



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Análisis del área de cobertura para la tecnología de comunicación por  
luz visible dentro de los túneles mineros.**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Autores**

**BYRON JAVIER ABRIL ORELLANA  
XAVIER LAUTARO MATUTE MATUTE**

**Director**

**DANIEL ESTEBAN ITURRALDE PIEDRA**

**CUENCA, ECUADOR  
2015**

## DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto a mis padres quienes me dieron fuerza y apoyo incondicional a pesar de todos los obstáculos que se presentaron a lo largo de mi carrera: Leonel y Elsa, ejemplos de vida que no hicieron más que darme buen ejemplo y demostrarme como salir adelante. A mis hermanos que muchas veces han sabido alentarme: Santi, Diana.

A mis compañeros de trabajo quienes veían mis ojeras y preocupados me preguntaban si estaba bien: Ing. Edison Brito, Plazaro, Santiago, PGC1, Mayte y Fabián.

Sin duda con quien compartí estos años a pesar de las malas noches, iras, malgenio, peleas, risas llegaron a ser amigos y compañeros incondicionales: Víctor, Paola, Lautaro.

El tiempo de DIOS es perfecto.

**Byron**

Al culminar una meta más de mi vida, quiero dedicar este proyecto de graduación a mis queridos padres: Manuel y Olga, quienes me han sabido apoyar de manera incondicional a lo largo de mi vida, con sus consejos, principios y por estar siempre a mi lado logrando que cumpla mis sueños. Quiero dedicarlo también a toda mi familia especialmente a mis hermanas Catalina y Gabriela, por su cariño y compañía en todo momento. De igual manera a mi enamorada Verónica Montero por sus palabras de aliento para seguir adelante y sobre todo por la paciencia y comprensión que me ha sabido brindar.

A mis amigos quienes con su amistad y apoyo estuvieron en mi formación profesional: Paola Quezada, Byron Abril y Víctor Rubio.

**Xavier**

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta tesis es el resultado de muchos años de esfuerzo y sacrificio, teniendo al frente a personas profesionales que han sabido brindar sus sabios conocimientos, logrando así el fortalecimiento y la seguridad para desenvolvernos en la vida cotidiana y profesional.

Es por ello que nos hemos tomado la atribución de agradecer al MsC. Daniel Iturralde quien ha dedicado parte de su tiempo a este proyecto, instruyéndonos con sus conocimientos, permitiéndonos llegar a culminar nuestra tesis con satisfacción.

**Byron y Xavier**

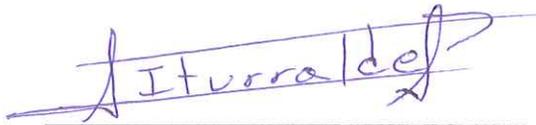
# ANÁLISIS DEL ÁREA DE COBERTURA PARA LA TECNOLOGÍA DE COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE DENTRO DE LOS TÚNELES MINEROS

## RESUMEN

Este proyecto pretende realizar un estudio de luminotecnia con tecnología LED para alcanzar una máxima optimización lumínica dentro de túneles mineros, así disminuirá diversos problemas que se tiene en este ambiente, como llegar a cubrir toda la zona de trabajo o tránsito que se tienen en las minas, todo esto considerando de importancia que mientras mejor iluminación se tiene, mejores serán las condiciones de trabajo.

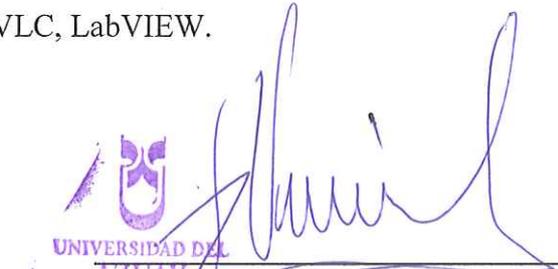
Se busca un modelo matemático en donde dicha iluminaria pueda ser utilizada como medio de comunicación. Se analizará el área de cobertura lumínica que a su vez podría ser considerada como área de cobertura para un sistema de comunicación.

**Palabras Claves:** LED, Minas, Canal VLC, LabVIEW.



Daniel Esteban Iturralde Piedra

**Director de Tesis**

  
  
UNIVERSIDAD DEL  
AZUAY  
ESCUELA  
Ingeniería Eléctrica

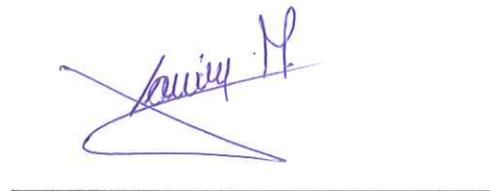
Francisco Eugenio Vásquez Calero

**Director de Escuela**



Byron Javier Abril Orellana

**Autor**



Xavier Lautaro Matute Matute

**Autor**

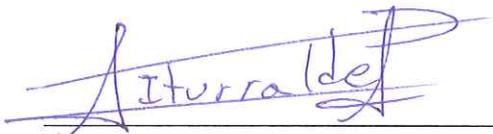
**ANALYSIS OF COVERAGE AREA FOR VISIBLE LIGHT  
COMMUNICATION TECHNOLOGY INSIDE MINING TUNNELS**

**ABSTRACT**

This project aims to conduct a lighting study with LED technology for maximum light optimization within mining tunnels. This will decrease the various problems that exist in this environment, such as being able to cover the whole area of work or transit into the mines. Therefore, it is important to consider that the better the lighting, the better the working conditions.

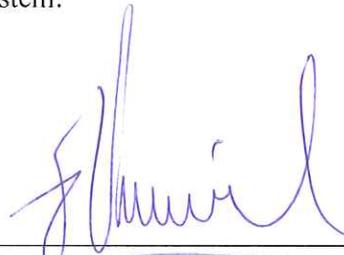
We look for a mathematical model where this lightning system can be used as a communication medium. We will analyze the light coverage area which in turn could be considered as coverage area for a communication system.

**Keywords:** LED, Mines, VLC Channel, LabVIEW.



Daniel Esteban Iturralde Piedra

**Thesis Director**



Francisco Eugenio Vásquez Calero

**School Director**



Byron Javier Abril Orellana

**Author**



Xavier Lautaro Matute Matute

**Author**



Translated by,  
Lic. Lourdes Crespo

## INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT .....	v
INDICE DE CONTENIDOS.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	viii
INDICE DE TABLAS .....	xi
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPITULO 1: GENERALIDADES

1.1 Motivación de la investigación:.....	2
1.2 Problemática:.....	5
1.3 Pregunta de la investigación.....	6
1.4 OBJETIVOS.....	6
1.4.1 Objetivo General .....	6
1.4.2 Objetivos específicos:.....	6
1.5 Metodología.....	7

### CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1 Tipos de minas.....	8
2.1.1 Minería subterránea: .....	8
2.1.2 Minería a cielo abierto .....	9
2.1.3 Tipos de minerales dentro de una mina .....	10
2.2 Condiciones de las minas subterráneas.....	11
2.2.1 Estudio de temperatura .....	11
2.2.2 Estudio de humedad.....	13
2.2.3 Estudio de condiciones de trabajo. ....	14

2.2.4	Dimensiones de una mina .....	15
2.3	Tipos de cable.....	18
2.3.1	Conexiones eléctricas .....	18
2.3.2	Normas de seguridad .....	22
2.4	Tipos de led .....	25
2.5	Ubicación de led en minas .....	27
2.6	Comunicaciones por luz visible .....	28

### **CAPITULO 3: MÉTODOS**

3.1	Estudio de luminotécnia.....	35
3.2	Modelo de canal VLC.....	40
3.3	Geometría Celular.....	45

### **CAPITULO 4: DESARROLLO Y DESCRIPCION DEL SISTEMA**

4.1	Análisis de iluminancia por superficie. ....	49
4.2	Ubicación de cada luminaria led. ....	51
4.3	Modelado 3D en labVIEW .....	58
4.4	Software .....	65

### **CAPITULO 5: RESULTADOS**

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	75
--------------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA .....	78
--------------------	----

Anexo 1.....	81
Anexo 2.....	81
Anexo 3.....	82
Anexo 4.....	82
Anexo 5.....	83

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tasa de fatalidad en minería Sudáfrica. ....	3
Figura 2 Tasa de fatalidad en minería China. ....	4
Figura 3 Tasa de fatalidad en minería Chile.....	5
Figura 4 Galería subterránea de la mina el teniente (Chile). ....	9
Figura 5 Mina de cobre y oro a cielo abierto “la alumbreira” (Argentina).....	10
Figura 6 Esquema para galerías de pequeña sección: 8,40 m <sup>2</sup> .....	16
Figura 7 Esquema para galerías de sección media: 16,06 m <sup>2</sup> .....	17
Figura 8 Esquema para galerías de sección grande: 33,25 m <sup>2</sup> .....	18
Figura 9 Cable Monopolar 2kv tipo W. ....	19
Figura 10 Cable multiconductor redondo 2kv.....	20
Figura 11 Cable multicolor redondo 2kV tipo G-GC. ....	20
Figura 12 Cable multiconductor redondo 2kv tipo SHD-GD. ....	20
Figura 13 Cable multiconductor redondo 5 a 2kv tipo SHD-GC.....	21
Figura 14 Cable multiconductor redondo EPR 5 a 15kv tipo MP-GC. ....	22
Figura 15 Cable multiconductor redondo XLPE/PVC 5 a 15 tipo MP-GC.....	22
Figura 16 Reflector led para ubicaciones peligrosas. ....	25
Figura 17 Led de montaje alto para ubicaciones peligrosas.....	26
Figura 18 Led industrial.....	26
Figura 19 Baliza led. ....	27
Figura 20 Ilustración conceptual del modelo VLC.....	30
Figura 21 Combinación de luz (roja, verde y azul) led para formar luz blanca. ....	31
Figura 22 Muestra como la luz azul podría ser extraída mediando filtro óptico.....	32
Figura 23 Muestra el enlace de comunicación proporcionado por la luz blanca. ....	33

