm)	40x40x10	40x40x10 (c/u)	Base = 25x10x10 Largo riel =100 (modelo a escala)
Ventajas	Diseño compacto	Eliminación del giro	Eliminación del giro
Desventajas	Algoritmo de posición robusto. Error acumulativo en la posición debido al giro.	Implementación de alto costo	Envergadura extensa

Cada una de estas propuestas está pensada para distintas tecnologías (sensores y actuadores) que ayudarán en el posicionamiento y cumplirán los objetivos del proyecto. En la Tabla 2-5 se mencionan las tecnologías consideradas para cada diseño.

Tabla 2-5 Implementación de sensores en cada diseño propuesto

	Plataforma 3 o 4 ruedas	Tipo impresora
Encoders	X	X
IMU	X	X
Landmarks	X	X
Map Matching		
Balizas		
GPS		
LIDAR		
RTLS		

Si bien toda tecnología es posible de implementar con cualquier diseño, pero se prefiere la simplificación del proyecto, optimizando los recursos para el procesamiento y la reducción de costos.

## 2.5 Requisitos físicos de la plataforma robótica

Para este proyecto se debe evaluar las condiciones medioambientales en los cuales trabajará la plataforma a implementar y los componentes que llevará consigo, considerando el tamaño y peso de cada uno de estos, por lo cual se enlistan ciertas condiciones que debe cumplir.

1. Debe ser capaz de trabajar en un área de trabajo de 3.5 x 30 mts, distancia aproximadas entre poste y poste.
2. Debe ser capaz de moverse en un área de 3 m<sup>2</sup> con un error menor a 1 cm. Esta área define los puntos de medición contiguos.
3. Debe ser capaz de contener un instrumento de aproximadamente 10 x 20 x 4 cms, mostrado en la Figura 2-41, y toda la electrónica necesaria para el procesamiento, movimiento y sensado.



Figura 2-41 Luxómetro Tektronix J17

4. La plataforma debe ser fácil de transportar y de usar. Se han bosquejado dos modelos que cumplirían a grandes rasgos las especificaciones medio-ambientales y requerimientos cinemáticos para la precisión en la ubicación.
5. Debe considerar variables como la estabilidad, navegabilidad y maniobrabilidad de la plataforma.

## 2.6 Selección de la arquitectura, hardware y método de posicionamiento

1. Respecto al posicionamiento

Según lo presentado en este capítulo, las tecnologías estudiadas respecto al posicionamiento se consideran las ventajas mencionadas anteriormente, los costos de implementación que involucra cada una y la precisión que pueden prestar en este proyecto debido a la alta precisión que requiere. Las tecnologías RTLS y lidar/laser han sido descartadas debido a su alto costo de

### 3 Fundamentos teóricos y tecnológicos de la plataforma

implementación. Los GPS disponibles en el mercado a un valor considerable sin depreciar este proyecto no tienen la precisión necesaria para esta aplicación.

La mezcla de un sistema de posicionamiento relativo y otro absoluto entregarán lo necesario para la ubicación de la plataforma. La utilización de landmarks o marcas en el área de trabajo ayudado de un seguidor de líneas aseguran el comportamiento deseado de la plataforma.

El esquema general de lo propuesto en el apartado anterior se muestra en la Figura 2-42.

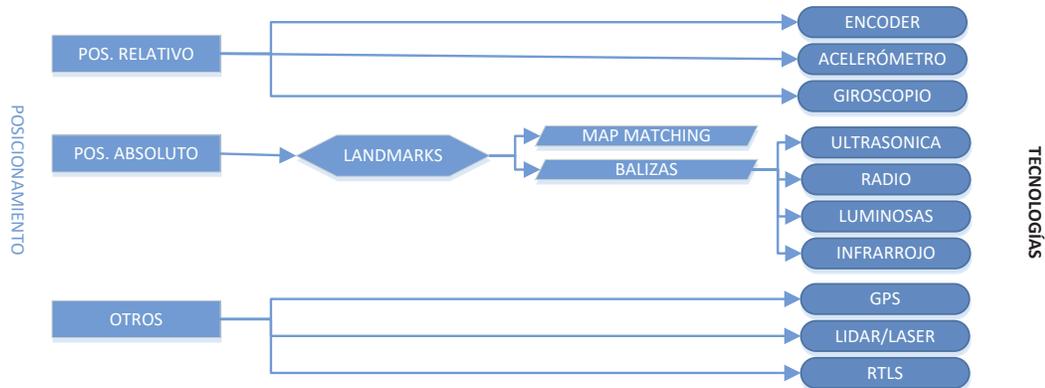


Figura 2-42 Esquema general de las tecnologías

#### 2. Respecto al hardware

Para este proyecto, dado que uno de los requerimientos es la movilidad, se opta por usar motores stepper o motores paso a paso, debido al torque que ofrecen y el control de movimiento que disponen. Por el contrario, los servomotores no tienen la fuerza necesaria para mover una estructura del tamaño que se propone y los motores dc no ofrecen un control de giro necesario, exceptuando la incorporación de encoders.

El procesamiento es de suma importancia, sino el más importante. La versatilidad y la cantidad de tecnologías ligadas a la plataforma Arduino, sean estos, sensores y actuadores, ayudarán en la implementación de la plataforma debido a la alta documentación disponible. Sin bien, Raspberry puede ser una herramienta muy potente está sobredimensionada para este uso.

El esquema general de lo propuesto en el apartado anterior se muestra en la Figura 2-43.



Figura 2-43 Esquema general del hardware

3. Respecto a la arquitectura

Las disposiciones típicas de locomoción afectan directamente en la cinemática de la plataforma, ambas ilustradas en la Figura 2-44, no obstante es necesario, antes, definir la arquitectura a utilizar. Dada las ventajas expuestas anteriormente, principalmente la eliminación de la variable “giro” hace pertinente la utilización de la arquitectura tipo impresora, abarcando una mayor área de la calzada y restringiendo el movimiento en un solo sentido, hacia adelante; ocupándose del ancho, el carro de medición. La utilización del seguidor de línea asegura el mejor comportamiento de la plataforma al momento del avance.



Figura 2-44 Disposiciones típicas y arquitecturas estudiadas

Una vez decidida la arquitectura, se descartan automáticamente 2 disposiciones, síncrona y omnidireccional dada la forma y requisitos de la ubicación de las ruedas. El tipo Ackerman y oruga proponen una implementación compleja y dependiente en gran medida de la mecánica. Por último, la configuración de tipo triciclo ofrece la mejor relación implementación-cinemática. Utilizando dos motores de tipo paso a paso y una rueda de castor permite un desplazamiento controlado.

En principio se pensó una plataforma de forma general, cúbica, con un espacio suficiente para contener la electrónica necesaria para el proyecto, pero considerando las limitaciones que refieren al posicionamiento, un posicionamiento con error mínimo, se elige el diseño tipo impresora como muestran los bosquejos de la Figura 2-45.

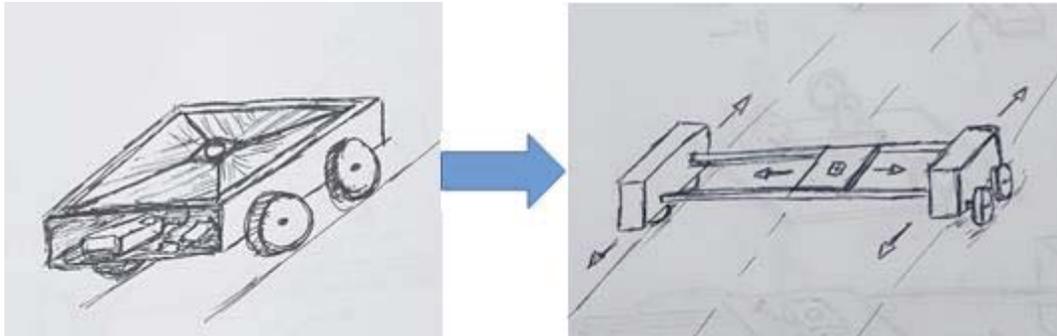


Figura 2-45 Bosquejos iniciales de la plataforma móvil

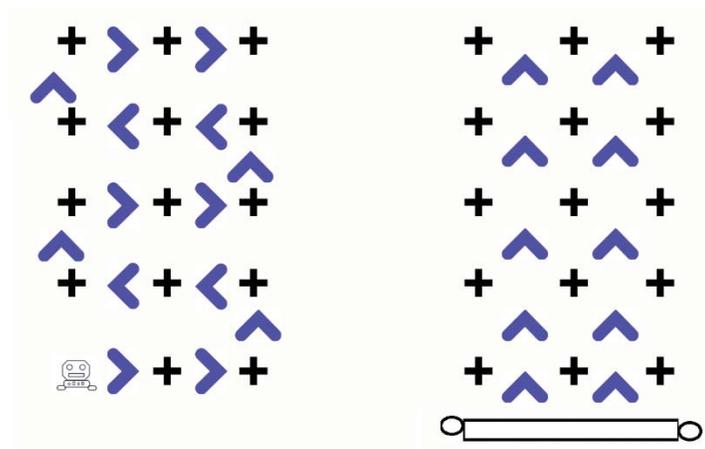


Figura 2-46 Huella de movimiento de cada una de las plataformas

Considerando que el ancho de la calzada es de alrededor 3 metros, las dimensiones de una plataforma para cubrir esta área y la portabilidad de esta es inviable. La estructura base del sistema, debe ser capaz de sostener rieles que transportarán un carro, independiente del largo que alcance cada uno de ellos, considerando un largo promedio de 3 metros, pudiendo alargar o acortar, montando o plegando estos rieles.

## **3 Diseño y fabricación de la plataforma**

El capítulo anterior es de mucha importancia dado que presenta las múltiples tecnologías que sirven para la implementación de este proyecto, y permiten comparar y plantear los diferentes usos y complejidades del trabajo con ellas. En este capítulo se indagará en las tecnologías que serán usadas en la plataforma además del diseño del chasis que dará soporte a estas.

### **3.1 Componentes y diseño de hardware electrónico seleccionados**

#### **3.1.1 Actuadores de la plataforma**

Proporcionan la movilidad a la plataforma y tienen distintas características, tamaños y requerimientos. Es necesario considerar las diferencias fundamentales entre cada tipo de motor. Para este proyecto, los motores paso a paso presentan ventajas considerables por sobre el servo motor y el motor dc. El torque de este tipo de motores, es la ventaja principal por sobre el resto, debido a que se trata de una plataforma de 15 kg aproximadamente, pero esto hace que necesite una elevada corriente y obliga el uso de una fuente externa de alimentación.

##### **1. NEMA 17 Bipolar**

Este modelo de motor paso a paso dará la movilidad sobre el terreno a la plataforma usando un motor en cada lado. Al ser un motor del tipo bipolar, físicamente posee cuatro cables de salida y requieren de cambios de dirección del flujo de corriente a través de sus bobinas, en una secuencia determinada. Cada inversión de polaridad provoca el movimiento del eje en un paso. Este motor se muestra en la Figura 3-1.



Figura 3-1 Motor NEMA 17 (fuente: <http://olimex.cl/>)

Este motor, se utiliza generalmente en impresoras 3D y sus características se presentan en la Tabla 3-1 Características del motor NEMA 17Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Características del motor NEMA 17

Parámetro	Valor
Paso	1,8 grados
Tensión	12 – 15,4 VDC
Torque	5,5 Kg-cm (54N-cm)
Bobinas	2
Corriente por bobina	1,5 A
Dimensiones	4,3x 4,3x 4,8 cm
Peso	368

#### 2. Motor SMJ40-4845-B Unipolar

Este motor es usado típicamente por impresoras y scanners de computadora. Estos motores tienen 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexión interna y son más simples de controlar comparado con los bipolares. El motor se ilustra en la Figura 3-2.

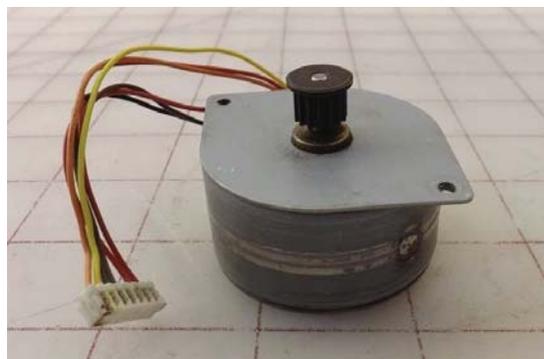


Figura 3-2 Motor unipolar SMJ40

Pese a la escasa información de este motor debido a que es un componente usado en electrodomésticos y máquinas de oficina, algunas especificaciones técnicas se presentan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Especificaciones del motor

Parámetro	Valor
Tipo	Unipolar
Modelo	SMJ40
Nº pasos	48
Peso	110 g

#### 3.1.2 Drivers para motores

Se utiliza el driver Pololu basado en el chip Allegro A4988 y es usado como controlador de motores paso a paso de hasta 2A de corriente por cada bobina. Posee cinco resoluciones diferentes: paso completo, medio paso, un cuarto de paso, un octavo de paso y un dieciseisavo de paso. Tiene un control de corriente ajustable de salida de corriente máxima, por medio de un potenciómetro, que le permite utilizar tensiones superiores a la tensión nominal del motor paso a paso para lograr mayores tasas de paso. El driver Pololu se ilustra en la Figura 3-3.

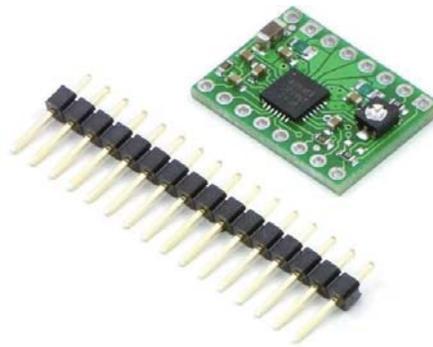


Figura 3-3 Driver Pololu A4988 (fuente: <https://electronilab.co>)

El controlador requiere una tensión de alimentación lógica (3-5,5v) que se conecta a través de los pines VDD y GND y una tensión de alimentación del motor (8-35v) para ser conectada a través de VMOT y GND como se indica en la Figura 3-4. Estos suministros deben tener condensadores de desacoplamiento adecuados cerca de la placa, y que deben ser capaces de entregar las corrientes esperadas (peaks de hasta 4 Amperes para el suministro del motor).

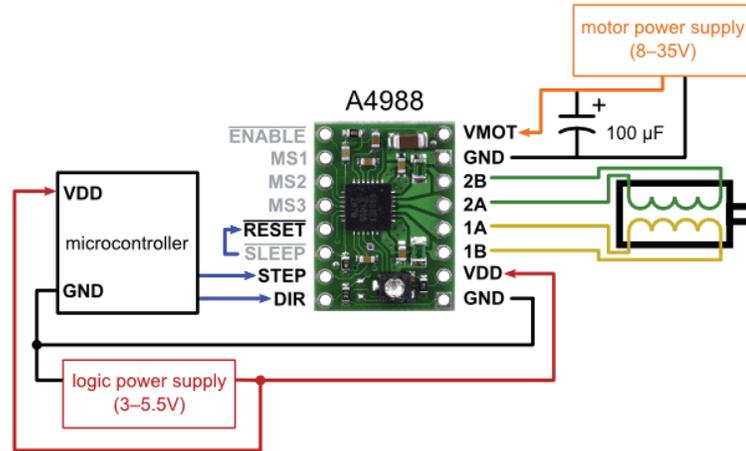


Figura 3-4 Conexión del driver A4988 (fuente: <https://electronilab.co>)

Un controlador de micro pasos tal como el A4988 permite resoluciones más altas que otros controladores de paso a paso, permitiendo ubicaciones en paso intermedio, que se consiguen por la activación de las bobinas con los niveles de corriente intermedios.

La resolución o tamaño de paso puede ser seleccionada mediante los pines MS1, MS2 y MS3 que permiten cinco resoluciones diferentes de paso como indica la Tabla 3-3. Para que los modos de micro pasos funcionen correctamente, el límite de corriente debe ser lo suficientemente bajo, de lo contrario, los niveles intermedios no se mantienen correctamente y el motor saltará pasos.

Tabla 3-3 Configuración de micropasos para pines MS1,MS2 y MS3

MS1	MS2	MS3	Resolución de micropaso
Bajo	Bajo	Bajo	Paso completo (Full step)
Alto	Bajo	Bajo	Medio paso (Half step)
Bajo	Alto	Bajo	Cuato de paso (Quarter step)
Alto	Alto	Bajo	Octavo de paso (Eighth step)
Alto	Alto	Alto	Dieciseisavo de paso (Sixteenth step)

Cada pulso de entrada escalón corresponde a un micropaso de motor en la dirección seleccionada por el pin DIR. Los pines STEP y DIR no están conectados a ningún voltaje determinado, por lo que no se debe dejar ninguno de estos pines al aire en su aplicación. Si se desea que el motor gire en una sola dirección, es preciso conectar DIR directamente a VCC o GND. El pin RST es flotante y si se desea usar, se puede conectar al pin SLP adyacente en el PCB para llevarlo a estado alto y activar la tarjeta.

Una forma de establecer el límite de corriente es poner el controlador en modo paso completo y medir la corriente que circula a través de una sola bobina del motor sin activar la entrada STEP. La corriente medida será 0,7 veces el límite actual (ya que ambas bobinas están siempre activas y limitadas a 70% del ajuste de límite de corriente en el modo de paso completo). Otra forma de establecer la corriente es medir el voltaje en el pin “ref” y calcular el límite de la corriente resultante. El límite de corriente se refiere a la tensión de referencia como muestra la Ecuación (3-1).

$$\text{Límite de corriente} = V_{\text{ref}} * 2,5 \quad (3-1)$$

#### 3.1.3 Sensores

##### 1. Reloj de tiempo real, modelo DS1307

Esta placa está basada en el integrado DS1307 y es un reloj de tiempo real que permite tomar los datos temporales actuales de algún sistema. Trabaja con el protocolo I2C y entrega etiquetas de hora, minuto, segundo, día, mes y año pudiendo compensar la fecha incluyendo años bisiestos con calendario hasta el año 2100. Este componente se ilustra en la Figura 3-5.



Figura 3-5 RTC DS1307 (fuente: <http://tienda.bricogeek.com>)

Es preciso disponer de una pequeña batería de tipo reloj debido a que el reloj interno debe seguir funcionando mientras la tarjeta esté apagado o desconectado del resto del circuito.

Al utilizar esta tarjeta por primera vez se hace necesaria la configuración de la hora y día actual que quedará fijada en el chip para el posterior uso y consulta las veces que sea necesaria.

##### 2. Sensor de línea, modelo QRE1113 y sensores infrarrojos,

El sensor QRE 1113 es comúnmente utilizado en los proyectos de robótica y trabaja con el reflejo de un led infrarrojo que es percibido por un fototransistor que capta la cantidad de luz que rebota en alguna determinada superficie. Trabaja principalmente con contraste de colores, usualmente blanco y negro, ya que estos son los extremos en la gama de colores, uno absorbiendo toda la luz y la otra reflejando casi el máximo de luz. Este sensor está disponible en formato análogo y digital, en este caso se utilizará la versión digital. Este sensor se muestra en la Figura 3-6.

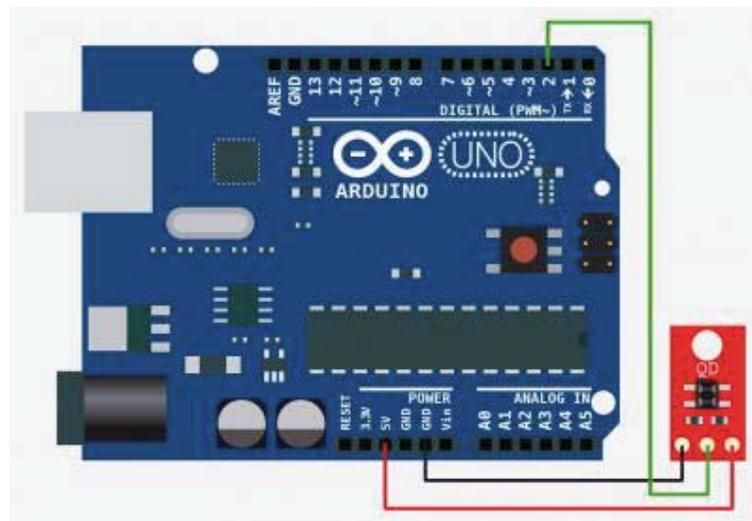


Figura 3-6 Conexión QRE1113

En la plataforma se implementa un arreglo de 6 sensores de línea del tipo QRE1113 orientados hacia el piso de manera de poder detectar la línea de referencia dispuesta por los operarios, orientando el sentido de movimiento de la plataforma.

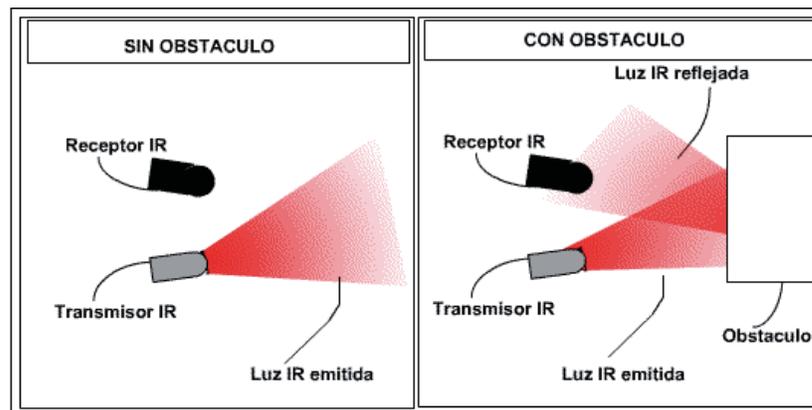


Figura 3-7 Funcionamiento de un emisor-receptor infrarrojo.  
(fuente: <https://roboticaenlasergio.wordpress.com>)

El funcionamiento se explica en la Figura 3-7. Un emisor o transmisor infrarrojo emite una señal luminosa a frecuencias bajas y es recibida por el fototransistor midiendo lo reflejado.

De igual manera operan los sensores de tipo pórtico, dispuestos en la estructura de la Figura 3-8, que están presente en los rieles de la plataforma. Estos sensores están posicionados frente a frente de manera que el receptor siempre esté recibiendo señal desde el emisor.

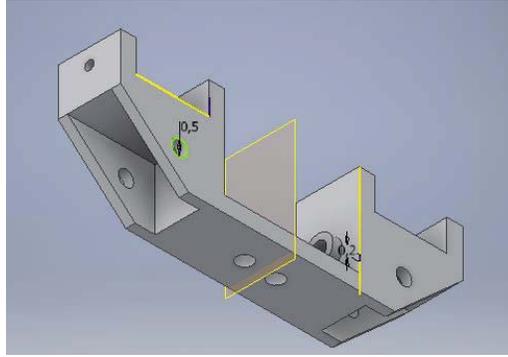


Figura 3-8 Diseño de pórticos infrarrojos

Al moverse el carro de medición, este, cortará el rayo infrarrojo que existe entre el emisor y receptor, así indicará que el carro se encuentra en dicho pórtico, detendrá el carro y enviará la orden para que comience la medición.

Este sensor será implementado con receptores y emisores infrarrojos de 5mm tipo led, Figura 3-9, en un pórtico que puede ser posicionado en cualquier parte del riel.



Figura 3-9 Emisor y receptor infrarrojo de 5 mm.

#### 3. Final de carrera

Es un dispositivo eléctrico, sensor de contacto o pulsador y se muestra en la Figura 3-10. Es utilizado como protección de eventuales fallas de avance o simplemente como indicador de fin de recorrido. Puede contener, internamente, interruptores normalmente abiertos (NA), cerrados (NC) o conmutadores dependiendo de la tarea que cumpla.



Figura 3-10 Switch fin de carrera (fuente: <https://paletosdelaelectronica.wordpress.com>)

Este interruptor está conectado a una entrada digital del Arduino, cortando de inmediato el funcionamiento del motor paso a paso del carro como protección de los sistemas infrarrojos y estará ubicado en ambos extremos del riel.

## 3.2 Manipulación de datos y procesamiento

### 3.2.1 Módulo para tarjeta SD

Este módulo permite conectar una tarjeta SD a la tarjeta Arduino pudiendo almacenar datos en algún formato específico. Para este proyecto, los datos de interés son obtenidos desde el luxómetro. Son almacenados en un orden definido en un archivo de texto (.txt), que al finalizar el procedimiento de medición, se extraen y procesan. Esta tarjeta se muestra en la Figura 3-11.

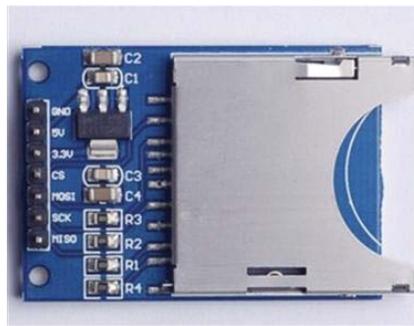


Figura 3-11 Módulo SD card (fuente: <http://olimex.cl/>)

Previo al almacenamiento de los datos de iluminancia provenientes del luxómetro, se almacena la fecha y hora actual entregada por el reloj de tiempo real, para poder entregar información temporal de la medición.

Las tarjetas SD se gestionan por medio de comunicación SPI, la cual es una comunicación síncrona de cuatro hilos transmitiendo a full dúplex (envío y recepción al mismo tiempo). Es síncrona ya que utiliza líneas diferentes para los datos además del clock, esto hace que no haya pérdida de sincronía y con ello, pérdida de datos, problema que usualmente ocurre con la comunicación serial (comunicación asíncrona).

En un bus de datos SPI, una de las partes se le llama “master”, como indica la Figura 3-12. Por otro lado se encuentran los esclavos, pudiendo haber uno o varios en el mismo bus. Cuando el master envía información, lo hace por una línea de datos que se llama MOSI (Master Out Slave In) y si el esclavo responde, lo hace a través de una línea llamada MISO (Master In Slave Out).

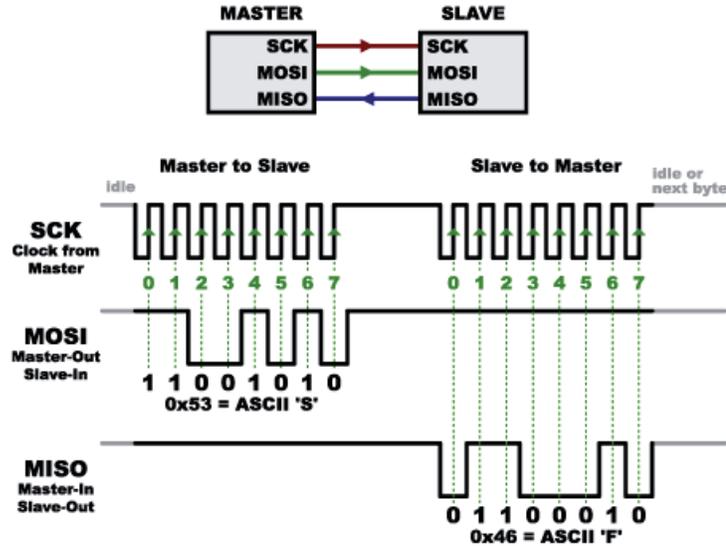


Figura 3-12 Control SPI Master-Slave (fuente: <http://www.prometec.net/bus-spi/>)

La conexión que se realiza con esta tarjeta a Arduino Mega es como se indica en la Tabla 3-4 Conexión SD Card a Arduino Mega Tabla 3-4.

Tabla 3-4 Conexión SD Card a Arduino Mega

Pin	Arduino MEGA
MOSI (DI)	51
MISO (DO)	50
SCK (CLK)	52
SS (CS)	53

La información que almacena la tarjeta en el proyecto es la siguiente:

1. Fecha y hora de medición.
2. Ancho y largo de la calzada. Datos ingresados por el operador.
3. Cálculo del número de puntos.
4. Cálculo de distancia entre cada punto.
5. Listado de puntos y sus respectivos datos de iluminancia obtenidos por el luxómetro.

### 3.2.2 Procesador: Arduino Mega 2560

Para este proyecto, se decide trabajar con Arduino Mega 2560 dado que es el modelo con más entradas y salidas, además de tener una mayor cantidad de pines con comunicación serie (cuatro pares), este último factor, es de suma importancia ya que se utilizará un alto número de pines para la conexión de sensores, motores e interface con lo cual se necesitará comunicar dos placas Arduino, separando así en dos secciones, una para la comunicación con el luxómetro, interface

### 3 Diseño y fabricación de la plataforma

con el operador y datalogger y el segundo, encargado de la locomoción de la plataforma, en el que además se incluye el sensado de variables que permite la corrección en el desplazamiento de esta.

Los modelos Arduino, físicamente, son compatibles con múltiples shields o adaptadores para distintas funciones como la adaptación de energía a través de relays, dataloggers con SD y RTC incluidos, uso de diversos tipos de motores, shields que se utilizará en este proyecto, comunicación por medio del protocolo RS232, entre otros más; factor que también incide en la elección de esta tecnología y no en otra como raspberry pi u otra. Las virtudes de esta placa se muestran en la Figura 3-13.

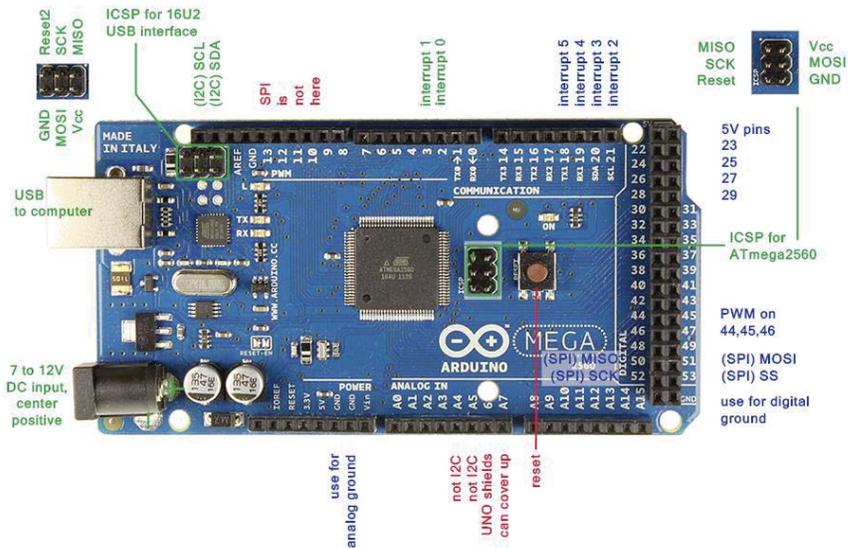


Figura 3-13 Pin out Arduino Mega 2560 (Fuente: <https://forum.arduino.cc>)

Este Arduino será el procesador de la plataforma robótica móvil, al cual se conectarán los sensores y actuadores, algunos por medio de shields o placas especialmente adaptadas para el uso de Arduino.

Enlistando las dos placas Arduino Mega y los pines conectados se puede apreciar el potencial de esta tarjeta, pudiendo realizar múltiples tareas con una excelente velocidad de procesamiento (16 MHz) y trabajando con diversos protocolos. Las conexiones se indican en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5 Pines utilizados por la plataforma de medición

Arduino Mega / Almacenamiento-Interface		Arduino Mega / Locomoción-Posicionamiento	
Pin	Tarea	Pin	Tarea
D0-D1	Com. Serial Luxómetro	D0-D13	Motor Shield
D20	SDA RTC/SDA LCD	D22-D24	Porticos IR
D21	SCL RTC/SCL LCD	D25-D26	Fin de carrera
D23-D37	Teclado	D18	RX Almacenamiento
D50	MISO SD	D19	TX Almacenamiento
D51	MOSI SD	D27-D32	QRE1117 Seg.Linea
D52	SCK SD		
D53	CS SD		
D18	TX Locomocion		
D19	RX Locomoción		

### 3.2.3 Comunicación con luxómetro

El fabricante del luxómetro, Tektronix, ofrece al usuario la posibilidad de obtener los datos que se están midiendo por medio de comunicación serial RS232. El luxómetro posee en su parte lateral un conector hembra Jack de 3,5 mm para la extracción de estos datos como lo indica la Figura 3-14.

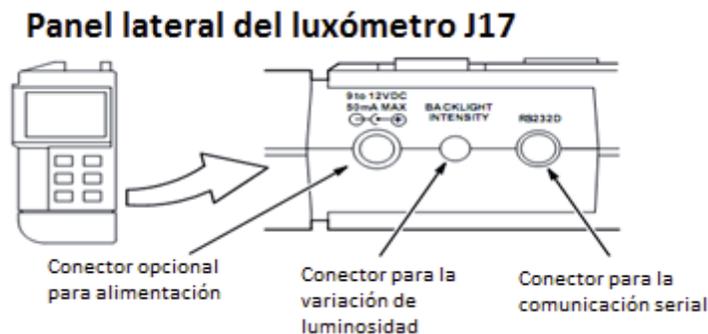


Figura 3-14 Panel lateral del luxómetro J17 (fuente: <http://www.tek.com>)

Además, en el manual de usuario se dispone de un esquemático de cómo se debe crear un cable para dicha comunicación. Desde un conector DB-9 se utilizan sólo 3 pines y estos deben ser

conectados al plug de 3,5 mm (el plug que comúnmente se utiliza en los audífonos) según la Figura 3-15.

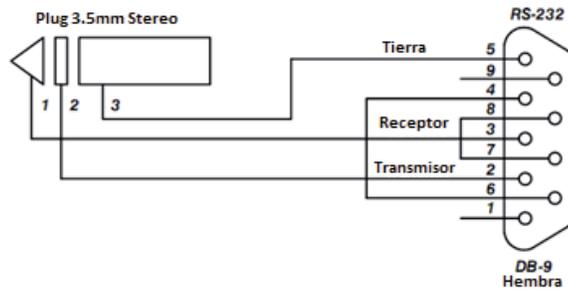


Figura 3-15 Esquema de conexión de comunicación serial con el luxómetro J17.  
(fuente: <http://www.tek.com>)

Existen ciertos parámetros de configuración para generar la comunicación con este luxómetro, estos parámetros se muestran en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6 Configuración para comunicación RS-232

Parámetro	Valor
Vel. Transmisión	2400 Baudios
Bits datos	8
Bits de parada	1
Tipo de dato	Asincrono
Operación	Half-Duplex

Para esto se utiliza el shield RS232 de la marca LinkSprite que ofrece lo necesario para trabajar con este protocolo de comunicación de forma cómoda. Esta tarjeta se muestra en la Figura 3-16.

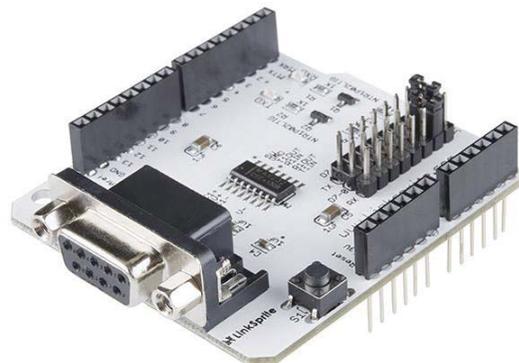


Figura 3-16 RS-232 Shield. (fuente: <https://www.sparkfun.com>)

Esta placa dispone de dos jumpers para conectar los pines que se utilizarán para la comunicación. En este caso se utilizará como RX el pin 0 y TX el pin 1, el cual utilizará el par de transmisión serial 0 del Arduino Mega, como se indica en la Figura 3-17.

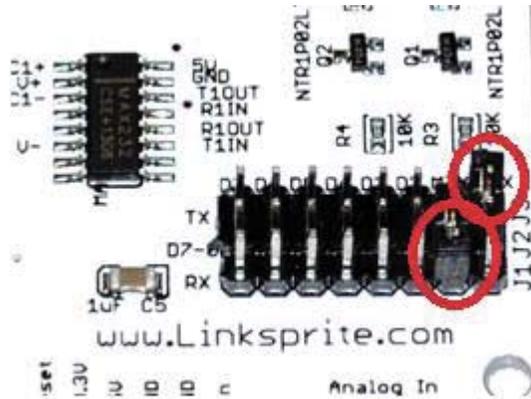


Figura 3-17 Jumpers de selección de pines de comunicación. (fuente: <https://www.sparkfun.com>)

#### 3.2.4 Interfaz de operación

##### 1. LCD 16X2

El Liquid Crystal Display o LCD es una pantalla de cristal líquido empleada para la visualización de textos o información de forma gráfica y está administrado por un microcontrolador. Los índices 16x2 indican el tamaño de este componente, esto es, 2 filas y 16 caracteres por cada fila. Cada uno de estos 32 cuadros está compuesto por varios pixeles que al encenderse o apagarse, forman una letra, número o carácter.

Cada uno de los pines de este display cumple una función determinada pero se pueden agrupar por tareas similares como se indica en la Figura 3-18 y su conexión específica se indica en la Tabla 3-7.

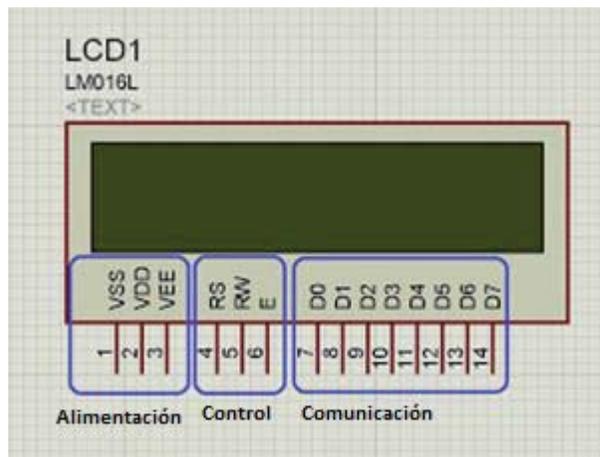


Figura 3-18 Esquema de conexión de un LCD 16x2. (fuente: <http://todoelectrodo.blogspot.cl/>)

Tabla 3-7 Pin out de conexión de un LCD 16x2

Parámetro	Conexión y/o función
Vss	GND
Vdd	5 volt
Vee	Potenciometro, regula el contraste
RS	Control de registro (0) o de datos (1)
RW	Escritura (0) o lectura(1)
E	Pin de habilitación
D0 – D7	Bus de datos bidireccional

La conexión de prueba del LCD y Arduino se muestra en la Figura 3-19.

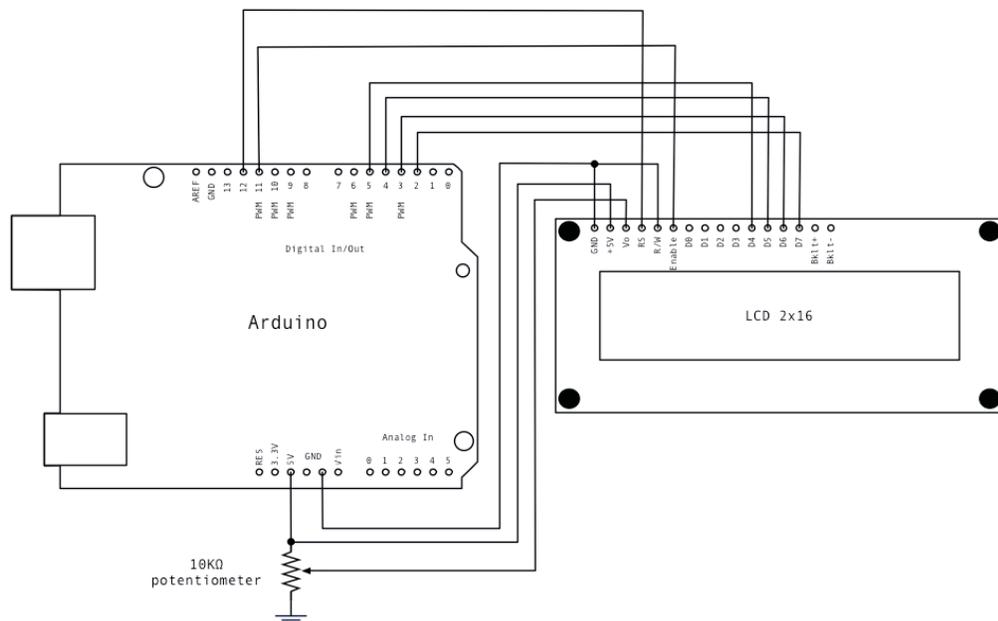


Figura 3-19 Esquema de prueba para el LCD

Es evidente que esta forma de conectar ambos elementos utiliza una cantidad importante de pines que podrían ser utilizados en otros componentes o sensores. Por lo anterior, existe una solución llamada Módulo Serial I2C para LCD.