Figura 24 Espectro y modulación emitidos por la luz blanca. ....	34
Figura 25 Ley inversa de los cosenos. ....	37
Figura 26 Ley del coseno .....	38
Figura 27 Parámetros que intervienen en la iluminación. ....	39
Figura 28 Iluminación VLEDs .....	41
Figura 29 (a) Matriz de LED y distribución de iluminación.(b) un transmisor y (c) cuatro transmisores. ....	43
Figura 30 Predicción grafica de la cobertura para la comunicación a 3dB. ....	44
Figura 31 ..... Variación de la potencia recibida (mínimo a 3dB para obtener comunicación) .....	45
Figura 32 Interior de un Sistema Celular VLC. ....	46
Figura 33 Representación de una célula en el eje de coordenadas. ....	47
Figura 34 Parámetros para la correcta comunicación vía LED. ....	49
Figura 35 Esquema de cobertura celular en una galería de mina. ....	52
Figura 36 Esquema del funcionamiento del programa principal. ....	57
Figura 37 Pantalla principal del programa LabVIEW. ....	58
Figura 38 Panel frontal del programa labVIEW. ....	59
Figura 39 6 SubVI. ....	59
Figura 40 Creador de figuras en 3D. ....	60
Figura 41 Creador de objetos en 3D. ....	60
Figura 42 Arreglo en labVIEW para realizar figuras en 3D. ....	61
Figura 43 Agrega objetos a una gráfica. ....	61
Figura 44 Traslación de gráficos en coordenadas. ....	62
Figura 45 Agrega diferentes tipos de objetos en labview. ....	62
Figura 46 Cambia la tonalidad (transparencia) de objetos. ....	62
Figura 47 Diagrama para dibujar una mina en 3D. ....	63
Figura 48 Programación en VrmlPad para graficar los hexágonos. ....	64

Figura 49 Grafica principal del modelado de la mina en 3D. ....	64
Figura 50 Parámetros de entrada para poder graficar una mina con su respectiva iluminación. ....	65
Figura 51 Esquema de los parámetros principales de entrada y salida. ....	66
Figura 52 Parámetros que determinan las coordenadas para la colocación de las lámparas en la mina. ....	66
Figura 53 SubVI para el modelado en 3D dependiente de los parámetros de entrada. ....	67
Figura 54 Visualización de una mina con sus respectivas lámparas en 3D. ....	67
Figura 55 Distribución de los leds. ....	68
Figura 56 Medición de luxes del led de color blanco con el luxómetro a 10cm. ....	69
Figura 57 Medición de luxes del led de color rojo con el luxómetro a 10cm. ....	69
Figura 58 Medición de luxes del led azul con el luxómetro a 10cm. ....	70
Figura 59 Medición de luxes del led verde con el luxómetro a 10cm. ....	70
Figura 60 Resultados a partir de los parámetros de entrada. ....	71
Figura 61 Medición del Radio de cobertura. ....	71
Figura 62 Panel frontal en labVIEW del modelado matemático en 3D. ....	72
Figura 63 Prototipo a escala de iluminación en una mina subterránea. ....	73
Figura 64 Vista de la iluminación lateral a escala de una mina. ....	73
Figura 65 Maqueta desde una perspectiva cónica ....	74
Figura 66 Divergencia de la luz. ....	76
Figura 67 Cambio del ángulo de visión con el difusor. ....	77

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de minerales que se pueden encontrar en una mina .....	11
Tabla 2: niveles mínimos de iluminación dentro de una mina .....	15
Tabla 3: Carga máxima permanente en amperios para cables de interior de minas	23
Tabla 4: Comparación de la tecnología de comunicación VLC, IR y R.....	29
Tabla 5: Ubicación de los hexanos en la primera fila.....	53
Tabla 6: Ubicación de los hexanos en la segunda fila .....	54
Tabla 7: Ubicación de los hexanos en la tercera fila .....	55
Tabla 8: Ubicación de los hexanos en la cuarta fila .....	56

Abril Orellana Byron Javier  
Maute Matute Xavier Lautaro  
Trabajo de Graduación  
Ing. Daniel Iturralde Piedra MsC.  
Abril 2015.

## **ANÁLISIS DEL ÁREA DE COBERTURA PARA LA TECNOLOGÍA DE COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE DENTRO DE LOS TÚNELES MINEROS.**

### **INTRODUCCIÓN**

El Ecuador, la minería se ve como un gran potencial; más aun viendo la actividad económica que maneja esta, las principales minas son de oro, plata, cobre que se extraen en varias zonas de nuestro país. Las condiciones que se suele desarrollar el trabajo en la minería hace que los riesgos habituales se vean incrementados considerablemente, por tal motivo es de gran importancia el estudio de minas, en especial de túneles mineros puesto que, dentro de estos se tiene inconvenientes con la iluminación, comunicación y para esto se tiene que adecuar de la mejor manera el ambiente de trabajo y sobre todo la seguridad de quienes trabajan dentro de ello.

El presente trabajo de grado tiene como objetivo realizar un estudio de iluminación para alcanzar la máxima optimización lumínica, mejorando así el ambiente de trabajo. Gracias a nuevas tecnologías LED se realiza el análisis de comunicaciones por luz visible, obteniendo la iluminación correcta para lograr una comunicación bajo este sistema. Por último, se desarrollara una simulación en tres dimensiones de un tune minero asignando automáticamente la ubicación de cada lámpara y la zona de cobertura de cada una, cumpliendo siempre las normativas para lograr una comunicación por luz visible.

## CAPÍTULO 1

### GENERALIDADES

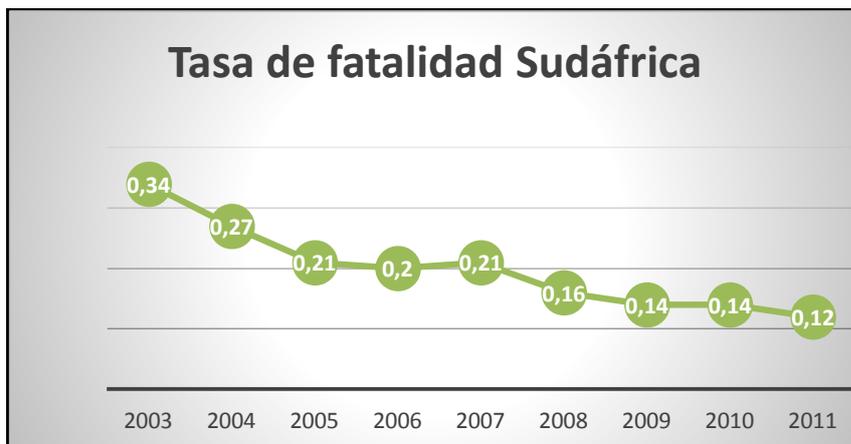
#### 1.1 Motivación de la investigación:

Lamentablemente la estadística relevante al tema de los accidentes en minería es genérica y dispersa, es por eso que para cuantificar el problema, el presente trabajo se centra en los casos de accidentes fatales de tres de los grandes países que basan su economía en el área minera:

**Sudáfrica:** La minería en Sudáfrica ha sido la principal causa por la cual este país se encuentra dentro de las grandes economías mundiales, es el mayor productor de platino del mundo, el quinto de oro y carbón; y uno de los mayores exportadores de diamantes. El Departamento encargado de los Recursos Minerales en Sudáfrica mostró datos desde el año 2003 hasta el año 2011 que corresponden a la tasa de fatalidad en accidentes producidos en la industria minera.

En la figura 1 se puede observar la tasa de fatalidad correspondiente a Sudáfrica desde el año 2003 al 2011. (Total accident, fatality and injury rates per million hours worked, 2011)

Figura 1 Tasa de fatalidad en minería Sudáfrica.



Fuente: Autores

**China:** A causa de su diversidad geográfica, China posee una gran variedad de recursos minerales; se cree que las reservas de carbón llegan hasta los 11 trillones de toneladas. En un análisis de datos sobre accidentes de minas de carbón en China desde el 2001 al 2008, se observa que la tasa de fatalidad ha disminuido de 3.18 en el 2001 a 0.84 en el 2008. (Análisis of national coal-mining accident data in china, 2011)

En la figura 2 se visualiza la tasa de fatalidad correspondiente a China desde el año 2001 al año 2008.

Figura 2 Tasa de fatalidad en minería China.



Fuente: Autores

**Chile:** La minería es el motor económico de Chile, el principal producto comercial es el cobre, Chile es el mayor productor del mundo, satisfaciendo al 36% del mercado mundial y contando con el 28% de las reservas mundiales de cobre. El gobierno de Chile por intermedio del Servicio Nacional de Geología y Minería, muestra en su estadística la tasa de fatalidad en la industria minera. (antecedentes históricos: tasa de fatalidad de accidentes mineros, 2013)

La figura 3 indica la tasa de fatalidad correspondiente a Chile desde el año 2000 al año 2012 en la industria minera.

Figura 3 Tasa de fatalidad en minería Chile



Fuente: Autores

Ecuador cuenta con 1138 concesiones mineras distribuidas en todo el territorio nacional, según lo informó la Dirección Técnica Minera de la Dirección General de Minería, del Ministerio de Energía y Minas. En Ecuador, la estadística de muertes de mineros debido a desastres y accidentes en las minas, producto de explosiones, derrumbamientos, deslaves, etc., ocasionaron la muerte de 66 trabajadores en 2010; 48 fallecieron en 2011, 35 víctimas en 2012, y 11 en el 2013. (MINAS, 2007)

En el año 2009 el ingreso económico receiptado por la Dirección Nacional de Minería del Ecuador fue de aproximadamente 6 millones de dólares, dando gran importancia a la actividad minera del Ecuador. La minería en el Ecuador se puede considerar como fuente principal de ingreso llegando a pensar que en un futuro podría reemplazar al petróleo. (SACHER & ACOSTA, 2012)

## 1.2 Problemática:

Debido a los bajos niveles de seguridad, los gobiernos de todos y cada uno de los países reportan cada vez políticas más estrictas en relación a la seguridad en el trabajo. Es importante gestionar y organizar los aspectos básicos, exigidos por la normativa legal vigente a las empresas de hoy en día, sobre todo en materia de seguridad. Por tanto, es esencial que las empresas se esfuercen en mejorar las condiciones de seguridad, mediante el uso de tecnología.

Uno de los puntos críticos y de gran análisis es la iluminación dentro de la industria minera, es necesario trabajar bajo normativas vigentes y cumplir con estándares de seguridad, ya que el riesgo de accidentes laborales es muy alto y las inversiones para la iluminación son altas, buscando de esta manera un mejor ambiente de trabajo.

Hoy en día la industria minera a nivel mundial no cuenta con estudios innovadores de comunicación, en la actualidad se están desarrollando nuevas tecnologías de comunicación inalámbrica, una de las cuales está basada en las comunicaciones por luz visible, se puede aprovechar esta nueva alternativa, para además de tener una correcta iluminación dentro de una mina se pueda lograr comunicación con las personas que se encuentren dentro, esta tarea de comunicación para cualquier otro tipo de tecnología de la actualidad se ha vuelto muy difícil de lograr, generando así un problema de falta de comunicación de los trabajadores con lugares externos a la mina. (ILUMINACION EN OPERACIONES MINERAS EXIGE SEGURIDAD, 2012)

### **1.3 Pregunta de la investigación**

¿Se puede desarrollar un modelo matemático para la optimización de la iluminación LED (Diodo Emisor d Luz) y del área de cobertura para la tecnología de comunicación por luz visible dentro de los túneles mineros?

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo General**

Generar un modelo matemático para la optimización de la iluminación LED y del área de cobertura para la tecnología de comunicación por luz visible dentro de los túneles mineros.

### **1.4.2 Objetivos específicos:**

- Analizar los tipos de luminarias LED a utilizar en minas.
- Desarrollar un modelo matemático para la optimización de la iluminación LED y cobertura de la tecnología de comunicación por luz visible para la industria minera.

- Simular el modelo matemático.
- Montar y probar el modelo matemático de luminotecnia en una maqueta, similar a una mina utilizando entre dos o tres lámparas led.

## **1.5 Metodología**

Para realizar el estudio de luminotecnia se realizara una investigación analítica y comparativa de los tipos de LED que se tiene en el mercado puesto que al tener una gran variedad de estos se deberá seleccionar los que puedan trabajar bajos las condiciones de una mina, punto vital de la investigación pues este sería el elemento más importante. Se realizara investigación en internet, libros, papers o datasheets para conocer tipos, modelos y valores con los que trabajan.

En cuanto a la minería se trabajara en una investigación en internet, libros para conocer las dimensiones estándares de estas, además de temperatura, humedad, iluminación para llegar a conseguir un modelado matemático óptimo.

## **CAPÍTULO 2**

### **ESTADO DEL ARTE**

#### **2.1 Tipos de minas.**

La explotación de una mina se realiza a través de dos métodos: subterránea y a cielo abierto.

##### **2.1.1 Minería subterránea:**

Su principal característica es que se puede extraer el mineral por debajo de la superficie, ya sea a través de socavones o galerías.

Este método sirve ya sea para extraer la concentración del mineral alta o baja, normalmente se utiliza la alta cuando el mineral se encuentra a gran profundidad o es muy valioso el mineral; en cambio en la baja pueden ser explotados cuando son lo suficientemente grandes, es decir si hay una montaña y hay miles de metros de roca estéril, se podrá hacer una galería en la parte interna de la montaña y extraer el mineral por block – caving, es decir se requiere una mínima perforación, produciendo así el colapso controlado del yacimiento que luego será reemplazado por pilares ya sean artificiales o naturales que soportara la roca estéril. Un ejemplo muy claro es la mina el teniente situado en Chile como se puede observar en la figura 4.

*Figura 4 Galería subterránea de la mina el teniente (Chile).*



Fuente: Emol, economía. <http://www.emol.com>. [Consulta: 06 de diciembre de 2014].

La ventaja de la minería subterránea es que al momento de la explotación, la misma mueve menor cantidad de mineral y de roca estéril y no afecta visualmente el área así como es en el caso de la explotación a cielo abierto.

La desventaja de la minería subterránea solo se aplica cuando la concentración de minerales es muy rica e incluso son más peligrosos para los operarios ya que los derrumbes suelen cobrar víctimas. Siendo otra desventaja el Mantener niveles adecuados de ventilación ya que el polvo que se produce en las explosiones queda retenido en las galerías si no se los extrae. (AMSTRONG & RAJI)

### **2.1.2 Minería a cielo abierto**

La característica principal es que al realizar la explotación solo se hace cuando el yacimiento es de gran volumen y tiene una concentración baja de minerales. Dentro de la minería a cielo abierto se encontró dos tipos de minería, que corresponde a los minerales no metalíferos y rocas de aplicación, que solo son explotados a cielo abierto, ya que el poco valor de la roca no soporta una explotación subterránea.

La ventaja en la minería a cielo abierto es que permite explotar en yacimientos de baja concentración de minerales y la cantidad de accidentes en los operarios es menor que en las minas subterráneas. La desventaja es que cuando se realiza una explotación llega a contaminar el campo visual, como se ve en la figura 5 y produce mucho material estéril de desecho, originando partículas suspendidas en el ambiente. (AMSTRONG & RAJI)

Figura 5 Mina de cobre y oro a cielo abierto “la alumbreira” (Argentina)



Fuente: TV grafías. <http://www.tvgrafias.com>. [Consulta: 06 de diciembre de 2014].

### **2.1.3 Tipos de minerales dentro de una mina**

En la tabla 1 se puede apreciar los tipos de materiales que se pueden extraer en la minería. (LOS MINERALES Y SUS PROPIEDADES, 2012)

Tabla 1 Tipos de minerales que se pueden encontrar en una mina.

Clases	¿Qué es?	Composición Química	Ejemplos
<b>Elementos nativos</b>	Formados por un solo elemento químico.	Au, Ag, Pt, S o C	Oro, plata, platino, azufre, diamante y el grafito.
<b>Haluros o sales</b>	Posee cloro, yodo, o flúor.	Cl, I o F	Halita, silvina y fluorita.
<b>Óxidos</b>	Se combinan metales con oxígeno.	O	Magnetita y hematites.
<b>Sulfuros</b>	Compuestos de azufre con algún metal.	S	Pirita (hierro), galena o el cinabrio.
<b>Carbonatos</b>	Contiene carbonato y oxígeno.	C y O	Calcita y dolomita.
<b>Sulfatos</b>	Tiene azufre y oxígeno.	S y O	Yeso, baritina y anhidrita.
<b>Fosfatos</b>	Tiene fósforo y oxígeno.	P y O	-
<b>Silicatos</b>	Silicio y oxígeno	Si y O	-

## 2.2 Condiciones de las minas subterráneas

### 2.2.1 Estudio de temperatura

Al realizar el estudio de temperatura de una mina se hablara también de ventilación de la misma, ya que las dos están ligadas directamente, es decir a mayor temperatura mayor ventilación y viceversa.

Se deberá tener en cuenta que la temperatura del suelo aumenta con la profundidad, esta elevación corresponderá a una elevación de temperatura de 1 °C (grado geométrico). El valor inverso del grado geométrico se denomina gradiente geotérmico. En minas profundas las causas vitales para el aumento de temperatura son:

- La compresión adiabática del aire en el pozo de entrada.
- El calor del terreno.
- El calor causado por las distintas formas de oxidación.
- Temperatura del aire en la superficie.

- Intensidad de la ventilación.

Formas de medir Temperatura en el interior de las Minas:

- Termómetros ordinarios: De vidrio, basados en la dilatación de mercurio o líquido coloreado.
- Pares Termo-Eléctricos: Se basan en la propiedad que poseen dos metales distintos que al calentarse causan una fuerza electromotriz.
- De Resistencia Variable: Estos poseen una temperatura positiva y negativa (Fabricado con sustancias semiconductoras cuya resistencia se modifica en función de la Temperatura absoluta).

La persona que labora dentro de una mina, emite un flujo de calor, que es necesaria para el equilibrio fisiológico de la misma. Los cambios térmicos del cuerpo del ser humano con el medio se generan por radiación, convección y evaporación.

Para el estudio de temperatura en una mina se deberá tomar en cuenta puntos estratégicos de la mina en las que se hará constantes seguimientos. La temperatura será medida a través de un psicómetro.

Se considerará:

- Temperatura de bulbo seco (Tbs): Es la temperatura del aire húmedo, esta se tomara a través de un Tbs envuelto en algodón húmedo bajo una corriente de aire.
- Temperatura efectiva (Te): Nos permite medir el nivel de bienestar de la persona que se encuentra laborando en un ambiente fijo.

Flujo de calor emitido

Entre mayor sea la temperatura efectiva menor será el flujo de calor que el obrero pueda disparar en cualquier sitio de trabajo; el flujo de calor del adulto en inmovilidad es de un promedio de 100 militermios por hora.