#### 2. Módulo Serial I2C

Este módulo viene a solucionar el problema de la cantidad de pines de uso, lo cual disminuye desde 10 a 4 pines. Para el uso de este módulo es necesaria la implementación de la librería Wire.h que configura y controla los datos que llegan a la pantalla. La forma de conectarlo al display se indica en la Figura 3-20.

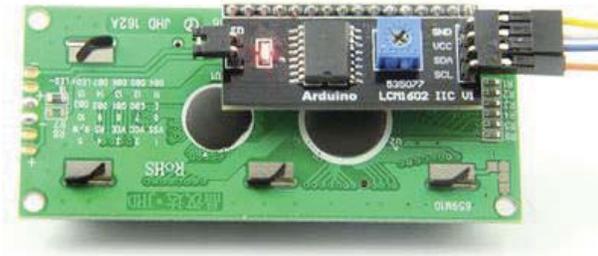


Figura 3-20 Conexión LCD y Modulo i2c (fuente: <http://www.geeetech.com>)

### 3. Teclado Matricial 4x4

Un teclado básicamente es un arreglo de botones, como muestra la Figura 3-21, a los cuales se asigna un símbolo o una función determinada. Al ser pulsada una tecla, se reconoce una tensión en las filas de forma secuencial para luego, leer las columnas y verificar cual se encuentra en estado alto. Esto ya que al pulsar una tecla, se cierra una única conexión entre una fila y una columna.

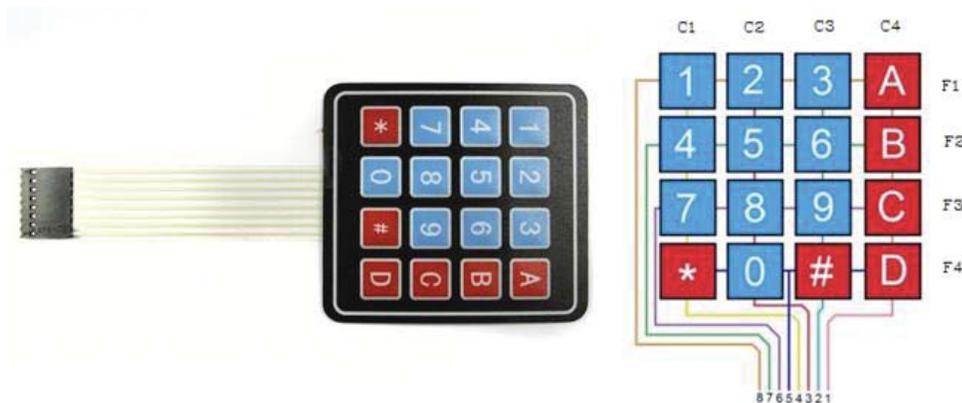


Figura 3-21 Diagrama de conexión interna del teclado 4x4. (fuente: <https://www.olimex.cl/>)

Por ejemplo, constantemente se está verificando el estado de los botones. Se verifica la fila 1 (F1) y si ninguna columna se encuentra en estado alto es porque no ha sido presionado ningún botón. Luego, se verifica F2, y C2 se encuentra en estado alto, esto significa que el botón 5 fue presionado.

Para controlar este teclado se debe descargar y cargar la librería Keypad.h en Arduino. Esta posee todas las configuraciones y caracteres contenidos en dicho teclado.

### 3.3 Herramientas de diseño.

Existen múltiples formas de llevar a cabo un proyecto de ingeniería, de cualquier tipo, pero el denominador común es el diseño y bosquejo de lo que se requiere construir o implementar. Los softwares de diseño son variados y se diferencian por las herramientas y prestaciones de cada una de ellas pero para todas es necesario un mínimo de manejo en las vistas de diseño.

#### 1. Inventor Autodesk e impresora 3D Makerbot

Inventor es un software de diseño industrial 3D y prototipado digital de productos. Es posible diseñar máquinas, instalaciones, piezas mecánicas y planos entre otros pudiendo simular esfuerzos de materiales que pueden entregar mayor respaldo a los proyectos de diseño. Este programa permite crear diseños simples en 2D para luego extruir el dibujo creando piezas en 3D. También pueden utilizarse los planos de trabajo para producir los bocetos que se pueden compensar de los planos útiles de la partición, pudiendo corregir parte por parte sin tener que modificar el volumen completo. Además permite el ensamble de piezas logrando sistemas complejos.

Para este proyecto se diseñaron las piezas a la medida de los requerimientos y considerando las limitaciones estructurales que implican las rigurosas normas técnicas para la medición.

La impresora Makerbot es una máquina capaz de realizar réplicas de diseños en 3D, como muestra la Figura 3-22, creando piezas o maquetas volumétricas inyectando PLA (Poliácido Láctico) y generando capa por capa el volumen diseñado.

La mayoría de las piezas involucradas fueron diseñadas en el software de prototipado Inventor y luego impresas en una impresora Makerbot 3D.

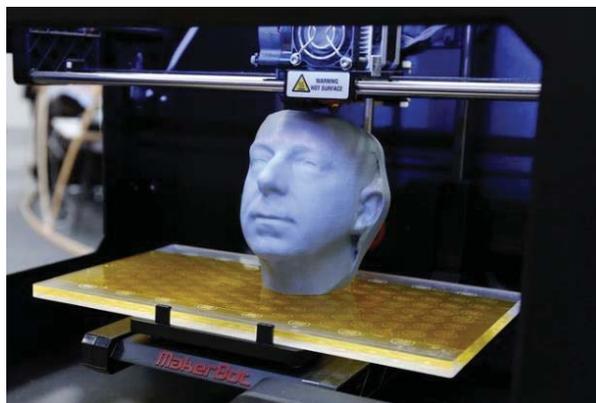


Figura 3-22 Impresora Makerbot en proceso de impresión (fuente: <https://www.makerbot.com/>)

### 3.4 Diseño e impresión de las piezas de la plataforma.

En primer lugar es necesario bosquejar el diseño que se pretende obtener, con esto, además, se identifican las partes que requieren diseño e impresión, mientras otras son obtenidas en el mercado.

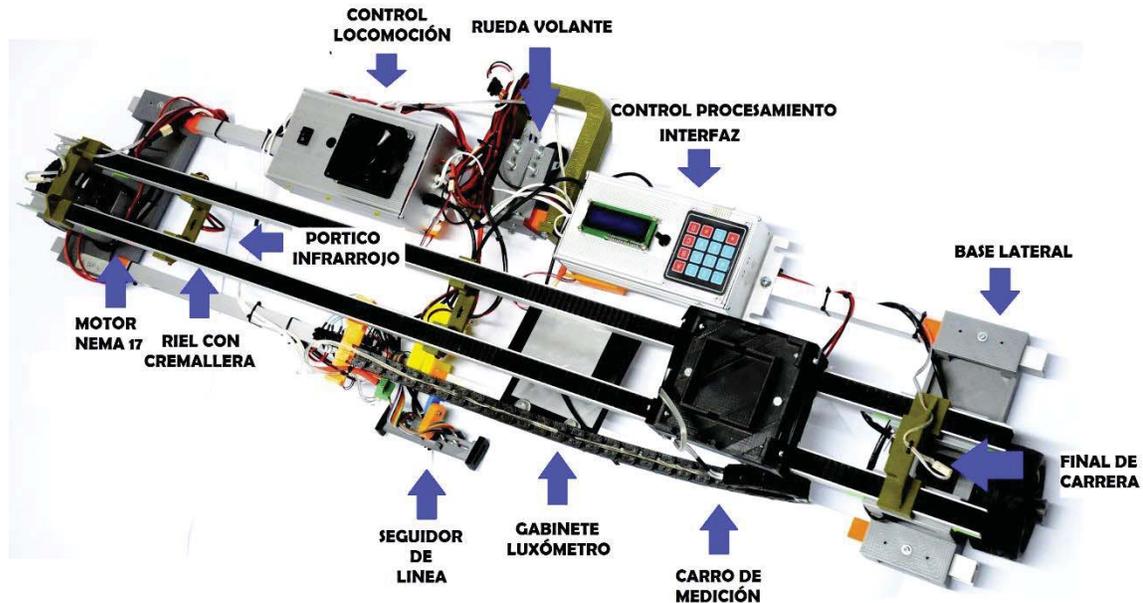


Figura 3-23 Esquema general y partes de la plataforma robótica

#### 1. Bases laterales de la plataforma

Esta pieza es la más importante de la plataforma debido a que da soporte y alinea toda la estructura. Las características de la pieza impresa están indicadas en la Tabla 3-8 y la proyección del diseño en Inventor y la pieza real se ilustran en la Figura 3-24.

Tabla 3-8 Características de la impresión 3D

Parámetro	Valor
Peso	315,25 gr
Altura	10,3 cm
Ancho	8 cm
Largo	25 cm
Tiempo impresión	25 hr 22 min
Grosor de línea	0,2 mm
Relleno	30 %

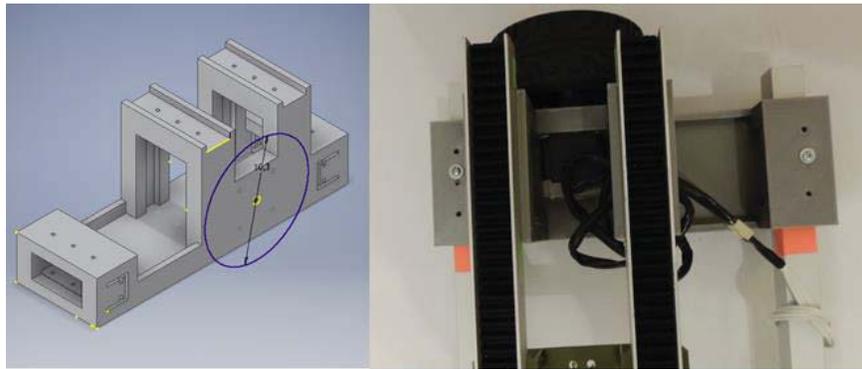


Figura 3-24 Vista desde Inventor e imagen real de la pieza base

## 2. Carro de medición

Este carro estará situado sobre dos rieles con cremallera. El carro posee un motor unipolar que controla el movimiento de este a través de una correa de transmisión. En la parte superior llevará el sensor fotosensible para captar los niveles de iluminación por medio del luxómetro. Además en la parte inferior posee una aleta dispuesta para cortar el haz invisible de cada pórtico infrarrojo. Sus características se presentan en la Tabla 3-9 y la pieza se muestra en la Figura 3-25 y Figura 3-26.

Tabla 3-9 Características de la impresión 3D del carro de medición

Parámetro	Valor
Peso	212,42 gr
Altura	9 cm
Ancho	12 cm
Largo	13 cm
Tiempo impresión	16 hr 5 min
Resolución	0,2 mm
Relleno	30 %

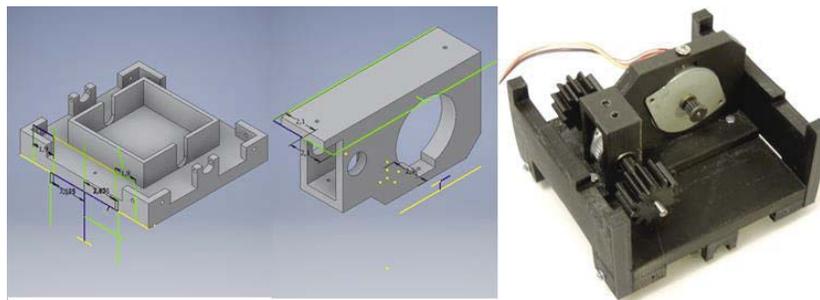


Figura 3-25 Vista desde Inventor de las piezas e imagen real del carro de medición

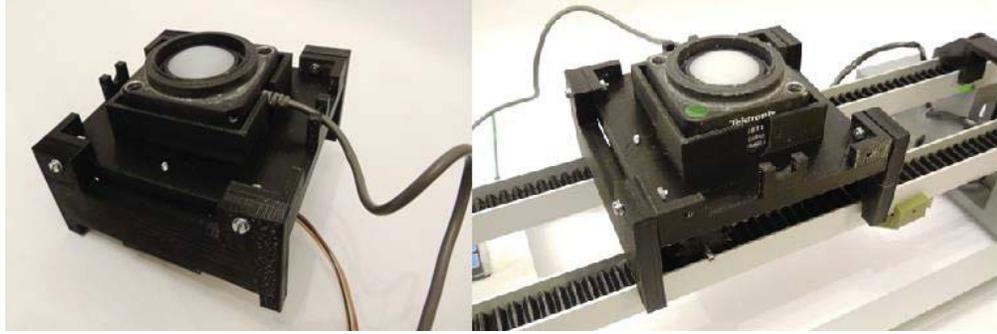


Figura 3-26 Foto real de la impresión del carro de medición

### 3. Cremalleras y piñones

Estas piezas fueron diseñadas de manera de obtener un perfecto calzado entre ellas. Este factor es de suma importancia al momento de medir la distancia que recorrerá el carro por el riel ya que un desfase en el calce puede afectar en el posicionamiento y por consiguiente en la medición en un lugar no deseado. La pieza impresa posee las características mencionadas en la Tabla 3-10 y la pieza impresa e implementada se muestran en la Figura 3-27 y Figura 3-28. El piñón diseñado acorde a la cremallera se ilustra en la Figura 3-29 y tiene un avance de 7,5 cm/vuelta.

Tabla 3-10 Características de la impresión 3D de la pieza

Parámetro	Valor
Peso Cremallera	16,21 gr
Peso piñon	7,49 gr
Medidas cremallera	12,5x1,9x1,15 cm
Medidas piñon	29,73x29,73x31,75 cm
Tiempo impresión crem.	1 hr 47 min
Tiempo impresión piñon	53 min
Resolución	0,2 mm
Relleno	30 %

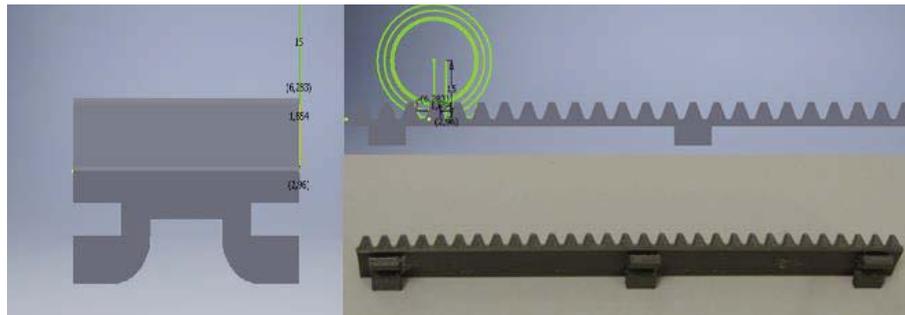


Figura 3-27 Vista de Inventor y vista real de la cremallera



Figura 3-28 Vista real de la cremallera incorporada al perfil

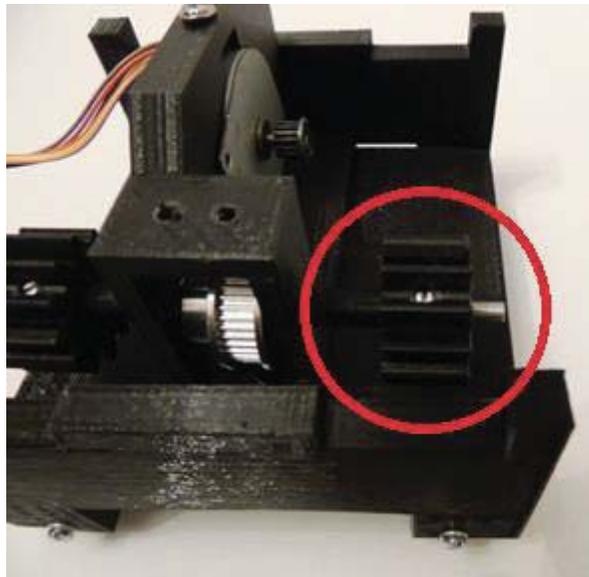


Figura 3-29 Vista del piñón del carro de medición

#### 4. Soporte de la rueda de castor o rueda volante

La rueda de castor provista en la parte trasera de la plataforma proveerá a esta de giros dependiendo de la corrección que ejecute el sistema pudiendo generar virajes simples. Las características de impresión se indican en la Tabla 3-11 y la impresión en la Figura 3-30. Los sensores están distanciados entre sí a 5 mm de manera de cubrir el ancho de la línea de seguimiento.

Tabla 3-11 Características de impresión 3D del soporte

Parámetro	Valor
Peso	77,63 gr
Altura	6,4 cm
Ancho	5,9 cm
Largo	9,1 cm
Tiempo impresión	7 hr 3 min
Resolución	0,2 mm
Relleno	30 %

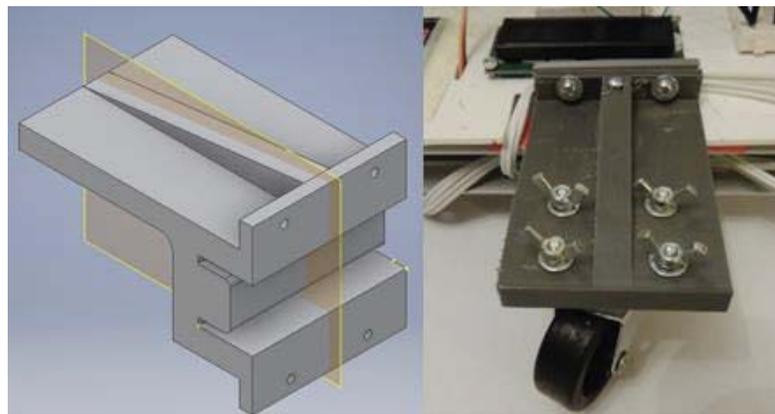


Figura 3-30 Vista desde Inventor y vista del diseño real

#### 5. Soporte del seguidor de línea

Esta pieza tendrá la tarea de transportar los seis sensores de línea encargados de orientar a la plataforma en un movimiento recto. Los sensores se pueden desmontar y cambiar de posición. Además la pieza puede ser inclinada dependiendo de las condiciones de la calzada o por problemas de medición. Sus características de impresión se indican en la Tabla 3-12 y la pieza se muestra en la Figura 3-31.

Tabla 3-12 Características de impresión del soporte

Parámetro	Valor
Peso	16,77 gr
Altura	3,7 cm
Ancho	2,5 cm
Largo	12,5 cm
Tiempo impresión	1 hr 34 min
Resolución	0,2 mm
Relleno	30 %

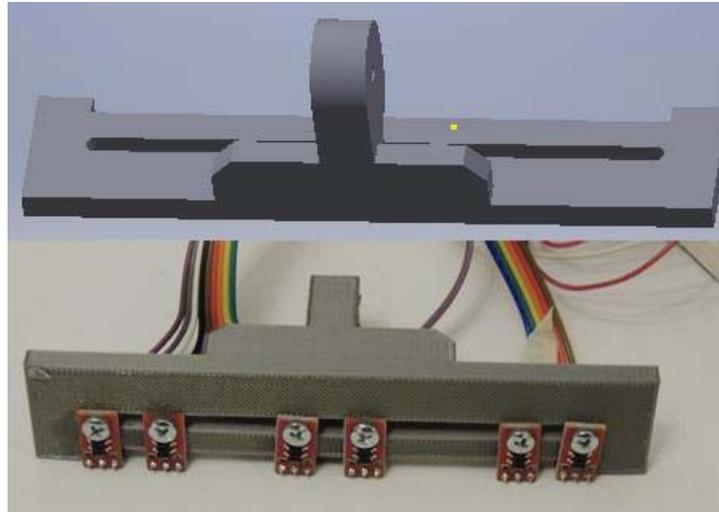


Figura 3-31 Vista de la pieza en Inventor y pieza impresa

#### 6. Pórticos infrarrojos

Estos pórticos serán los encargados de detectar la posición del carro de medición ya que estará provista de sensores infrarrojos, ubicados en línea vista y generando un haz invisible. El carro interferirá el haz y con esto se dará la orden de detener los motores y proceder con la medición. Sus características se indican en la Tabla 3-13 y se muestra en la Figura 3-32.

Tabla 3-13 Características de la impresión 3D de los pórticos

Parámetro	Valor
Peso	22,05 gr
Altura	3,4 cm
Ancho	2 cm
Largo	10,8 cm
Tiempo impresión	2 hr 3 min
Resolución	0,2 mm
Relleno	30 %

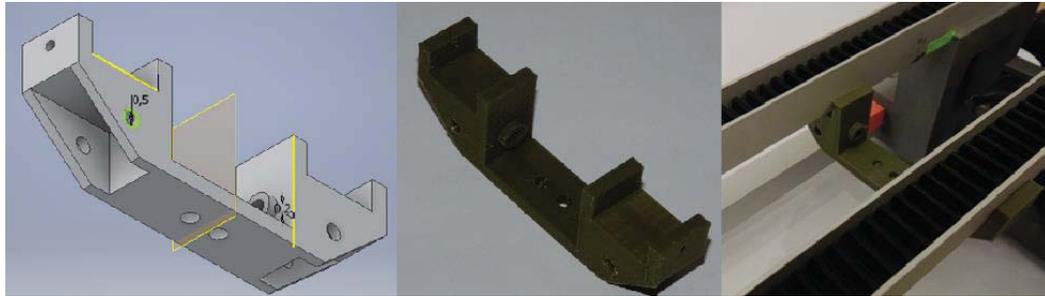


Figura 3-32 Vista del pórtico IR en Inventor, impreso e implementado

La ubicación de cada pórtico dependerá del ancho de la calzada a medir por lo cual se pueden mover a razón del operario.

### 7. Ruedas

Las ruedas usadas para el desplazamiento de la plataforma por la calzada requieren de un buen agarre y de un diámetro tal que no agregue altura a la plataforma, debido a que el sensor de medición demanda estar cercano al piso. Además su dureza impide una alta deformación de esta. Sus especificaciones, la imagen del producto y su implementación de muestran en la Tabla 3-14 y en la Figura 3-33 respectivamente.

Tabla 3-14 Características de las ruedas de la plataforma

Parámetros	Especificaciones
Marca	NO 370
Modelo	82B-803
Color	Negro
Material	Plastico - Caucho
Diámetro	10,3 cm
Profundidad	4,5 cm
Peso	355 gr



Figura 3-33 Rueda de plástico- caucho usada en la plataforma

#### 8. Pieza de encaje para las ruedas de la plataforma

Esta pieza une el rotor de los motores NEMA 17 indicada en la Figura 3-34, que dan movilidad a la plataforma, con la rueda de plástico. Fijándola firmemente al rotor y pudiendo además hacer cualquier cambio de rueda en cualquier momento. Sus características de impresión se indican en la Tabla 3-15.

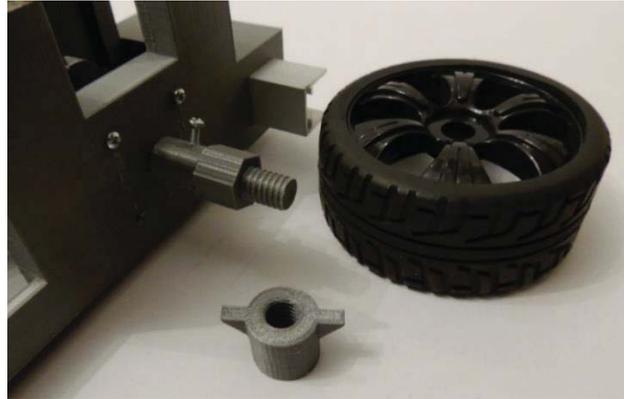


Figura 3-34 Pieza de conexión del rotor del motor con la rueda de la plataforma

Tabla 3-15 Características de la impresión 3D de la pieza de unión

Parámetro	Valor
Peso	11,68 gr
Altura	3,7 cm
Ancho	2,2 cm
Largo	5 cm
Tiempo impresión	1 hr 9 min
Resolución	0,2 mm
Relleno	30 %

#### 9. Rueda de castor o rueda volante

Esta rueda es comúnmente utilizada en muebles del hogar y para este proyecto servirá como pivote para controlar los movimientos de la plataforma proporcionando movilidad y viraje. Se indica en la Figura 3-35 la imagen del producto y la Tabla 3-16 indica sus características.

Tabla 3-16 Características según el fabricante de la rueda de castor

Especificaciones	
Marca	GVM
Modelo	Zincada
Color	Negro
Diametro	10,3 cm
Capacidad	25 gr



Figura 3-35 Rueda de castor de la plataforma

#### 10. Perfil de aluminio

Finalmente se presenta la pieza que tiene la misión de enrielar el carro de medición, en la Figura 3-36. Este sistema funciona como cualquier portón automático domiciliario o de edificio. En ella estarán contenidas las cremalleras que se mostraron anteriormente. Las características del producto se indican en la Tabla 3-17.

Tabla 3-17 Características del producto

Parámetros	Especificaciones
Marca	CINTAC
Modelo	Corredera
Color	Zinc
Diametro	120 cm

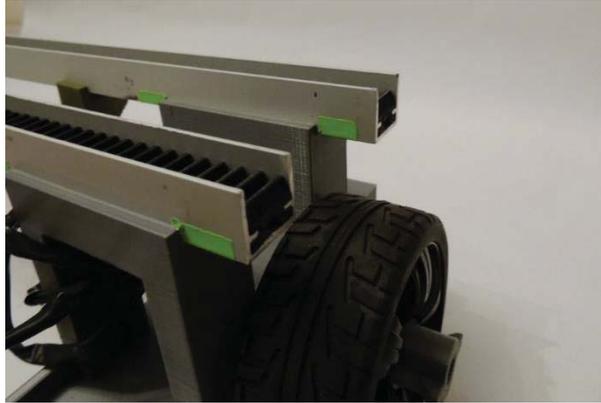


Figura 3-36 Perfiles ya implementados en la plataforma

# 4

## Desarrollo del algoritmo

En el capítulo anterior se revisaron los componentes que se utilizarán para el movimiento y procesamiento de la plataforma. Estos componentes interactúan entre ellos y reciben datos del operador y del medio en el que opera. En el presente capítulo se explica el funcionamiento interno del sistema y la interacción entre los subsistemas encargados de cada tarea.

### 4.1 Sistema general

La plataforma está compuesta de dos grandes sistemas como lo indica la Figura 4-1, uno, encargado del procesamiento de los datos ingresados, largo y ancho, específicamente para calcular los puntos en el área de medición, esto es, cada cuanto distancia se debe medir. Además se obtienen las especificaciones temporales de la operación, día y hora. El segundo, encargado de la locomoción de la plataforma, controlando los tres motores, dos para el movimiento de la plataforma y el tercero para el movimiento del sensor del luxómetro.

Ambos sistemas se comunican entre sí por comunicación serie por medio de uno de los tres puertos que dispone Arduino. La velocidad de transmisión entre el sistema de procesamiento y el de locomoción es de 9600 baudios y la velocidad entre el luxómetro y el sistema de procesamiento es de 2400 baudios.

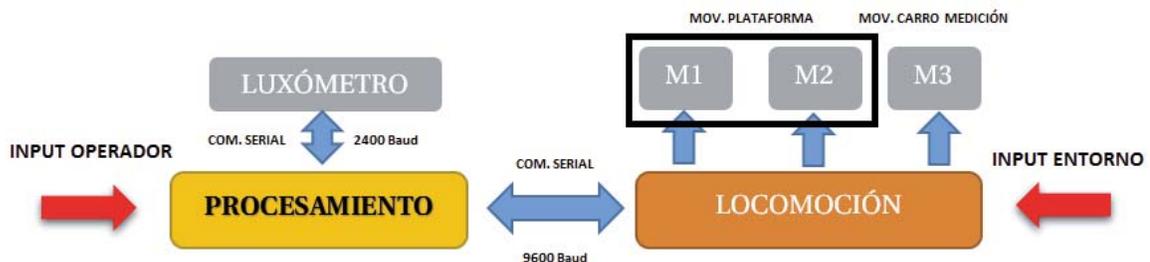


Figura 4-1 Comunicación entre las partes de la plataforma

El sistema de almacenamiento e interfaz encargado del procesamiento interactuará con el operario mediante el teclado y el display lcd recibiendo las medidas de la calzada. El operario deberá seguir las instrucciones proporcionadas en el LCD.

Al iniciarse la plataforma, se iniciarán automáticamente ambos sistemas. En primera instancia el sistema de procesamiento se encargará de la recepción de variables y cálculo de puntos, para luego enviar un comando para el inicio del sistema de locomoción como lo indica la

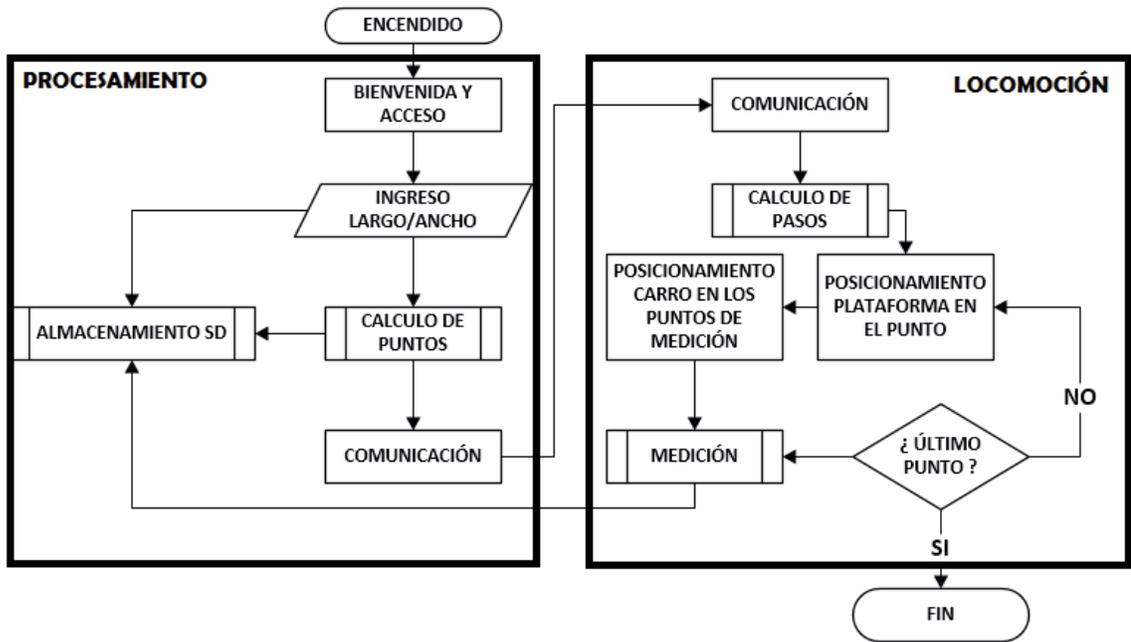


Figura 4-2 Sistema general de funcionamiento de la plataforma

## 4.2 Procesamiento y almacenamiento de datos

Esta sección de la plataforma es la que dirige la operación completa, guiando la tarea y comunicándose con el operario. Está compuesta por un Arduino Mega 2560, reloj de tiempo real, pantalla y teclado, una placa controladora para tarjetas sd y una tarjeta de gestión de datos por medio de comunicación RS232 como se muestra en la Figura 4-3.

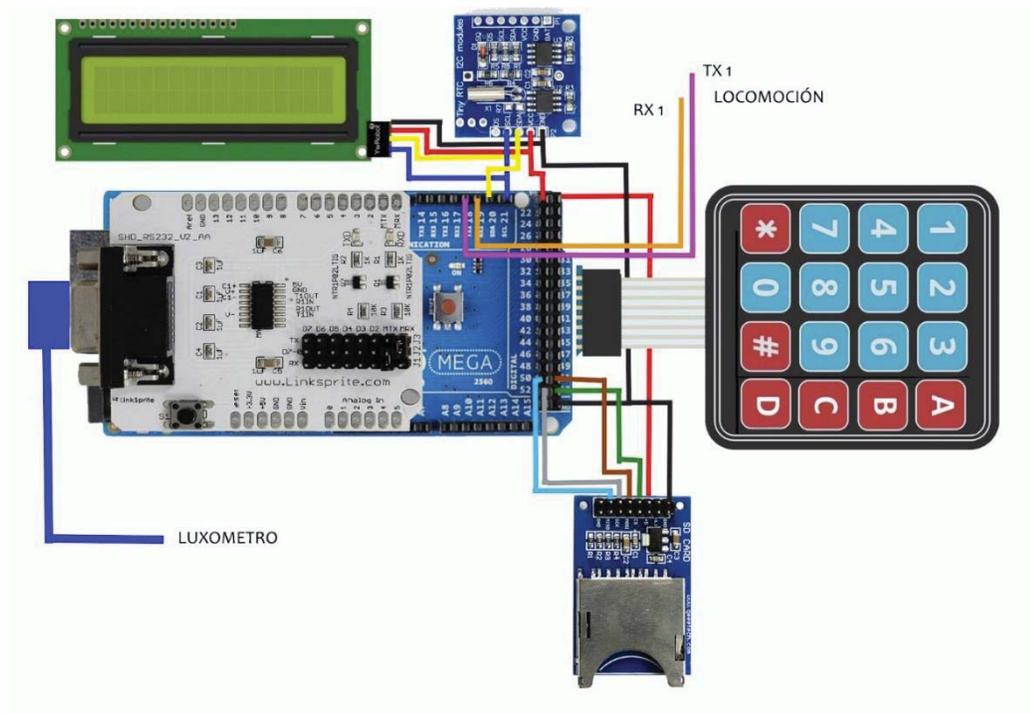


Figura 4-3 Esquema de conexión del sistema de almacenamiento y procesamiento

Al iniciar el programa se establecen los parámetros de comunicación serial y los datos del reloj; se verifica la presencia de una tarjeta sd y se crea un archivo con extensión .txt que contendrá las marcas temporales, ingreso de largo y ancho, cálculo de puntos, distancia entre ellos y los parámetros de iluminancia.

El procedimiento explicado en la Figura 4-4 en la sección LOOP inicia con la solicitud de los datos de entrada y se informa por cualquier ingreso no coherente. Por otro lado la sección SETUP es necesaria para configuraciones previas de la plataforma. Finalmente el sistema ingresa en un ciclo de comunicación entre la sección de procesamiento y de locomoción, cuadro “Inicio Comunicación”, en primera instancia enviando un comando para la inicialización del sistema de locomoción y a la espera de la posición del carro de medición para comenzar la tarea.

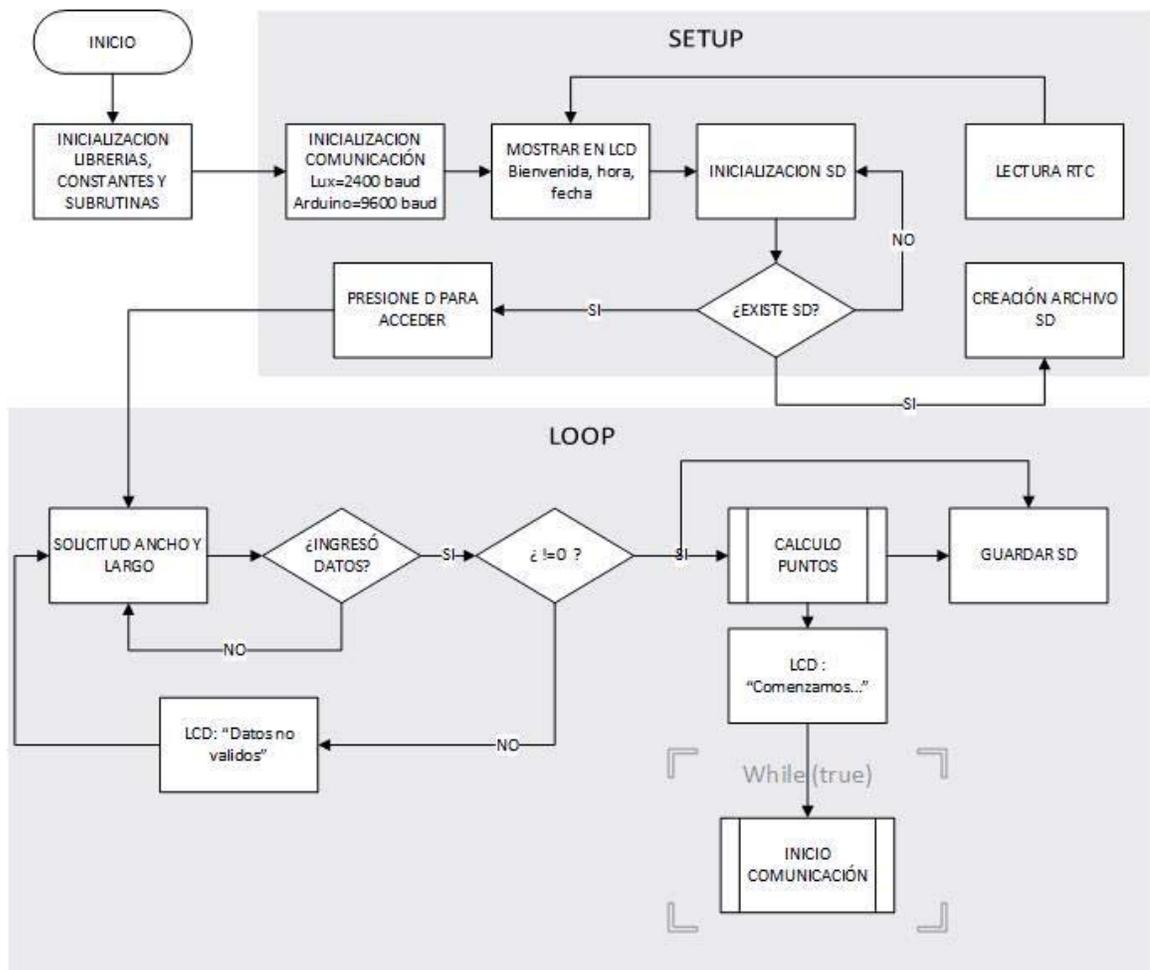


Figura 4-4 Operación del sistema de almacenamiento e interfaz

### 4.2.1 Interfaz

La interfaz, compuesta de una pantalla y un teclado, mostrarán todos los pasos a seguir al operario. El ejecutor de la operación deberá aprobar cada una de las acciones que ejecutará la plataforma, dando tiempo para que el robot esté bien posicionado y con la disposición completa del área a medir.

### 4.2.2 Ingreso de medidas a la plataforma.

Ambos medidas, ancho y largo, son solicitadas por la plataforma en centímetros, esto debido a que el teclado alfanumérico utilizado no posee la tecla “,” (coma) o “.” (punto), facilitando el

ingreso de los datos para el operador. Por protocolo, el operario debe ingresar 4 números por cada medida como se indica en el ejemplo de la Figura 4-5.

dato	x	x	x	x
ejemplo	0	3	1	0
Esto equivale a 310 cm (3,1 m)				

Figura 4-5 Formato de ingreso de medidas

Si el ancho ingresado sobrepasa el largo ingresado la pantalla de la plataforma anunciará un error en el ingreso, solicitando nuevamente el ingreso de datos. El proceso se ilustra en la Figura 4-6.