El rendimiento del motor humano se considera bajo con una emisión de 450 militermios por hora, la que corresponde a una labor pesado del orden de 8,500 kilográmetros. El aumento de la temperatura implica una reducción de la productividad del obrero, más aun si es una labor pesada, reduciendo así las

facultades generales y peligrando su propia seguridad. (CORDOBA & MOLINA, 2011)

### **2.2.2 Estudio de humedad**

La mayoría de los casos las labores mineras se realizan en condiciones de temperatura y humedad alta generando fatiga y desgaste físico en el obrero.

Es por ello que se ha visto la necesidad de incorporar un sistema de ventilación en las mineras subterráneas, con el fin de evitar humedad, diluir, remover los gases y el polvo, enfriar ciertas cosas y sobre todo proporcionar aire para las personas que trabajan dentro de una mina. En la naturaleza, la energía más barata que se utiliza es el aire natural para ventilar las minas subterráneas. Este aire es introducido por la bocamina recorriendo todo el circuito de ventilación (ductos), la misma que tendrá que salir por la bocamina de salida. (ANDRADE GALLARDO, 2008)

Deberá existir una diferencia de alturas entre las bocaminas de entrada y salida para que funcione este tipo de ventilación. Para que exista una adecuada ventilación se tendrá que determinar el diámetro del caudal para poder satisfacer las necesidades del personal y de los equipos para laborar en condiciones óptimas dentro de la mina.

Se sabe que el aire que pasa por una mina sufre cambios en su composición, más aún si la mina presenta profundidades mayores a los mil metros, se deberá tener en cuenta:

- El número de personas.
- Desprendimiento de gases de la mina.
- Temperatura.
- Producción.
- Consumo de explosivos.
- Equipos de diésel.

Ley de Atkinson, se utiliza cuando el flujo de aire fluye en la galería o ductos de la mina requiriendo de cierta presión para mover el aire, tamaño, forma y longitud del ducto, densidad y velocidad del aire. Todos estos parámetros se deducen en la siguiente ecuación:

$$P = K * C * L * V^2 / A \quad (\text{ec. 2.1})$$

Donde P es la pérdida de presión (pascales).

K = factor de fricción. ( $\text{N s}^2 / \text{m}^4$ )

C = perímetro (metros).

L = longitud (metros).

V = velocidad (m/sg).

A = área (metro al cuadrado).

### 2.2.3 Estudio de condiciones de trabajo.

Los aspectos de seguridad varían según el lugar y el tipo de trabajo que vayan a realizar en el campamento, este tiene que estar cerca del lugar de trabajo con el objetivo de que se minimice cualquier tipo de desplazamiento de transportes, también deberá estar en un lugar seguro, con fuentes de agua potable ya sea de manera natural o se almacenara en recipientes limpios y con etiqueta. Si el campamento se encuentra en un lugar alto, deberá estar situado en la parte inferior para evitar el malestar físico.

Las minas deberán encontrarse con una adecuada ventilación, para evitar cualquier tipo de derrumbes, caso contrario, se deberá tener una fuente de salida de emergencia con buena señalización de seguridad, para todo ello la mina deberá contar con una adecuada iluminación con el fin de disminuir los accidentes e incluso daños oculares, ya que la mayoría de las minas tiene una iluminación precaria como se ve en la tabla 2. (DÍAZ, MARCELO RAÚL, 2009)

*Tabla 2 Niveles mínimos de iluminación dentro de una mina.*

<b>Zona o parte del lugar de trabajo (*)</b>	<b>Nivel mínimo de iluminación (LUX)</b>
<b>Zonas donde se ejecutan tareas con:</b>	
<b>Bajas exigencias visuales</b>	100
<b>Exigencias visuales moderadas</b>	200
<b>Exigencias visuales altas</b>	500
<b>Áreas o locales de uso ocasional</b>	50
<b>Áreas o locales de uso habitual</b>	100
<b>Vías de circulación de uso ocasional</b>	25
<b>Vías de circulación de uso habitual</b>	50

Los campamentos deberán estar a una distancia adecuada para evitar algún tipo de emergencia como por ejemplo el incendio, es por eso que es necesario tener un equipo contra incendios y salidas de emergencia o evacuación. Cada objeto que se encuentre dentro del campamento deberá tener una etiqueta propia en cada objeto y que se encuentren en adecuadas condiciones.

También es importante establecer una comunicación segura y poseer información acerca de los equipos que se encuentran dentro del campamento, en la prevención y realización de simulacros contra incendios o combustibles.

Respecto al equipo, al transporte, a los explosivos, deberán ir de acuerdo a las medidas preventivas, es decir que se deberán tomar medidas preventivas de acuerdo al tipo de equipo que vaya a utilizar o manipular, ya que cada uno de ellos necesita ropa específica, manejo de un personal autorizado y una protección personal adecuada. (DÍAZ, MARCELO RAÚL, 2009)

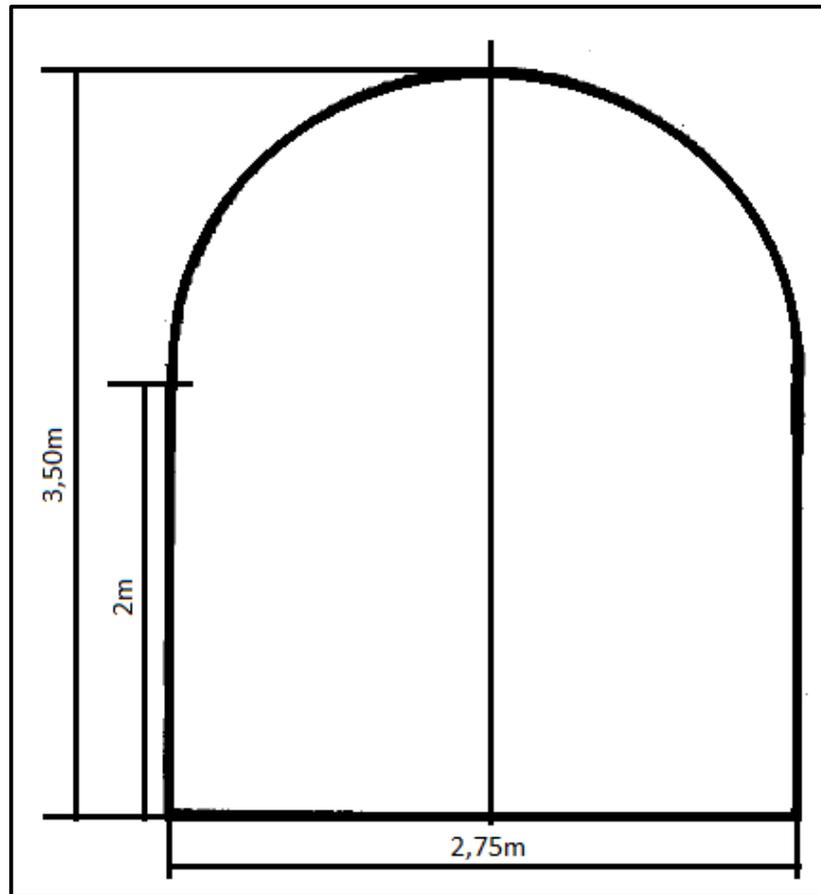
#### **2.2.4 Dimensiones de una mina**

Las galerías pueden dividirse según su tamaño en 3 tipos:

**Pequeñas:** sus dimensiones no sobrepasan los 9 metros cuadrados de sección, a pesar de ser pequeñas sus medidas de ancho y alto no deben ser inferiores a 2 metros y 2,5 metros respectivamente; ya que se haría difícil la circulación de los equipos

mecánicos y de las personas. En la figura 6 se puede apreciar el área de la galería. (DISEÑO DE EXPLOTACIONES E INFRAESTRUCTURAS MINERAS SUBTERRANEAS, 2007)

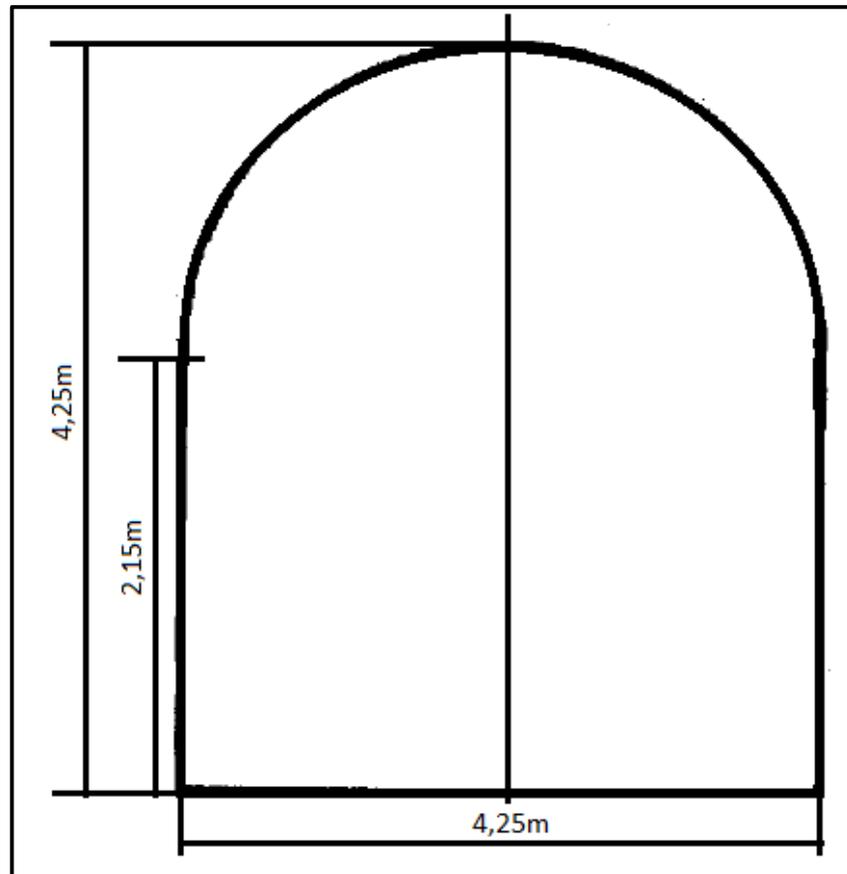
Figura 6 Esquema para galerías de pequeña sección:  $8,40 \text{ m}^2$



Fuente: biblioteca digital de la universidad politécnica de Madrid <http://oa.upm.es>  
[Consulta: 14 de diciembre de 2014].