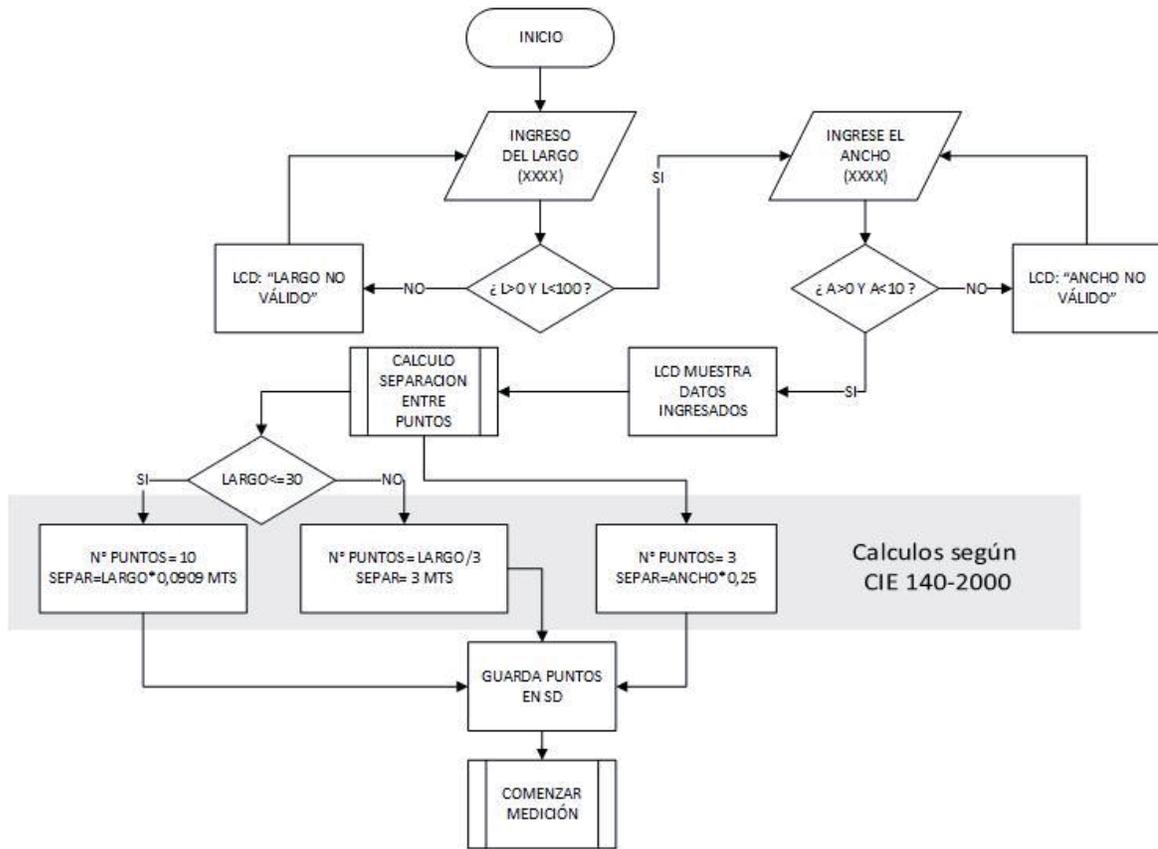
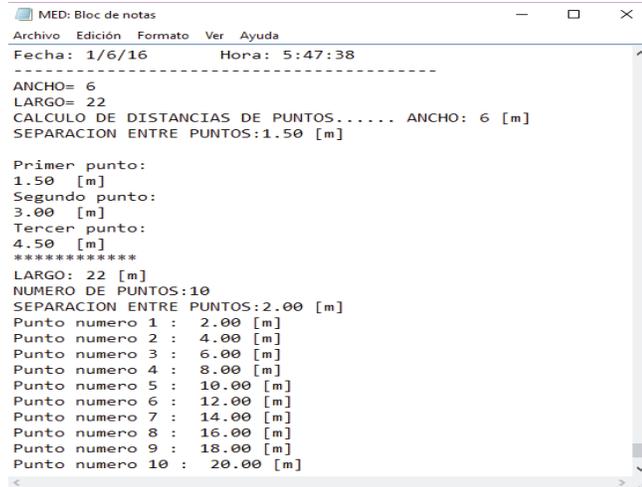


Figura 4-6 Análisis y cálculos de medidas ingresadas

Una vez terminada la configuración y los parámetros ingresados, los cálculos realizados se almacenan en el archivo .txt como se indica en la Figura 4-7.



```

MED: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Fecha: 1/6/16 Hora: 5:47:38
-----
ANCHO= 6
LARGO= 22
CALCULO DE DISTANCIAS DE PUNTOS..... ANCHO: 6 [m]
SEPARACION ENTRE PUNTOS:1.50 [m]

Primer punto:
1.50 [m]
Segundo punto:
3.00 [m]
Tercer punto:
4.50 [m]
*****
LARGO: 22 [m]
NUMERO DE PUNTOS:10
SEPARACION ENTRE PUNTOS:2.00 [m]
Punto numero 1 : 2.00 [m]
Punto numero 2 : 4.00 [m]
Punto numero 3 : 6.00 [m]
Punto numero 4 : 8.00 [m]
Punto numero 5 : 10.00 [m]
Punto numero 6 : 12.00 [m]
Punto numero 7 : 14.00 [m]
Punto numero 8 : 16.00 [m]
Punto numero 9 : 18.00 [m]
Punto numero 10 : 20.00 [m]

```

Figura 4-7 Datos almacenados automáticamente

### 4.3 Sistema de locomoción y posicionamiento

El sistema de locomoción de la plataforma está compuesto por dos motores paso a paso bipolar modelo NEMA 17. Cada uno es controlado por un driver modelo A4988 que entrega hasta 2A por bobina. Además, el carro de medición es controlado por un tercer motor paso a paso unipolar, también controlado por este driver.

La locomoción es uno de los factores de mayor importancia en el proyecto ya que es fundamental mantener un bajo error, menor al 10% o menor a 1 cm respecto a cada punto de medición.

El sistema de locomoción detecta marcas externas, la huincha de medir, que permiten orientar la dirección de avance por medio de seguidores de línea. Esta, es dispuesta por los operarios que la han usado para medir el largo de la calzada.

#### 4.3.1 Seguidor de línea

En la parte frontal de la plataforma se ubica un arreglo de seis sensores del tipo QRE1113 digital que miden las tonalidades del piso basándose en el rebote de un haz infrarrojo proveniente del emisor del sensor.

Una vez que los operarios midan el largo de la calzada, deberán dejar posicionada la huincha de medir, esta servirá de línea, con un alto contraste dado por el color del pavimento de la calzada.

Los sensores, en términos de programación conforman un arreglo SV[i] siendo i el número de sensores del arreglo y SV el nombre del vector de sensores. Al comenzar el movimiento se realiza una medición en cada uno de los sensores obteniendo valores entre 0 y 4000. Estos valores son comparados entre ellos obteniendo el nivel máximo y mínimo alcanzado mediante las instrucciones min () y max (). Arduino al utilizar estas funciones, sólo es capaz de comparar dos valores por vez, es por esto que se comparan de a pares. A cada comparación se le asigna una variable con las letras a, b, c y d para asignar los mínimos relativos y; e, f, g y h para asignar los

máximos relativos. Al final de esta comparación se obtiene dos valores, el mínimo y el máximo absolutos renombrados con las variables MINIMO y MAXIMO. Las operaciones se muestran en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Variables de comparación entre sensores de línea

Variable	Operación
a	$\min(SV[1],SV[2])$
b	$\min(SV[3],SV[4])$
c	$\min(SV[5],SV[6])$
d	$\min(a,b)$
MINIMO	$\min(c,d)$
e	$\max(SV[1],SV[2])$
f	$\max(SV[3],SV[4])$
g	$\max(SV[5],SV[6])$
h	$\max(e,f)$
MAXIMO	$\max(g,h)$

Cuando el sensor se posiciona en el color blanco, se obtienen valores de lectura menores que los valores leídos ubicándose en el color negro, con esto se infiere que la línea blanca se encontraría en los niveles mínimos. Ejemplificando lo anterior, se muestra la Figura 4-8 en la que se muestran los sensores de línea con su respectivo número y la posición de la línea blanca.

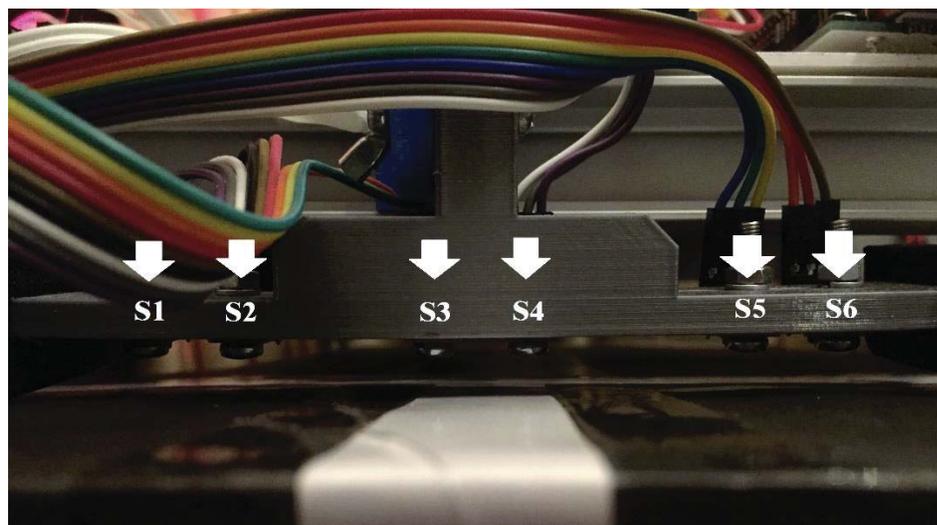
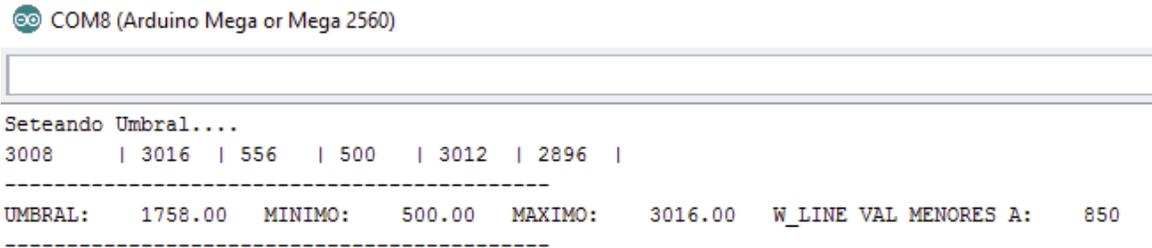


Figura 4-8 Test de sensores de línea y detección de línea

Los datos obtenidos por cada sensor se escriben en el monitor serie de Arduino con el siguiente formato.

SV[1] | SV[2] | SV[3] | SV[4] | SV[5] | SV[6] |

Al analizar los valores y la posición de la línea blanca según la Figura 4-8 y contrastándolo con los datos obtenidos en la Figura 4-9 se reafirma lo dicho anteriormente. Los colores claros presentarán valores menores a los reflejados por colores oscuros, aún más, tratándose de los “colores” extremos, blanco y negro.



COM8 (Arduino Mega or Mega 2560)

```

Seteando Umbral....
3008      | 3016 | 556   | 500   | 3012 | 2896 |
-----
UMBRAL:   1758.00  MINIMO:   500.00  MAXIMO:   3016.00  W_LINE VAL MENORES A:   850
-----

```

Figura 4-9 Datos desde los sensores de línea y cálculos de mínimo y máximo.

Una vez calculado el mínimo y máximo de los valores medidos, se calcula la posición de la línea blanca. Para esto es necesario identificar el rango de valores en los cuales se mueve el color blanco, que en el ejemplo de la Figura 4-9 es entre 500 y 556. Examinando estos valores se puede apreciar que no presentan el mismo valor aun tratándose del mismo color por consiguiente es necesario redefinir para qué valores se presentará el color blanco. Realizando múltiples pruebas se puede concluir la Ecuación (4-1) para la identificación de la línea blanca.

$$LINEA\_BLANCA = MINIMO + 0,7 * MINIMO \quad (4-1)$$

La línea blanca se encontrará con un 99% de exactitud para valores superiores al mínimo, más un 70 % de este mismo valor. Esta fórmula no interfiere con los valores medidos para tonalidades de color negro según pruebas realizadas con los sensores de línea.

Para un mejor análisis de casos en el seguidor de línea, los datos leídos en tiempo real son transformados a datos binarios. Será un valor cero (0) si el dato leído es superior al dato almacenado como LINEA\_BLANCA, de lo contrario será uno (1).

Con lo anterior ya es posible diseñar un análisis de casos para decidir qué movimiento ejecutará la plataforma dependiendo de la posición de la línea blanca. A través de este algoritmo la plataforma deberá mantener siempre la línea blanca bajo los sensores centrales. Si dicha condición no se cumple, la plataforma responderá con la compensación de uno de los dos actuadores, corrigiendo el error. El diagrama de bloques se muestra en la Figura 4-10.

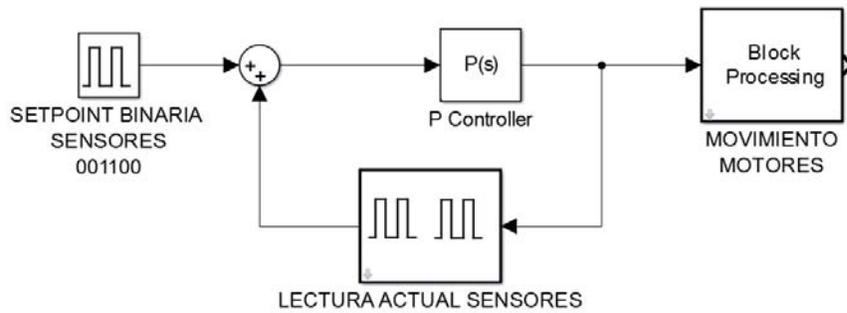


Figura 4-10 Sistema de control de locomoción

La plataforma responderá corrigiendo la posición, apagando y encendiendo el motor del lado que necesite avanzar, en la Figura 4-11 se presentan los 3 posibles casos de forma general. Sólo en el caso central, plataforma con avance correcto, ambos motores están encendidos para avanzar en línea recta. En el primer y tercer caso la plataforma debe corregir encendiendo el motor derecho para el primer caso y encendiendo el motor izquierdo para el tercer caso, de manera de poder corregir su avance y volver a alinearse.

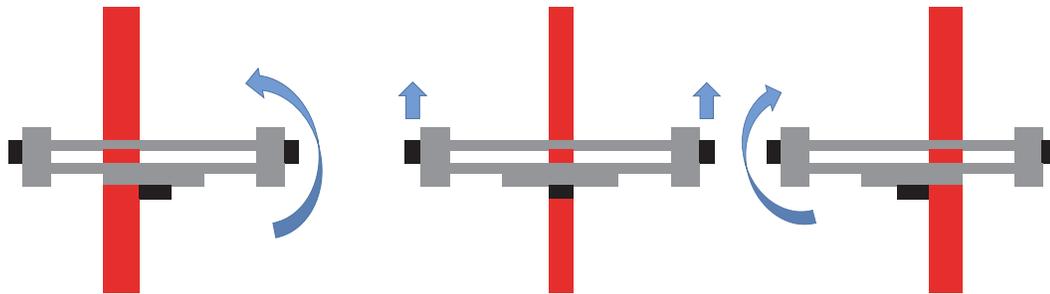


Figura 4-11 Movimiento de la plataforma para tres casos generales.

La Figura 4-12 ilustra todos los casos considerados como favorables. El caso óptimo es el que presenta en color rojo en la parte central de la figura. Se indicará con un número 1 para algún sensor que este ubicado en la línea blanca. Por el contrario, con un número 0 si algún sensor se ubica en la calzada. A modo de explicación de la figura, se tomará la primera fila indicada con una flecha roja en el costado izquierdo. La lectura de los sensores indica que sólo el sensor 1 (S1) se encuentra en la línea blanca que guía la trayectoria de la plataforma, esto indica que la plataforma se encuentra hacia el costado derecho de la calzada y en una posición incorrecta de avance por lo cual, esta debe corregir su movimiento. Para corregir el avance, la plataforma enciende el motor derecho (ON) y apagar el motor izquierdo (OFF), tantas veces sea necesario, para con ello, retomar el avance correcto y situarse los sensores S3 y S4 en la línea blanca, mientras que el resto de los sensores (S1,S2,S5,S6) se posicionarán en la calzada (en color gris).

dirección de avance  
↑

	MOTOR IZQUIERDO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	MOTOR DERECHO	
corrección de motor izquierdo	OFF	1	0	0	0	0	0	ON	corrección de motor derecho
	OFF	1	1	0	0	0	0	ON	
	OFF	0	1	0	0	0	0	ON	
	OFF	0	1	1	0	0	0	ON	
	OFF	0	0	1	0	0	0	ON	
	ON	0	0	1	1	0	0	ON	
	ON	0	0	0	1	0	0	OFF	
	ON	0	0	0	1	1	0	OFF	
	ON	0	0	0	0	1	0	OFF	
	ON	0	0	0	0	1	1	OFF	
ON	0	0	0	0	0	1	OFF		

sensores en la calzada  
 sensores en línea blanca  
 sensores y plataforma en posición óptima

Figura 4-12 Respuesta de motores a once casos favorables

También pueden existir casos incoherentes, estos se pueden dar por diversos motivos; error de lectura, descalibración de sensores, altura no óptima del arreglo de sensores o porque la plataforma sale de la ruta. Estos casos se muestran en la Figura 4-13. En estos casos ambos motores, derecho e izquierdo, se mantienen apagados.

dirección de avance  
↑

MOTOR IZQUIERDO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	MOTOR DERECHO
OFF	1	1	1	1	1	1	OFF
OFF	0	0	0	0	0	0	OFF

Figura 4-13 Respuesta de motores a casos incoherentes

Los actuadores serán controlados por un determinado número de pasos dependiendo el caso. Este número de pasos o steps será proporcional al error. Para un error mayor, el número de pasos será mayor, para poder reestablecer rápidamente la ruta óptima, por otro lado, para un error menor, los pasos serán acotados.

Cuando la plataforma se encuentre en el caso óptimo, los pasos serán mayores para poder avanzar rápidamente al siguiente punto de medición y así acortar los tiempos de la operación. Con respecto a la cantidad de pasos de corrección del avance de la plataforma se ilustra la Figura 4-14.

		↑							
	MOTOR IZQUIERDO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	MOTOR DERECHO	
	0 pasos/rev	0	0	0	0	0	0	0 pasos/rev	
	0 pasos/rev	1	0	0	0	0	0	60 pasos/rev	corrección rápida
	0 pasos/rev	1	1	0	0	0	0	60 pasos/rev	
	0 pasos/rev	0	1	0	0	0	0	60 pasos/rev	
	0 pasos/rev	0	1	1	0	0	0	30 pasos/rev	corrección lenta
	0 pasos/rev	0	0	1	0	0	0	30 pasos/rev	
avance optimo	40 pasos/rev	0	0	1	1	0	0	40 pasos/rev	avance optimo
corrección lenta	30 pasos/rev	0	0	0	1	0	0	0 pasos/rev	
	30 pasos/rev	0	0	0	1	1	0	0 pasos/rev	
corrección rápida	60 pasos/rev	0	0	0	0	1	0	0 pasos/rev	
	60 pasos/rev	0	0	0	0	1	1	0 pasos/rev	
	60 pasos/rev	0	0	0	0	0	1	0 pasos/rev	
	0 pasos/rev	1	1	1	1	1	1	0 pasos/rev	

Figura 4-14 Respuesta proporcional de cada motor según el valor sentido

Observando la Figura 4-14, por ejemplo, si la lectura de los sensores es 000110, la línea blanca se encontrará en el lado derecho de la plataforma, entonces será necesario corregir la trayectoria. La corrección consiste en apagar el motor derecho y el motor izquierdo encenderlo con un paso de aproximadamente 30 pasos por revolución, definida como una corrección lenta.

- Cálculo de la distancia recorrida por la plataforma

La plataforma previamente ha calculado la distancia entre cada punto, por lo cual, esta se conoce. Para medir la distancia se utiliza una rueda sólida, para evitar la deformación, acondicionada como encoder, Figura 4-15. En ella, se encuentra dispuesto un sensor infrarrojo que se acciona cada vez que el receptor del sensor se active. Al activarse, se acciona un contador que acumula la cantidad de vueltas que realiza la rueda del encoder.

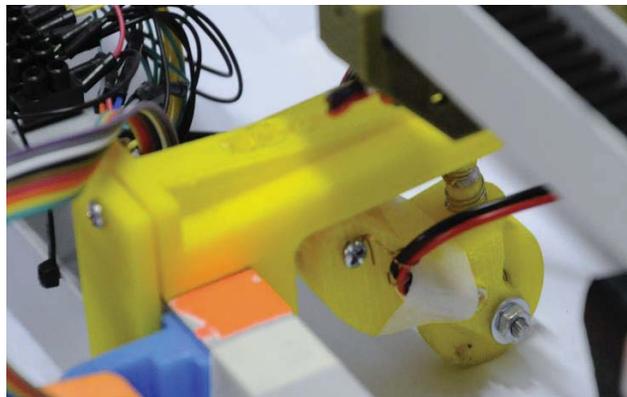


Figura 4-15 Encoder

La rueda del encoder, que se muestra en la Figura 4-16, tiene un perímetro de 10,05 cm que permite estimar la distancia recorrida, según el número de giros realizados. Suponiendo que la distancia entre puntos a lo largo es de 1 metro, la rueda deberá girar 9,95 vueltas.

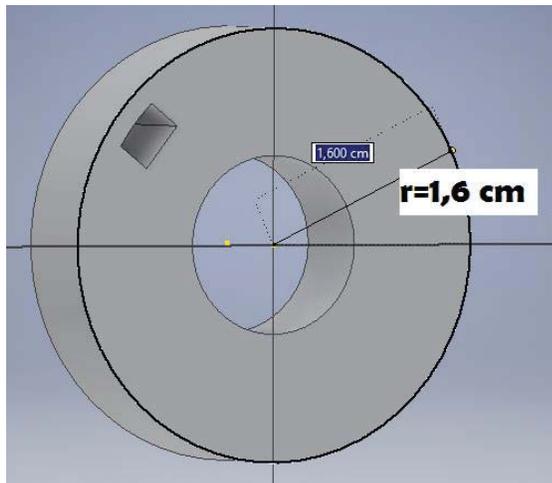


Figura 4-16 Diseño de la rueda del encoder

Considerando las especificaciones del motor paso a paso, el motor deberá girar 200 pasos para dar una vuelta completa, que es lo mismo que una vuelta completa de la rueda, el motor deberá actuar con 1990 pasos para conseguir avanzar 1 metro. Por ende, cuando el contador de pasos sea igual a 1990 pasos, el algoritmo dará la instrucción de detener la plataforma y comenzar una nueva medición de puntos a lo ancho y reestableciendo el contador en 0 para volver a ejecutar la misma acción n veces sea la cantidad de puntos a medir en lo largo de la calzada.

### 4.4 Medición de grilla

El proceso de medición, se ejecutará cada vez que termine el proceso de locomoción o avance de la plataforma y una cantidad determinada de veces dependiendo del número de puntos a lo largo. Dependerá por un lado del sistema de locomoción, accionando el motor del carro, y por el otro, la solicitud y almacenamiento de cada valor de iluminancia ejecutado por el sistema de almacenamiento.

Los finales de carrera y pórticos infrarrojos servirán de ayuda para la detección de la posición del carro. En cada uno de los pórticos el carro se detiene y envía por puerto serie un comando, el cual recibirá el sistema de almacenamiento e interpretará dependiendo del caso. Por otro lado, los finales de carrera, ubicados en los extremos del riel, son implementados para dar seguridad de la detención del carro de medición. Un comando enviado por un fin de carrera siempre indicará un comienzo o fin del proceso. En cambio los comandos enviados por los pórticos infrarrojos señalarán que se debe ejecutar una nueva toma de iluminancia desde el luxómetro, enviando el comando específico para la recepción de datos del luxómetro. Además, los comandos enviados por los pórticos servirán de subíndice para identificar el punto medido, como se indica en la Figura 4-17, luego de ser almacenado en la tarjeta sd.

1,1 lux 37.99E0  
 1,2 lux 40.27E0  
 1,3 lux 41.72E0

Figura 4-17 Formato de datos escritos en la SD

El sistema y operación completo, se resume en el siguiente diagrama que muestra el comando recibido y enviado por cada tarjeta, a modo de pregunta y respuesta. La respuesta o comando será esperada por el receptor, de no llegar, el algoritmo no podrá avanzar a la siguiente tarea. Lo anterior se gráfica en la Figura 4-18 en la que se especifica el proceso interno de programación a rasgos generales.

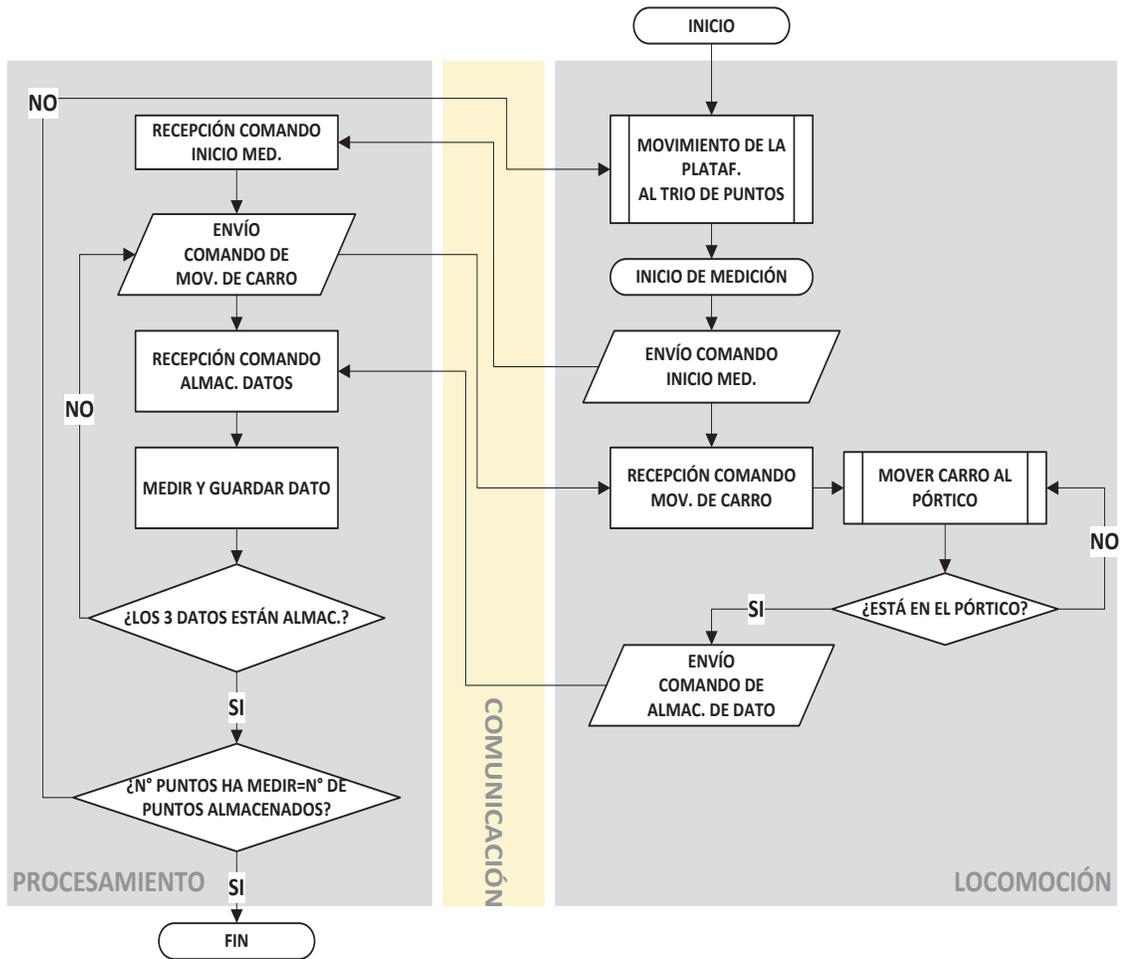


Figura 4-18 Diagrama de comunicación entre sistemas

# 5 Pruebas y resultados.

Para todo proyecto que involucre la implementación de un sistema electrónico es necesaria la realización de pruebas que permitan visualizar el comportamiento del prototipo, permitiendo tanto efectuar los cambios pertinentes para una mejor respuesta del sistema como también contrastar los resultados en diferentes situaciones.

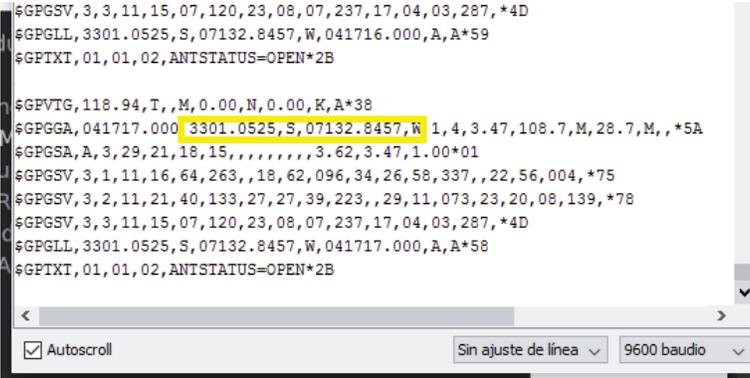
Las pruebas realizadas se separan en 3 partes: pruebas de componentes electrónicos, pruebas del sistema de locomoción y pruebas del sistema de almacenamiento.

## 5.1 Pruebas de componentes electrónicos

Estas pruebas se realizaron teniendo algunas nociones de las tecnologías que podrían solucionar factores importantes en el proyecto, como lo es el posicionamiento y el almacenamiento de datos pudiendo así corroborar o descartar estas tecnologías.

### 1. GPS L-80

Las pruebas realizadas con esta tarjeta han permitido comprobar la precisión de esta. Se implementó según las recomendaciones del fabricante y las primeras lecturas de posición se indican en la Figura 5-1.



```
#GPGSV,3,3,11,15,07,120,23,08,07,237,17,04,03,287,*4D
#GPGLL,3301.0525,S,07132.8457,W,041716.000,A,A*59
#GPTXT,01,01,02,ANTSTATUS=OPEN*2B

#GPVTG,118.94,T,,M,0.00,N,0.00,K,A*38
#GPRMC,041717.000,3301.0525,S,07132.8457,W,1.4,3.47,108.7,M,28.7,M,,*5A
#GPGSA,A,3,29,21,18,15,,,,,,,,,3.62,3.47,1.00*01
#GPGSV,3,1,11,16,64,263,,18,62,096,34,26,58,337,,22,56,004,*75
#GPGSV,3,2,11,21,40,133,27,27,39,223,,29,11,073,23,20,08,139,*78
#GPGSV,3,3,11,15,07,120,23,08,07,237,17,04,03,287,*4D
#GPGLL,3301.0525,S,07132.8457,W,041717.000,A,A*58
#GPTXT,01,01,02,ANTSTATUS=OPEN*2B

#GPRMC,041717.000,A,3301.0525,S,07132.8457,W,0.00,118.94,061015,,,A*69
```

Figura 5-1 Primeras pruebas con GPS L-80

En la Figura 5-1 se muestran las tramas recibidas en las primeras pruebas con la tarjeta GPS L-80 desde un departamento ubicado en la intersección de 6 norte con 1 oriente en la ciudad de Viña del Mar. Desglosando la trama y llevando estas coordenadas a Google Maps se obtuvo lo indicado en la Figura 5-2.



Figura 5-2 Visualización de las coordenadas recibidas en las primeras pruebas

El resultado de la prueba indica un error de precisión de más de 50 metros con respecto a la ubicación real lo cual descarta el uso de esta tecnología dados los requerimientos que implica el proyecto.

## 2. Reloj de tiempo real modelo DS1307

Este RTC según las recomendaciones del fabricante, para realizar las primeras pruebas, es conectado como se indica en la Figura 5-3.

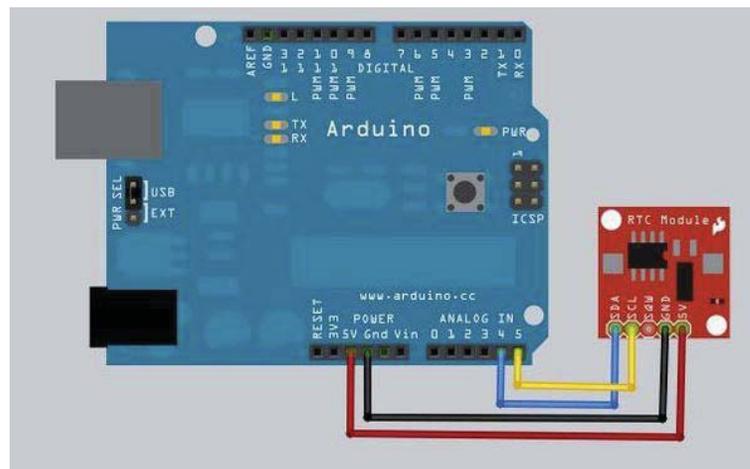


Figura 5-3 Conexión de prueba del RTC

Los pines de datos usados en la placa Arduino son 4 y 5 de la línea análoga ya que estos pines corresponden a SDA y SCL, respectivamente, para el uso del protocolo I2C. Los datos obtenidos se muestran en la Figura 5-4 los cuales corresponden efectivamente a la hora y fecha de la prueba realizada.

```
-----
Fecha: 24/5/16      Hora: 22:46:49
-----
```

Figura 5-4 Formato fecha y hora actual

### 3. Pruebas de almacenamiento con la tarjeta SD

Para operar con Arduino es necesario descargar la librería SD.h y SPI.h la que contiene las configuraciones necesarias para almacenar archivos en la tarjeta SD y la comunicación con ella, respectivamente. Cabe mencionar que este módulo, puede trabajar con tarjetas SD y microSD. Se aconseja formatear la tarjeta antes de utilizar.

Las primeras pruebas se realizan guardando valores obtenidos por un sensor de luz, LDR, valores que son capturados por medio de un botón. El estado del botón es leído por Arduino, y da la orden de guardar el valor actual del sensor al presionar el botón. El circuito del sensor es el que se muestra en la Figura 5-5, obviamente fusionado con la conexión de la tarjeta SD.

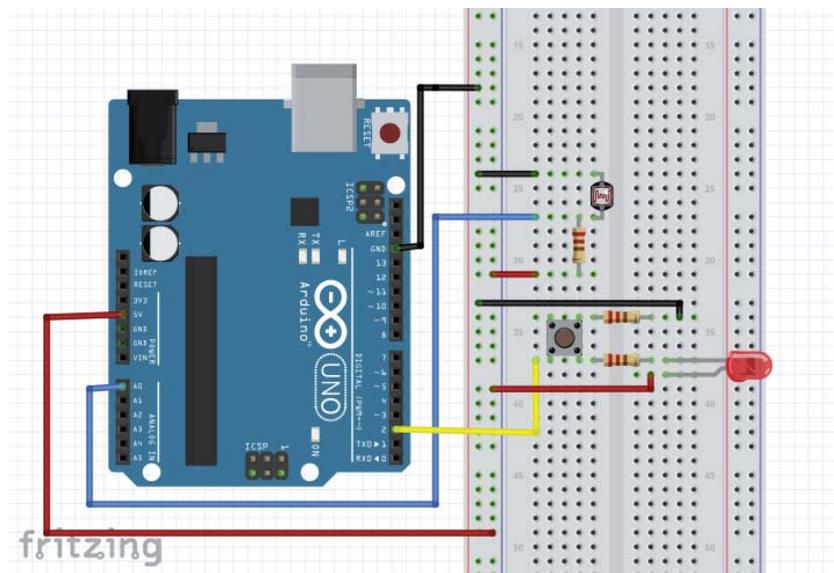


Figura 5-5 Conexión de sensor de luz para prueba con SD card

Al ejecutar el programa se crea un archivo con extensión txt, con el nombre que se indique en el programa (en el caso de la imagen, el archivo es llamado “med”). Si el archivo ya existe, no se volverá a crear, sino que sólo se continuará escribiendo en él.

```
datos = SD.open("med.txt", FILE_WRITE);
```

Cada vez que se requiera guardar información en el documento txt es necesario abrir el archivo y cerrar al finalizar la escritura, de lo contrario no se reconocerá el documento en un posterior almacenamiento.

Las primeras pruebas realizadas entregaron el siguiente archivo, con los datos tomados desde el LDR por medio de un botón como indica la Figura 5-6.



Figura 5-6 Datos obtenidos y guardados en la prueba de la SD card

Los datos almacenados dan cuenta de un correcto funcionamiento del sistema, lo cual da seguridad en el respaldo de los datos medidos.

#### 4. Comunicación serial con el luxómetro

Para generar la comunicación con el luxómetro es necesario generar un comando y enviarlo por el puerto serial desde la placa Arduino. El comando será recibido y leído por el luxómetro, según el comando, el luxómetro responderá a la solicitud. A continuación se muestra la Tabla 5-1 con la sintaxis de los comandos y la Tabla 5-2 con los comandos válidos.

Tabla 5-1 Sintaxis para los comandos

Símbolo	Significado
!	Inicia comunicación (Los comandos deben estar presedidos “!”)
{CR}	Carriage Return (ASCII 13); Reconoce como fin de comando.
{LF}	Line feed (ASCII 10); Reconoce como el fin de un comando.
(Espacio en blanco)	Actua como un parametro delimitador sin comandos. El luxómetro tambien reconoce una coma (,) como delimitador.
Italica	Son nombres de parámetros.

Tabla 5-2 Ejemplos de comandos válidos.

Comando	Significado
!NEW{CR}	El luxómetro transmitirá el valor actual leído.
!NEW n{CR}	El luxómetro transmitirá n valores leídos.

Los datos recibidos deben ser interpretados y si fuese necesario “limpiados” para mostrarlos en el formato que el usuario desee. Estos datos se muestran inicialmente como se visualiza en la Figura 5-7.

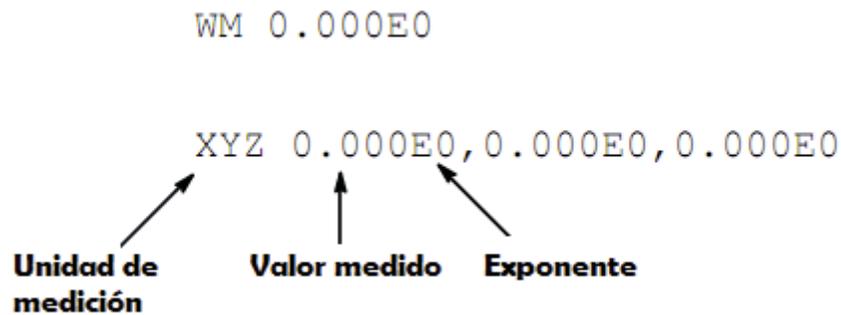


Figura 5-7 Formato de datos entregados por el luxómetro

Los valores entregados contienen cuatro dígitos significativos y un índice multiplicador del exponencial.

Las primeras pruebas consisten en conectar el luxómetro por medio del cable diseñado y propuesto por el fabricante, al puerto serie de un pc. Se instala el software Termite; este programa permite leer y escribir en el puerto serie del PC. Es necesario ajustar la velocidad de comunicación del software a la velocidad de trabajo del luxómetro, 2400 baudios.

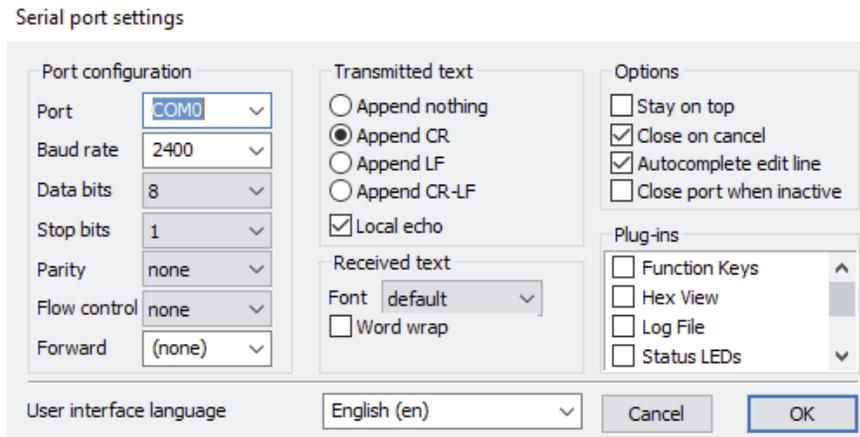


Figura 5-8 Configuración del software Terminate.

Posteriormente se escribe el comando “!NEW”, que solicita el dato, en la pantalla del software. En la pantalla aparece el valor actual obtenido por el luxómetro.

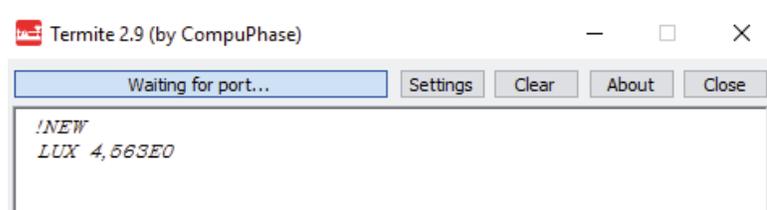


Figura 5-9 Primeras pruebas en Software Terminate.

Lo obtenido verifica la correcta comunicación con el instrumento a utilizar.

## 5.2 Pruebas de locomoción

Las pruebas realizadas tienen el objetivo de encontrar la mejor configuración de pasos de motor y de velocidad tanto para la plataforma como para el carro de medición, obteniendo el comportamiento deseado.

### 1. Carro de medición

Las pruebas realizadas con el carro de medición permiten conocer el tiempo que durará la medición a lo ancho de la calzada. Para estos efectos se considera una calzada de ancho 110 cm, considerando el largo actual del riel, posicionando los sensores tal como lo indica la Figura 5-10.

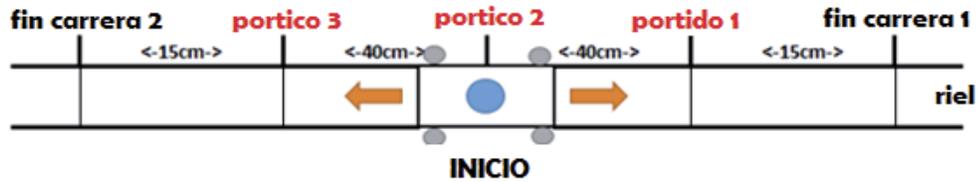


Figura 5-10 Recorrido del carro de medición

El recorrido del carro está predefinido de la siguiente forma: PORTICO 2, PORTICO 1, FIN CARRERA 1, **PORTICO 1, PORTICO 2, PORTICO 3**, FIN CARRERA 2, PORTICO 3, PORTICO 2. Esta secuencia está predefinida y programada de manera de optimizar el posicionamiento del carro y grabación de los datos almacenados. El punto inicial y final (PORTICO 2) es definido de manera que el peso del carro no afecte en el centro de masa de la plataforma e interfiera en la dinámica de movimiento de esta. Cabe mencionar que la medición de iluminancia se realizará en los sensores indicados en rojo.

La secuencia predefinida por programa busca un punto de referencia para poder comenzar la medición y tener un orden de almacenamiento de los datos, el punto referencia es FIN CARRERA 1, por ende al comenzar el movimiento del carro, este, busca posicionarse en FIN CARRERA 1. Una vez accionado este sensor, se le ordena al carro posicionarse en PORTICO 1 y así sucesivamente hasta llegar a FIN CARRERA 2 y devolverse a la posición inicial que es PORTICO 2.

El posicionamiento del carro en cada pórtico infrarrojo proporciona la medición de iluminancia en el punto, deteniendo el carro y enviando la orden al luxómetro para realizar la medida y posteriormente grabar el dato en la tarjeta SD.

Como se mencionó en capítulos anteriores, el motor que controla el movimiento del carro de medición es capaz de dar 48 pasos por vuelta. Este dato es utilizado en la Tabla 5-3 para dimensionar la cantidad adecuada de pasos y obtener una velocidad apropiada de desplazamiento de modo de no eludir la detención en cada sensor.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5-3 mencionando los pasos que ejecutará el motor por cada vuelta, tiempo de demora por cada tres puntos medidos, esto es, la secuencia PORTICO 1-PORTICO 2-PORTICO 3, tiempo de demora por cada nueve puntos medidos, o sea, PORTICO 1-PORTICO 2-PORTICO 3-PORTICO 1-PORTICO 2-PORTICO 3-PORTICO 1-PORTICO 2-PORTICO 3, tiempo que demora el carro de medición en realizar 9 mediciones, detenciones fallidas para las 9 mediciones y el porcentaje de detenciones favorables en la posición. Una detención fallida ocurre cuando el carro de medición pasa por un pórtico infrarrojo y no se produce la detención y por el contrario, una detención favorable es cuando el carro se detiene en cada uno de los pórticos.

Tabla 5-3 Pruebas de tiempo y paso de motor del carro de medición

Pasos de motor por vuelta	Tiempo para 3 mediciones Sec:P1-P2-P3	Tiempo para 9 mediciones	Detenciones fallidas (total de 9)	% de detenciones favorables
150 paso/rev	50 seg	127 seg	0/9 veces	100%
300 paso/rev	36 seg	120 seg	3/9 veces	67%
500 paso/rev	34 seg	89 seg	4/9 veces	56%
800 paso/rev	31 seg	67 seg	6/9 veces	33%
1000 paso/rev	29 seg	65 seg	7/9 veces	22%

Es de suma importancia que el carro se detenga en cada uno de los pórticos para realizar cada medición. La tabla anterior permite seleccionar la cantidad de pasos por vuelta pertinentes para que el carro tenga un comportamiento aceptable, sin errores en las detenciones del carro.

Se prueban distintas configuraciones de pasos para el motor encargado de mover el carro. Los pasos configurados se realizan por cada ciclo de movimiento de carro, esto es, se ejecuta el movimiento del carro y posteriormente revisa el estado de cada sensor de los pórticos. Por ahora los sensores no han sido configurados como interrupción externa. La interrupción externa permite accionar una condición sea cual sea la rutina de programa que se esté ejecutando, interrumpiéndose la rutina en cualquier momento. Por lo anterior el número de pasos afecta directamente en el tiempo en que se revisa la condición de los sensores y la velocidad con que se mueve el carro. Al realizar una menor cantidad de pasos, la revisión del estado de cada sensor infrarrojo es más rápida, por lo cual, disminuye la probabilidad de error pero en desmedro del tiempo que demora pero este tiempo sigue estando muy por debajo de los tiempos en la forma actual de medir.

Lo mencionado en el párrafo anterior y contrastándolo con la Tabla 5-3 que evidencian el acierto de la posición del carro, 0 detenciones fallidas de un total de 9, para la configuración de 150 pasos por revolución, respondiendo en un tiempo mayor comparado con las otras configuraciones. Por lo anterior se elige ejecutar 150 pasos por cada revolución debido al alto porcentaje de detenciones favorables. Por lo anterior se deduce que recorre 110 cm en 50 segundos, esto resulta una velocidad promedio de 0,022 m/s.

## 2. Distancia recorrida por la plataforma

Esta prueba permite obtener el tiempo que tarda la plataforma en moverse desde un punto a otro a lo largo de la calzada. Con esto y con la prueba anterior se puede estimar el tiempo total de la operación.

La prueba realizada consiste en medir el tiempo que demora la plataforma siguiendo una línea, desde el punto X hasta el Y como indica la Figura 5-11.

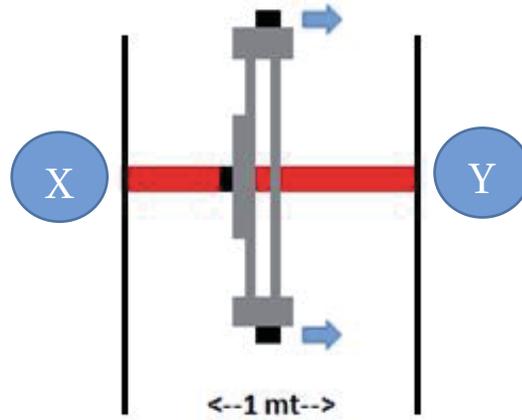


Figura 5-11 Prueba de avance de la plataforma

Se consideran 3 casos críticos en el avance de la plataforma y estos se mencionan en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4 Casos críticos

Casos	Situación	Expectativa
1	Línea más cerca del motor A	Motor B avance más pasos que A
2	Línea equidistante de A y B	Motor A y B avancen a igual paso
3	Línea más cerca del motor B	Motor A avance más pasos que B

Los casos señalados en la Tabla 5-4 se ilustra en la Figura 5-12.

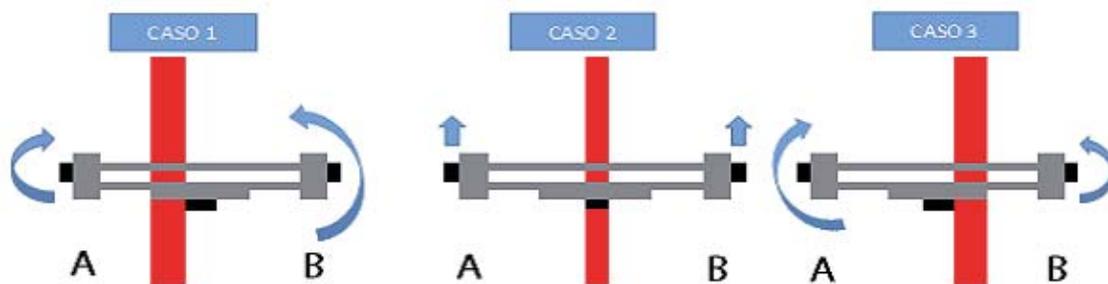


Figura 5-12 Casos críticos para el avance de la plataforma

El avance óptimo se encuentra dado por el caso 2, en el cual los motores A y B giran con el mismo paso de motor. El caso 3 ilustra la condición contraria al caso 1. La línea se encuentra más cerca del motor B que del A, por esto, el motor A debe avanzar más pasos que el motor B. Resumiendo, el caso 1 y el caso 3 representan los casos en los cuales un motor avanza más rápido que el otro para poder compensar el movimiento y el caso 2 es el comportamiento óptimo aplicando la misma cantidad de pasos para ambos motores.

La primera prueba consta de configurar distintos pasos de motor tanto para el avance óptimo (caso 2), presentan PASOS IGUALES; y para la corrección, caso 1 y 3. De esta prueba se obtienen la cantidad de pasos por revolución que servirán para la configuración del avance de la plataforma, probando así, la configuración en que funciona la corrección de línea. La prueba se realiza 2 veces para cada configuración obteniendo la Tabla 5-5.

Tabla 5-5 Pruebas de pasos de motor para la compensación de ruedas

	PASO MAYOR (paso/rev)	PASO MENOR (paso/rev)	SUM.PASOS. (paso/rev)	AVANCE ÓPTIMO (paso/rev)	Seguimiento correcto de línea
1	2000	1000	3000	2000	SI
2	3000	2500	5500	2000	NO
3	4000	2000	6000	2000	NO
4	5000	100	5100	5000	SI

Referente a la tabla anterior no se percibe un patrón que permita definir el motivo por el cual la plataforma siga o no correctamente la línea, esto es, salga del curso normal de avance, independiente de las correcciones de motor que deba realizar. Tal como ocurre para el carro de medición, tratándose del uso de un lenguaje de programación secuencial, es necesaria la revisión de los sensores de línea constantemente y en tiempos acotados, a fin de que la plataforma corrija el curso oportunamente. Por ejemplo, si la plataforma debe avanzar 2000 pasos por revolución, esta demorará un mayor tiempo que en ejecutar 100 pasos por revolución. Por lo anterior, observando la suma de la cantidad de pasos (PASO MAYOR+ PASO MENOR), los casos favorables se encuentran presentes en las sumas menores, 3000 y 5100 paso/rev, esto hace presumir que el programa al ejecutar un número menor de pasos de motor o instrucciones, revisa más rápido los sensores de línea debido al tiempo de demora de cada instrucción de programa, por consecuencia, corrige más rápido que a los casos que presentan una suma mayor.

Tomando los casos favorables de la prueba anterior, la Tabla 5-6 establece el tiempo que tarda la plataforma en recorrer 1 metro, con las configuraciones de pasos de motor que no han presentado fallas, es decir, siguen correctamente la línea. Se realizan 10 repeticiones bajo las mismas condiciones para los casos 1 y 4, casos favorables de la Tabla 5-5. El parámetro que permitirá optar por una configuración u otra es el tiempo y el número de veces que pierde el seguimiento de línea la plataforma.

Tabla 5-6 Resultados con velocidad ajustada

	PASO MAYOR (paso/rev)	PASO MENOR (paso/rev)	AVANCE ÓPTIMO (paso/rev)	Nº de pruebas	Rango tiempo (seg.)	Error Sigue Linea	% error
1	2000	1000	1000	10	26	5	50%
2	5000	100	5000	10	29	2	20%

La configuración indicada en el punto 1 presenta una mejor respuesta en tiempo, pero reporta mayor cantidad de errores, por lo cual, se opta por el uso de la configuración del punto 2. Por lo cual se deduce que la plataforma, avanzando de forma óptima, avanzará a 5000 pasos/rev y a una velocidad de 0,03 m/s ( $v=1 \text{ m}/29 \text{ s}$ ). La Figura 5-13 Configuración de pasos de motor adoptada Figura 5-13 ilustra la configuración elegida.

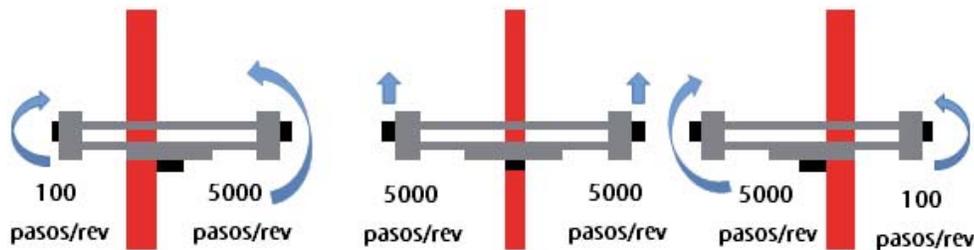


Figura 5-13 Configuración de pasos de motor adoptada

Considerando esta configuración y los tiempos de demora de avance del carro de medición, se puede extrapolar el tiempo que tarda una operación completa, suponiendo un área de medición, considerando la distancia entre postes de 15 metros y el ancho de la vía de 1,5 m.

Tabla 5-7 Extrapolación de tiempos de medición

	Plataforma recorre 1 mt	Plataforma recorre 15 mt	Carro de medición (3 pórticos= 1 set de ptos)	Carro de medicion 10 sets de 3 pórticos	Total medición área 1,5 x 15 m
Tiempo demora	29 seg	435 seg	50 seg	500 seg	935 seg (15,6 min)

En la Tabla 5-7 se muestran los tiempos obtenidos de las pruebas mencionadas en los puntos 1 y 2. La plataforma recorre 1 metro en 29 segundos, por ende recorrerá 15 metros en aproximadamente 435 segundos (7,25 minutos). A su turno, la plataforma se detendrá

en cada set de 3 puntos de medición, éstos son recorridos por el carro de medición tardando 50 segundos por set. A lo largo de los 15 metros habrá 10 sets de 3 puntos, por lo cual demorará 500 segundos (8,3 minutos), en completar el recorrido. Con lo anterior se tendrá un tiempo total de operación de 15,6 minutos.

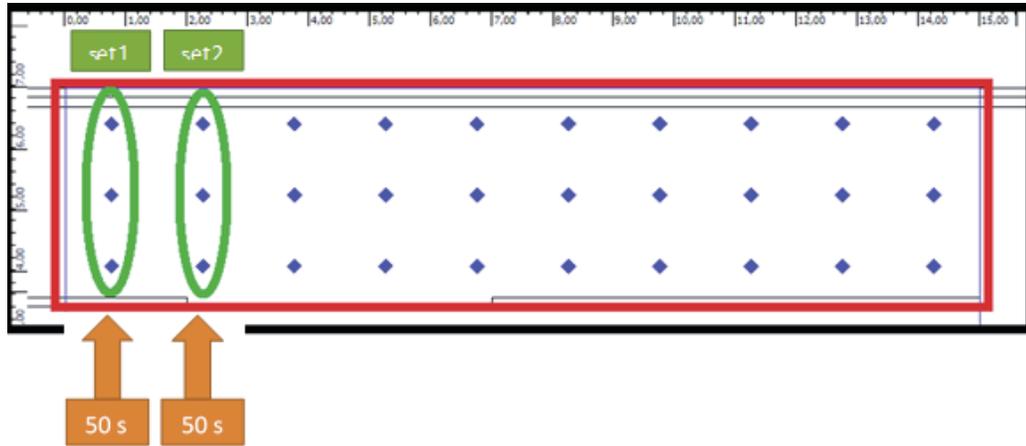


Figura 5-14 Área de medición de 1,5x15 m

### 3. Pruebas de energía para partida de motores

Al tratarse de un proyecto que involucra autonomía es pertinente el estudio de las fuentes de energía necesarias para proporcionar independencia al sistema.

El sistema se divide en 2 subsistemas que poseen diferentes fuentes de energía, como se observa en la Figura 5-15.

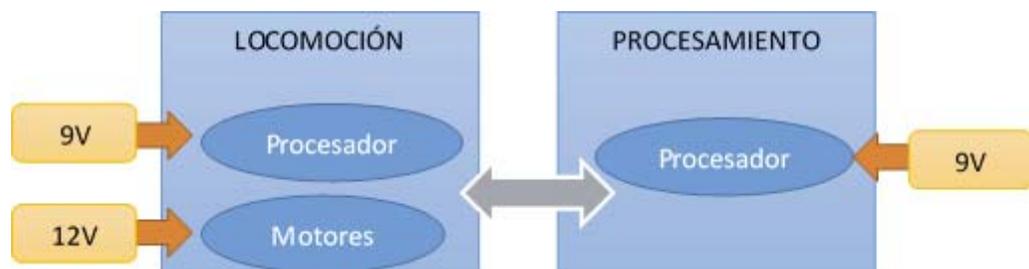


Figura 5-15 Partes de la plataforma y tensión necesaria

El sistema de locomoción compuesto por una placa Arduino Mega 2560 y 3 motores paso a paso encargados del movimiento y requiere una fuente de 12 volts para alimentar los motores. El sistema de procesamiento compuesto por una placa Arduino Mega 2560, teclado y pantalla LCD y requiere de 9 volts para funcionar correctamente.

Los motores requieren fuentes que permitan alto consumo de corriente para proporcionar el torque necesario. Específicamente se utilizan motores paso a paso del modelo NEMA 17 que tienen las especificaciones mencionadas en la Tabla 5-8.

Tabla 5-8 Requerimientos motor NEMA 17

Item	Especificación
Ángulo/paso	1,8°
Voltaje	12 a 15,4 Vdc
Torque	5,5 Kg-cm
N° bobinas	2
Corriente por bobina	1,5 A

El punto crítico referente a energía está dado por la fuente de alimentación de los motores. Estos requieren de una alta corriente para proporcionar el torque necesario para salir de la inercia.

Por lo anterior, se realizan pruebas con distintas fuentes de alimentación para los motores ya que este ítem es crítico. Se realizan pruebas para 3 fuentes de energía con las siguientes especificaciones indicadas en la Tabla 5-9.

Tabla 5-9 Especificaciones fuentes testeadas

Item	Fabricante	Tipo	Voltaje	Eficiencia
Fuente 1	Power Sonic	Bateria recargable, Gel	12 v	18 A-hr
Fuente 2	Ultracell	Bateria recargable, Gel	12 v	7 A-hr
Fuente 3	Weihao	Switching (conectada a red eléctrica)	12v	29 A

Las primeras 2 fuentes, tipo batería se han escogido debido a la alta corriente que proporciona y el tamaño y peso. La fuente 3 es una fuente tipo switching que se conecta a la red eléctrica, capaz de entregar hasta 29 Amperes con una tensión de 12v. Las 3 fuentes cumplen con el voltaje necesario para el funcionamiento de los motores pero la corriente es fundamental en el torque ejercido por estos, para salir de la inercia y dar movilidad a la plataforma.

La prueba consiste en medir la corriente suministrada a los motores para que la plataforma logre partir. Se obtienen los siguientes resultados, en la Tabla 5-10, de un número de 3 pruebas por cada fuente.

Tabla 5-10 Pruebas con distintas fuentes de alimentación

Fuente Motores	I peak (A)	Comportamiento Plataforma
Fuente 1	0,61	NO arranca
Fuente 2	0,07	NO arranca
Fuente 3	2,72	SI arranca

Las baterías probadas no son capaces de proporcionar la corriente necesaria para iniciar el movimiento cuando la plataforma se encuentra detenida, siendo ésta, la más crítica en cuanto a utilización energía. El consumo de los drivers controladores de motores tiene un peak de corriente de 2,72 amperes para salir de la inercia.

### 5.3 Prueba de almacenamiento de datos medidos.

Se realiza una prueba en vacío, la que involucra la toma de datos de 10 sets de puntos en la calzada, cada uno de ellos consta de tres mediciones a lo ancho de la calzada, completando de este modo un total de 30 puntos a medir, lo que se grafica en la Figura 5-16.

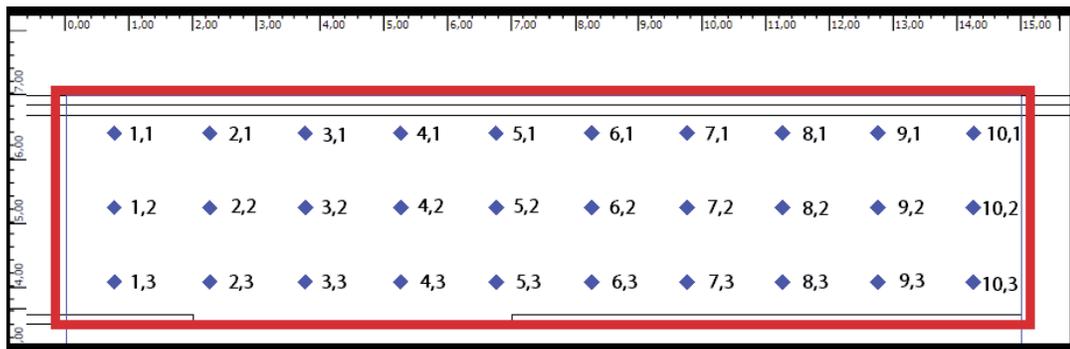


Figura 5-16 Coordenadas de puntos para almacenamiento de datos

Se realizan pruebas de almacenamiento teniendo en vacío el funcionamiento del encoder, encargado de medir la distancia de avance de la plataforma, y actuando sólo el carro de medición, deteniéndose en los pórticos y realizando una rutina normal de medición.

Los datos almacenados en formato de texto en la tarjeta SD son los siguientes:

-----  
MARCA\_TEMPORAL

Fecha= 27/7/16

Hora= 20/45/47  
-----

MEDIDAS

Ancho= 3.00[m]

```
Largo= 8.00[m]
-----
CALCULO_DE_DISTANCIAS_DE_ANCHO
Separacion_entre_puntos=0.75[m]
Primer_punto=0.75 [m]
Segundo_punto=1.50 [m]
Tercer_punto=2.25 [m]
-----
CALCULO_DE_DISTANCIAS_DE_LARGO
Numero_de_puntos=10
Separacion_entre_puntos=0.73[m]
Punto_numero_1=0.73[m]
Punto_numero_2=1.45[m]
...
Punto_numero_10=7.27[m]
-----
MEDICION
1,1 lux 388.600E0
1,2 lux 387.200E0
1,3 lux 385.000E0
2,1 lux 387.100E0
2,2 lux 387.500E0
...
9,3 lux 386.100E0
10,1 lux 385.800E0
10,2 lux 381.900E0
10,3 lux 381.100E0
//////////FIN OP////
```

Los datos almacenados en el archivo de texto dentro de la sd son exportados a una planilla Excel, especialmente dispuesta para la operación, se muestran en la Figura 5-17.

	A	B	C
1	MARCA_TEMPORAL		
2	Fecha	miércoles, 27 de Julio de 2016	
3	Hora	20:45:47	
4	-----		
5	MEDIDAS		
6	Ancho		3 00[m]
7	Largo		8 00[m]
8	-----		
9	CALCULO_DE_DISTANCIAS_DE_ANCHO		
10	Separacion_entre_puntos		0 75[m]
11	Primer_punto		0 75[m]
12	Segundo_punto		1 50[m]
13	Tercer_punto		2 25[m]
14	-----		
15	CALCULO_DE_DISTANCIAS_DE_LARGO		
16	Numero_de_puntos		10
17	Separacion_entre_puntos		0 73[m]
18	Punto_numero_1		0 73[m]
19	Punto_numero_2		1 45[m]
20	Punto_numero_3		2 18[m]
21	Punto_numero_4		2 91[m]
22	Punto_numero_5		3 64[m]
23	Punto_numero_6		4 36[m]
24	Punto_numero_7		5 09[m]
25	Punto_numero_8		5 82[m]
26	Punto_numero_9		6 54[m]
27	Punto_numero_10		7 27[m]
28	-----		
29	MEDICION		
30		1	1 388,6
31			
32		1	2 387,2
33			
34		1	3 385

Figura 5-17 Extracto de los datos exportados desde texto a Excel

Al extraer los datos, se ejecuta un programa o macros, especialmente diseñada para trabajar con el formato en el cual han sido almacenados, a continuación se genera una segunda hoja de cálculo en el archivo Excel, la cual presenta la información procesada y requerida para los informes de resultado de mediciones luminotécnicas. La planilla presenta automáticamente:

1. La posición de los datos dentro de la ilustración de una calzada.
2. Aplica un factor de mantenimiento a los valores obtenidos dependiendo de las luminarias medidas.
3. Calcula y presenta los parámetros de iluminancia media y mínima.

La planilla lista para ser procesada por los ingenieros se presenta en la Figura 5-18.

## 6 Pruebas y resultados.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q		
1																			
2																			
3																			
4																			
5	<b>ILUMINANCIA (LUX), DATOS MEDIDOS</b>																		
6						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	FIN_OP			
7	<b>FACTOR</b>	1,204		<b>PISTA 1</b>	A	398,600	397,800	398,400	398,200	399,300	397,800	391,900	393,400	395,400	395,800	0,000			
8					B	387,200	397,500	396,600	391,400	399,100	397,100	370,500	398,300	393,300	391,900	0,000			
9					C	395,000	394,700	395,100	392,800	395,000	394,400	395,800	398,400	396,100	391,100	0,000			
10																			
11	<b>ILUMINANCIA (LUX), DATOS NORMALIZADOS</b>																		
12						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	FIN_OP			
13																			
14					<b>PISTA 1</b>	A	467,874	466,068	467,634	465,105	468,717	466,911	459,687	461,614	464,022	464,503	0,000		
15	<b>NOMBRE CALLE</b>				B	468,189	466,550	465,466	459,206	467,272	466,068	446,082	465,828	467,513	459,808	0,000			
16					C	463,540	463,179	463,660	460,891	463,540	462,818	464,503	467,634	464,864	458,844	0,000			
17																			
18																			
19																			
20																			
21																			
22																			
23	<b>RESULTADOS</b>																		
24							<b>Emed(lux)</b>	<b>Emin(lux)</b>	<b>Emin/Emed</b>										
25					<b>PISTA 1</b>		244,13	446,08	1,83										
26																			
27					<b>TOTAL</b>		244,13	446,08	1,83										
28																			
29																			

Figura 5-18 Hoja de datos de medición de iluminancia

## 6 Análisis económico

Toda organización, empresa de manufactura o institución que presta un servicio, busca optimizar sus recursos, sin perjuicio de la calidad y eficacia del trabajo ofrecido. Al tratarse de empresas que prestan servicios de ingeniería y específicamente fotometría es primordial disponer de personal capacitado para las tareas a realizar.

El laboratorio de fotometría en cada operación que involucre la medición de iluminancia en terreno, debe desplegar recursos tanto en instrumentación, transporte, recursos humanos y muchas veces hospedaje, dependiendo el lugar y los tiempos de duración la medición. Para efectos de este trabajo, se busca optimizar el tiempo de medición y los recursos humanos implicados.

### 6.1 Costos de la implementación del proyecto

Para el análisis de costos del proyecto se clasificará por conceptos, esto es, mano de obra proporcionada por un técnico mecánico industrial, horas de trabajo de la máquina de impresión 3D y mano de obra del alumno proyectista; cada uno de estos ítems valorados por horas de trabajo.

Al técnico industrial se le encargó el ensamblaje de engranes del carro de medición y de la rueda del encoder, además de la realización de las perforaciones y ajustes en las cajas metálicas contenedoras de la electrónica de la plataforma tal como se muestra en la Figura 6-1.

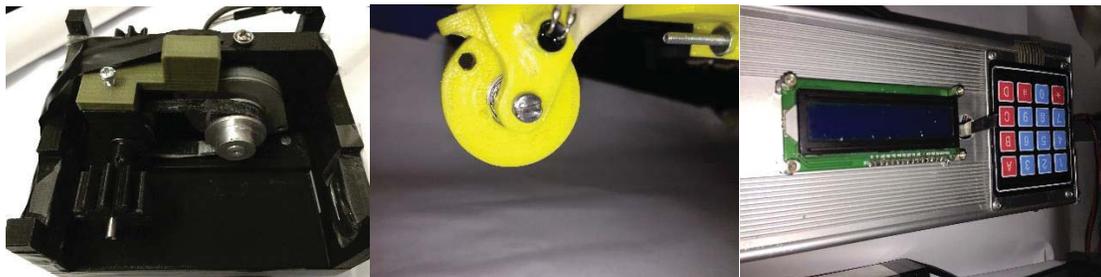


Figura 6-1 Trabajos realizados por el técnico industrial

Tabla 6-1 Costo inicial del proyecto

Concepto	Horas hombre	Valor hora hombre	Subtotal
Investigación, diseño y pruebas	960	\$2.500	\$2.400.000
<b>TOTAL INICIAL</b>			<b>\$2.400.000</b>

Los costos asociados del proyecto, mencionados en la Tabla 6-1, consideran un tiempo de duración del proyecto de un año calendario, cuyo trabajo del proyectista es cuantificado como 20 horas semanales y valorizadas por hora en los cuales se consideran horas de investigación, estado del arte y pruebas previas de algunos componentes potencialmente viables para el proyecto.

Tabla 6-2 Costos de implementación de la plataforma a escala

Concepto	Horas hombre/máquina	Valor hora hombre/máquina	Subtotal
Mecánico Industrial	8	\$4.000	\$32.000
Makerbot 3D	123	\$4.000	\$492.000
Componentes electrónicos y materiales	--	--	\$553.500
<b>TOTAL IMPLEMENTACIÓN ESCALA</b>			<b>\$1.077.500</b>

Se solicitó el servicio de un profesional del área mecánico industrial para el montaje de algunas piezas como el encoder de medición de distancia, implementación de los engranes en el carro de medición y perforación de las cajas que contienen la electrónica del proyecto. Referente al concepto de un profesional del área mecánica industrial e impresora Makerbot 3D, se considerarán como servicios solicitados a terceros.

Los materiales fueron adquiridos la gran mayoría en Chile en el mercado local, estos se mencionan en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3 Lista de materiales

Concepto	Cantidad
Tarjeta Arduino Mega 2560	2
Tarjeta interfaz RS232	1
Tarjeta interfaz SD	1
Reloj de tiempo real DS1307	1
Tarjeta SD	1
Interfaz I2C para LCD	1
Motor NEMA 17	2
Motor unipolar T31250	1
Driver de motor Pololu A4988	3
Teclado 4x4	1
Speaker	1
Ventilador de PC	1
Fuente switching 12v 29A	1
Perfil de aluminio 1,1 mts	4
Engrane GT2	1
Correa para engrane GT2	1
Final de carrera	2
Rueda de castor	1
Rueda de goma	2
Pantalla LCD 16x2	1
PLA para impresora 3D	3

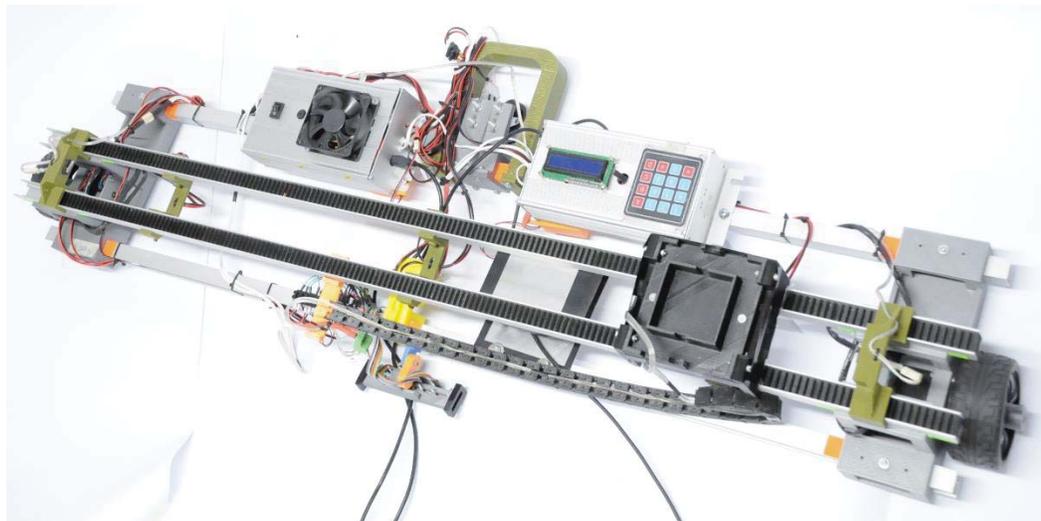


Figura 6-2 Plataforma implementada para trabajo a escala

El costo total de la implementación del proyecto, que se ilustra en la Figura 6-2, alcanzó el monto de \$3.477.500, incluyendo diseño, desarrollo y construcción, con duración de 1 año calendario y los materiales utilizados se enumeran en la Tabla 6-3.

El tamaño de la plataforma alcanza los 126 cm de largo, 45 cm de ancho y 20 cm de altura en su primera versión para uso a escala. Para la utilización en un escenario real, considerando una calzada de 3 mts de ancho y 15 mts de largo sería necesario implementar un riel de 3 metros, el ancho de la calzada, lo cual incluiría 4 perfiles de aluminio extra y la impresión de la cremallera. El resto de la plataforma se mantendría de igual forma y tamaño, por lo cual, los ítems extras se valorizan en la Tabla 6-4.

Tabla 6-4 Implementación extra plataforma real

Concepto	Horas hombre/máquina	Cantidad	Valor hora hombre/material/máquina	Subtotal
Makerbot 3D	48	--	\$4.000	\$192.000
Filamento impresión	--	1	\$30.000	\$30.000
Perfil Aluminio	--	4	\$6.740	\$26.960
Implement. ruedas	10	--	\$2.500	\$25.000
<b>TOTAL EXTRA</b>				<b>\$273.960</b>

Según la Tabla 6-1, Tabla 6-2 y Tabla 6-4 el costo estimado de la plataforma para la operación en un área con tamaño real alcanzaría un valor de \$3.751.460.

## 6.1 Importancia de la optimización de recursos y procesos productivos.

La optimización de recursos se basa en la eficacia y la eficiencia para alcanzar grandes objetivos utilizando la menor cantidad de recursos posibles. Cuando se busca una optimización de los recursos, también se busca ahorrar recursos, ya sean financieros o humanos. Para poder tener una eficacia en estos aspectos, es necesario conocer los objetivos o metas que tiene la organización y de esta forma, los recursos utilizados serán los necesarios para llegar a tener éxito.

A través de los años, el hombre se ha propuesto mejorar su condición de vida, facilitando las labores cotidianas, procesos de producción, competencia y rentabilidad haciendo que el desgaste sea cada vez menor, es por esto que de la mano de la tecnología, investigación y avances en materiales, ha podido crear nuevos sistemas automáticos que de una u otra forma han ayudado en su anhelo. Estos sistemas desarrollan tareas de toda índole, desde las más básicas a las de mayor complejidad, realizándolo en menor tiempo y de mejor calidad debido a que no sufren desgaste como las personas.

La automatización como proceso ha sido una de las mayores creaciones del hombre, pues a partir de sus resultados se ha logrado disminuir significativamente fallas de tipo humano, así como han mejorado los niveles de producción y el nivel de vida.

Como proceso, la automatización se compone de tres fases; el ingreso de datos, el procesamiento de dichos datos y finalmente la salida y ejecución de los resultados obtenidos. El ingreso de datos se puede realizar por medio de pulsadores, perillas, accionadores, así como las variables de

entrada pueden ser de tipo físico, como temperatura, presión, etc. El manejo de estas variables permite al operador o programador, dotar de ciertas características a un programa para luego ser analizadas.

Durante el procesamiento de las entradas, y mediante el uso de tecnologías como la computación, el hombre decodifica dichas entradas en lenguajes de máquina.

Por ultimo encontramos la salida de datos, después de haber realizado los procesos propios del análisis de datos de entrada y luego de encontrar una respuesta y solución al problema, el sistema mediante algún tipo de comunicación, transmite sus conclusiones a sistemas generalmente de tipo de mecánico.

## 6.2 Valoración de la plataforma en operación

Este trabajo busca la optimización de recursos, principalmente del tipo humano, en las mediciones en terreno de iluminancia para alumbrado público. Por esto, se muestra la Tabla 6-5 que compara los factores que reducirán costos en la operación de la medición. En la tabla se identifica el costo de la operación; el cual incluye sueldo de los operarios capacitados, transporte y otros costos asociados. Para estos efectos se considera una calzada de 15 metros de largo, 1 metro y 50 cm de ancho tal como se consideró en las pruebas realizadas.

Tabla 6-5 Reducción de operarios, costos y tiempos ligado al uso de la plataforma.

Operación	N° Operarios	Costo de operación	Tiempo de operación
SIN plataforma	4	\$800.000	40 min app
CON plataforma	2	\$400.000	15,6 min app
Reducción	50%	50%	61%

Debido a que ya no es necesario el marcaje de la calzada y el uso manual del luxómetro, el número de operarios se reduce a la mitad, es decir solo se necesitarán dos operarios, para efectos de la medición de la calzada y la puesta en marcha de la plataforma. La reducción del número de operarios es directamente proporcional al costo de la operación, ya que este incluye principalmente los honorarios de los encargados de la operación que bordean en promedio los \$200.000 por operario.

El tiempo de operación es reducido por la velocidad de movimiento de la plataforma y el almacenamiento automático de los datos medidos en menos cabo de la operación actual sin plataforma.

Se consideró un costo total de implementación de la plataforma de \$3.751.460 considerando todos los factores involucrados: horas hombre, impresión 3d, servicios externos, materiales, etc.; pero este valor no es considerado como el precio final de venta. Se estima marginar un 40% del costo de implementación, con una ganancia de \$1.500.584, lo cual tiene como total de venta de \$5.252.044 sin IVA. Si se considera este valor con IVA (19%) la plataforma alcanzaría un precio total de venta de \$6.249.933. Por lo anterior, para un potencial comprador de la plataforma de medición automatizada, la inversión inicial sería de \$6.249.933, como lo indica la Tabla 6-6, lo cual hace meditar sobre el número de operaciones que implica el retorno de este dinero.