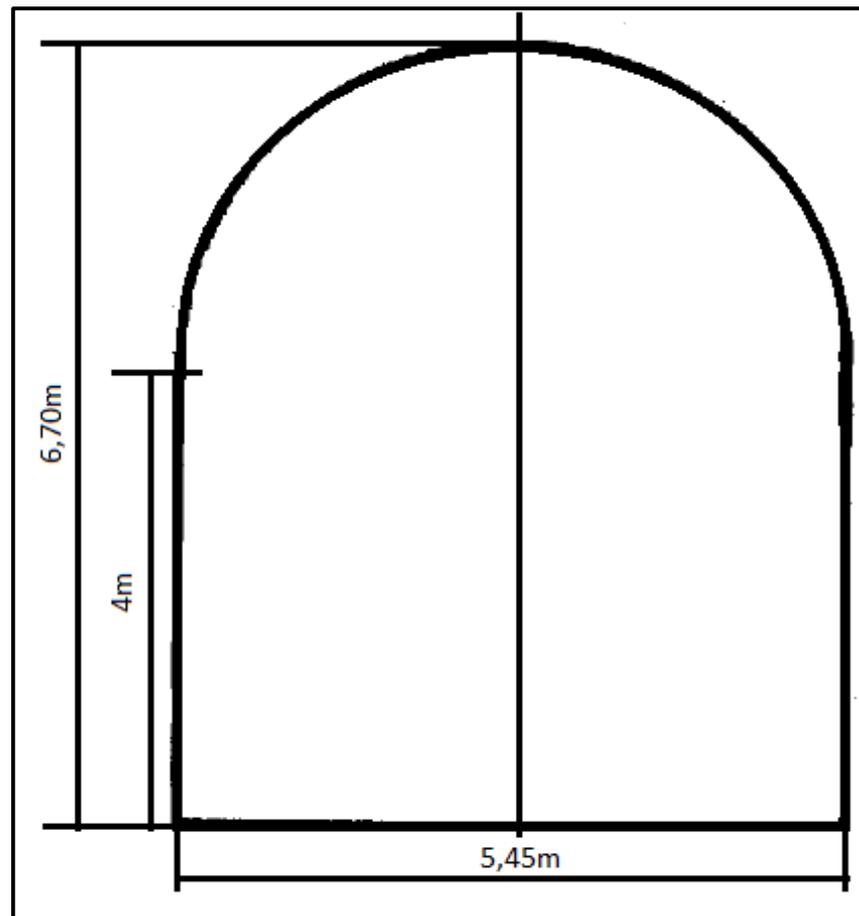
**Medianas:** sus dimensiones están entre los 9 y 24 metros cuadrados de sección. Son las que más se utilizan, el área de dicha galería se puede observar en la figura 7; pues cubren todas las necesidades de una mina en su interior. (DISEÑO DE EXPLOTACIONES E INFRAESTRUCTURAS MINERAS SUBTERRANEAS, 2007)

Figura 7 Esquema para galerías de sección media:  $16,06 \text{ m}^2$



Fuente: biblioteca digital de la universidad politécnica de Madrid <http://oa.upm.es>  
[Consulta: 14 de diciembre de 2014].

**Grandes:** van desde los 24 hasta los 40 metros cuadrados de sección. Normalmente estas galerías son utilizadas cuando se tiene transporte alto, por ejemplo camiones con neumáticos bien grandes. Véase el área de la galería en la figura 8. (DISEÑO DE EXPLOTACIONES E INFRAESTRUCTURAS MINERAS SUBTERRANEAS, 2007)

Figura 8 Esquema para galerías de sección grande:  $33,25 \text{ m}^2$ 

Fuente: biblioteca digital de la universidad politécnica de Madrid <http://oa.upm.es>  
 [Consulta: 14 de diciembre de 2014].

## 2.3 Tipos de cable.

### 2.3.1 Conexiones eléctricas

Los cables instalados en las galerías deberán ser colocados en ganchos metálicos o soportes de madera situados sucesivamente con el fin de evitar que estos se cuelguen. Evitar en su mayoría tuberías metálicas de aire comprimido, de no ser así se deberá colocar a tierra cada 250 metros con alambre de cobre o hierro galvanizado, y su resistencia no deberá pasar de los 10 ohmios. (LASZLO)

Cuando existen empalmes se debe asegurar la continuidad eléctrica de las envolventes.

- **Alumbrado en general:** las lámparas de alumbrado fijo deberán tener una protección (envoltura) resistente de vidrio. Si esta envoltura no es resistente se deberá colocar una armadura para proteger. Estas lámparas deberán ser resistentes al agua y polvo. Si se tratase de una mina de carbón se recomienda tener un sistema de cierre con llave
- **Intensidad luminosa:** Todas las lámparas deberán tener una intensidad luminosa con el fin de que evite la fatiga ocular. (CABLES PARA MINERIA, 2015)

A continuación se detallan los diferentes tipos de cable:

- **Cable monopolar 2kV tipo W:** Son utilizados para sostener equipos de transporte (figura 9), en la que el cable es sometido a varias presiones, flexiones y fricciones.

Figura 9 Cable Monopolar 2kv tipo W.



Fuente: CENTELSA. <http://www.centelsa.com.co>. [Consulta: 12 de noviembre de 2014].

- **Cable multiconductor redondo 2kV:** Tienen la misma función que el Cable monopolar 2kV tipo W con la diferencia que es idóneo para instalaciones móviles en las que no se necesitan un conductor de monitoreo de tierra o un conductor neutro. (figura 10).

Figura 10 Cable multiconductor redondo 2kv.



Fuente: CENTELSA. <http://www.centelsa.com.co>. [Consulta: 12 de noviembre de 2014].

- **Cable multiconductor redondo 2kV tipo G – GC:** Son utilizados para sostener equipos de transporte, en la que el cable es sometido a varias presiones, flexiones y fricciones (figura 11). Se diferencia del Cable multiconductor redondo 2kV ya que este cable es apto para las instalaciones en las que se necesitan un conductor de monitoreo de tierra y un conductor neutro.

Figura 11 Cable multicolor redondo 2kV tipo G-GC.



Fuente: CENTELSA. <http://www.centelsa.com.co>. [Consulta: 12 de noviembre de 2014].

- **Cable multiconductor redondo 2kV tipo SHD – GC:** Son utilizados para suministrar energía eléctrica a subestaciones y equipos portátiles como palas mecánicas, dragas, equipos de perforación, etc. (figura 12), con sistemas que posean una corriente alterna de 2Kv en el que se requiera una pantalla electrostática.

Figura 12 Cable multiconductor redondo 2kv tipo SHD-GD.



Fuente: CENTELSA. <http://www.centelsa.com.co>. [Consulta: 12 de noviembre de 2014].

- **Cable multiconductor redondo 5 a 2kV tipo SHD – GC:** Tiene la misma utilidad que el Cable multiconductor redondo 2kV tipo SHD-GC con la única diferencia que se utiliza un sistema de corriente alterna de 5 a 25Kv (figura 13) en donde se necesita una pantalla electrostática.

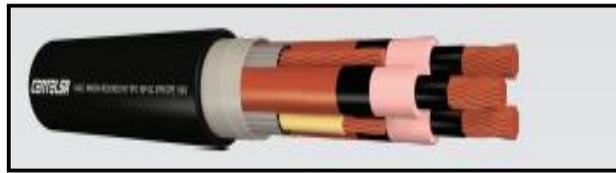
Figura 13 Cable multiconductor redondo 5 a 2kv tipo SHD-GC



Fuente: CENTELSA. <http://www.centelsa.com.co>. [Consulta: 12 de noviembre de 2014].

- **Cable multiconductor redondo EPR 5 a 15kV tipo MP – GC:** Son utilizados para suministrar energía eléctrica a equipos semiportátiles de minas o para las instalaciones determinadas dentro de una mina (figura 14). Estos cables son usados en trechos horizontales, en ductos y también para las instalaciones en la industria pesada.

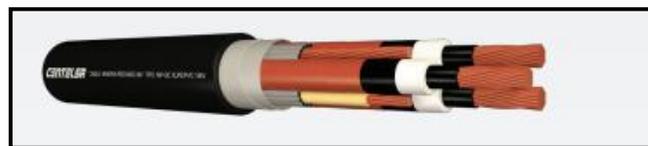
Figura 14 Cable multiconductor redondo EPR 5 a 15kv tipo MP-GC.



Fuente: CENTELSA. <http://www.centelsa.com.co>. [Consulta: 12 de noviembre de 2014].

- **Cable multiconductor redondo XLPE/PVC 5 a 15 tipo MP – GC:** Tiene la misma finalidad que el Cable multiconductor redondo EPR 5 a 15kV tipo MP – GC. (CABLES PARA MINERIA, 2015)

Figura 15 Cable multiconductor redondo XLPE/PVC 5 a 15 tipo MP-GC.



Fuente: CENTELSA. <http://www.centelsa.com.co>. [Consulta: 12 de noviembre de 2014].

### 2.3.2 Normas de seguridad

En todo tipo de instalación que se realiza dentro de una mina los cables pasan por una serie de condiciones adversas ya sea dentro de la mina así como también de agentes externos, ambos casos dependerán de la durabilidad y el tiempo de vida útil de los mismos. Todas las instalaciones deberán ser protegidas de cualquier elevación de la tensión, se recomienda utilizar limitadores de tensión y relés.