Tabla 6-6 Valor de implementación y venta

Concepto	Valor
Total de implementación	\$3.751.460
Precio de venta sin IVA	\$5.252.044
Precio de venta con IVA	\$6.249.933

Si se considera que una medición de iluminancia de 3 calles bordean los \$3.000.000 y por promedio anualmente se realizan 2 mediciones alcanzando un valor final de \$6.000.000. Es necesario calcular el periodo de recuperación de capital (PRK), que es el tiempo en que tarda en recuperar la inversión inicial para que luego de ese periodo, sea sólo ganancia considerando la vida útil del equipo.

Este tiempo es cuando el valor actual neto (VAN) es cero. Si la vida útil de la plataforma es de 10 años y la tasa de retorno mínima aceptada (TRMA) es del 10% se resumen los datos iniciales en la Tabla 6-7 y se calcula en la Ecuación (6-1), (6-2), (6-3) y (6-4), siendo VP el valor presente.

Tabla 6-7 Valores iniciales

Concepto	Valor
Inversión inicial (I <sub>o</sub> )	\$6.249.933
Ingreso anual	\$6.000.000
Vida útil	10 años
Tasa de retorno mínima (TRMA)	10%

$$VAN = -I_o + VP \quad (6-1)$$

$$0 = -6.249.933 + 6.000.000 (P / A, 10, T) \quad (6-2)$$

$$1,0416 = (P / A, 10, T) \quad (6-3)$$

$$T = 1,16 \quad (6-4)$$

Según las ecuaciones (6-3),(6-4),(6-3) y (6-4) el tiempo calculado para la recuperación de la inversión es de 1 año considerando en promedio la realización de 1 medición por año a un costo de \$3.000.000.

# Conclusión

La automatización, a través de las últimas décadas ha sido un factor protagonista principalmente en la producción industrial ayudando en la realización de tareas repetitivas y peligrosas.

Considerando que en el ámbito de la luminotecnia y fotometría no se han realizado avances considerables, y haciendo referencia a herramientas que de la mano de la electrónica y programación han sido adquiridas en el plan de estudios de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, ha motivado el afán de auxiliar una tarea que actualmente es engorrosa, repetitiva y que involucra factores medio ambientales considerables para los operarios involucrados, esto es, la medición de variables luminotécnicas, específicamente iluminancia, en caminos y carreteras.

En primer término se buscaba diseñar y construir una plataforma capaz de medir iluminancia en un escenario controlado, a escala, pero perfectamente escalable a la escena real y que almacene los datos medidos. Este propósito, tras un trabajo de un año, se cumple, respaldado por los modelos y las pruebas señaladas en este informe, mediante la construcción de una plataforma robótica móvil, su arquitectura, fundada en el funcionamiento de las impresoras convencionales, facilita el posicionamiento de un sensor fotosensible utilizado en la medición de iluminancia y almacena los datos medidos en puntos determinados de una calzada dependiendo de las medidas transversales y longitudinales de esta.

Uno de los objetivos y ejes fundamentales del proyecto fue lo que dice relación con el almacenamiento, el cual se realiza mediante una tarjeta de almacenamiento sd y los datos son obtenidos por comunicación serial desde el luxómetro, los cuales, una vez finalizada la medición, pueden ser extraídos y exportados a una planilla Excel especialmente dispuesta para la tarea, para el posterior tratamiento de los datos.

Punto crítico del trabajo fue el posicionamiento de la plataforma en algunas coordenadas precisas, en las cuales debe realizarse la toma de datos. Mediante el estudio de las tecnologías disponibles hoy en día, dicho factor, se buscó resolver de una manera simple.

En primera instancia se pensó en una plataforma pequeña, capaz de posicionarse en todos los puntos con la ayuda de giroscopio y acelerómetro, midiendo el giro de la plataforma y conservando una determinada orientación, pero este factor no proporciona la exactitud requerida de 1 cm con respecto al punto. Mediante una lluvia de ideas que pudiesen solucionar

la problemática de posicionamiento, se decidió sobre la implementación de una plataforma que se base en la mecánica de funcionamiento de una impresora, pudiendo así, separar las dos variables involucradas en la cinemática de la plataforma: el movimiento a lo ancho y a lo largo de la calzada.

Para el movimiento a lo ancho de la calzada se utiliza un carro que se desliza a través de un riel. Este riel puede extenderse a cualquier longitud, capaz de cubrir el ancho de la calzada y está dotado de 3 pórticos infrarrojos, que pueden disponerse en cualquier posición del riel. Los pórticos serán los lugares en los cuales el carro de medición se detendrá y realizará una medición instantánea de iluminancia. Luego, para el movimiento a lo largo de la calzada, se utiliza la misma huincha con la cual se midió el largo de esta. Dicho implemento guiará a la plataforma para un avance correcto, con ayuda de sensores seguidores de línea. La detención de la plataforma es controlada por un encoder especialmente dispuesto para la tarea, que a medida que gira, se logra calcular el avance de la plataforma. Con lo anterior, el avance de la plataforma elimina la variable “giro”, no perdiendo la orientación y evitando el error acumulativo de posición.

Uno de los requisitos impuestos para el desarrollo e implementación de la plataforma es la portabilidad de ésta, a pesar de que se optó por una plataforma de mayor tamaño, no se sacrificó dicho objetivo, dado que es perfectamente transportable por una persona y con un peso que no supera los 20 kgs. El riel, como antes se mencionó, puede ser capaz de alcanzar una envergadura igual o superior al ancho de la calzada, y puede ser desmontable y plegable. Para el presente trabajo se consideró un largo de 1,1 metro de longitud, pero se diseñó como una base escalable, independiente del diseño actual de la plataforma.

Con el desarrollo del proyecto y la realización de pruebas, tanto a componentes electrónicos particulares como también a la plataforma completa, se pudo identificar factores críticos de funcionamiento, de los cuales uno de ellos es la alimentación. Se hicieron pruebas con diferentes fuentes de energía, en consideración al alto consumo de corriente por parte de los motores paso a paso utilizados, alcanzando un peak de 2,7 A. El resultado de las pruebas, demostró que la fuente de energía de tipo switching, cuya entrega máxima es de 29 Amper, fue la única que pudo poner en movimiento la plataforma, a pesar de que todas poseían el mismo nivel de tensión (12v). En desmedro de que este tipo de fuente debe estar conectada a la red eléctrica, factor a mejorar en próximos trabajos.

Con respecto a la configuración de pasos de los motores paso a paso modelo NEMA 17 se hicieron pruebas de avance con respecto al error de posicionamiento que presenta el seguidor de línea, permitiendo un sincronizado muestreo de los sensores de línea, no afectando en el funcionamiento de éstos. Concluyendo en un número determinado de pasos para cada motor en distintas situaciones de corrección del avance según lo indica la Tabla 7-1.

Tabla 7-1 Definición de configuración de pasos de motor para corrección

PASO MAYOR (paso/rev)	PASO MENOR (paso/rev)	AVANCE ÓPTIMO (paso/rev)	N° de pruebas	Rango tiempo (seg.)	Error Sigue Linea	% error
5000	100	5000	10	29	2	20%

Esta configuración presenta una mejor respuesta en tiempo y reporta menor cantidad de errores respecto a un número de 10 pruebas. Por lo cual se deduce que la plataforma, avanzando de forma óptima, avanzará a 5000 pasos/rev y a una velocidad de 0,03 m/s ( $v=1 \text{ m}/29 \text{ seg}$ ).

Es de suma importancia que las empresas e instituciones se abran a la automatización de procesos, disminuyendo los costos involucrados como también el error involucrado por la operación del factor humano. En este caso, las fuentes de error humano son variadas, desde la lectura del valor indicado por el instrumento hasta el traspaso de estos números a las planillas de trabajo dispuestas para el estudio de la medición, truncando números o promediando erróneamente valores oscilantes del instrumento.

Otro de los propósitos de este trabajo, es ofrecer una oportunidad de mejora a un proceso que actualmente se realiza de forma manual, por operarios que trabajan hasta altas horas de la madrugada con la finalidad de no alterar el normal flujo vehicular. Sometiéndose a condiciones medioambientales importantes lo cual hace que el tiempo de ejecución sea importante. Lo cual, considerando las pruebas realizadas con la configuración de motor y los tiempos medidos de demora del carro de medición se reduce considerablemente el tiempo de la operación, desde 40 minutos a casi 16 minutos para un área de medición de 1,5 x 15 mts reduciendo en un 61%.

Tanto el tiempo de operación como también los costos involucrados se ven reducidos con el eventual uso de esta plataforma. Los costos de la operación se ven afectados principalmente en el salario de los operarios comprendidos. Con el uso de esta tecnología se reduce en un 50 % el número de operarios, disminuyendo así el costo que implica el pago por la realización de esta tarea como resumen la Tabla 7-2.

Tabla 7-2 Reducción de costos de la operación

Operación	N° Operarios	Costo de operación	Tiempo de operación
SIN plataforma	4	\$800.000	40 min app
CON plataforma	2	\$400.000	15,6 min app
Reducción	50%	50%	61%

Finalmente se evaluó la venta de esta plataforma y el tiempo que demoraría la empresa que se lo adjudica en recuperar la inversión llegando a un valor de \$6.249.933 IVA incluido y recuperando la inversión en 1 año considerando un ingreso anual de \$6.000.000 por efectos de estas mediciones.

Realizado este proyecto se plantean mejoras al prototipo desarrollado que pueden ser solucionadas en futuros trabajos de tesis para esta área, como lo es:

1. Estudio de otras fuentes de alimentación que permitan máxima autonomía.
2. Expansión de rieles con mayor envergadura para la medición en escenario a tamaño real.
3. Uso de timers, flags e interrupciones para la optimización del programa fuente.
4. Adaptación del sistema para otros lugares de medición, como lo es, recintos deportivos principalmente canchas de césped.
5. Implementación del sistema para uso de medición de iluminancia vertical.
6. Análisis de la variación de la medición de iluminancia, según la altura, y propuesta de un modelo de “interpolación” según altura.

# Bibliografía

- [1] I. C. o. Illumination, *Road Lighting Calculations*, Viena, Austria, 2000.
- [2] S. d. E. y. Combustibles, *NSEG 9. En.71. Alumbrado Público en Sectores Urbanos.*, 1971.
- [3] S. d. E. y. Combustibles, *Reglamento de Alumbrado Público de vías de tráfico vehicular*, 2007.
- [4] I. C. o. Illumination, *CIE 115-2010. Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic*, 2010.
- [5] I. C. o. Illumination, *CIE 140-2000. Road Lighting Calculations*, 2000.
- [6] J. R. Mardones, *Plataforma robótica con sensores supervisada de forma remota*, Valparaíso, 2013.
- [7] D. R. Silva, *Sistema de navegación de un robot móvil asistida por gps*, Valparaíso, 2015.
- [8] Tektronix, *User Manual J17 & J1800 Series LumaColor Photometer & Sensor heads*, Beaverton, 1993.
- [9] I. P. L. -. J. H. Tello, *Proyecto Mihro (Mobile intelligent hexapod robot)*, Mataró, 2008.

# A Programas

## A.1 Programa sistema de almacenamiento

### A.1.1 Configuración de librerías y variables utilizadas

```
#include "RTClib.h"
#include <Keypad.h> //LIBRERIA TECLADO
#include <SPI.h> //LCD SERIE
#include<Wire.h> //LCD SERIE
#include<LiquidCrystal_I2C.h> //LCD SERIE
#include <SD.h>
#include<String.h>

RTC_DS1307 RTC;
char filename[] = "0000000000.CSV";
//File myFile;

int i=0;
char input;
/////LCD //////////////////////////////////
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE); //Dirección de LCD
/////RTC////////////////////////////////////
// Declaración de las variables para almacenar información de tiempo
uint8_t second, minute, hour, wday, day, month, year, ctrl;
/////SD////////////////////////////////////
File datos;
const int chipSelect = 53; //PARA ARDUINO UNO ES 10
////////////////////////////////////
int contador=0; //para que escriba una sola vez en la sd

////////////////////////////////////
char LARGO[4]; //Cadena donde se guardaran los caracteres de las teclas presionadas
char ANCHO[4];
```

```
int cont_LARGO=0;    //variable que se incrementara al presionar las teclas
int cont_ANCHO=0;
int LARGO_ENTERO;   //transforma el char en entero
int ANCHO_ENTERO;   //transforma el char en entero
float LARGO_ENTERO_DEC; //transforma el char en entero
float ANCHO_ENTERO_DEC; //transforma el char en entero

float separ_ancho; //separación entre puntos a lo ancho
float separ_largo; //separación entre puntos a lo largo
const byte ROWS = 4; //Número de filas del teclado que se está usando
const byte COLS = 4; //Número de columnas del teclado que se está usando

char hexaKeys[ROWS][COLS] = //Aquí pondremos la disposición de los caracteres tal cual están
en nuestro teclado
{
  {'1','2','3','A'},
  {'4','5','6','B'},
  {'7','8','9','C'},
  {'*','0','#','D'}
};
byte rowPins[ROWS] = {23, 25, 27, 29}; //Seleccionamos los pines en el arduino donde irán
conectadas las filas
byte colPins[COLS] = {31, 33, 35, 37}; //Seleccionamos los pines en el arduino donde irán
conectadas las filas
Keypad customKeypad = Keypad(makeKeymap(hexaKeys), rowPins, colPins, ROWS, COLS);
//inicializa el teclado
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
int conteo_port=0;
int cont_puntos_med=0;
////////////////////////////////////
int salida=0;
int medicion;
////////////////////////////////////
```



### A.1.3 Programa y ciclo repetitivo

```
void loop()
{
  INGRESO();
  if(ANCHO_ENTERO!=0 && LARGO_ENTERO!=0 && contador==0)
  {
    TIEMPO_SD();
    ESCRIBIR_SD();
    delay(1000);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(1,0);
    lcd.print("Escrito en SD ");
    contador=1;
    CALCULO_ANCHO();
    delay(3000);
    CALCULO_LARGO();
    delay(3000);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(1,0);
    lcd.print("Inicio Medicion");
    while(true)
    {
      COMUNICACION_V2();
    }
  }
}
```

```
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
```

### A.1.4 Subrutinas programadas

```

void INGRESO()
{
  char inicio = customKeypad.getKey(); //se guarda en la variable customKey el caracter de la tecla
  presionada
  if (inicio=='D')    //Al presionar D comienza a solicitar el ancho y largo
  {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("ingrese largo cm");

    while(inicio=='D') //si se apretó D entra a leer el resto de los numeros
    {
      char largo=customKeypad.getKey();
      if (largo != NO_KEY)    //se evalúa si se presionó una tecla
      {
        LARGO[cont_LARGO]=largo;    //se guarda caracter por caracter en el arreglo codigo[]

        lcd.setCursor(cont_LARGO,1);
        lcd.print(LARGO[cont_LARGO]);
        cont_LARGO=cont_LARGO+1;    //incrementamos la variable cont
        if(cont_LARGO==4)    //si ya fueron presionadas 4 teclas se evalúa si la contraseña es
correcta
        {
          // Serial.println(codigo[3]); //se imprime en el puerto serie la tecla presionada
          cont_LARGO=0; //resetear a 0 la variable cont
          delay(2000);
          lcd.clear();
          lcd.setCursor(0,0);
          lcd.print("el largo es:");
          LARGO_ENTERO=((LARGO[0]-48)*1000+(LARGO[1]-48)*100+(LARGO[2]-
48)*10+LARGO[3]-48); //conversion de char a int
          LARGO_ENTERO_DEC=LARGO_ENTERO/100;
          lcd.setCursor(1,1);
          lcd.print(LARGO_ENTERO_DEC);
          lcd.print(" m");
          delay(3000);
          lcd.clear();
          lcd.setCursor(0,0);
          lcd.print("ingrese ancho cm");

        }
      }
    }
  }
}

```

```

while(cont_LARGO==0)
{

char ancho=customKeypad.getKey();
if (ancho != NO_KEY)    //se evalúa si se presionó una tecla
{
    ANCHO[cont_ANCHO]=ancho;
    lcd.setCursor(cont_ANCHO,1);    //se guarda caracter por caracter en el arreglo codigo[]
    lcd.print(ANCHO[cont_ANCHO]);
    cont_ANCHO=cont_ANCHO+1;        //incrementamos la variable cont
    digitalWrite(13,LOW);
    if(cont_ANCHO==4)    //si ya fueron presionadas 4 teclas se evalúa si la contraseña es
correcta
    {
        cont_ANCHO=0; //resetear a 0 la variable cont
        delay(2000);
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("el ancho es:");
        ANCHO_ENTERO=(ANCHO[0]-48)*1000+(ANCHO[1]-48)*100+(ANCHO[2]-
48)*10+ANCHO[3]-48;
        ANCHO_ENTERO_DEC=ANCHO_ENTERO*0.01;
        lcd.setCursor(1,1);
        lcd.print(ANCHO_ENTERO_DEC);
        lcd.print(" m");
        delay(3000);
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("resultado");
        lcd.setCursor(1,1);
        lcd.print(LARGO_ENTERO_DEC);
        lcd.setCursor(6,1);
        lcd.print("-");
        lcd.setCursor(8,1);
        lcd.print(ANCHO_ENTERO_DEC);
        cont_LARGO=1; //reestablece el contador para salir del ciclo while y volver al ciclo de
largo
        inicio=0; //cambia la condicion de entrada del contador de largo para no entrar
nuevamente a este ciclo y poder terminar este programa

```

```
        if(ANCHO_ENTERO>LARGO_ENTERO)
        {
            lcd.clear();
            lcd.setCursor(1,0);
            lcd.print("DATOS NO VALID.!");
            lcd.setCursor(1,1);
            lcd.print("Reinicie sist.");

        }
    }

}

}
}
}
digitalWrite(13,HIGH);
}

}

////////////////////////////////////
bool read_ds1307()
{
    // Iniciar el intercambio de información con el DS1307 (0xD0)
    Wire.beginTransmission(0x68);

    // Escribir la dirección del segundero
    Wire.write(0x00);
    // Terminamos la escritura y verificamos si el DS1307 respondió
    // Si la escritura se llevo a cabo el metodo endTransmission retorna 0
    if(Wire.endTransmission() != 0)
        return false;

    // Si el DS1307 esta presente, comenzar la lectura de 8 bytes
    Wire.requestFrom(0x68, 8);

    // Recibimos el byte del registro 0x00 y lo convertimos a binario
    second = bcd2bin(Wire.read());
    minute = bcd2bin(Wire.read()); // Continuamos recibiendo cada uno de los registros
    hour = bcd2bin(Wire.read());
    wday = bcd2bin(Wire.read());
    day = bcd2bin(Wire.read());
    month = bcd2bin(Wire.read());
}
```

```
year = bcd2bin(Wire.read());

// Recibir los datos del registro de control en la dirección 0x07
ctrl = Wire.read;
}

/**
 * Esta función convierte un número BCD a binario. Al dividir el número guardado
 * en el parametro BCD entre 16 y multiplicar por 10 se convierten las decenas
 * y al obtener el módulo 16 obtenemos las unidades. Ambas cantidades se suman
 * para obtener el valor binario.
 */
uint8_t bcd2bin(uint8_t bcd)
{
    // Convertir decenas y luego unidades a un numero binario
    return (bcd / 16 * 10) + (bcd % 16);
}

/**
 * Imprime la fecha y hora al monitor serial de arduino
 */
void TIEMPO()
{
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Fecha: ");
    lcd.setCursor(7,0);
    lcd.print(day);
    lcd.setCursor(9,0);
    lcd.print('/');
    lcd.setCursor(10,0);
    lcd.print(month);
    lcd.setCursor(12,0);
    lcd.print('/');
    lcd.setCursor(13,0);
    lcd.print(year);

    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Hora: ");
    lcd.setCursor(7,1);
    lcd.print(hour);
    lcd.setCursor(9,1);
    lcd.print(':');
    lcd.setCursor(10,1);
```

```
lcd.print(minute);
lcd.setCursor(12,1);
lcd.print(':');
lcd.setCursor(13,1);
lcd.print(second);
delay(3000);
}

void MOSTRAR_TIEMPO()
{
  if (read_ds1307())
  {
    TIEMPO(); // Mostrar la fecha y hora
  }
  else
  {
    // No se puede leer desde le DS1307 (NACK en I2C)
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("No detecta rtc");
    delay(1000);
  }
}

void INICIAL_SD()
{
  // getFileName();
  while (!Serial)
  {
    ;
  }
  Serial.println("Inicializando SD card..."); // ve si está presente la tarjeta y la inicializa

  if (!SD.begin(chipSelect))
  {
    Serial.println("Falla en la tarjeta..no podemos comenzar!");
    return;
  }
  Serial.println("Tarjeta inicializada!");
  datos = SD.open("med.txt", FILE_WRITE);
  //datos = SD.open(filename, FILE_WRITE); //filename guarda un arreglo con la fecha de hoy
}
```

```
void ESCRIBIR_SD()
{
  datos = SD.open("med.txt", FILE_WRITE);
  //datos = SD.open(filename, FILE_WRITE);
  datos.println("MEDIDAS");
  datos.print("Ancho= ");
  datos.print(ANCHO_ENTERO_DEC);
  datos.println("[m]");
  datos.print("Largo= ");
  datos.print(LARGO_ENTERO_DEC);
  datos.println("[m]");
  datos.println("-----");
  datos.println("CALCULO_DE_DISTANCIAS_DE_ANCHO");
  datos.close();
}
```

```
void TIEMPO_SD()
{
  datos = SD.open("med.txt", FILE_WRITE);
  //datos = SD.open(filename, FILE_WRITE);
  datos.println(" ");
  datos.println("-----");
  datos.println("-----");
  datos.println("MARCA_TEMPORAL");
  datos.print("Fecha= ");
  datos.print(day);
  datos.print('/');
  datos.print(month);
  datos.print('/');
  datos.println(year);

  datos.print("Hora= ");
  datos.print(hour);
  datos.print('/');
  datos.print(minute);
  datos.print('/');
  datos.println(second);
  datos.println("-----");
  datos.close();
}
```

```
void LUX()
{

String dato="";
datos=SD.open("med.txt",FILE_WRITE);
//datos=SD.open(filename,FILE_WRITE);

Serial.print("!NEW\r");

while(Serial.available() == 0) //espera el dato
{}

while(Serial.available()>0)
{
dato+=(char)Serial.read();
//delay(15);
delay(15);//100
}
datos.print(input);
datos.print(" ");
// datos.print(medicion); //
//datos.print(" "); //
datos.println(dato);
//datos.println("--");
datos.close();
//lcd.setCursor(0,1);
//lcd.print(dato);
delay(100);

}

////////////////////////////////////

void COMUNICACION_V2()
{
// Serial.println("esperando comando....");
```

```
for(i;i<1;i++)
{
  Serial1.print('a');
  Serial.println("enviando a");
}

while(Serial1.available()==0){}
while(Serial1.available(>0)
{
  input=Serial1.read();
  switch(input)
  {
    input=Serial1.read();
    case '0':

      Serial.print(input);
      lcd.clear();
      lcd.setCursor(1,0);
      lcd.println(input);
      delay(500);
      Serial1.print('b');
      Serial.println(" ,enviando b");
      break;
    case '1':
      datos=SD.open("med.txt",FILE_WRITE);
      datos.print(medicion);
      datos.print(",");
      datos.close();
      Serial.print(input);
      LUX();
      //delay(300);
      Serial.print(input);
      lcd.clear();
      lcd.setCursor(1,0);
      lcd.println(input);
      delay(500);
      Serial1.print('c');
      Serial.println(" ,enviando c");
      break;
    case '2':
      datos=SD.open("med.txt",FILE_WRITE);
      datos.print(medicion);
      datos.print(",");
```

```
    datos.close();
    LUX();
    //delay(300);
    Serial.print(input);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(1,0);
    lcd.println(input);
    delay(500);
    Serial1.print('d');
    Serial.println(",enviando d");
    break;
case '3':
    datos=SD.open("med.txt",FILE_WRITE);
    datos.print(medicion);
    datos.print(",");
    datos.close();
    LUX();
    //delay(300);
    Serial.print(input);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(1,0);
    lcd.println(input);
    delay(500);
    Serial1.print('e');
    Serial.println(",enviando e");
    break;
case '4':
    //String dato="";
    Serial.print(input);
    datos=SD.open("med.txt",FILE_WRITE);
    //datos.println("//////////FIN PUNTO////");
    datos.close();
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("FIN PTOS");
    delay(100);
    Serial1.print('f');
    Serial.println(",enviando f");
    break;
case '5':
    salida=0;
    while(Serial1.available()==0 && salida==0){}
    while(Serial1.available()>0 && salida==0)
    {
```

```

    medicion=Serial1.read();
    medicion=medicion-47;
    Serial.print("medicion numero= ");
    Serial.println(medicion);
    salida=1;
  }
  Serial1.print('a');
  Serial.println(",enviando a");
  break;
case '6':
  //delay(500);
  Serial.println(",enviando g");
  Serial1.print('g');
  break;
case '7':
  datos=SD.open("med.txt",FILE_WRITE);
  datos.println("//////////FIN OPERACION/////");
  datos.close();
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("FIN OPERACION");
  break;

}
}

}

```

### A.1.5 Calculo ancho y largo de la calzada

```

void CALCULO_LARGO()
{
  int cont_largo=0;
  if (LARGO_ENTERO_DEC > 0 && LARGO_ENTERO_DEC <= 200 && cont_largo==0)
  {
    cont_largo==1;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("PROCESANDO LARGO");
    datos=SD.open("med.txt",FILE_WRITE);
    //datos=SD.open(filename,FILE_WRITE);
    //datos.print("Largo= ");
  }
}

```

```
//datos.print(LARGO_ENTERO);
//datos.println(" [m]");

////////////////////////////////////
if(LARGO_ENTERO_DEC<=30) //para distancias menores a 30 metros
{
    int numero_puntos=10;
    datos.print("Numero_de_puntos=");
    datos.println(numero_puntos);
    separ_largo=LARGO_ENTERO_DEC*0.0909; //divide el largo en 11 partes iguales, (divido el
numero por 100 por 11 y lo paso a %)
    datos.print("Separacion_entre_puntos=");
    datos.print(separ_largo);
    datos.println(" [m]");

    // Serial1.println(numero_puntos);
    Serial.print("no puntos= ");
    Serial.println(numero_puntos);

    for(int puntos=1;puntos<11;puntos++) //inicia un contador para escribir el n hasta el n-esimo
punto y su respectiva ubicacion
    {

        datos.print("Punto_numero_");
        datos.print(puntos);
        datos.print("=");
        datos.print(separ_largo*puntos);
        datos.println(" [m]");

    }

}

////////////////////////////////////
if(LARGO_ENTERO_DEC>30)
{
    int numero_puntos1=LARGO_ENTERO_DEC/3; //divide el largo en 3 y esto dá la cantidad de
puntos ha medir
    separ_largo=3; //se toma la separacion entre punto y punto <= 3...para comodidad se toma 3
mts
    datos.print("Numero_de_puntos=");
    datos.println(numero_puntos1);
```

```

datos.print("Separacion_entre_puntos=");
datos.print(separ_largo);
datos.println("[m]");

// Serial1.print(numero_puntos1);
Serial.print("no puntos= ");
Serial.println(numero_puntos1);

for(int puntos1=1;puntos1<numero_puntos1;puntos1++) //inicia un contador para escribir el
n hasta el n-esimo punto y su respectiva ubicacion
{

datos.print("Punto_numero_");
datos.print(puntos1);
datos.print("=");
datos.print(separ_largo*puntos1);
datos.println("[m]");

}

}

////////////////////////////////////

}
else //cuando el largo ingresado no corresponde al rango [0,200] metros, ya que es poco
probable q entre poste y poste hayan 200mts
{
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("LARGO:");
lcd.setCursor(7,0);
lcd.print(LARGO_ENTERO_DEC);
lcd.setCursor(11,0);
lcd.println(" m");
lcd.setCursor(1,0);
lcd.print("No valido");

}
lcd.setCursor(1,1);
lcd.print("OK");
datos.println("-----");

```

```

datos.println("MEDICION");
datos.close();

Serial1.println(LARGO_ENTERO_DEC);
Serial.print("enviando LARGO= ");
Serial.println(LARGO_ENTERO_DEC);

}

////////////////////////////////////

void CALCULO_ANCHO()
{
int cont_ancho=0;
if (ANCHO_ENTERO_DEC >= 0 && ANCHO_ENTERO_DEC <= 10 && cont_ancho==0)
{
cont_ancho==1;
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("PROCESANDO ANCHO");
separ_ancho=ANCHO_ENTERO_DEC*0.25; //divide el ancho en 4 partes iguales
datos=SD.open("med.txt",FILE_WRITE);
//datos=SD.open(filename,FILE_WRITE);
//datos.print("Ancho= ");
//datos.print(ANCHO_ENTERO);
//datos.println("[m]");
datos.print("Separacion_entre_puntos=");
datos.print(separ_ancho);
datos.println("[m]");
datos.print("Primer_punto=");
datos.print(separ_ancho);
datos.println(" [m]");
datos.print("Segundo_punto=");
datos.print(separ_ancho*2);
datos.println(" [m]");
datos.print("Tercer_punto=");
datos.print(separ_ancho*3);
datos.println(" [m]");
//datos.println("*****");
datos.println("-----");
datos.println("CALCULO_DE_DISTANCIAS_DE_LARGO");
}
}

```

```

}
else
{
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("ANCHO:");
  lcd.setCursor(7,0);
  lcd.print(ANCHO_ENTERO_DEC);
  lcd.setCursor(11,0);
  lcd.println(" m");
  lcd.setCursor(1,0);
  lcd.print("No valido");

}

lcd.setCursor(1,1);
lcd.print("OK");
datos.close();
}

```

```

////////////////////////////////////

```

## A.2 Programa de locomoción.

### A.2.1 Librerías y variables utilizadas

```

#include <AccelStepper.h>
////////////////////////////////////SONIDO////////////////////////////////////
#include "pitches.h" //Librería que contiene las notas musicales
int sonido = NOTE_E5; //Declaramos la nota musical como el sonido
int buz=24;
////////////////////////////////////IR////////////////////////////////////
int recep1=41;
int recep2=39;
int recep3=37;
int lecturaS1;
int lecturaS2;
int lecturaS3;
int lectura;
int ledS1=36;
int ledS2=38;
int ledS3=40;
////////////////////////////////////FIN DE CARRERA////////////////////////////////////
int FC1=22;

```

```
int FC2=23;
int lecturaFC1;
int lecturaFC2;

int cont_salida=0;
//////////////////////////////////COMUNICACION//////////////////////////////////
char input;
//////////////////////////////////SEGUIDOR DE LINEA//////////////////////////////////
#define NUM_SENSORES 6
int S1=42; //3
int S2=44; //4
int S3=46; //5 antes 46
int S4=43; //6
int S5=45; //7
int S6=47; //8
int SV[NUM_SENSORES];
int estados = 0;
//////////////////////////////////
float UMBRAL;
int a,b,c,d;
int e,f,g,h;
float MINIMO, MAXIMO;
int LINEA_BLANCA;
int led_der=40 ;
int led_izq=36;
int led_centro=38 ;
//////////////////////////////////
// Definicao pino ENABLE
int pino_enable_der = 10; //PWM
int pino_enable_izq = 5; //PWM
int pino_enable_carro = 11; //PWM
int dir_der = 8;
int step_der = 9;
int dir_izq = 4;
int step_izq = 6;
int dir_carro = 13;
int step_carro = 12;

int tiempo_pasos;
// Definicao pines STEP e DIR
AccelStepper motorder(1,9,8);
AccelStepper motorizq(1,6,4);
AccelStepper motorcarro(1,13,12);
```

```

int max_steps;

int vel_mayor=5000; //5000
int vel_menor=100; //100
int ciclo=50; //50
int pasos_carro= 150;
////////////////////////////////////CONTADOR DE DISTANCIA////////////////////////////////////
int recep_encoder=26;
int led_encoder=27;
int estado_ir;
int vueltas=0;

int vueltas_inter_distancia; //calculo de vueltas segun la distancia inter_distancia
int inter_distancia=0; //valor recibido por el puerto serial
char int_distancia;
int salida=0;
int salida2=0;
int salida3=0;
int salida4=0;
int numero_puntos;
int mediciones=0;
float separ_largo;
int LARGO=0;
////////////////////////////////////

```

## A.2.2 Configuraciones de setup

```

void setup()
{
pinMode(recep_encoder,INPUT);
pinMode(led_encoder, OUTPUT);
pinMode(recep1,INPUT);
pinMode(recep2,INPUT);
pinMode(recep3,INPUT);
pinMode(ledS1,OUTPUT);
pinMode(ledS2,OUTPUT);
pinMode(ledS3,OUTPUT);
pinMode(FC1,INPUT);
pinMode(FC2,INPUT);
pinMode(buz,OUTPUT);
pinMode(dir_der, OUTPUT);
pinMode(step_der, OUTPUT);

```

```

pinMode(dir_izq, OUTPUT);
pinMode(step_izq, OUTPUT);
pinMode(dir_carro, OUTPUT);
pinMode(step_carro, OUTPUT);
pinMode(pino_enable_der, OUTPUT);
pinMode(pino_enable_izq, OUTPUT);
pinMode(pino_enable_carro, OUTPUT);
Serial.begin(9600);
Serial1.begin(9600);
motorcarro.setMaxSpeed(1000);
motorcarro.setSpeed(300);
motorcarro.setAcceleration(1000);

Serial.println("Seteando Umbral...");
LECT_SENSORES();
set_umbral();

}

```

### A.2.3 Programa y ciclo repetitivo

```

void loop()
{

while(LARGO==0 && salida==0 && salida2==0) //RECIBE EL DATO DE DISTANCIA
{
SERIAL_DISTANCIA();
}

if(vueltas_inter_distancia!=0 && mediciones<numero_puntos)
{
Serial.println("ok");
contador_distancia();
CAMBIO_BIN();
SENS_LINE();
for(int i=0;i<ciclo;i++)
{
motorder.runSpeed();
motorizq.runSpeed();
delayMicroseconds(3000); //5000
}
}

```

```
salida4=0;
while(vueltas==vueltas_inter_distancia && salida4==0)
// while(vueltas==1 && salida4==0) //a las 2 vueltas del encoder se detiene
{

digitalWrite(pino_enable_der, HIGH);
digitalWrite(pino_enable_izq, HIGH);
digitalWrite(pino_enable_carro, HIGH);
digitalWrite(led_encoder,HIGH);
delay(2000);
digitalWrite(led_encoder,LOW);
delay(2000);
//Serial.print("medicion =");
Serial.println(mediciones);
Serial1.print('5');
Serial.println("enviando no medicion ");
delay(100);
Serial1.print(mediciones);
salida3=0;
salida4=1;
while(input!=g && salida3==0)
{
  CARRO_MED_V2();
}
mediciones++;
vueltas=0;
}
}
if(mediciones==numero_puntos)
{
SONIDO();
SONIDO();
SONIDO();
Serial1.print('7');
// Serial.println("TERMINO MEDICION");
digitalWrite(pino_enable_der, HIGH);
digitalWrite(pino_enable_izq, HIGH);
digitalWrite(pino_enable_carro, HIGH);
while(true){}
}
}
```

## A.2.4 Subrutinas programadas

```

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////SERIAL_DISTANCIA////////////////////////////////////
void SERIAL_DISTANCIA()
{
  digitalWrite(ledS1,HIGH);
  digitalWrite(ledS2,HIGH);
  digitalWrite(ledS3,HIGH);
  float separ_largo;
  String largo="";

  while(Serial1.available()==0){}
  while(Serial1.available()>0)
  {
    salida2=1;
    salida=1;
    largo+=(char) Serial1.read();
    delay(15);
  }
  Serial.print("Largo=");
  LARGO=largo.toInt();

  Serial.println(LARGO);
  if(LARGO<=30) //para distancias menores a 30 metros
  {
    numero_puntos=10;
    Serial.print("numero puntos= ");
    Serial.println(numero_puntos);
    separ_largo=LARGO*0.0909*100; //divide el largo en 11 partes iguales, (divido el numero por 100
por 11 y lo paso a %)
  }
  if (LARGO>30)
  {numero_puntos=LARGO/3; //divide el largo en 3 y esto dá la cantidad de puntos a medir
  Serial.print("no puntos= ");
  Serial.println(numero_puntos);
  separ_largo=300; //se toma la separacion entre punto y punto <= 3...para comodidad se toma 3
mts
  }
  Serial.print("Separacion entre puntos:");
  Serial.print(separ_largo);
  Serial.println(" cm");
}

```

```

vueltas_inter_distancia=(separ_largo/ 10.048); //10,048=2*3,14*1,6....1,6 radio rueda encoder, 3
es una holgura
Serial.print("vueltas encoder=");
Serial.println(vueltas_inter_distancia);
digitalWrite(ledS1,LOW);
digitalWrite(ledS2,LOW);
digitalWrite(ledS3,LOW);
}

```

## A.2.5 Programa de operación carro de medición

```

//////////////////////////////////CARRO MEDICION V2//////////////////////////////////

```

```

void CARRO_MED_V2()
{
  int sentido_horario=0;
  int sentido_antihorario=0;
  digitalWrite(pino_enable_der, HIGH);
  digitalWrite(pino_enable_izq, HIGH);
  digitalWrite(pino_enable_carro, HIGH);
  Serial.println("esperando....");
  while(Serial1.available()==0)
  {}
  while(Serial1.available(>0)
  {
    Serial.println("recibiendo");
    LECTURA_IR_FC();
    input=Serial1.read();
    LECTURA_IR_FC();
    Serial.println(input);
    switch(input)
    {
      LECTURA_IR_FC();
      input=Serial1.read();
      LECTURA_IR_FC();
      case 'a':
        LECTURA_IR_FC();
        while(lecturaFC1==0)
        {
          LECTURA_IR_FC();
          digitalWrite(pino_enable_carro, LOW);
          LECTURA_IR_FC();
          step(HIGH,0,HIGH,0,HIGH,pasos_carro);