Deberán existir las protecciones adecuadas con el fin de que si existe algún problema eléctrico se pueda cortar toda la corriente de la mina. En las instalaciones eléctricas destinadas a máquinas y aparatos eléctricos deberá existir protección contra cortocircuitos y exceso de carga, al igual que en cada punto de derivación. En el interior de una mina se debe considerar los siguientes aspectos:

- Nunca deben juntarse los conductores eléctricos.
- Debe existir la adecuada señalización cuando existan cables eléctricos para evitar peligros cuando existen trabajos de excavación.
- Los trabajos eléctricos y de mantenimiento son exclusivamente responsabilidad de los electricistas.

Cables eléctricos

No debe existir en ninguna parte de la mina cables eléctricos sin su debido recubrimiento. Los cables pueden ser según el lugar de emplazamiento:

- Cables armados para galerías y pozos con pendientes superiores a 45°.
- Cables armados para galerías horizontales con pendientes inferiores a 45°.
- Cables para máquinas, herramientas y alumbrado de galerías.

La carga máxima permitida en los cables deberá calcularse con el fin de que no exceda los 70°. Cuando hay una temperatura ambiente de 30°, se debe tomar en cuenta la tabla 3 en donde se ve la carga admisible. (NORMAS SOBRE CABLES E INSTALACIONES ELECTRICAS BAJO TIERRA, 2009)

Tabla 3 Carga máxima permanente en amperios para cables de interior de minas.

Sección nominal	Conductores y cables flexibles aislados con goma para tensión	Cables armados con aislante de goma, papel impregnado, Cables semiflexibles de goma, tensión hasta 1000 voltios				Cable de tres conductores armados Cables semiflexibles hasta 6kV		
		Cable de 1 conductor	Cable de 2 conductores	Cable de 3 conductores	Cable de 4 conductores	Tensión hasta 3kV	Tensión hasta 6kV	Tensión hasta 10kV
2,5	27	38	30	27	23	-	-	-
4	35	50	40	35	30	-	-	-
6	48	65	50	40	40	45	-	-
10	66	85	70	60	50	60	55	50
16	90	115	90	85	70	80	75	65
25	110	150	115	100	95	100	100	85
35	145	190	140	125	110	125	120	100
50	175	235	175	150	140	150	145	125
70	215	285	210	185	170	185	175	150
95	260	345	250	220	200	220	2120	180
120	305	400	285	255	225	250	245	210
150	350	460	325	300	265	285	280	240
185	400	515	370	340	300	325	315	270

Dentro de las normas de seguridad hay que tener en cuenta los siguientes:

- El fuego, se deberá realizar primero un estudio minucioso y la aplicación de una serie de medidas que se deberán observar en el proyecto que se va a ejecutar, con el fin de evitar un incendio y que facilite la extinción del mismo si llegase a producirse.

Para ello los cables deberán ir situados a una distancia normativizada de los conductos de gas y elegir aquellos que impedirán la creación del incendio.

Segundo se realizara un estudio sobre el humo, que aparece por la combustión de materiales que han sido sometidos a la acción del fuego, para ello los cables deberán ser de un material que no sean propagadores de incendio, para así evitar la emisión de gases tóxicos y corrosivos debido a la combustión de los halogenuros contenidos en los revestimientos de los cables.

- La conductibilidad dependerá del material con la que está hecho el cable y la distancia que tiene que recorrer hasta llegar al punto de su consumo, debido a que esta transporta la energía.
- La resistencia debido a que esta nos suministra información con relación a la oposición que genera el conductor al paso de la corriente por medio del mismo.
- El aislamiento eléctrico ya que este localiza las fallas en el aislamiento del conducto principal o ya sea por su duración, es por ello que es recomendable realizar pruebas constantemente con el fin de evitar fallas. Estos cables deberán ser armados para proteger contra cualquier daño mecánico.
- Las revisiones periódicas, ya que los cables deben ser sometidos a un programa puesto que el cable puede estar en contacto con diversos elementos ya sea internos o externos.
- El voltaje, se debe considerar peligroso cuando es superior a 50V y el suministro a las instalaciones deberá permanecer con una tensión sobre los 220 V que se lo

realizara mediante cables armados. (NORMAS SOBRE CABLES E INSTALACIONES ELECTRICAS BAJO TIERRA, 2009)

## 2.4 Tipos de led

Un LED (palabra inglesa LED: Ligth-Emitting Diode. "Diodo emisor de luz") es un diodo semiconductor que emite luz, ideal para utilizarlo en iluminación.

Los tipos de led que se utilizan en una mina dependen de ciertos parámetros o condiciones que se mencionara a continuación: fotometría, uso, el tipo de fuente de luz, las dimensiones y la forma de la mina, etc. En el interior de una mina muchas de las veces se necesita iluminación las 24 horas del día, si interrupción de esta.

Para ello se necesitan luminarias que deben cumplir estándares de calidad, seguridad y rendimiento; es por eso que las luminarias LED son muy optimas debido a su durabilidad (7 años) no necesita de mantenimiento y tiene un amplio rango de caída de tensión sin perder luz.

Se podrá encontrar una variedad de tipos entre los cuales se tiene los siguientes:

- **Reflectores LED para ubicaciones peligrosas:** El tiempo de vida que tiene el LED es alrededor de 60,000 horas, estas lámparas son resistentes para los impactos y las vibraciones que se tiene en el interior de una mina. Véase en la figura 16.

Figura 16 Reflector led para ubicaciones peligrosas.



Fuente:CENTELSA. <http://www.crouse-hindslatam.com> [Consulta: 12 de noviembre de 2014].

- **LED de montaje alto para ubicaciones peligrosas:** Esta luminaria es muy útil debido a su alumbrado que es muy consistente desde lugares muy altos, no solamente sirve para el campo de una mina, sino también para áreas peatonales, plazas, calles, etc. Como se muestra en la figura 17.

Figura 17 Led de montaje alto para ubicaciones peligrosas



Fuente: CENTELSA. <http://www.crouse-hindslatam.com> [Consulta: 12 de noviembre de 2014].

- **LED industrial:** ideal para alta luminosidad (figura 18) en ambientes de trabajos con poca luz natural, característicos por ser de alta potencia (máximo 500W). ideal para minas y naves industriales.

Figura 18 Led industrial



Fuente: CENTELSA. <http://www.crouse-hindslatam.com> [Consulta: 12 de noviembre de 2014].

- **Baliza LED de patrón múltiple de PRFV para ubicaciones peligrosas:** Este led tiene un tiempo de duración de 8 horas permitiendo la variación de la señalización visual y diseñada para que resista a la corrosión que se da

dentro de una mina como se muestra el modelo en la figura 19. (CABLES PARA MINERIA, 2015)

Figura 19 Baliza led.



Fuente: CENTELSA. <http://www.crouse-hinds-latam.com> [Consulta: 12 de noviembre de 2014].

## 2.5 Ubicación de led en minas

Para tener una buena ubicación de los LEDs en las minas es necesario tener en cuenta las luminarias y las fuentes luminosas, para ello se habrá que tener en cuenta la eficacia de la luz, el flujo luminoso, la duración y la vida útil de la fuente dentro de la mina.

Una adecuada ubicación también garantiza la seguridad de las personas que laboran en una mina, llevando ello a una mejor productividad y rendimiento en el trabajo, mejora el confort visual y hace que sea más agradable su labor.

Para tener un mejor alumbrado con los LEDs en las minas se deberá tener en cuenta lo siguiente:

- Tener un conocimiento sobre las actividades que se vayan a realizar dentro de la mina.
- Los requerimientos visuales de cada punto de trabajo y su localización.
- Las circunstancias de las superficies.
- Los recursos de la iluminación natural.
- Un adecuado control y manejo del deslumbramiento.

- Propiedades de las fuentes y luminarias. (REGLAMENTO TECNICO DE ILUMINACION Y ALUMBRADO PUBLICO, 2010)

## 2.6 Comunicaciones por luz visible

En los últimos años se ve un gran avance en la investigación en comunicaciones por luz visible puesto que se vuelve un centro de atención al utilizar LEDs para iluminación y comunicación a la vez, además de presentar ventajas ante otras fuentes de iluminación incandescentes como bajo consumo de energía, mayor velocidad de transmisión, no hay peligro de afección en la salud por la emisión, creando un interés en la creación de aplicaciones como creación de redes domésticas, comunicaciones entre coches, cabina de aviones y en lugares de Europa y Australia tienen enlaces robustos cortos de transmisión con una velocidad aproximada a los 500Mbps.

En 1870 Alexander Graham Bell realizó la primera comunicación por luz visible transmitiendo una señal de audio de una persona en una especie de espejo, en 1880 Bell logró una comunicación a una distancia de 213m usando como medio de transmisión la luz solar, siendo este un inconveniente por la intermitencia que tiene este.

En 1990 se produjo el LED de alto brillo para iluminación en general y desde esta fecha se dispara mejoras sobre este tipo de iluminación desde 0.1 lm/W a 230 lm/W y con una vida útil de hasta 100000 horas. OLED iluminación de estado sólido orgánico es una alternativa de iluminación con baja eficacia luminosa entre 100lm / W con un tiempo de vida corto, sin embargo, puede ser una alternativa para sustituir iluminaciones tradicionales en áreas grandes (incandescente 52 lm /W, Fluorescente 90lm/W. (GHASSEMLOOY, POPOOLA, & RAJBHANDARI, 2013)

Los LEDs blancos tiene una eficacia alrededor de los 260lm/W que si bien no alcanza a los valores teóricos del 425lm/W cada vez se ve incrementos a pasos agigantados, presentando ventajas como:

- Mayor tolerancia a la humedad.
- No contienen mercurio.
- Tamaño pequeño y compacto.

- Tiempo de vida más largo.
- Conversión de energía más alta de 200ml/W en LEDs blancos.
- Menor consumo de energía.
- De cambio rápido.
- Generación de calor mínima.

Temas que están siendo abordados es la creación de dispositivos de bajo costo, alta luminosidad y excelente calidad de color, remplazando ya a las bombillas de hogares debido que cada vez abaratan sus costos. En comparación con la radio frecuencia no sufre interferencia electromagnética y al no está basado en radio frecuencia no representan riesgo alguno para la salud, ideales para hospitales, cabina de aviones, entornos industriales; tiene un gran ancho de banda entre 400THz y 800THz como se ve en la tabla 4. (GHASSEMLOOY, POPOOLA, & RAJBHANDARI, 2013)

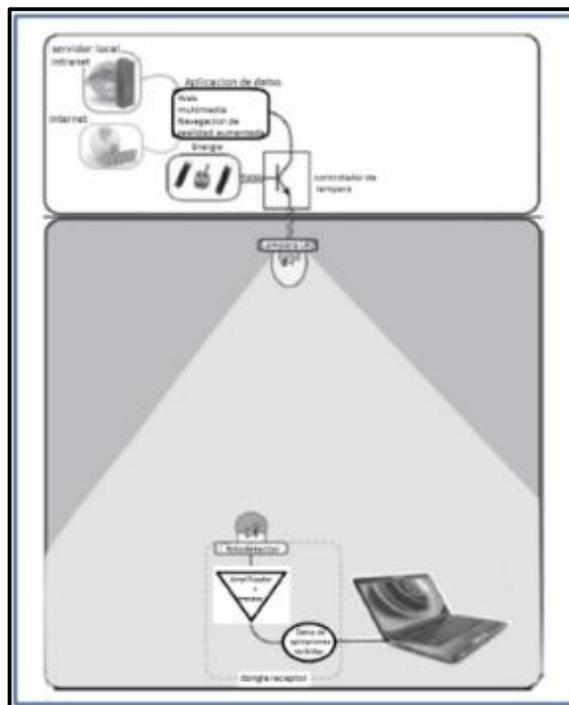
Tabla 4 Comparación de las tecnologías de comunicación VLC, IR y R.

<b>Comparación de VLC, IR y Tecnología de Comunicación RF</b>			
<b>PROPIEDAD</b>	<b>VLC</b>	<b>IRB</b>	<b>RFB</b>
Ancho de banda	Ilimitado, 400-700 nm	Ilimitado, 800-1600 nm	Regulable y Limitado
Electromagnético Interferencia + peligro	No	No	Si
Línea de vista	Si	Si	No
Distancia	Pequeña	Corto a Largo (al aire libre)	Corto a Largo (al aire libre)
Seguridad	Buena	Buena	Pobre
Estándares	En progreso (IEEE 802.15.7 grupo de trabajo)	Bien desarrollado para interiores (IrDa), En progreso para exteriores	Madurado
Servicios	Iluminación + Comunicación	Comunicación	Comunicación
Fuentes de Ruido	La luz del sol + otro ambiente de luces	La luz del sol + otro ambiente de luces	Todos los aparatos eléctricos o electrónicos
Consumo de Energía	Relativamente baja	Relativamente baja	Media
Movilidad	Limitada	Limitada	Buena
Cobertura	Estrecha y ancha	Estrecha y ancha	En su mayoría

## Descripción del Sistema.

Como se ve en la figura 20 el LED necesita un controlador en donde modulando la corriente de conductor a una frecuencia alta se tiene el encendido y apagado del dispositivo imperceptible al ojo humano, para otro tipo de lámparas como incandescentes sería un reto realizar esta acción. El LED tiene tiempo de respuesta tan corto en el orden de nanosegundos. La luz emitida por el LED será de alta frecuencia y de baja corriente.

Figura 20 Ilustración conceptual del modelo VLC



Fuente: GHASSEMLOOY Z, POPOOLA W., RAJBHANDARI S. Optical Wireless Communications. System and Channel Modelling with MATLAB. 6000 Broken Sound Parkway NW. 2013.

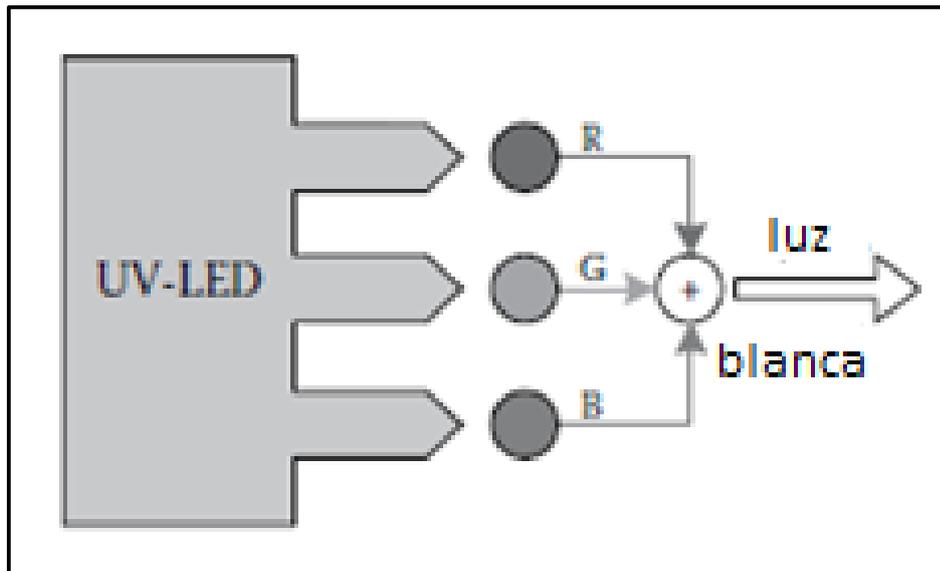
El flujo luminoso emitido del LED es linealmente proporcional al ancho de atenuación de la señal.

Dependiendo de la aplicación se puede utilizar transmisores LED o laser semiconductor, siempre y cuando se tenga como requisito principal de iluminación de luxes entre 200 y 1000 en un entorno cerrado.

Existen dos tipos de led:

**LED blanco:** Usando rojo (625nm), verde (525nm) y azul (470nm) se emplean para generar luz blanca como se muestra en la figura 21, son tres tipos de emisores y se usan en donde se quiere variedad en color, división de longitud de onda multiplexada.

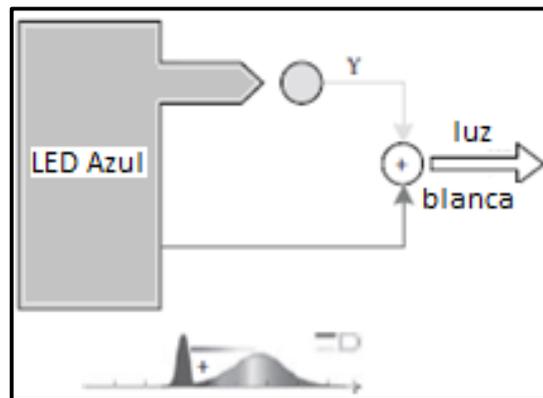
Figura 21 Combinación de luz (roja, verde y azul) led para formar luz blanca.



Fuente: GHASSEMLOOY Z, POPOOLA W., RAJBHANDARI S. Optical Wireless Communications. System and Channel Modelling with MATLAB. 6000 Broken Sound Parkway NW. 2013.

**LED de un solo color:** Consiste en un LED azul recubierto de una capa de fósforo que emite una luz amarilla, esta última absorbe una porción de longitud de onda de la luz azul, dando una longitud de onda de la luz amarilla más grande dando una tonalidad rojiza mezclándose con la no absorbida del color azul mostrando un nuevo color blanco, el fósforo da una lenta respuesta limitando el ancho de banda como se puede apreciar en la figura 22.

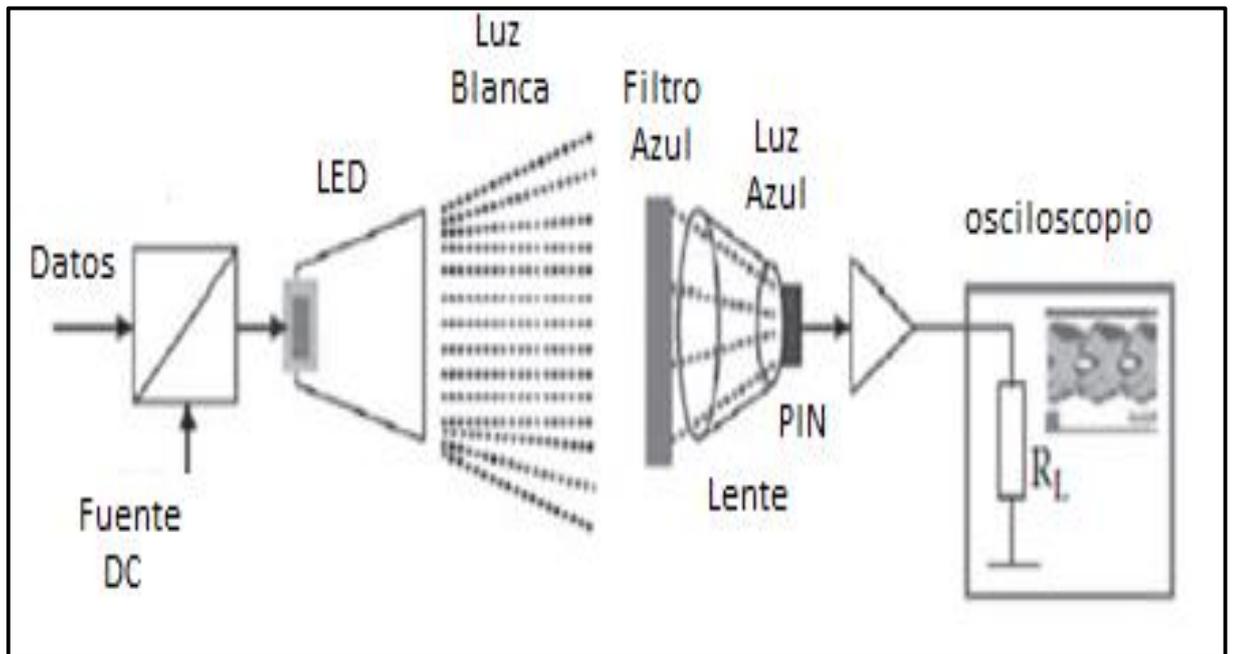
Figura 22 Muestra como la luz azul podría ser extraída mediante filtro óptico.