```

```
    LECTURA_IR_FC0;
  }
  LECTURA_IR_FC0;
  motorcarro.run();
  LECTURA_IR_FC0;
  if(lecturaFC1==1 && (antirebote(lecturaFC1)))
  {
    digitalWrite(pino_enable_carro, LOW);
    step(HIGH,0,HIGH,0,LOW,0);
    Serial1.print('0');
    Serial.println("enviando 0");
    input=Serial1.read();
    LECTURA_IR_FC0;
    motorcarro.run();
    LECTURA_IR_FC0;
  }
  SONIDO();

  motorcarro.run();
  LECTURA_IR_FC0;
  break;
case 'b':
  LECTURA_IR_FC0;
  while(lecturaS1==1) //si recibió b y el primer sensor no está interrumpido se mueve
  {
    LECTURA_IR_FC0;
    digitalWrite(pino_enable_carro, LOW);
    LECTURA_IR_FC0;
    step(HIGH,0,HIGH,0,LOW,pasos_carro); //700
    LECTURA_IR_FC0;
    motorcarro.run();
    LECTURA_IR_FC0;
  }
  LECTURA_IR_FC0;
  motorcarro.run();
  LECTURA_IR_FC0;
  if(lecturaS1==0 &&(antirebote(lecturaS1))) //si está interrumpido
  {
    digitalWrite(pino_enable_carro, LOW);
    step(HIGH,0,HIGH,0,LOW,0);
    //delay(500);
    Serial1.print('1');
    Serial.println("enviando 1");
```

```
    input=Serial1.read();
    LECTURA_IR_FC();
    motorcarro.run();
    LECTURA_IR_FC();
}
SONIDO();

LECTURA_IR_FC();
motorcarro.run();
LECTURA_IR_FC();
break;
case 'c':
    LECTURA_IR_FC();
    while(lecturaS2==1)
    {
        LECTURA_IR_FC();
        digitalWrite(pino_enable_carro, LOW);
        LECTURA_IR_FC();
        step(HIGH,0,HIGH,0,LOW,pasos_carro);
        LECTURA_IR_FC();
        motorcarro.run();
        LECTURA_IR_FC();
    }
    LECTURA_IR_FC();
    motorcarro.run();
    LECTURA_IR_FC();
    if(lecturaS2==0 &&(antirebote(lecturaS2)))
    {
        digitalWrite(pino_enable_carro, HIGH);
        step(HIGH,0,HIGH,0,LOW,0);
        Serial1.print('2');
        Serial.println("enviando 2");
        input=Serial1.read();
        LECTURA_IR_FC();
        motorcarro.run();
        LECTURA_IR_FC();
    }
    SONIDO();

    LECTURA_IR_FC();
    motorcarro.run();
    LECTURA_IR_FC();
    break;
```

```
case 'd':
  LECTURA_IR_FC();
  while(lecturaS3==1)
  {
    LECTURA_IR_FC();
    digitalWrite(pino_enable_carro, LOW);
    LECTURA_IR_FC();
    step(HIGH,0,HIGH,0,LOW,pasos_carro);
    LECTURA_IR_FC();
    motorcarro.run();
    LECTURA_IR_FC();
  }
  LECTURA_IR_FC();
  motorcarro.run();
  LECTURA_IR_FC();
  if(lecturaS3==0 && (antirebote(lecturaS3)))
  {
    digitalWrite(pino_enable_carro, HIGH);
    step(HIGH,0,HIGH,0,LOW,0);
    Serial1.print('3');
    Serial.println("enviando 3");
    input=Serial1.read();
    LECTURA_IR_FC();
    motorcarro.run();
    LECTURA_IR_FC();
  }
  SONIDO();

  LECTURA_IR_FC();
  motorcarro.run();
  LECTURA_IR_FC();
  break;
case 'e':
  LECTURA_IR_FC();
  while(lecturaFC2==0)
  {
    LECTURA_IR_FC();
    digitalWrite(pino_enable_carro, LOW);
    LECTURA_IR_FC();
    step(HIGH,0,HIGH,0,LOW,pasos_carro);
    LECTURA_IR_FC();
    motorcarro.run();
    LECTURA_IR_FC();
  }
```

```
}
LECTURA_IR_FC();
if(lecturaFC2==1 &&(antirebote(lecturaFC2)))
{
    digitalWrite(pino_enable_carro, HIGH);
    step(HIGH,0,HIGH,0,LOW,0);
    Serial1.print('4');
    Serial.println("enviando 4");
    input=Serial1.read();
    LECTURA_IR_FC();
    motorcarro.run();
    LECTURA_IR_FC();
}
SONIDO();

LECTURA_IR_FC();
motorcarro.run();
LECTURA_IR_FC();
break;
case 'f':
    Serial.println("FIN DE MEDICION");
    SONIDO();
    SONIDO();
    LECTURA_IR_FC();
    while(lecturaS2==1)
    {
        LECTURA_IR_FC();
        digitalWrite(pino_enable_carro, LOW);
        LECTURA_IR_FC();
        step(HIGH,0,HIGH,0,HIGH,pasos_carro);
        LECTURA_IR_FC();
        motorcarro.run();
        LECTURA_IR_FC();
    }
    LECTURA_IR_FC();
    motorcarro.run();
    LECTURA_IR_FC();
    if(lecturaS2==0 &&(antirebote(lecturaS2)))
    {
        digitalWrite(pino_enable_carro, LOW);
        step(HIGH,0,HIGH,0,LOW,0);
        LECTURA_IR_FC();
        motorcarro.run();
    }
}
```

```
    LECTURA_IR_FC();
    Serial1.print('6');
    Serial.println("enviando 6");
}
Serial.println("SEGUIR MOVIENDO");
//Serial1.print('6');
//Serial.println("enviando 6");
digitalWrite(pino_enable_carro, HIGH);
LECTURA_IR_FC();
motorcarro.run();
LECTURA_IR_FC();
digitalWrite(pino_enable_der, LOW);
digitalWrite(pino_enable_izq, LOW);
digitalWrite(pino_enable_carro, LOW);
LECTURA_IR_FC();
salida3=1;
break;

}
LECTURA_IR_FC();

}
LECTURA_IR_FC();
motorcarro.run();

}

////////////////////CONTADOR DISTANCIA////////////////////
void contador_distancia()
{

    estado_ir=digitalRead(recep_encoder);

    if(estado_ir==1 && (antirebote(estado_ir)))
    {
        vueltas=vueltas+1;
        Serial.print("vueltas=");
        Serial.println(vueltas);
    }
    else
        Serial.print("estado encoder= ");
```

```
Serial.println(estado_ir);
// delay(300);

}

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
void LECTURA_IR_FC()
{
lecturaS1=digitalRead(recep1);
lecturaS2=digitalRead(recep2);
lecturaS3=digitalRead(recep3);
lecturaFC1=digitalRead(FC1);
lecturaFC2=digitalRead(FC2);
//Serial.print("S1= ");
//Serial.print(lecturaS1);
//Serial.print(" | ");
//Serial.print("S2= ");
//Serial.print(lecturaS2);
//Serial.print(" | ");
//Serial.print("S3= ");
//Serial.print(lecturaS3);
//Serial.print(" | ");
//Serial.print("FC1= ");
//Serial.print(lecturaFC1);
//Serial.print(" | ");
//Serial.print("FC2= ");
//Serial.println(lecturaFC2);
}

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////Función Antirebote
int timeAntirebote=150;

boolean antirebote(int pin){//esta función nos va a devolver un valor booleano.
int contador=0;
boolean estado; //guarda el estado del botón
boolean estadoAnterior;//guarda el último estado del botón

do
{
estado=digitalRead(pin);
if (estado != estadoAnterior){
```

```

    contador=0;
    estadoAnterior = estado;
}
else
{
    contador = contador + 1;
}
delay(1);
}
while(contador < timeAntirebote);
return estado;
}

//////////////////////////////////SONIDO//////////////////////////////////
void SONIDO()
{
    noTone(buz);
    delay(500);
    tone(buz,sonido);
    delay(500);
    noTone(buz);
}
//////////////////////////////////FUNCION
MOTORES//////////////////////////////////
void step(boolean dirizq , int stepsizq , boolean dirder , int stepsder , boolean dircarro, int
stepscarro)
// void step(boolean dirizq , int stepsizq , boolean dirder , int stepsder )
{
    digitalWrite(dir_izq,dirizq);
    digitalWrite(dir_der,dirder);
    digitalWrite(dir_carro,dircarro);
    delay(50); //50
    int max_steps=max(max(stepsder,stepsizq),stepscarro);
    // int max_steps=max(stepsder,stepsizq);
    for(int i=0;i<max_steps;i++)
    {
        if(i<stepsder) digitalWrite(step_izq, HIGH);
        if(i<stepsizq) digitalWrite(step_der, HIGH);
        if(i<stepscarro) digitalWrite(step_carro, HIGH);
        delayMicroseconds(800); //800

        if(i<stepsder) digitalWrite(step_izq, LOW);
        if(i<stepsizq) digitalWrite(step_der, LOW);
    }
}

```

```

if(i<steps carro) digitalWrite(step_carro, LOW);
delayMicroseconds(800); //800
}
}
////////////////////////////////CASOS 4////////////////////////////////
void SENS_LINE()
{
motorder.runSpeed();
motorizq.runSpeed();
if(SV[2]==0 &&SV[3]==1 &&SV[4]==1 &&SV[5]==0) //CENTRO
{
motorizq.setSpeed(vel_mayor);
motorder.setSpeed(vel_mayor);
}

else if((SV[2]==1 ||SV[3]==1) && SV[4]==0 && SV[5]==0) //IZQUIERDO
{
motorder.setSpeed(vel_mayor);
motorizq.setSpeed(vel_menor);
}

////////////////////////////////
else if(SV[2]==0 && SV[3]==0 && (SV[4]==1 ||SV[5]==1)) //DERECHO
{
motorizq.setSpeed(vel_mayor);
motorder.setSpeed(vel_menor);
}
motorder.runSpeed();
motorizq.runSpeed();
}

////////////////////////////////
void CAMBIO_BIN()
{
//SV[6] = readQD_S1();
SV[5] = readQD_S2();
SV[4] = readQD_S3();
SV[3] = readQD_S4();
SV[2] = readQD_S5();
// SV[1] = readQD_S6();
// for (unsigned char i = 1; i < NUM_SENSORES+1; i++)
for (unsigned char i = 2; i < NUM_SENSORES; i++)

```

```
{
  if(SV[i]<=LINEA_BLANCA)
  {
    SV[i]=0; //0 PARA SEGUIR LINEA NEGRA
  }
  else if(SV[i]>LINEA_BLANCA)
  {
    SV[i]=1;
  }
  //Serial.print(SV[i]);
  //Serial.print('\t');
  //Serial.print(" | ");

}
// Serial.println();
//delay(250);

}

////////////////////////////////////

void minimo()
{
  // a=min(SV[1],SV[2]);

  b=min(SV[3],SV[4]);
  c=min(SV[5],SV[2]);
  // c=min(SV[5],SV[6]);
  //d=min(a,b);
  MINIMO=abs(min(c,b));
  // MINIMO=abs(min(c,d));
}
////////////////////////////////////

void maximo()
{
  //e=max(SV[1],SV[2]);

  f=max(SV[3],SV[4]);
  g=max(SV[5],SV[2]);
  //g=max(SV[5],SV[6]);
  //h=max(e,f);
  // MAXIMO=max(g,h);
  MAXIMO=max(g,f);
}
```

```

}
////////////////////////////////////
void set_umbral()
{
  minimo();
  maximo();
  // UMBRAL=(MAXIMO+MINIMO)/2;
  LINEA_BLANCA=MINIMO+(MINIMO*0.7);
  Serial.println("-----");
  // Serial.print("UMBRAL: ");
  // Serial.print(UMBRAL);
  // Serial.print(" MINIMO: ");
  // Serial.print(MINIMO);
  // Serial.print(" MAXIMO: ");
  // Serial.print(MAXIMO);
  // Serial.print(" W_LINE VAL MENORES A: ");
  // Serial.println(LINEA_BLANCA);
  // Serial.println("-----");
}

////////////////////////////////////
void LECT_SENSORES()
{
  // SV[6] = readQD_S10;
  SV[5] = readQD_S20;
  SV[4] = readQD_S30;
  SV[3] = readQD_S40;
  SV[2] = readQD_S50;
  //SV[1] = readQD_S60;
  // for (unsigned char i = 1; i < NUM_SENSORES+1; i++)
  /* for (unsigned char i = 2; i < NUM_SENSORES; i++)
  {
    Serial.print(SV[i]);
    Serial.print('\t');
    Serial.print(" | ");
  }
  Serial.println(); // uncomment this line if you are using raw values
  delay(250);*/
}
////////////////////////////////////
int readQD_S10()
{

```

```
pinMode( S1, OUTPUT );
digitalWrite( S1, HIGH );
delayMicroseconds(10);
pinMode( S1, INPUT );

long time = micros();
while (digitalRead(S1) == HIGH && micros() - time < 3000);
int diff = micros() - time;
return diff;
}
int readQD_S2()
{
pinMode( S2, OUTPUT );
digitalWrite( S2, HIGH );
delayMicroseconds(10);
pinMode( S2, INPUT );

long time = micros();
while (digitalRead(S2) == HIGH && micros() - time < 3000);
int diff = micros() - time;
return diff;
}
int readQD_S3()
{
pinMode( S3, OUTPUT );
digitalWrite( S3, HIGH );
delayMicroseconds(10);
pinMode( S3, INPUT );

long time = micros();
while (digitalRead(S3) == HIGH && micros() - time < 3000);
int diff = micros() - time;
return diff;
}
int readQD_S4()
{
pinMode( S4, OUTPUT );
digitalWrite( S4, HIGH );
delayMicroseconds(10);
pinMode( S4, INPUT );

long time = micros();
while (digitalRead(S4) == HIGH && micros() - time < 3000);
```

```
int diff = micros() - time;
return diff;
}
int readQD_S5()
{
pinMode( S5, OUTPUT );
digitalWrite( S5, HIGH );
delayMicroseconds(10);
pinMode( S5, INPUT );

long time = micros();
while (digitalRead(S5) == HIGH && micros() - time < 3000);
int diff = micros() - time;
return diff;
}
int readQD_S6()
{
pinMode( S6, OUTPUT );
digitalWrite( S6, HIGH );
delayMicroseconds(10);
pinMode( S6, INPUT );
long time = micros();
while (digitalRead(S6) == HIGH && micros() - time < 3000);
int diff = micros() - time;
return diff;
}
//////////////////////////////////////////////////////////////////FIN//////////////////////////////////////////////////////////////////
/////
```

## **B Manual de operario**

1. Mida el ancho de la calzada.
2. Posicione los pórtricos infrarrojos en los puntos a medir a lo ancho de la calzada. El carro de medición se detendrá en los pórtricos para tomar la lectura de iluminancia.
3. Posicione la huincha de medir en la mitad de la calzada para medir el largo y deje posicionada la huincha en ese lugar. Esta servirá como guía para los sensores de línea de la plataforma
4. Posicione la plataforma en la calzada centrando los sensores de línea con la huincha de medir.
5. Conecte la fuente de switching a los conectores de energía. Luego encienda las cajas metálicas de control.
6. La pantalla de la plataforma le solicitará ingresar el largo y el ancho de la plataforma usando el teclado dispuesto en ella y siga las instrucciones indicadas en la pantalla. Estas medidas deben ser ingresadas en centímetros.
7. Luego, la plataforma realizará la medición en los puntos calculados.
8. Al finalizar la medición apague los switches de energía de las cajas de control y desconecte la fuente de switching.
9. Retire la tarjeta SD ubicada en la caja de control de la plataforma y procese los datos almacenados en la tarjeta.
10. Utilice la plantilla Excel especialmente dispuesta para la medición. Esta, indicará los parámetros importantes para el informe de medición.

**C Norma CIE 140-2000**  
**Road lighting calculations**



ISBN 3 901 906 54 1

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE  
INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION  
INTERNATIONALE BELEUCHTUNGSKOMMISSION

# TECHNICAL REPORT

## ROAD LIGHTING CALCULATIONS

**CIE 140 - 2000**

---

UDC: 628.931  
628.971  
628.971.6

Descriptor: Artificial lighting: Design and calculation  
Exterior lighting  
Street lighting

## THE INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION

The International Commission on Illumination (CIE) is an organisation devoted to international co-operation and exchange of information among its member countries on all matters relating to the art and science of lighting. Its membership consists of the National Committees in 37 countries and one geographical area and of 8 associate members.

The objectives of the CIE are :

1. To provide an international forum for the discussion of all matters relating to the science, technology and art in the fields of light and lighting and for the interchange of information in these fields between countries.
2. To develop basic standards and procedures of metrology in the fields of light and lighting.
3. To provide guidance in the application of principles and procedures in the development of international and national standards in the fields of light and lighting.
4. To prepare and publish standards, reports and other publications concerned with all matters relating to the science, technology and art in the fields of light and lighting.
5. To maintain liaison and technical interaction with other international organisations concerned with matters related to the science, technology, standardisation and art in the fields of light and lighting.

The work of the CIE is carried on by seven Divisions each with about 20 Technical Committees. This work covers subjects ranging from fundamental matters to all types of lighting applications. The standards and technical reports developed by these international Divisions of the CIE are accepted throughout the world.

A plenary session is held every four years at which the work of the Divisions and Technical Committees is reviewed, reported and plans are made for the future. The CIE is recognised as the authority on all aspects of light and lighting. As such it occupies an important position among international organisations.

## LA COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE

La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) est une organisation qui se donne pour but la coopération internationale et l'échange d'informations entre les Pays membres sur toutes les questions relatives à l'art et à la science de l'éclairage. Elle est composée de Comités Nationaux représentant 37 pays plus un territoire géographique, et de 8 membres associés.

Les objectifs de la CIE sont :

1. De constituer un centre d'étude international pour toute matière relevant de la science, de la technologie et de l'art de la lumière et de l'éclairage et pour l'échange entre pays d'informations dans ces domaines.
2. D'élaborer des normes et des méthodes de base pour la métrologie dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.
3. De donner des directives pour l'application des principes et des méthodes d'élaboration de normes internationales et nationales dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.
4. De préparer et publier des normes, rapports et autres textes, concernant toutes matières relatives à la science, la technologie et l'art dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.
5. De maintenir une liaison et une collaboration technique avec les autres organisations internationales concernées par des sujets relatifs à la science, la technologie, la normalisation et l'art dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.

Les travaux de la CIE sont effectués par 7 Divisions, ayant chacune environ 20 Comités Techniques. Les sujets d'études s'étendent des questions fondamentales, à tous les types d'applications de l'éclairage. Les normes et les rapports techniques élaborés par ces Divisions Internationales de la CIE sont reconnus dans le monde entier.

Tous les quatre ans, une Session plénière passe en revue le travail des Divisions et des Comités Techniques, en fait rapport et établit les projets de travaux pour l'avenir. La CIE est reconnue comme la plus haute autorité en ce qui concerne tous les aspects de la lumière et de l'éclairage. Elle occupe comme telle une position importante parmi les organisations internationales.

## DIE INTERNATIONALE BELEUCHTUNGSKOMMISSION

Die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) ist eine Organisation, die sich der internationalen Zusammenarbeit und dem Austausch von Informationen zwischen ihren Mitgliedsländern bezüglich der Kunst und Wissenschaft der Lichttechnik widmet. Die Mitgliedschaft besteht aus den Nationalen Komitees in 37 Ländern und einem geographischen Gebiet und aus 8 assoziierten Mitgliedern.

Die Ziele der CIE sind :

1. Ein internationaler Mittelpunkt für Diskussionen aller Fragen auf dem Gebiet der Wissenschaft, Technik und Kunst der Lichttechnik und für den Informationsaustausch auf diesen Gebieten zwischen den einzelnen Ländern zu sein.
2. Grundnormen und Verfahren der Meßtechnik auf dem Gebiet der Lichttechnik zu entwickeln.
3. Richtlinien für die Anwendung von Prinzipien und Vorgängen in der Entwicklung internationaler und nationaler Normen auf dem Gebiet der Lichttechnik zu erstellen.
4. Normen, Berichte und andere Publikationen zu erstellen und zu veröffentlichen, die alle Fragen auf dem Gebiet der Wissenschaft, Technik und Kunst der Lichttechnik betreffen.
5. Liaison und technische Zusammenarbeit mit anderen internationalen Organisationen zu unterhalten, die mit Fragen der Wissenschaft, Technik, Normung und Kunst auf dem Gebiet der Lichttechnik zu tun haben.

Die Arbeit der CIE wird in 7 Divisionen, jede mit etwa 20 Technischen Komitees, geleistet. Diese Arbeit betrifft Gebiete mit grundlegendem Inhalt bis zu allen Arten der Lichtanwendung. Die Normen und Technischen Berichte, die von diesen international zusammengesetzten Divisionen ausgearbeitet werden, sind von der ganzen Welt anerkannt.

Tagungen werden alle vier Jahre abgehalten, in der die Arbeiten der Divisionen überprüft und berichtet und neue Pläne für die Zukunft ausgearbeitet werden. Die CIE wird als höchste Autorität für alle Aspekte des Lichtes und der Beleuchtung angesehen. Auf diese Weise unterhält sie eine bedeutende Stellung unter den internationalen Organisationen.

Published by the

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE  
CIE Central Bureau  
Kegelgasse 27, A-1030 Vienna, AUSTRIA  
Tel: +43(01)714 31 87 0, Fax: +43(01)714 31 87 18  
e-mail: ciecb@ping.at  
WWW: <http://www.cie.co.at/>

© CIE 2000



ISBN 3 901 906 54 1

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE  
INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION  
INTERNATIONALE BELEUCHTUNGSKOMMISSION

# TECHNICAL REPORT

## ROAD LIGHTING CALCULATIONS

CIE 140 - 2000

Rev. No.	Date	Revision Notes
1	July 2006	Page 19. Fig. 13. Dual carriageway. Upper shaded area, as a calculation area in the opposite driving direction, where in the lanes no observers are positioned, has been removed.
2	December 2006	ISBN Number on the cover pages has been corrected.

UDC: 628.931  
628.971  
628.971.6

Descriptor: Artificial lighting: Design and calculation  
Exterior lighting  
Street lighting

This Technical Report has been prepared by CIE Technical Committee 4-15 of Division 4 "Lighting and Signalling for Transport" and has been approved by the Board of Administration of the Commission Internationale de l'Eclairage for study and application. The document reports on current knowledge and experience within the specific field of light and lighting described, and is intended to be used by the CIE membership and other interested parties. It should be noted, however, that the status of this document is advisory and not mandatory. The latest CIE proceedings or CIE NEWS should be consulted regarding possible subsequent amendments.

Ce rapport technique a été préparé par le Comité Technique CIE 4-15 de la Division 4 "Eclairage et signalisation pour les transports" et a été approuvé par le Bureau d'Administration de la Commission Internationale de l'Eclairage, pour étude et application. Le document traite des connaissances courantes et de l'expérience dans le domaine spécifique indiqué de la lumière et de l'éclairage, et il est établi pour l'usage des membres de la CIE et autres groupements intéressés. Il faut cependant noter que ce document est indicatif et non obligatoire. Pour connaître d'éventuels amendements, consulter les plus récents comptes rendus de la CIE ou le CIE NEWS.

Dieser Technische Bericht ist vom CIE Technischen Komitee 4-15 der Division 4 "Beleuchtung und Signale für den Verkehr" ausgearbeitet und vom Vorstand der Commission Internationale de l'Eclairage gebilligt worden. Das Dokument berichtet über den derzeitigen Stand des Wissens und Erfahrung in dem behandelten Gebiet von Licht und Beleuchtung; es ist zur Verwendung durch CIE-Mitglieder und durch andere Interessierte bestimmt. Es sollte jedoch beachtet werden, daß das Dokument eine Empfehlung und keine Vorschrift ist. Die neuesten CIE-Tagungsberichte oder das CIE NEWS sollten im Hinblick auf mögliche spätere Änderungen zu Rate gezogen werden.

Any mention of organisations or products does not imply endorsement by the CIE. Whilst every care has been taken in the compilation of any lists, up to the time of going to press, these may not be comprehensive.

Toute mention d'organisme ou de produit n'implique pas une préférence de la CIE. Malgré le soin apporté à la compilation de tous les documents jusqu'à la mise sous presse, ce travail ne saurait être exhaustif.

Die Erwähnung von Organisationen oder Erzeugnissen bedeutet keine Billigung durch die CIE. Obgleich große Sorgfalt bei der Erstellung von Verzeichnissen bis zum Zeitpunkt der Drucklegung angewendet wurde, ist es möglich, daß diese nicht vollständig sind.

© CIE 2000

The following members of CIE TC 4-15 "Road Lighting Calculations" took part in the preparation of this report. The committee comes under CIE Division 4, "Lighting and Signalling for Transport".

## MEMBERS:

W. Adrian	Canada
S. Almási	Hungary
J. B. Arens	United States of America
A. Augdal	Norway
G. Birnbaum	Israel
J.-M. Dijon	Belgium
P. V. Hautala	Finland
J. Koster	Netherlands
J. Lecocq	France
K. Narisada	Japan
S. Onaygil	Turkey
W. Riemenschneider	Switzerland
G. Rossi	Italy
A. J. V. Serós	Spain
R. H. Simons (Chairman)	United Kingdom
E. Širola	Croatia
K. Sørensen	Denmark
R. E. Stark	United States of America
A. Stockmar	Germany
R. Yates	South Africa
A. de Visser	Netherlands

## ADVISERS

P. Blaser	Switzerland
P. Gandon-Léger	France
N. Pollard	United Kingdom

## Contents

SUMMARY	V
RESUME	V
ZUSAMMENFASSUNG	V
1. INTRODUCTION	1
2. DEFINITIONS, SYMBOLS AND ABBREVIATIONS	1
3. LIST OF SYMBOLS AND ABBREVIATIONS	2
4. MATHEMATICAL CONVENTIONS AND PROCEDURES	4
5. REQUIREMENTS FOR PHOTOMETRIC DATA	5
5.1 Luminous intensity data for luminaires	5
5.2 Interpolation of luminous intensity data	6
5.2.1 Linear interpolation	6
5.2.2 Quadratic interpolation	8
5.2.3 Quadratic interpolation in the region of $C=0^\circ$ , or $\gamma=0^\circ$ or $180^\circ$	9
5.3 Road surface reflection data	9
5.3.1 Interpolation in the r-table	11
6. CALCULATION OF $I(C,\gamma)$	12
6.1 Mathematical conventions for distances measured on the road	13

6.2 Mathematical conventions for luminaire axes	13
6.3 Calculation of $C$ : luminaire not turned about photometric axes	14
6.4 Calculation of $\gamma$ : luminaire not turned about photometric axes	15
6.5 Calculation of $C$ and $\gamma$ : luminaire turned about photometric axes	15
7. CALCULATION OF PHOTOMETRIC QUANTITIES	16
7.1 Luminance	16
7.1.1 Luminance at a point	16
7.1.2 Field of calculation for luminance	16
7.1.3 Position of calculation points	17
7.1.4 Position of observer	18
7.1.5 Number of luminaires included in calculation	19
7.2 Illuminance	20
7.2.1 Horizontal illuminance	20
7.2.2 Semicylindrical illuminance	20
7.2.3 Carriageway	22
7.2.4 Footways and cyclepaths	23
7.2.5 Areas of irregular shape	23
8. CALCULATION OF QUALITY CHARACTERISTICS	23
8.1 Average luminance $L_{av}$	24
8.2 Overall uniformity $U_0$	24
8.3 Longitudinal uniformity $U_L$	24
8.4 Threshold increment $TI$	24
8.5 Surround ratio $SR$	24
8.6 Average illuminance of the carriageway ( $E_{av}$ )	25
8.7 Minimum illuminance on the carriageway	25
8.8 Average illuminance of the footpath	25
8.9 Minimum illuminance on the footpath	25
8.10 Uniformity of illuminance	25
9. ANCILLARY DATA	25
10. REFERENCES	25
APPENDIX A: DERIVATION OF EQUATIONS FOR TURNING THE LUMINAIRE ABOUT THE THREE AXES OF THE COORDINATE SYSTEM	26
A.1. Method	26
A.2. General matrix for turning movements about the axes of the coordinate system	26
A.3. Turning movement about the Z axes	26
A.4. Turning movement about the X axes	26
A.5. Turning movement about the Y axes	27
A.6. Sequence of turning movements	27
A.7. Composition of turning movements	27
A.8. Initial attitude of luminaire	28
BIBLIOGRAPHY	28

## **ROAD LIGHTING CALCULATIONS**

### **SUMMARY**

The purpose of this report is to update and to replace CIE 30.2-1982, *Calculation and measurement of illuminance and luminance in road lighting*. It gives the methods which CIE 115-1995 and CIE 136-2000 require for their recommendations.

It includes the calculation of luminance, illuminance, and their associated measures of uniformity, as well as disability glare. The conventions adopted for luminance and illuminance grids are also included.

## **METHODES DE CALCUL POUR L'ECLAIRAGE ROUTIER**

### **RESUME**

Ce rapport est destiné à mettre à jour et à remplacer la publication CIE 30.2-1982, *Calcul et mesure d'éclairage et de luminance en éclairage routier* (en anglais). Il fournit les méthodes requises par les publications CIE 115-1995 et CIE 136-2000 et dans leurs recommandations.

Il comporte le calcul de luminance et d'éclairage et leurs critères d'uniformité associés ainsi que le calcul d'éblouissement d'incapacité. Il comporte également les conventions retenues pour les maillages de luminance et d'éclairage.

## **BERECHNUNGSMETHODEN FÜR STRASSENBELEUCHTUNG**

### **ZUSAMMENFASSUNG**

Dieser Bericht ersetzt CIE-Publikation 30.2-1982 "Calculation and measurement of illuminance and luminance in road lighting". Es werden die Methoden beschrieben, die für die in CIE 115-1995 und CIE 136-2000 gegebenen Empfehlungen benötigt werden.

Im vorliegenden Bericht werden Verfahren angegeben sowohl zur Berechnung von Leuchtdichten, Beleuchtungsstärken und den daraus abgeleiteten Gleichmäßigkeiten als auch zur Ermittlung der Kennzahlen der physiologischen Blendung. Darüber hinaus werden die Festlegungen für die Leuchtdichte- und Beleuchtungsstärkeraster beschrieben.



## 1. INTRODUCTION

This report is a revision of CIE 30.2-1982 *Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting*. It gives the methods of calculating the lighting quantities, which CIE 115 -1995 and CIE 136-2000 require for their recommendations.

It includes the calculation of luminance and illuminance, and introduces the up-to-date conventions for the location of calculation grid points and observer position. A listing of the computer program for carrying out the calculations, which appeared in previous editions of the report, is not given as it has proven impossible to provide a service for the maintenance of such a program. Instead test data will be given in a separately issued part of the report to enable programs to be verified.

The calculation of illuminance is described in greater detail than in the previous reports, as illuminance, in its many forms, is now a requirement for pedestrian lighting.

The laboratory measurement of the reflection properties of the road surfaces, which was fully dealt with in previous editions of the report, has been omitted as it will be the subject of a separate report, as will be field measurements.

## 2. DEFINITIONS, SYMBOLS AND ABBREVIATIONS

**first axis (of a luminaire when measured in the (C,γ) coordinate system):** The vertical axis through the photometric centre of a luminaire when it is at its tilt during measurement.

NOTE 1: The poles of the (C,γ) coordinate system lie in this axis. See Fig. 1.

NOTE 2: This axis is tilted when the luminaire is tilted from its tilt during measurement.

NOTE 3: See CIE 121 - 1996 for more information on the first axis of a luminaire.

**vertical photometric angle (of a light path):** The angle between the light path and the first axis of the luminaire. Unit: degrees of arc. Symbol:  $\gamma$ . (See Figs. 1. and 6.)

**photometric azimuth (of a light path):** The angle between the vertical half-plane passing through the light path and the zero reference half-plane through the first axis of a luminaire, when the luminaire is at its tilt during measurement. Unit: degrees of arc. Symbol: C. (See Fig. 1.)

**angle of deviation (with respect to luminance coefficient):** The complementary angle between the vertical plane through the luminaire and point of observation and the vertical plane through the observer and the point of observation. Unit: degrees of arc. Symbol:  $\beta$ . (See Fig. 6.)

**angle of incidence:** The angle that a light path makes with the normal to the plane of incidence. Unit: degrees of arc. Symbol:  $\varepsilon$ . (See Fig. 6.)

**angle of observation:** The angle that the viewing direction makes with the horizontal. Unit: degrees of arc. Symbol:  $\alpha$ . (See Fig. 6.)

**luminance coefficient (at a surface element, in a given direction, under specified conditions of illumination):** Quotient of the luminance of the surface element in the given direction by the illuminance on the medium. Unit:  $\text{sr}^{-1}$ . Symbol:  $q$ .

NOTE:

$$q = \frac{L}{E}$$

where:

$q$  is the luminance coefficient in reciprocal steradians;  
 $L$  is the luminance in candelas per square metre;  
 $E$  is the illuminance in lux.

**reduced luminance coefficient (for a point on a surface):** The reduced luminance coefficient is the luminance coefficient multiplied by the cube of the cosine of the angle of incidence of the light on the point. Unit:  $\text{sr}^{-1}$ . Symbol:  $r$

NOTE 1: This can be expressed by the equation:

$$r = q (\cos \varepsilon)^3$$

where:

$q$  is the luminance coefficient in reciprocal steradians;  
 $\varepsilon$  is the angle of incidence in degrees of arc (Fig. 6.).

NOTE 2: The angle of observation,  $\alpha$  in Fig. 6. affects the value of  $r$ . By convention this angle is fixed at  $1^\circ$  for road lighting calculations.  $r$  is reasonably constant for values of  $\alpha$  between  $\frac{1}{2}^\circ$  and  $1\frac{1}{2}^\circ$ , the angles over which luminance calculations for the road surface are generally required.

**tilt during measurement (of a luminaire):** The angle between a defined datum axis on the luminaire and the horizontal when the luminaire is mounted for photometric measurement. Symbol:  $\theta_m$  (See Fig. 10.)

NOTE: The defined datum axis may be any feature of the luminaire, but generally for a side-mounted luminaire it lies in the mouth of the luminaire canopy, in line with the spigot axis. Another commonly used feature is the spigot entry axis.

**tilt in application (of a luminaire):** The angle between a defined datum axis on the luminaire and the horizontal when the luminaire is mounted for field use. Symbol:  $\theta_f$  (See Fig. 10.)

NOTE 1: The defined datum axis may be any feature of the luminaire but generally for a side-mounted luminaire it lies in the mouth of the luminaire canopy, in line with the spigot axis. Another commonly used feature is the spigot entry axis.

NOTE 2: This is the actual tilt of the luminaire when it is mounted for field use and should not be confused with *tilt normal in application* or *designed attitude* in CIE 121-1996.

**orientation (of a luminaire):** When the first axis of the luminaire is vertical, it is the angle that a chosen reference direction, which is longitudinal for a straight road, makes with the  $C=0^\circ$ ,  $\gamma=90^\circ$  measurement direction of the luminaire. Unit: degrees of arc. Symbol:  $\nu$ . (See Fig. 9. which illustrates the sign conventions.)

**rotation (of a luminaire):** The angle the first axis of the luminaire makes with the nadir of the luminaire, when the tilt during measurement is zero. Unit: degrees of arc. Symbol:  $\psi$  (See Fig. 9. which illustrates the sign conventions.)

**longitudinal direction:** The direction parallel to the axis of the road.

**transverse direction:** The direction at right angles to the axis of the road.

NOTE: On a curved road the transverse direction is that of the radius of curvature at the point of interest on the road.

**installation azimuth (with respect to a given point on the road surface and a given luminaire at its tilt during measurement):** When the luminaire is at its tilt during measurement, it is the angle a chosen reference direction, which is longitudinal for a straight road, makes with the vertical plane through the given point and the first axis of the luminaire. Unit: degrees of arc. Symbol:  $\varphi$ . (See Fig. 6.)

NOTE: The reference direction for a straight road is by convention the longitudinal direction.

### 3. LIST OF SYMBOLS AND ABBREVIATIONS

The symbols and abbreviations used in this report are listed in Table 1.

**Table 1.** Symbols and abbreviations

Quantity		Unit
Symbol	Name or description	
A	age of observer	years
C	photometric azimuth (Fig. 1.)	degrees of arc

Quantity		Unit
Symbol	Name or description	
$d$	spacing between calculation points in the transverse direction (Fig. 12.) for calculation of luminance	m
$d_F$	spacing between calculation points in the transverse direction (Fig. 12.) of a footway or cyclepath	m
$D$	spacing between calculation points in the longitudinal direction (Fig. 12.) of a carriageway or driving lane	m
$D_F$	spacing between calculation points in the longitudinal direction of a footway or cyclepath for calculation of illuminance	m
$E_{av}$	average illuminance of the carriageway	lx
$E_e$	total illuminance at the eye, produced by new luminaires, on a plane normal to the line of sight and at the height of the observer's eye, scaled to a luminous flux of one kilolumen from the lamps or lamps in each luminaire	lx/klm
$E_h$	horizontal illuminance	lx
$E_{sc}$	semicylindrical illuminance	lx
$H$	mounting height of a luminaire (Fig. 6.)	m
$I$	luminous intensity, usually per kilolumen from the lamp	cd or cd/klm
$j, m$	integers indicating the row or column of a table	-
$k, K$	local constants	-
$L$	luminance	cd · m <sup>-2</sup>
$L_v$	veiling luminance	cd · m <sup>-2</sup>
$MF$	maintenance factor	-
$n$	number of points in the transverse direction	-
$N$	number of points in the longitudinal direction	-
$q$	luminance coefficient	sr <sup>-1</sup>
$r$	reduced luminance coefficient	sr <sup>-1</sup>
$S$	spacing between luminaires (Fig. 12.)	m
$SR$	surround ratio	-
$TI$	threshold increment	%
$U_L$	longitudinal uniformity of luminance	-
$U_0$	overall uniformity of luminance	-
$W_F$	width of footway or cyclepath	m
$W_L$	width of driving lane (Fig. 12.)	m
$W_r$	width of relevant area (Fig. 16.)	m
$x$	abscissa in (x, y) coordinate system (Fig. 8.)	m
$y$	ordinate in (x, y) coordinate system (Fig. 8.)	m
$\alpha$	angle of observation (Fig. 6.)	degrees of arc

Quantity		Unit
Symbol	Name or description	
$\alpha_{sc}$	angle between the vertical plane of the incident light path and the normal to the flat surface of the semicylinder used for measuring semicylindrical illuminance (Fig. 15.)	degrees of arc
$\beta$	angle of deviation (Fig. 6.)	degrees of arc
$\gamma$	vertical photometric angle (Fig. 1.)	degrees of arc
$\delta$	tilt for calculation (Fig. 10.)	degrees of arc
$\theta$	angle between line of sight and centre of luminaire	degrees of arc
$\theta_f$	tilt in application (Fig. 10.)	degrees of arc
$\theta_m$	tilt during measurement (Fig. 10.)	degrees of arc
$\varepsilon$	angle of incidence (Fig. 6.)	degrees of arc
$\nu$	orientation of luminaire(Fig. 9.)	degrees of arc
$\psi$	rotation of a luminaire (Fig. 9.)	degrees of arc
$\phi$	initial luminous flux of lamp or lamps in a luminaire	lm

#### 4. MATHEMATICAL CONVENTIONS AND PROCEDURES

The mathematical conventions used in this document are:

- the luminaire is regarded as a point source of light;
- light reflected from the surrounds and interreflected light is disregarded;
- obstruction to the light from luminaires by trees and other objects is disregarded;
- the road surface is flat and has uniform reflecting properties over the area considered;
- the atmospheric attenuation is zero.

For interpolation the Lagrange formula is used:

$$y(x) = \sum_{i=1}^n y_i \prod_{j=1, j \neq i}^n \left( \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \right) \quad (1)$$

where;

$y(x)$  is the interpolated value of  $y$  at the point  $x$ ;

$n$  is the number of points between which interpolation is required;

$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_j, y_j), \dots, (x_n, y_n)$  are the points between which interpolation is required;

$\sum$  signifies the summation of the terms;

$\prod$  signifies the product of the terms.

## 5. REQUIREMENTS FOR PHOTOMETRIC DATA

### 5.1 Luminous intensity data for luminaires

For calculations made according to this report, a luminous intensity table (*I*-table) prepared in accordance with CIE 121-1996 is required. The calculations will be facilitated if the *I*-table and associated data are in the form recommended in CIE 102-1993. The coordinate system used for road lighting luminaires is generally the  $(C, \gamma)$ , shown in Fig. 1. although the  $(B, \beta)$  coordinate system is used in some countries and is commonly used for floodlights. The formulae quoted in this document are related to the  $(C, \gamma)$  coordinate system. Luminous intensity is expressed in candelas per kilolumen (cd/klm) from all the light sources in the luminaire.

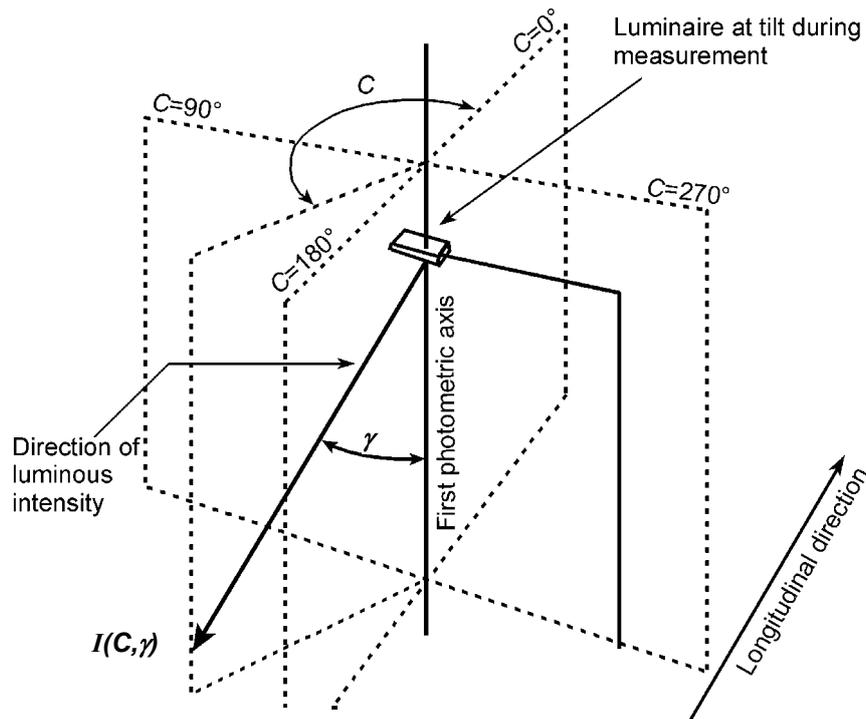


Fig. 1.  $C, \gamma$  coordinate system.

Values of luminous intensities are required over the range of angles which are important. In particular, values are required up to the maximum angle of elevation which is relevant for the intended application of the luminaire, with allowance being made for the maximum angle of tilt of the luminaire. Angular intervals stipulated in this report have been selected to give acceptable levels of interpolation error when the recommended interpolation procedures are used, and to keep the time taken for photometric measurements within practical limits.

In the  $(C, \gamma)$  system of coordinates, luminous intensities will be required at the angular intervals stated below.

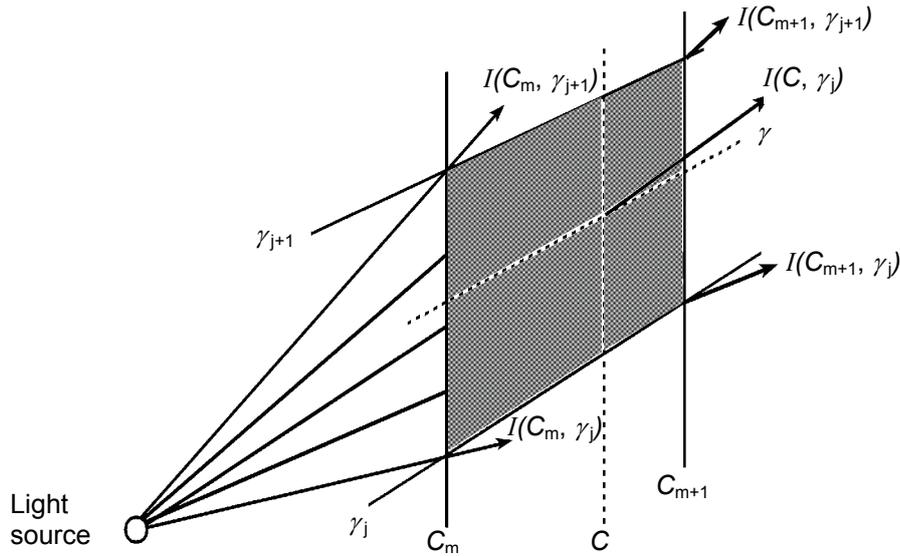
For all luminaires the angular intervals in elevation ( $\gamma$ ) should at most be  $2.5^\circ$  from  $0^\circ$  to  $90^\circ$  plus the permissible maximum field angle of elevation minus the measurement angle of elevation, for the luminaire. In azimuth the intervals can be varied according to the symmetry of the light distribution from the luminaire as follows:

- luminaires with no symmetry about the  $C = 0^\circ$ - $180^\circ$  plane: the intervals should at most be  $5^\circ$ , starting at  $0^\circ$ , when the luminaire is in its measurement angle of elevation and ending at  $355^\circ$ ;
- luminaires with nominal symmetry about the  $C = 90^\circ$ - $270^\circ$  plane: the intervals should at most be  $5^\circ$ , starting at  $270^\circ$ , when the luminaire is at its tilt during measurement, and ending at  $90^\circ$ ;
- luminaires with nominally the same light distribution in all  $C$  planes: only one representative set of measurements in elevation is needed.

NOTE: Up to the present time,  $I$ -tables have usually been measured according to the angular spacings recommended in CIE Publication 30.2-1982. These spacings are wider than those recommended above, and for these  $I$ -tables linear interpolation, as described in Section 5.2.1. will not be satisfactory. Quadratic interpolation or an equivalent mathematical procedure is recommended.

**5.2 Interpolation of luminous intensity data**

Interpolation will be required in an  $I$ -table when a luminous intensity is required in a direction which lies between the directions in which measurements are taken as shown in Fig. 2. where the luminous intensity  $I(C, \gamma)$  is required. it is necessary to interpolate between the four values of intensity lying closest to the direction  $C$  in azimuth and  $\gamma$  in elevation.

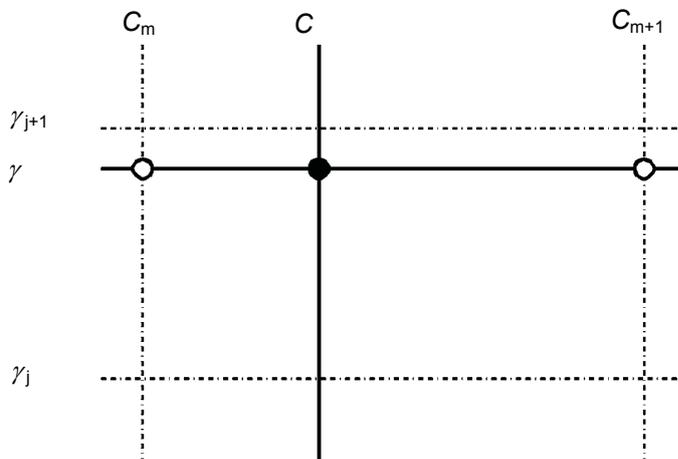


**Fig. 2.** Luminous intensities required for linear interpolation.

Linear or quadratic interpolation, or a more accurate mathematical procedure can be used for this purpose. The choice of linear or quadratic interpolation depends on the angular spacing of the intensity measurements. More accurate procedures, such as spline functions, may be used but are not described in this document.

**5.2.1 Linear interpolation**

To estimate the intensity  $I(C, \gamma)$  it is necessary to interpolate between the four values of intensity lying closest to the direction  $(C, \gamma)$  as indicated in Fig. 3.



**Fig. 3.** Angles required for linear interpolation of luminous intensity.

For linear interpolation Equ. (1), with  $n$  equal to 2 becomes:

$$y(x) = y_1 \left( \frac{x - x_2}{x_1 - x_2} \right) + y_2 \left( \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right)$$

This equation can be applied to either  $C$  or  $\gamma$  first. When it is first applied to  $C$ ,  $C$  is substituted for  $x$ :

$$\begin{aligned} x &= C \\ x_1 &= C_m \\ x_2 &= C_{m+1} \end{aligned}$$

From this substitution two constants ( $K_1$  and  $K_2$ ) can be defined, and conveniently evaluated by a computer subroutine:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{C - C_{m+1}}{C_m - C_{m+1}} \\ K_2 &= \frac{C - C_m}{C_{m+1} - C_m} \end{aligned}$$

Since  $K_1 + K_2 = 1$  the notation can be simplified by putting  $K = K_1$  so  $K_2 = 1 - K$ .

Substitution of these constants and appropriate values of  $I$  for  $y$  in Equ. (1), gives after simplification:

$$I(C, \gamma_j) = I(C_m, \gamma_j) + K \cdot [I(C_{m+1}, \gamma_j) - I(C_m, \gamma_j)]$$

Similarly,

$$I(C, \gamma_{j+1}) = I(C_m, \gamma_{j+1}) + K \cdot [I(C_{m+1}, \gamma_{j+1}) - I(C_m, \gamma_{j+1})]$$

For interpolation at a constant azimuth,  $C$ , a similar procedure produces:

$$I(C, \gamma) = I(C, \gamma_j) + k \cdot [I(C, \gamma_{j+1}) - I(C, \gamma_j)]$$

where:

$$k = \frac{\gamma - \gamma_j}{\gamma_{j+1} - \gamma_j}$$

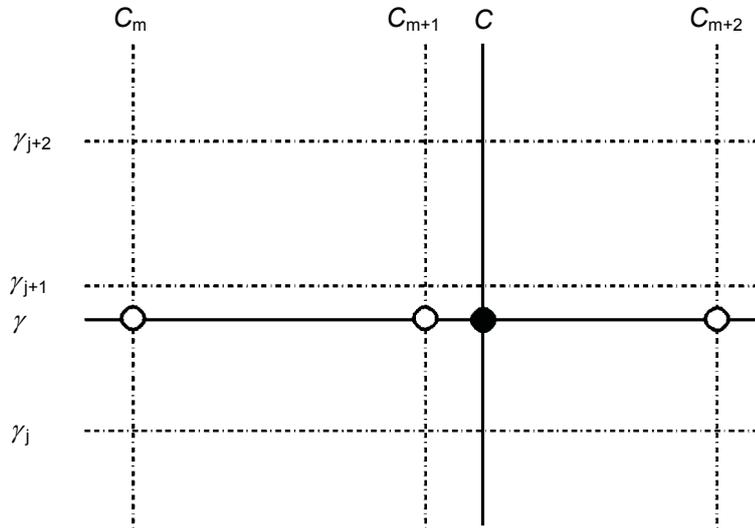
If this procedure is reversed by first carrying out interpolation in the  $\gamma$  cones followed by interpolation in the  $C$  planes the same result will be obtained.

Where linear interpolation is used with the larger angular intervals recommended in the previous edition of this report (CIE 30.2-1982) there will be some loss in accuracy and quadratic interpolation is recommended.

When interpolation is carried out in the region of  $C=0^\circ$  see Section 5.2.3.

### 5.2.2 Quadratic interpolation

Quadratic interpolation requires three values in the  $I$ -table for each interpolated value. Fig. 4. indicates the procedure. If a value of  $I$  is required at  $(C, \gamma)$ , interpolation is first carried out down three adjacent columns of the  $I$ -table enclosing the point. This enables three values of  $I$  to be found at  $\gamma$ . Interpolation is then carried out across the table to find the required value at  $(C, \gamma)$ . If preferred this procedure may be reversed, that is interpolation can be carried out across and then down the  $I$ -table without affecting the result.



**Fig. 4.** Values required for quadratic interpolation.

To reduce interpolation errors as far as possible the following two rules should be followed in selecting the values for insertion in the interpolation equations:

- 1) The two tabular angles adjacent to the angle for interpolation are selected for insertion in the interpolation equations and the average calculated.
- 2) If the angle for interpolation is smaller than this average then the third tabular angle is the next lower tabular angle (as shown for  $C$  in Fig. 4.); if the angle for interpolation is greater than this average then the third tabular angle is the next higher tabular angle (as shown for  $\gamma$  in Fig. 4.).

When interpolation is carried out in the region of  $C=0^\circ$ , or  $\gamma=0^\circ$  or  $180^\circ$  see Section 5.2.3.

The formula for quadratic interpolation is obtained by putting  $n$  equal to 3 in Equ. (1), which gives:

$$y(x) = y_1 \cdot \left[ \frac{(x-x_2)(x-x_3)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)} \right] + y_2 \cdot \left[ \frac{(x-x_1)(x-x_3)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)} \right] + y_3 \cdot \left[ \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)} \right]$$

where it will be noticed that there is cyclic permutation of the suffices.

This interpolation can be applied to either  $C$  or  $\gamma$ . When it is first applied to  $C$ , this parameter is substituted for  $x$  in the above equation:

$$\begin{aligned} x &= C \\ x_1 &= C_m \\ x_2 &= C_{m+1} \\ x_3 &= C_{m+2} \end{aligned}$$

where:

$C$  is the angle at which  $I$  is to be found by interpolation;  
 $m, m+1, m+2$  are integers indicating the number of the columns in the  $I$ -table;  
 $C_m, C_{m+1},$  and  $C_{m+2}$  are values of  $C$  for the corresponding column numbers.

From this substitution three constants can be defined, which can be conveniently evaluated by a subroutine program:

$$K_1 = \frac{(C - C_{m+1})(C - C_{m+2})}{(C_m - C_{m+1})(C_m - C_{m+2})}$$

$$K_2 = \frac{(C - C_m)(C - C_{m+2})}{(C_{m+1} - C_m)(C_{m+1} - C_{m+2})}$$

$$K_3 = \frac{(C - C_m)(C - C_{m+1})}{(C_{m+2} - C_m)(C_{m+2} - C_{m+1})}$$

From these three equations it follows that  $K_1 + K_2 + K_3 = 1$ . A set of three equations can then be written allowing evaluation in a calculation loop in a computer program with the variation of  $j$ :

$$I(C, \gamma_j) = K_1 \cdot I(C_m, \gamma_j) + K_2 \cdot I(C_{m+1}, \gamma_j) + K_3 \cdot I(C_{m+2}, \gamma_j)$$

$$I(C, \gamma_{j+1}) = K_1 \cdot I(C_m, \gamma_{j+1}) + K_2 \cdot I(C_{m+1}, \gamma_{j+1}) + K_3 \cdot I(C_{m+2}, \gamma_{j+1})$$

$$I(C, \gamma_{j+2}) = K_1 \cdot I(C_m, \gamma_{j+2}) + K_2 \cdot I(C_{m+1}, \gamma_{j+2}) + K_3 \cdot I(C_{m+2}, \gamma_{j+2})$$

For interpolation of the  $\gamma$  angles further application of Equ. (1), gives three new constants:

$$k_1 = \frac{(\gamma - \gamma_{j+1})(\gamma - \gamma_{j+2})}{(\gamma_j - \gamma_{j+1})(\gamma_j - \gamma_{j+2})}$$

$$k_2 = \frac{(\gamma - \gamma_j)(\gamma - \gamma_{j+2})}{(\gamma_{j+1} - \gamma_j)(\gamma_{j+1} - \gamma_{j+2})}$$

$$k_3 = \frac{(\gamma - \gamma_j)(\gamma - \gamma_{j+1})}{(\gamma_{j+2} - \gamma_j)(\gamma_{j+2} - \gamma_{j+1})}$$

From these three equations it follows that  $k_1 + k_2 + k_3 = 1$ , and:

$$I(C, \gamma) = k_1 \cdot I(C, \gamma_j) + k_2 \cdot I(C, \gamma_{j+1}) + k_3 \cdot I(C, \gamma_{j+2})$$

which gives the required value of luminous intensity.

The order of the interpolation procedure, first for  $\gamma$  and then for  $C$ , may be reversed without altering the result.

### 5.2.3 Quadratic interpolation in the region of $C=0^\circ$ , or $\gamma=0^\circ$ or $180^\circ$

For quadratic interpolation in these regions it may be necessary to take the third value of luminous intensity from the  $C = 90^\circ$  through to  $C = 180^\circ$  to  $270^\circ$  hemisphere of the luminous intensity distribution, which may be regarded as a mirror image of the  $C = 270^\circ$  through to  $C = 0^\circ$  to  $90^\circ$  hemisphere of the luminous intensity distribution.

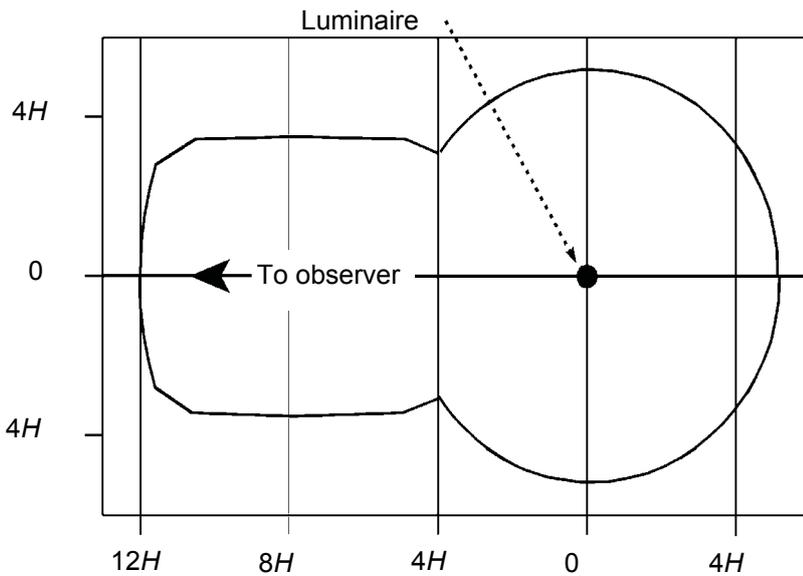
## 5.3 Road surface reflection data

Road surface reflection data are, conventionally, expressed in terms of the reduced luminance coefficient multiplied by 10 000 (for convenience of presentation), at the angular intervals and in the directions indicated in Table 2.

**Table 2.** Example  $r$ -table of reduced luminance coefficients ( $\times 10^4 r$ )

$\tan \varepsilon$	$\beta$ (degrees)																			
	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0,00	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329
0,25	362	358	371	364	371	369	362	357	351	349	348	340	328	312	299	294	298	288	292	281
0,50	379	368	375	373	367	359	350	340	328	317	306	280	266	249	237	237	231	231	227	235
0,75	380	375	378	365	351	334	315	295	275	256	239	218	198	178	175	176	176	169	175	176
1,00	372	375	372	354	315	277	243	221	205	192	181	152	134	130	125	124	125	129	128	128
1,25	375	373	352	318	265	221	189	166	150	136	125	107	91	93	91	91	88	94	97	97
1,50	354	352	336	271	213	170	140	121	109	97	87	76	67	65	66	66	67	68	71	71
1,75	333	327	302	222	166	129	104	90	75	68	63	53	51	49	49	47	52	51	53	54
2,00	318	310	266	180	121	90	75	62	54	50	48	40	40	38	38	38	41	41	43	45
2,50	268	262	205	119	72	50	41	36	33	29	26	25	23	24	25	24	26	27	29	28
3,00	227	217	147	74	42	29	25	23	21	19	18	16	16	17	18	17	19	21	21	23
3,50	194	168	106	47	30	22	17	14	13	12	12	11	10	11	12	13	15	14	15	14
4,00	168	136	76	34	19	14	13	11	10	10	10	8	8	9	10	9	11	12	11	13
4,50	141	111	54	21	14	11	9	8	8	8	8	7	7	8	8	8	8	10	10	11
5,00	126	90	43	17	10	8	8	7	6	6	7	6	7	6	6	7	8	8	8	9
5,50	107	79	32	12	8	7	7	7	6	5										
6,00	94	65	26	10	7	6	6	6	5											
6,50	86	56	21	8	7	6	5	5												
7,00	78	50	17	7	5	5	5	5												
7,50	70	41	14	7	4	4	4													
8,00	63	37	11	5	4	4	4													
8,50	60	37	10	5	4	4	4													
9,00	56	32	9	5	4	3														
9,50	53	28	9	4	4	4														
10,00	52	27	7	5	4	3														
10,50	45	23	7	4	3	3														
11,00	43	22	7	3	3	3														
11,50	44	22	7	3	3															
12,00	42	20	7	4	3															

The plan area covered by the data in the table is indicated in Fig. 5. in terms of the mounting height of the luminaire, and in relation to the position of the luminaire and the direction of the observer.



**Fig. 5.** Plan area covered by  $r$  tables.

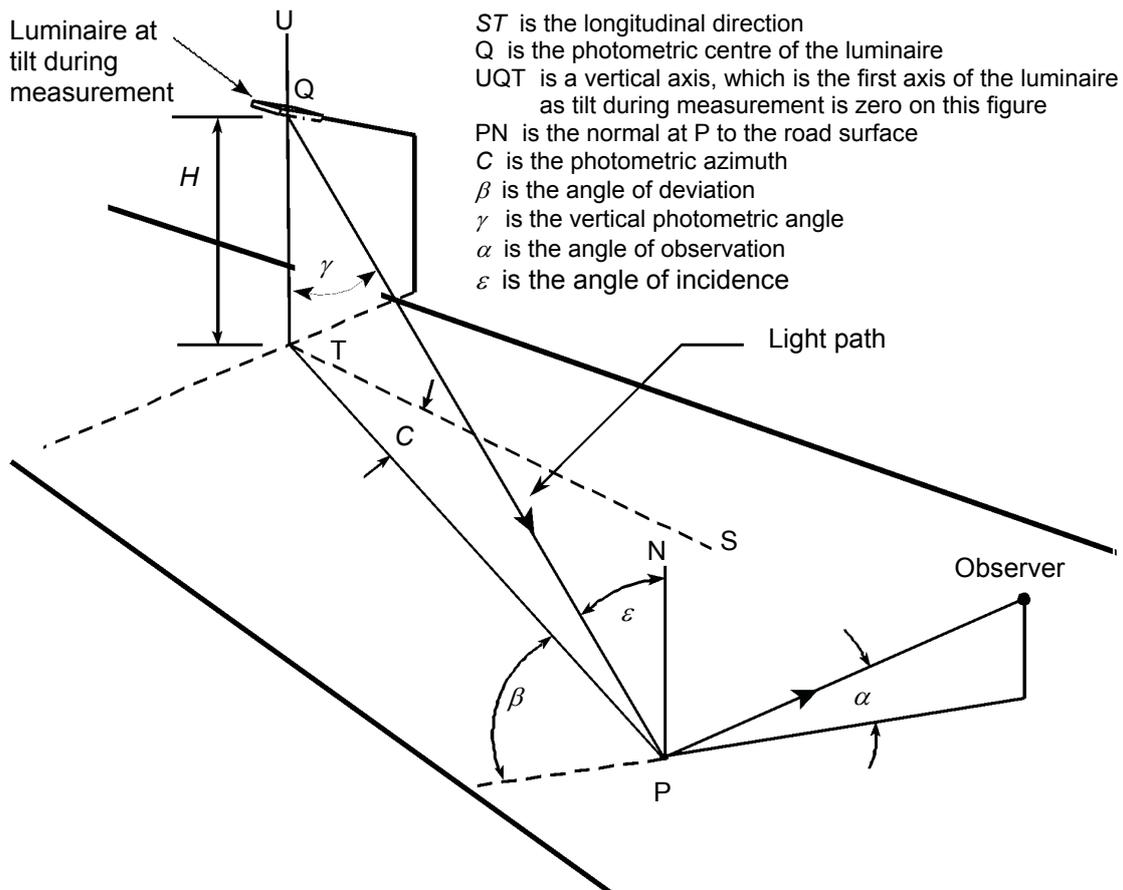
The reduced luminance coefficient varies according to the following angles, which are indicated in Fig. 6:

- a)  $\varepsilon$  the angle of incidence at the point P.

- b)  $\alpha$  the angle between the line of sight of the observer and the surface of the carriageway. This is fixed at  $1^\circ$ .
- c)  $\beta$  the complementary angle between the vertical plane through the luminaire, at Q, and point of observation, P, and the vertical plane through the observer and P.

It will be noticed in Fig. 6. that  $\gamma$ , the vertical photometric angle, is equal to  $\varepsilon$ , the angle of incidence. This is only true when the luminaire is used at its tilt in measurement and the rotation is zero.

The reflection characteristics of the road surface may vary with the angle of view with respect to the axis of the road, that is the surface may not be optically isotropic. The resulting variation in the reduced luminance coefficient is usually small and can be disregarded.



**Fig. 6.** Angular relationships for luminaire, observer and point of observation.

### 5.3.1 Interpolation in the $r$ -table

When a value of  $r$  is required for values of  $\tan \varepsilon$  and  $\beta$  lying between those given in the  $r$ -table it is necessary to use quadratic interpolation. This requires three values in the  $r$ -table for each interpolated value. Fig. 7. indicates the procedure. If a value of  $r$  is required at  $(\tan \varepsilon, \beta)$  interpolation is first carried out down three adjacent columns of the  $r$ -table enclosing the point. This enables three values of  $r$  to be found at  $\tan \varepsilon$ . Interpolation is then carried out across the table to find the required value at  $(\tan \varepsilon, \beta)$ .

To reduce interpolation errors as far as possible the following rule (which differs from that used for interpolation in the  $I$ -table) should be followed in selecting the values for insertion in the interpolation equations:

- The two tabular values adjacent to the value for interpolation are selected. The third tabular value is the next greatest, as shown in Fig. 7.
- Linear interpolation is used at the boundaries of the table.

The ensuing mathematical procedure is similar to that described for the  $I$ -table (Section 5.2.2.). As for that procedure the order of interpolation may be reversed without affecting the results.

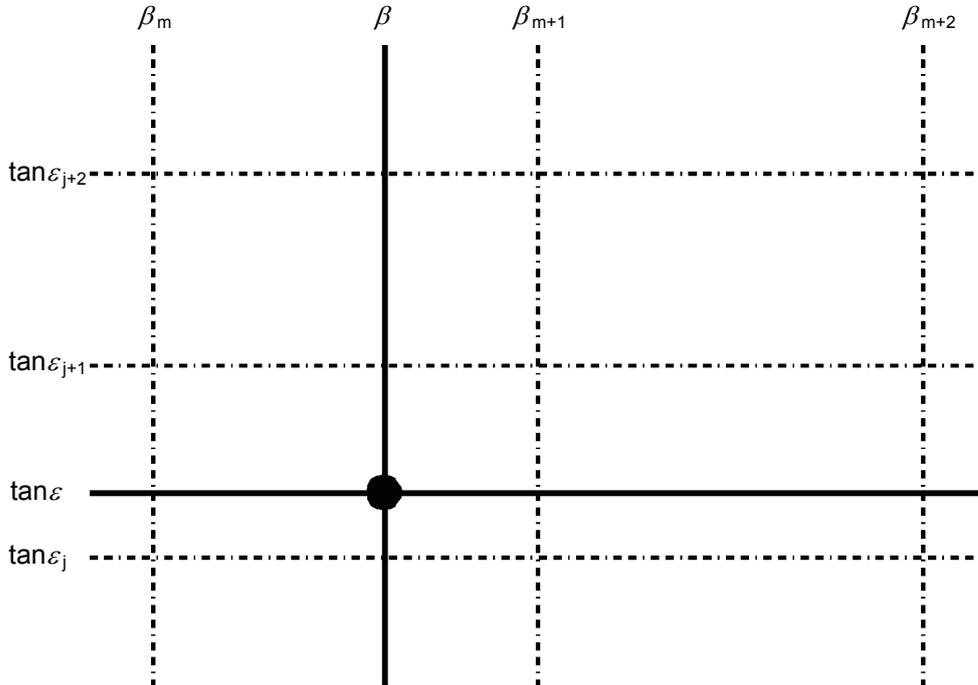


Fig. 7. Values required for interpolation procedure in the  $r$ -table.

**6. CALCULATION OF  $I(C, \gamma)$**

To determine the luminous intensity directed from a luminaire to a point it is necessary to find the vertical photometric angle ( $\gamma$ ) and photometric azimuth ( $C$ ) of the light path to the point. To do this account has to be taken of the orientation, the tilt in application, and rotation of the luminaire. For this purpose mathematical sign conventions for measuring distances on the road and for turning the luminaire about axes have to be established.

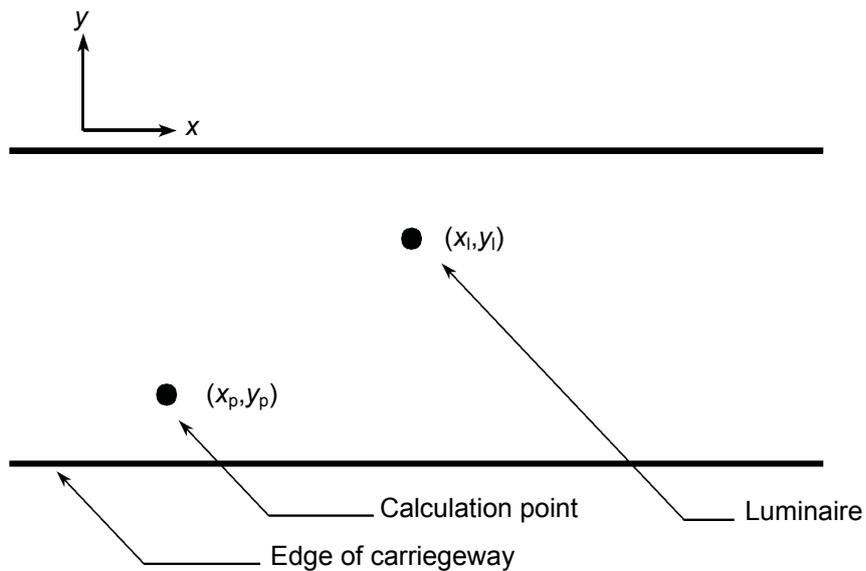


Fig.8.  $(x, y)$  coordinate system for locating luminaire in plan.

### 6.1 Mathematical conventions for distances measured on the road

A  $(x,y)$  rectangular coordinate system is used (Fig. 8.). The abscissa is aligned with the reference direction which, for a straight road, lies in the longitudinal direction. Then:

$$\begin{aligned} X &= x_p - x_l \\ Y &= y_p - y_l \end{aligned} \quad (2)$$

where:

$(x_p, y_p)$  are the coordinates of the calculation point;  
 $(x_l, y_l)$  are the coordinates of the luminaire.

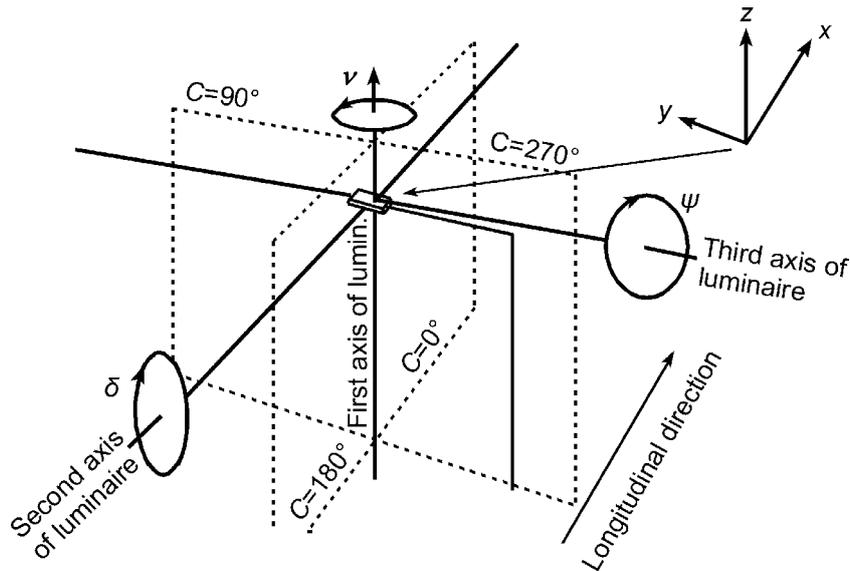


Fig. 9. Axes for turning the luminaire in relation to  $(x,y,z)$  coordinate system.

### 6.2 Mathematical conventions for luminaire axes

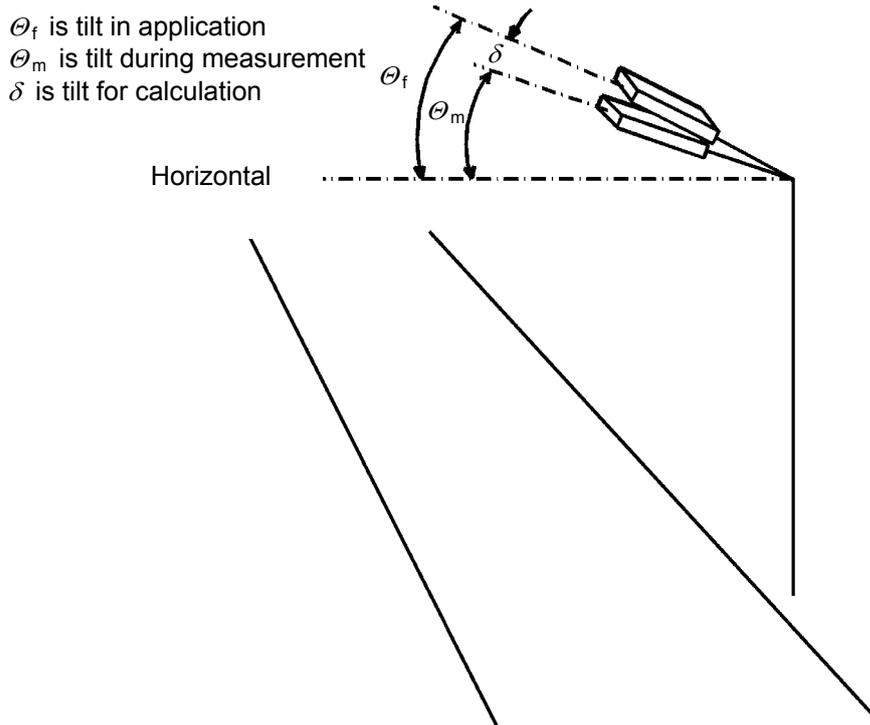
The luminaire has three axes of rotation. To describe these it is necessary to extend the  $(x,y)$  coordinate system to three dimensions by means of a  $z$ -axis. The origin is taken to be at the photometric centre of the luminaire. Fig. 9. shows the luminaire axes in relation to the  $(x,y,z)$  coordinate system, and the sense of the turning movements. The first axis of the luminaire is fixed in space and the second and third axes of the luminaire are mutually perpendicular and can be turned about the first axis. Further diagrams are given in CIE 121 - 1996.

Fig. 10. shows the relation of tilt for calculation to tilt during measurement and tilt in application. From this it is evident that:

$$\delta = \theta_f - \theta_m \quad (3)$$

where:

$\delta$  is the tilt for calculation, in degrees of arc;  
 $\theta_f$  is the tilt in application, in degrees of arc;  
 $\theta_m$  is the tilt during measurement, in degrees of arc.



**Fig. 10.** Tilt during measurement, tilt in application, tilt for calculation.

**6.3 Calculation of C: luminaire not turned about photometric axes**

From Fig. 9.

$$C = \tan^{-1} \frac{y}{x} \tag{4}$$

which will give:

$$-90^\circ \leq \tan^{-1} \frac{y}{x} \leq 90^\circ \tag{5}$$

The angular quadrant in which this lies is determined from Table 3.

**Table 3.** Calculation of C from x and y

x	y	C (degrees)	Range of C (degrees)
> 0	> 0	$\tan^{-1} \frac{y}{x}$	$0 \leq C \leq 90$
< 0	> 0	$180 + \tan^{-1} \frac{y}{x}$	$90 \leq C \leq 180$
< 0	< 0	$180 + \tan^{-1} \frac{y}{x}$	$180 \leq C \leq 270$
> 0	< 0	$360 + \tan^{-1} \frac{y}{x}$	$270 \leq C \leq 360$

In a standard I-table, where  $270^\circ \leq C \leq 360^\circ$  or  $0^\circ \leq C \leq 90^\circ$ , the values to be used can be found in Table 4.

**Table 4.** Values of  $C$  to be used in  $I$ -table

Calculated value of $C$ (degrees)	$C$ to be used in $I$ -table (degrees)
$0 \leq C \leq 90$	$C$
$90 < C \leq 180$	$180 - C$
$180 < C \leq 270$	$540 - C$
$270 \leq C < 360$	$C$
360	0

**6.4 Calculation of  $\gamma$ : luminaire not turned about photometric axes**

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{H} \text{ degrees} \quad (6)$$

where  $0^\circ \leq \gamma < 90^\circ$ .

**6.5 Calculation of  $C$  and  $\gamma$ : luminaire turned about photometric axes**

These are determined in three stages:

- 1) Substitution of  $v$ ,  $\psi$ ,  $\delta$ ,  $x$ , and  $y$  in the equations (see Appendix A for derivation):

$$x' = x (\cos v \cdot \cos \psi - \sin v \cdot \sin \delta \cdot \sin \psi) + y (\sin v \cdot \cos \psi + \cos v \cdot \sin \delta \cdot \sin \psi) + H \cdot \cos \delta \cdot \sin \psi$$

$$y' = -x \cdot \sin v \cdot \cos \delta + y \cdot \cos v \cdot \cos \delta - H \cdot \sin \delta$$

$$H' = -x (\sin v \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi + \cos v \cdot \sin \psi) - y (\sin v \cdot \sin \psi - \cos v \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi) + H \cdot \cos \delta \cdot \cos \psi$$

where:

$x$  and  $y$  are the longitudinal and transverse distances between the calculation point and the nadir of the luminaire as indicated in Fig. 8.

$H$  is the height of the luminaire above the calculation point;

$v$ ,  $\delta$ , and  $\psi$  are the orientation, tilt in application, and rotation;

$x'$ ,  $y'$ , and  $H'$  are distances on the coordinate system which has been turned through  $\delta$ ,  $v$ , and  $\psi$ . They correspond to  $x$ ,  $y$ , and  $H$  in the unturned coordinate system and for calculation purposes may be regarded simply as intermediate variables (see Fig. A.1.).

- 2) Calculation of  $C$

Evaluation of  $\tan^{-1} \frac{y'}{x'}$  will give:

$$-90^\circ \leq \tan^{-1} \frac{y'}{x'} \leq 90^\circ$$

The angular quadrant in which this lies is determined from Table 5.

**Table 5.** Calculation of  $C$  from  $x'$  and  $y'$ 

$x'$	$y'$	$C$ (degrees)	Range of $C$ (degrees)
$> 0$	$> 0$	$\tan^{-1} \frac{y'}{x'}$	$0 \leq C \leq 90$
$< 0$	$> 0$	$180 + \tan^{-1} \frac{y'}{x'}$	$90 \leq C \leq 180$
$< 0$	$< 0$	$180 + \tan^{-1} \frac{y'}{x'}$	$180 \leq C \leq 270$
$> 0$	$< 0$	$360 + \tan^{-1} \frac{y'}{x'}$	$270 \leq C \leq 360$

The values  $C$  to be used in an  $I$ -table are given in Table 4.

3) Calculation of  $\gamma$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x'^2 + y'^2}}{H'} \text{ degrees}$$

which will give

$$-90^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ.$$

The angular quadrant in which this lies is determined from Table 6.

**Table 6.** Calculation of  $\gamma$

$H'$	$\gamma$ (degrees)	Range of $\gamma$ (degrees)
$> 0$	$\gamma = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x'^2 + y'^2}}{H'}$	$0 \geq \gamma < 90$
$0$	90	90
$< 0$	$\gamma = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x'^2 + y'^2}}{H'} + 180$	$90 > \gamma \leq 180$

## 7. CALCULATION OF PHOTOMETRIC QUANTITIES

### 7.1 Luminance

#### 7.1.1 Luminance at a point

The luminance at a point is determined by applying the following formula or a mathematically equivalent formula:

$$L = \sum \frac{I(C, \gamma) \cdot r \cdot \Phi \cdot MF \cdot 10^{-4}}{H^2} \quad (7)$$

where:

$L$  is the maintained luminance in  $\text{cd/m}^2$ ;

$\Sigma$  indicates the summation of the contributions from all the luminaires;

$I(C, \gamma)$  is the luminous intensity in the direction  $(C, \gamma)$ , indicated in Fig. 1. in  $\text{cd/klm}$ ;

$r$  is the reduced luminance coefficient for a light ray incident with angular coordinates  $(\beta, \varepsilon)$ ,

$\Phi$  is the initial luminous flux in  $\text{klm}$  of the sources in each luminaire;

$MF$  is the product of the lamp flux maintenance factor and the luminaire maintenance factor; [1]

$H$  is the mounting height in  $\text{m}$  of the luminaires above the surface of the road.

$I(C, \gamma)$  is determined from the luminaire  $I$ -table after corrections have been made for the orientation, tilt, and rotation of the luminaire as indicated in Section 6. and linear interpolation, if necessary, applied. Likewise,  $r$  for the appropriate value of  $\beta$  and  $\tan \varepsilon$  is determined after the use of quadratic interpolation, if necessary.

#### 7.1.2 Field of calculation for luminance

The field of calculation should be typical of the area of the road which is of interest to the driver.

In the longitudinal direction on a straight road, the field of calculation should lie between two luminaires in the same row (Fig. 11.), the first luminaire being located 60 ahead of the observer.

In the transverse direction, it should cover the whole carriageway width on roads without a central reservation, and the width of one carriageway on roads with a central reservation.

However, this is limited by the applicability of the *r*-table. As stated in Section 5.3. the *r*-table is measured for an observer viewing the road at an angle of observation of 1° (Fig. 6.). For a conventionally used eye height of 1,5 m this would result in the observation point lying 86 m ahead of the observer. It has been found that the *r*-table is applicable over a range of viewing angles lying between 0,5° and 1,5° (see definition of *reduced luminance coefficient*), which results in the *r*-table being applicable to points lying between 57 m and 172 m approximately (conventionally taken as 60 m and 170 m) ahead of the observer.

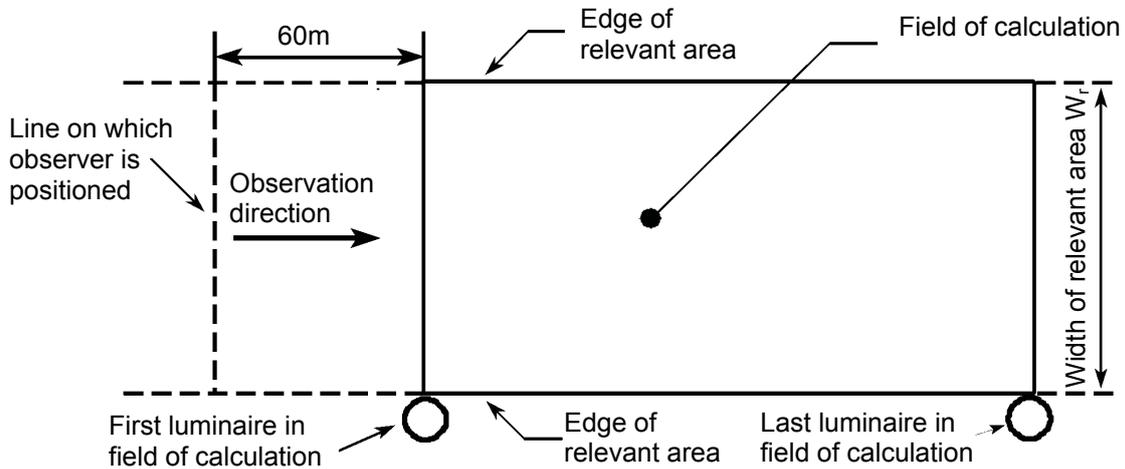
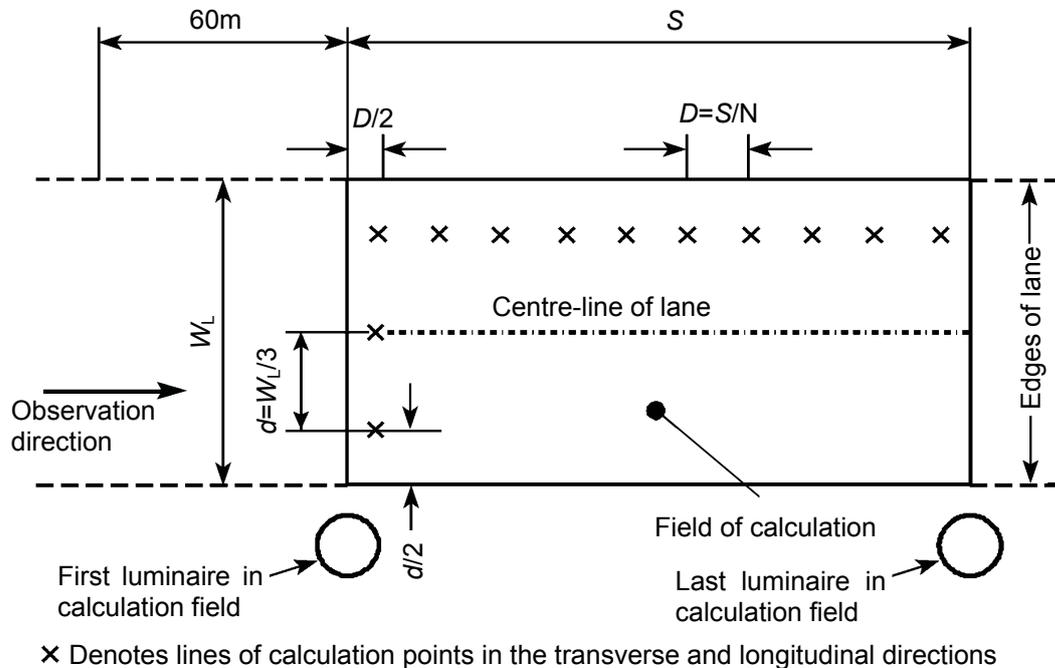


Fig. 11. Field of calculation for carriageway luminance.

7.1.3 Position of calculation points

The calculation points should be evenly spaced in the field of calculation and located as indicated in Fig. 12.



× Denotes lines of calculation points in the transverse and longitudinal directions

Fig. 12. Position of calculation points in a driving lane.

## (a) In the longitudinal direction

The spacing ( $D$ ) in the longitudinal direction is determined from the equation:

$$D = \frac{S}{N} \quad (8)$$

where:

$D$  is the spacing between points in the longitudinal direction (m);

$S$  is the spacing between luminaires in the same row (m);

$N$  is the number of calculation points in the longitudinal direction chosen such that:

for  $S \leq 30$  m,  $N = 10$

for  $S > 30$  m,  $N$  is the smallest integer giving  $D \leq 3$  m.

The first transverse row of calculation points is spaced at a distance  $D/2$  beyond the first luminaire (remote from the observer).

## (b) In the transverse direction

The spacing ( $d$ ) in the transverse direction is determined from the equation:

$$d = \frac{W_L}{3} \quad (9)$$

where:

$d$  is the spacing between points in the transverse direction (m);

$W_L$  is the lane width (m).

The outermost calculation points are spaced  $d/2$  from the edges of the lane.

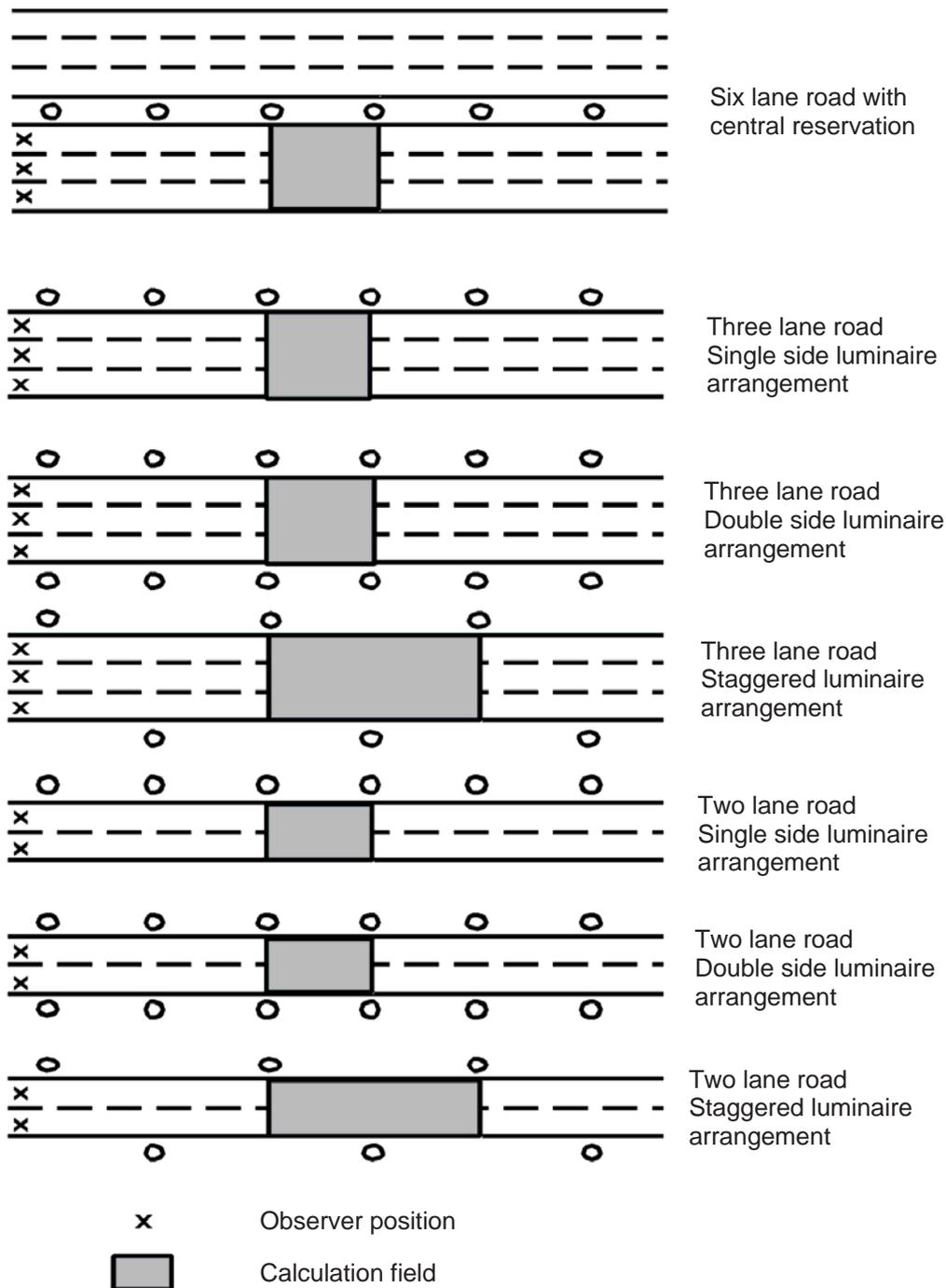
Where there is a hard shoulder and luminance information is required, the number and spacing of the calculation points should be the same as for a driving lane.

#### 7.1.4 Position of observer

The angle of observation from the horizontal is fixed at  $1^\circ$ , as stated in Section 5.3.

In the transverse direction the observer is placed in the centre of each lane in turn. Average luminance ( $L_{av}$ ) [see Section 8.1.] and overall uniformity of luminance ( $U_0$ ) [see Section 8.2.] are calculated for the entire carriageway for each position of the observer. Longitudinal uniformity of luminance ( $U_L$ ) [see Section 8.3.] is calculated for each centre-line. The operative values of  $L_{av}$ ,  $U_0$ , and  $U_L$  are the lowest in each case. Fig. 13. gives examples of the observer position in relation to the field of calculation.

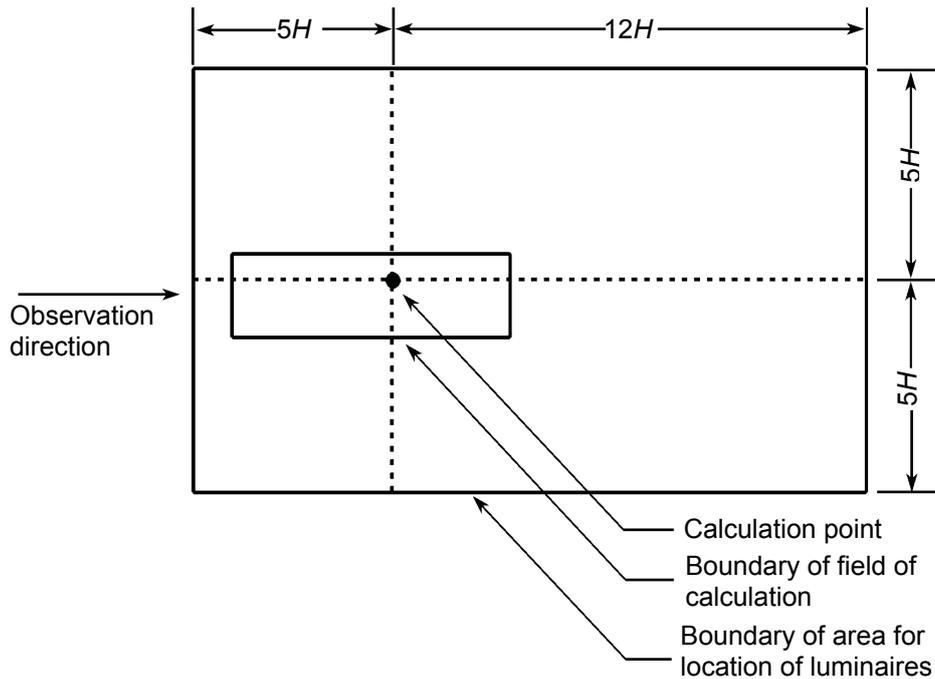
NOTE: For luminance calculations in some countries and for tunnel lighting calculations generally, the direction of observation is always in a line parallel to the run on the road. This means that the observer has to be aligned with each longitudinal line of calculation points. The results from these calculations should be labelled 'Moving observer for luminance calculations'.



**Fig. 13.** Examples of positions of observation points in relation to the field of calculation.

*7.1.5 Number of luminaires included in calculation*

For each calculation point, all the luminaires which make a significant contribution to the luminance should be included in the calculation. These luminaires lie in the plan area of the *r*-table (Table 2.), which approximates to a rectangle of dimensions  $5H$  by  $17H$ , and by its symmetry can be used to cover an area  $10H$  by  $17H$  (Fig. 5.). As a consequence it is only necessary to consider luminaires which are situated within five times the mounting height from the calculation point towards the observer, 12 times the mounting height from the calculation point away from the observer, and five times the mounting height on either side of the calculation point. Fig. 14. shows an example.



**Fig. 14.** Luminaires which may contribute to luminance at calculation point.

## 7.2 Illuminance

In this report the calculation of two forms of illuminance is considered. These are:

Planar illuminance on a horizontal plane, usually the road surface or footway, referred to as horizontal illuminance.

Semicylindrical illuminance, 1,5 m above the surface of interest. The semicylindrical illuminance varies with the direction of interest. For a street this is taken to be in a designated longitudinal direction. In Fig. 15. the shaded vertical plane is orientated in the longitudinal direction.

### 7.2.1 Horizontal illuminance

The horizontal illuminance at a point should be calculated from the following formula or a mathematically equivalent formula:

$$E_h = \sum \frac{I(C, \gamma) \cdot \cos^3 \varepsilon \cdot \Phi \cdot MF}{H^2} \quad (10)$$

where:

- $E_h$  is the maintained horizontal illuminance at the point in lux;
- $\Sigma$  indicates summation of the contributions from all the luminaires,
- $I(C, \gamma)$  is the intensity in cd/klm in the direction of the point;
- $\varepsilon$  is the angle of incidence of the light at the point;
- $\gamma$  is the vertical photometric angle;
- $H$  is the mounting height in m of the luminaire;
- $\Phi$  is the initial luminous flux in klm of the lamp or lamps in the luminaire;
- $MF$  is the product of the lamp flux maintenance factor and the luminaire maintenance factor.

### 7.2.2 Semicylindrical illuminance

The semicylindrical illuminance at a point should be calculated from the following formula or a mathematically equivalent formula:

$$E_{sc} = \sum \frac{I(C, \gamma) \cdot (1 + \cos \alpha_{sc}) \cdot \cos^2 \varepsilon \cdot \sin \varepsilon \cdot \Phi \cdot MF}{\pi \cdot (H - 1,5)^2} \quad (11)$$

where:

- $E_{sc}$  is the maintained semicylindrical illuminance at the point in lux;
- $\Sigma$  indicates summation of the contributions from all the luminaires;
- $I(C, \gamma)$  is the intensity in cd/klm in the direction of the calculation point;
- $\alpha_{sc}$  is the angle between the vertical plane containing the intensity vector and the vertical plane at right-angles to the flat surface of the semicylinder, as shown in Fig. 15;
- $\gamma$  is the vertical photometric angle;
- $\varepsilon$  is the angle of incidence of the light to the normal to the horizontal plane, at the point;
- $H$  is the mounting height in m of the luminaire;
- $\Phi$  is the initial luminous flux in klm of the lamp or lamps in the luminaire;
- $MF$  is the product of the lamp flux maintenance factor and the luminaire maintenance factor.

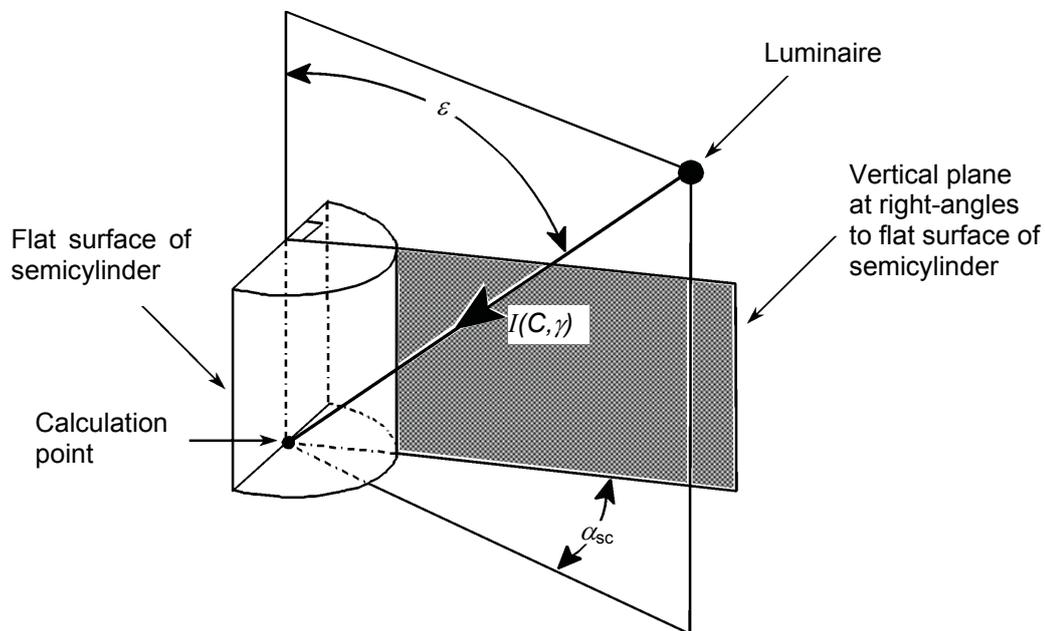
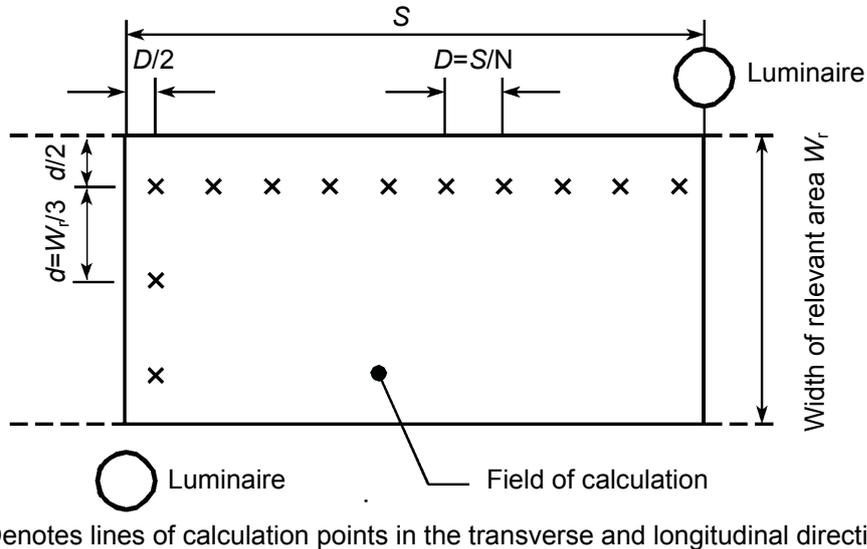


Fig. 15. Angles used in the calculation of semicylindrical illuminance.

7.2.3 Carriageway

7.2.3.1 Field of calculation

The field of calculation should be typical of the area of the road which is of interest to the driver and pedestrian, and may include the footways, cycleways, and verges. As shown in Fig. 16. it should be bounded by the edges of the carriageway and by transverse lines through two consecutive luminaires.



**Fig. 16.** Calculation points for illuminance.

For staggered installations consecutive luminaires will be on opposite sides of the road.

7.2.3.2 Position of calculation points

The calculation points should be evenly spaced in the field of calculation (Fig. 16.) and their number should be chosen as follows:

(a) In the longitudinal direction

The spacing in the longitudinal direction should be determined from the equation:

$$D = \frac{S}{N}$$

where:

- D is the spacing between points in the longitudinal direction (m);
- S is the spacing between luminaires (m);
- N is the number of calculation points in the longitudinal direction with the following values:

for  $S \leq 30$  m,  $N = 10$

for  $S > 30$  m, the smallest integer giving  $D \leq 3$  m.

The first row of calculation points is spaced at a distance  $D/2$  beyond the first luminaire (m).

(b) In the transverse direction

$$d = \frac{W_r}{3}$$

where:

- d is the spacing between points in the transverse direction (m);
- $W_r$  is the width of the carriageway or relevant area (m).

The spacing of points from the edges of the relevant area is  $D/2$  in the longitudinal direction, and  $d/2$  in the transverse direction, as indicated in Fig. 16.

#### 7.2.3.3 Number of luminaires included in calculation

Luminaires which are situated within five times the mounting height from the calculation point should be included in the calculation.

#### 7.2.4 Footways and cyclepaths

The calculation points should be evenly spaced in the field of calculation (Fig. 16.) and their number should be chosen as follows:

##### (a) Longitudinal direction

If the footways or cyclepaths are of the same lighting class as the carriageway, they may be considered together with the carriageway for determining the spacing of the calculation points in the longitudinal direction, otherwise Section 7.2.3.2. (a) applies.

##### (b) Transverse direction

$$d_F = \frac{W_F}{n}$$

where:

$d_F$  is the spacing between points in the transverse direction in metres;

$W_F$  is the width of the footway or cyclepath in metres;

$n$  is the number of points in the transverse direction with the following values:

for  $W_F \leq 1,0$  m,  $n = 1$

for  $W_F > 1,0$  m,  $n$  is the smallest integer giving  $d_F \leq 1$  m.

The points adjacent to the edge of the carriageway should be spaced from the edge of the carriageway at one half the spacing between points.

For the number of luminaires included in the calculation, Section 7.2.3.3. applies.

#### 7.2.5 Areas of irregular shape

These may include conflict areas [2], residential roads, and areas where pedestrian activity predominates.

The calculation points should cover the relevant area and be on a square grid with a spacing between points no greater than 5 m. A spacing of about 1 m should be considered for areas of particular interest or importance.

The orientation or orientations for semicylindrical illuminance should be in the main directions of pedestrian movement.

#### 7.2.5.1 Number of luminaires included in calculation

This should be the same as the number used for carriageway calculations.

## 8. CALCULATION OF QUALITY CHARACTERISTICS

Quality characteristics relating to luminance should be obtained from the calculated grids of luminance without further interpolation.

For initial average illuminance or initial average luminance,  $MF$  is 1,0 and initial values of the luminous flux of the lamp or lamps in the luminaires should be taken. For average luminance or average illuminance after a stated period, the  $MF$  for the luminaire after the stated period in the environmental conditions of the installation should be taken together with the luminous flux in kilolumens of the light source or sources in the luminaire after the stated period.

### 8.1 Average luminance $L_{av}$

The average luminance is calculated as the arithmetic mean of the luminances obtained at the calculation points.

### 8.2 Overall uniformity $U_0$

The overall uniformity is calculated as the ratio of the lowest to the average luminance.

### 8.3 Longitudinal uniformity $U_L$

The longitudinal uniformity is calculated as the ratio of the lowest to the highest luminance in the longitudinal direction along the centre-line of each lane, including the hard shoulder in the case of motorways. The number of points in the longitudinal direction (N) and the spacing between them should be the same as those used for the calculation of average luminance.

The observer's position should be in line with the row of calculation points.

### 8.4 Threshold Increment $TI$

The threshold increment ( $TI$ ) is calculated for the installation in its initial state, when it will have its highest value. It is calculated from the formula [3]:

$$TI = \frac{k \cdot E_e}{L_{av}^{0,80} \cdot \theta^2} (\%) \quad (12)$$

where:

$k$  is a constant which varies according to the age of the observer. It is conventionally taken as 650, which is applicable for an observer of 23 years. Its value for other ages can be derived from the formula:

$$k = 641 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{A}{66,4} \right)^4 \right] \quad (13)$$

$A$  is the age of the observer in years;

$E_e$  is the total illuminance (in lux per 1000 **initial** lamp lumens) produced by **new** luminaires on a plane normal to the line of sight and at the height of the observer's eye; the observer's eye, height 1,5 m above road level, is positioned transversely  $W_r/4$  from the carriageway edge indicated in Section 7.1.4. and longitudinally at a distance in metres of  $2,75(H - 1,5)$ , where  $H$  is the mounting height (in m), in front of the field of calculation. The line of sight is  $1^\circ$  below the horizontal and in a vertical plane in the longitudinal direction passing through the observer's eye.

$L_{av}$  is the average **initial** luminance of the road surface;

$\theta$  is the angle in degrees of arc between the line of sight and the centre of each luminaire.

This equation is valid for  $0,05 < L_{av} < 5 \text{ cd m}^{-2}$  and  $1,5^\circ < \theta < 60^\circ$  (CIE 31-1976).

$E_e$  is summed for the first luminaire in the direction of observation and luminaires beyond, up to a distance of 500 m.

The calculation is commenced with the observer in the initial position stated above and repeated with the observer moved forwards in increments which are the same in number and distance as are used for the longitudinal spacing of luminance points. The maximum value of  $TI$  found is the operative value.

### 8.5 Surround ratio $SR$

The surround ratio is the average horizontal illuminance on two longitudinal strips each adjacent to the two edges of the carriageway and lying off the carriageway divided by the average horizontal illuminance on two longitudinal strips each adjacent to the two edges of the carriageway but lying on the carriageway. The width of all four strips shall be equal to 5 m, or half the width of the carriageway, or the width of the unobstructed strip lying off the carriageway, whichever is the least. For dual carriageways, both carriageways together are treated as a single carriageway unless they are separated by more than 10 m.

The average illuminance on the strips on and adjacent to the carriageway should be determined by the same procedure, or mathematically equivalent procedure, as used for determining the average illuminance of the footpath.

### 8.6 Average illuminance of the carriageway ( $E_{av}$ )

The average illuminance is calculated as the arithmetic mean of the illuminances obtained at the calculation points in Section 7.2.3.2. (a).

For conflict, pedestrian, and other irregularly shaped areas the procedure in Section 7.2.5. is followed.

### 8.7 Minimum illuminance on the carriageway

The minimum illuminance is taken as the lowest value (in lux) of the illuminances in the field of calculation.

For conflict, pedestrian, and other irregularly shaped areas the procedure in Section 7.2.5. is followed.

### 8.8 Average illuminance of the footpath

The average illuminance is calculated as the arithmetic mean of the illuminances obtained at the calculation points in Section 7.2.3.2. (b).

### 8.9 Minimum illuminance on the footpath

The minimum illuminance is taken as the lowest value (in lux) of the illuminances in the field of calculation.

### 8.10 Uniformity of illuminance

The uniformity of horizontal and semicylindrical illuminance is calculated as the ratio of the minimum illuminance to the average illuminance.

## 9. ANCILLARY DATA

When photometric performance data are prepared for an installation, the following ancillary data should be declared:

- a) identification of the luminaires, including setting of the optical components and lamp, and mark number, if applicable;
- b) identification of  $I$ -table;
- c) identification of  $r$ -table;
- d) tilt during measurement of the luminaires;
- e) tilt in application of the luminaires;
- f) rotation of the luminaires;
- g) orientation of the luminaires;
- h) identification of the light sources;
- i) luminous flux of the light sources on which the calculations are based;
- j) maintenance factors applied;
- k) definition of the area of calculation;
- l) position of the luminaires in space or a numerical description
- m) mounting height of the luminaires;
- n) moving observer for luminance calculations;
- o) age of observer for calculation of threshold increment;
- p) any deviations from the procedures given in this report;

Item c) is not required when the calculations are solely those of illuminance.

## 10. REFERENCES

- 1 CIE 17.4-1987 International Lighting Vocabulary.
- 2 CIE 115-1995 Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic.
- 3 Adrian W., Bhainji A. Fundamentals of disability glare. A formula to describe straylight in the eye as a function of the glare angle and age. *Proc. 1<sup>st</sup> Symp. on Glare*. pp. 185-193. (1991).

## APPENDIX A: DERIVATION OF EQUATIONS FOR TURNING THE LUMINAIRE ABOUT THE THREE AXES OF THE COORDINATE SYSTEM

### A.1. Method

A rectangular coordinate system is adopted in which the position of a point P, is specified in  $(x, y, z)$  coordinates on **X**, **Y**, **Z** axes.

Matrices are used to express the turning<sup>1</sup> of the coordinate system about each of the three axes. These are composed, in the correct order, to give a new coordinate system **X'**, **Y'**, **Z'** in which the combined effect of the three turning movements is expressed in terms of coordinates  $(x', y', z')$ .

The first axis of the luminaire lies in the **Z** axis, the second axis of the luminaire lies in the **X** axis, and the third axis of the luminaire lies in the **Y** axis (see Fig. 9. and Fig. A.1.). The origin of the coordinate system lies at the photometric centre of the luminaire.

### A.2. General matrix for turning movements about the axes of the coordinate system

Consider a right-handed Cartesian coordinate system with axes **U**, **V**, and **W**. Let the coordinates of a point P in this system be  $(u, v, w)$ . If the system is turned anti-clockwise through an angle  $\omega$  about the **W** axis, the coordinates  $(u', v', w')$  of a stationary point P in the turned system can be found from the expression:

$$\begin{bmatrix} u' & v' & w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u & v & w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos \omega + v \sin \omega & -u \sin \omega + v \cos \omega & w \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

For convenience adopt the notation:

$$T_W^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A2})$$

where the negative power of  $T$  signifies that the matrix is the inverse of the matrix for turning the point P through the angle  $\omega$  about the origin, and the suffix **W** refers to the axis of turning.

### A.3. Turning movement about the Z axes

$$T_Z^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \nu & -\sin \nu & 0 \\ \sin \nu & \cos \nu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

### A.4. Turning movement about the X axes

$$T_X^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ 0 & \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (\text{A4})$$

<sup>1</sup> The more usual term for *turning* in texts describing the application of matrices is *rotation*. In this document *rotation* is used in the specialized sense for describing the turning of a luminaire about the **Y** axis.

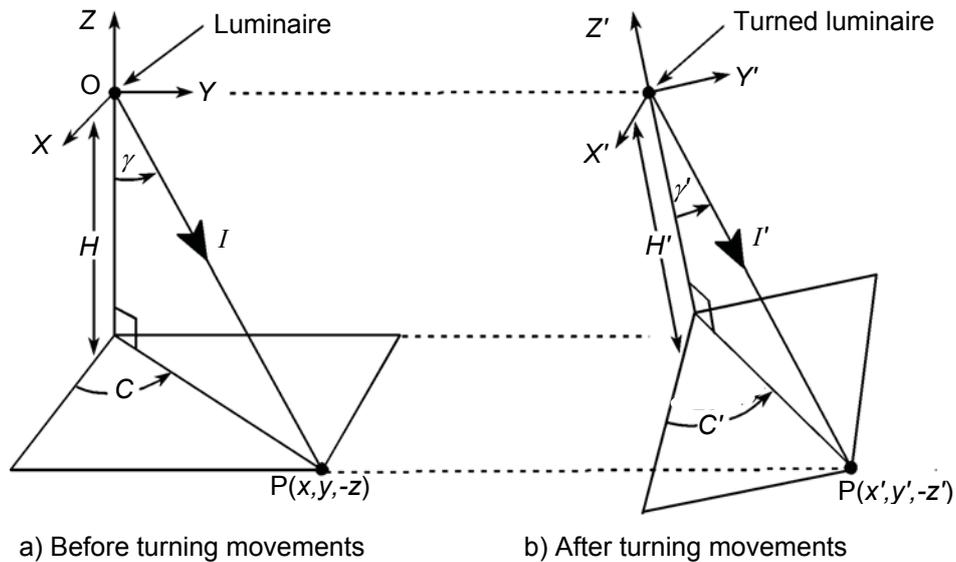
**A.5. Turning movement about the Y axes**

$$T_Y^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \tag{A5}$$

**A.6. Sequence of turning movements**

The effect of the turning movements will depend on the sequence in which they are applied. To be in accord with application in the field this must be first orientation, second tilt, and third rotation.

**A.7. Composition of turning movements**



**Fig. A.1.** Result of turning movement.

Fig. A.1. shows how the primed values  $x', y', z', H', C', I',$  and  $\gamma'$  after turning have taken place, relate to the unprimed values before turning has taken place. The position of  $P$  does not change with respect to the position of the luminaire, so the vector  $OP$  in Fig. A.1. (a) equals the vector  $OP$  in Fig. A.1. (b).  $x', y', z',$  and  $H'$  are found by multiplying the matrices for the three turning movements together. The order must be as indicated below to be in accord with Section A.6.

$$[x' \ y' \ z'] = [x \ y \ z] [T_Z^{-1} \cdot T_X^{-1} \cdot T_Y^{-1}] \tag{A6}$$

where:

$$[T_Z^{-1} \cdot T_X^{-1} \cdot T_Y^{-1}] = \tag{A7}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \nu \cdot \cos \psi - \sin \nu \cdot \sin \delta \cdot \sin \psi & -\sin \nu \cdot \cos \delta & \cos \nu \cdot \sin \psi + \sin \nu \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi \\ \sin \nu \cdot \cos \psi + \cos \nu \cdot \sin \delta \cdot \sin \psi & \cos \nu \cdot \cos \delta & \sin \nu \cdot \sin \psi - \cos \nu \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi \\ -\cos \delta \cdot \sin \psi & \sin \delta & \cos \delta \cdot \cos \psi \end{bmatrix}$$

Substitution of this in Equ (1) gives

$$\begin{aligned} x' &= x (\cos \nu \cdot \cos \psi - \sin \nu \cdot \sin \delta \cdot \sin \psi) + y (\sin \nu \cdot \cos \psi + \cos \nu \cdot \sin \delta \cdot \sin \psi) - z \cdot \cos \delta \cdot \sin \psi \\ y' &= -x \cdot \sin \nu \cdot \cos \delta + y \cdot \cos \nu \cdot \cos \delta + z \cdot \sin \delta \\ z' &= x (\cos \nu \cdot \sin \psi + \sin \nu \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi) + y (\sin \nu \cdot \sin \psi - \cos \nu \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi) + z \cdot \cos \delta \cdot \cos \psi \end{aligned}$$

Now from Fig. A.1.  $H' = -z'$ , and  $H = -z$ , so

$$x' = x (\cos \nu \cdot \cos \psi - \sin \nu \cdot \sin \delta \cdot \sin \psi) + y (\sin \nu \cdot \cos \psi + \cos \nu \cdot \sin \delta \cdot \sin \psi) + H \cos \delta \cdot \sin \psi$$

$$y' = -x \sin \nu \cdot \cos \delta + y \cos \nu \cdot \cos \delta - H \sin \delta$$

$$H' = -x (\cos \nu \cdot \sin \psi + \sin \nu \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi) - y (\sin \nu \cdot \sin \psi - \cos \nu \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi) + H \cos \delta \cdot \cos \psi$$

#### A.8. Initial attitude of luminaire

$\psi$ ,  $\nu$ , and  $\delta$  are the angles through which the luminaire is turned from its angular attitude when it is photometrically measured. In practice luminaires are photometrically measured at an angular attitude such that  $\psi$  and  $\nu$  are not off-set from zero. However, they may be measured with the luminaire tilted, in which case  $\delta = \theta_f - \theta_m$  (Fig. 10.).

#### BIBLIOGRAPHY

*CIE 31-1976* Glare and uniformity in road lighting installations

*CIE 102-1993* Recommended file format for electronic transfer of luminaire photometric data

*CIE 115-1995* Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic

*CIE 121-1996* The photometry and goniophotometry of luminaires

*CIE 136-2000* Guide to the lighting of urban areas

*LITG. LTAG* Publikation Nr. 14 1991 Methoden der Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichteberechnung für Straßenbeleuchtung

## D Mejoras en el proceso final

En el Capítulo 6: Pruebas y Resultados, apartado 5.2 Pruebas de Locomoción, se hace referencia en 2. Distancia recorrida por la plataforma, se consideran tres casos críticos en el avance de la plataforma, estos son posteriormente mencionados en la Tabla 5-4 e ilustrados en la Fig. 5-12. Esta figura especifica la forma en la cual la plataforma realiza la corrección de posicionamiento según el caso.

Cuando la plataforma comienza a desviarse de la línea de seguimiento, ésta ejecuta mayor cantidad de pasos por revolución (paso/rev) en un motor u otro, según sea el caso. Posteriormente en la Tabla 5-6, llamada “Resultados con velocidad ajustada” se menciona el error de seguimiento en la línea (error sigue línea) y el respectivo porcentaje de error (% error) para un total de 10 pruebas cumplidas, la tabla se ilustra nuevamente como sigue en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1 Resultados con velocidad ajustada

	PASO MAYOR (paso/rev)	PASO MENOR (paso/rev)	AVANCE ÓPTIMO (paso/rev)	Nº de pruebas	Rango tiempo (seg.)	Error Sigue Linea	% error
1	2000	1000	1000	10	26	5	50%
2	5000	100	5000	10	29	2	20%

El programa fuente se ha modificado de manera de poder rectificar este error de posicionamiento y ha dado resultado conforme utilizando las instrucciones de motor con constantes encendido y apagado de cada motor con un determinado tiempo (4,5 milisegundos). Este cambio de estado, on/off, en un muy corto tiempo, permite revisar los sensores de línea continuamente en lapsos cortos, pudiendo corregir instantáneamente al momento de un desvío de posición.

A continuación se ilustra nuevamente cada caso como se mostró en la Fig.5-12.

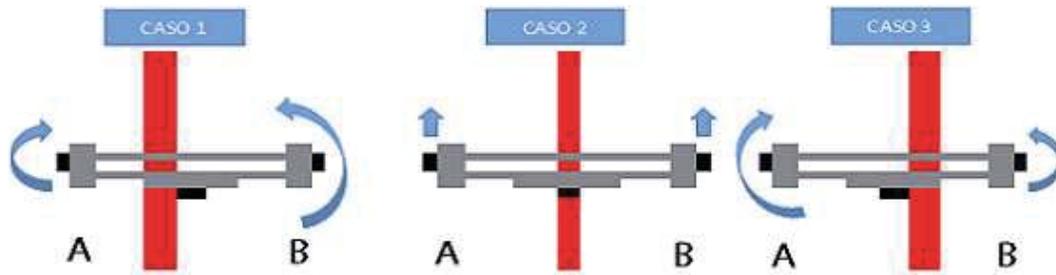


Figura 6-1 Casos críticos para el avance de la plataforma

Esto hace proponer una nueva tabla para explicar el comportamiento de cada situación, ahora referente al tiempo de encendido y apagado de cada motor, esto se muestra en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2 Tiempo de ejecución de motores para los 3 casos críticos

	MOTOR A	MOTOR B
CASO1	4.5 ms OFF	4.5 ms ON
CASO2	4.5 ms ON	4.5 ms ON
CASO3	4.5 ms ON	4.5 ms OFF

Con la nueva configuración se muestra un comportamiento satisfactorio en el mantenimiento de la orientación de la plataforma, logrando un perfecto seguimiento de línea a través de toda la operación.

Tabla 6-3 Error de posicionamiento con nuevas mejoras

Nº de pruebas	Tiempo de Operación	Error Sigue Línea	% acierto
10	17 min aprox.	0	100%