Fuente: GHASSEMLOOY Z, POPOOLA W., RAJBHANDARI S. Optical Wireless Communications. System and Channel Modelling with MATLAB. 6000 Broken Sound Parkway NW. 2013.

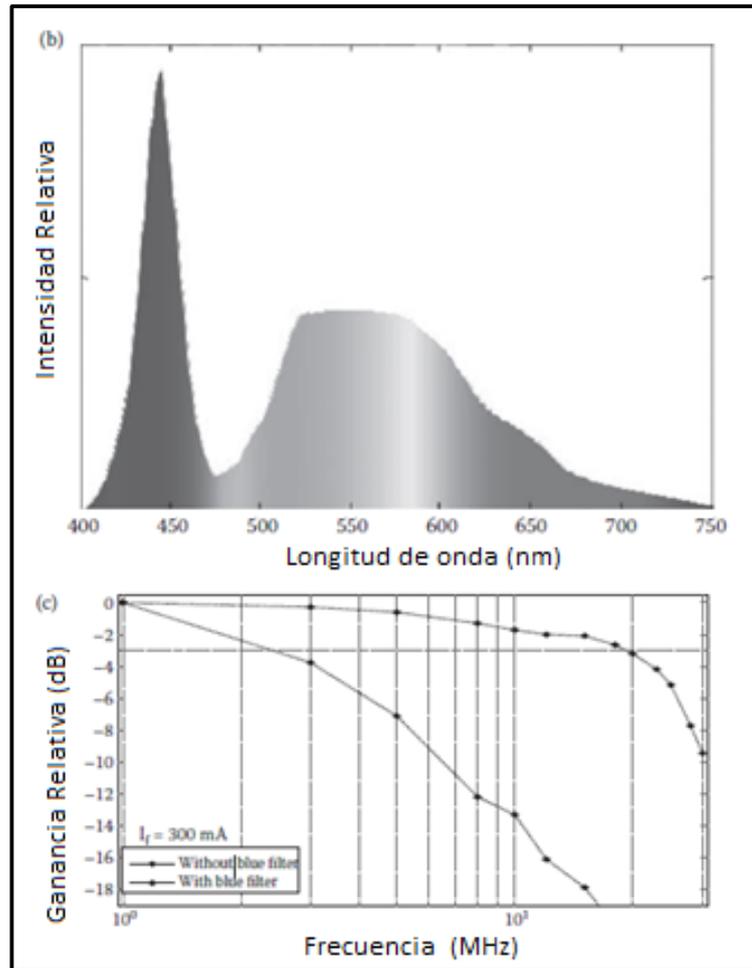
En un enlace típico de comunicación por luz visible es cuando se utiliza un LED blanco como se muestra en la figura 22 donde la iluminación y el enlace de comunicación son proporcionados por el LED. La luz azul podría ser extraída fácilmente del haz óptico entrante, el uso de un filtro óptico en el receptor muestra el espectro óptico de la luz blanca emitida y el ancho de banda de modulación medido como se ve en la figura 23.

Figura 23 Muestra el enlace de comunicación proporcionado por la luz blanca.



Fuente: GHASSEMLOOY Z, POPOOLA W., RAJBHANDARI S.. Optical Wireless Communications. System and Channel Modelling with MATLAB. 6000 Broken Sound Parkway NW. 2013.

Figura 24 Espectro y modulación emitidos por la luz blanca.



Fuente: GHASSEMLOOY Z, POPOOLA W., RAJBHANDARI S. Optical Wireless Communications. System and Channel Modelling with MATLAB. 6000 Broken Sound Parkway NW. 2013.

Para alcanzar altas velocidades de transmisión sobre los Gbps se requiere un alta eficacia luminosa LED, para esto, si se tiene un espacio amplio se requieren grupos de LEDs ubicados para cubrir toda la zona, dando un amplio grado de libertad en términos de iluminación, considerando que no deberá acceder luminosidad puesto que esto sí pondrá en riesgo la seguridad de los ojos. (GHASSEMLOOY, POPOOLA, & RAJBHANDARI, 2013)

## CAPÍTULO 3

### MÉTODOS

#### 3.1 Estudio de luminotécnica

En la industria minera subterránea existen normas de seguridad para la iluminación y más aún en minas en donde existe concentración de metano o minas de carbón, donde el objetivo primordial es evitar explosiones, para lo cual se hace necesaria una correcta iluminación del túnel minero.

Una fuente luminosa es segura si se dice que la alimentación de corriente es baja, con el fin de evitar chispas que den origen a la combustión en caso de que exista un cortocircuito.

Los países y las organizaciones internacionales han establecido normas para la cantidad de luz que se necesita en cada área de trabajo. La Sociedad de Ingeniería de la Iluminación (IES) y la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) elaboran criterios de iluminación para minas, por otra parte la CIE regula la calidad de luz que debe recibir el ojo con el fin de evitar el deslumbramiento que afecte el rendimiento visual.

Una mejora en el ambiente de iluminación permitiría disminuir los accidentes y aumentar el rendimiento del trabajador, la falta de iluminación influye en los accidentes mineros por que dificulta la observación en situaciones que se vuelven peligrosas y generan enfermedades en la visión de las personas, como: dolores de cabeza, movimiento involuntario de los glóbulos oculares, pérdida de la visión nocturna, entre otras. (LOPERA BEDOYA, 2009)

Para evitar este tipo de inconvenientes es necesario realizar un estudio de luminotecnia dentro de la mina.

¿Qué es la luminotecnia?

Luminotecnia es la ciencia que se dedica al estudio de las distintas formas de producir luz, así como su control y su aplicación.

Para introducirnos más al tema de la iluminación se tendrá en cuenta los siguientes conceptos.

**Flujo luminoso:** cantidad de luz que emite una fuente en todas las direcciones. (CONCEPTOS BÁSICOS, 2005)

**Símbolo:**  $\phi$  (Phi)

**Unidad de medida:** LUMEN (Lm)

**Luminancia o iluminación:** es el flujo luminoso por unidad de superficie. (CONCEPTOS BÁSICOS, 2005)

**Símbolo:** E

**Unidad de medida:** LUX (lux = lumen/m<sup>2</sup>)

**Intensidad Luminosa:** parte del flujo emitido por una fuente luminosa en una dirección dada, por el ángulo sólido que lo contiene. (CONCEPTOS BÁSICOS, 2005)

**Símbolo:** I

**Unidad de Medida:** Candela (cd)

**Luminancia:** intensidad luminosa emitida en una dirección dada por un superficie luminosa o iluminada (efecto de “brillo” que una superficie produce en el ojo) (CONCEPTOS BÁSICOS, 2005).

**Símbolo:** L

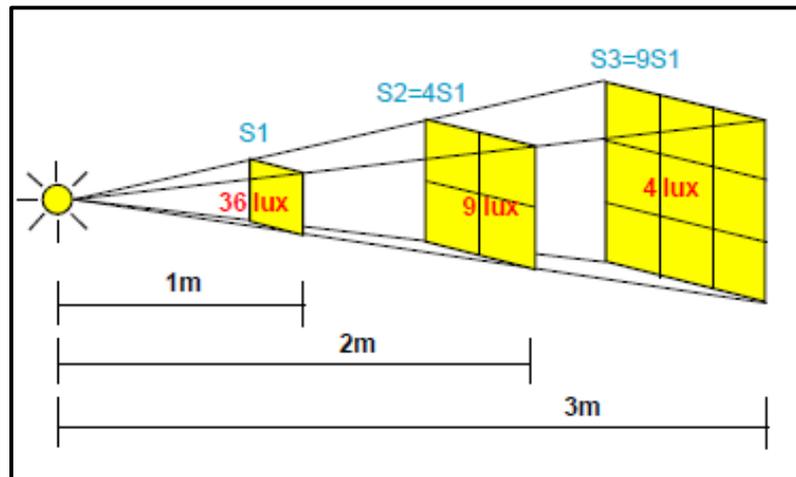
**Unidad de medida:** candela por metro cuadrado (cd/m<sup>2</sup>)

A demás de tener en cuenta los conceptos anteriores se debe conocer las siguientes leyes que son indispensables para realizar diversos cálculos.

### **Ley inversa de los cuadrados**

En la figura 25 se puede observar la ley que nos indica que la iluminación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que existe entre la fuente de luz y la superficie que esta iluminada. (LUMINOTECNIA; CAPITULO 6 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES, 2002)

Figura 25 Ley inversa de los cosenos.



Fuente: Calos Laszlo lighting design y Asoc. Consultora luminotécnica.

<http://www.laszlo.com.ar> [Consulta: 22 de Octubre de 2014].

Esta expresada por la siguiente formula:

$$E = I/D^2 \quad (\text{ec. 3.1})$$

E: Luminancia.

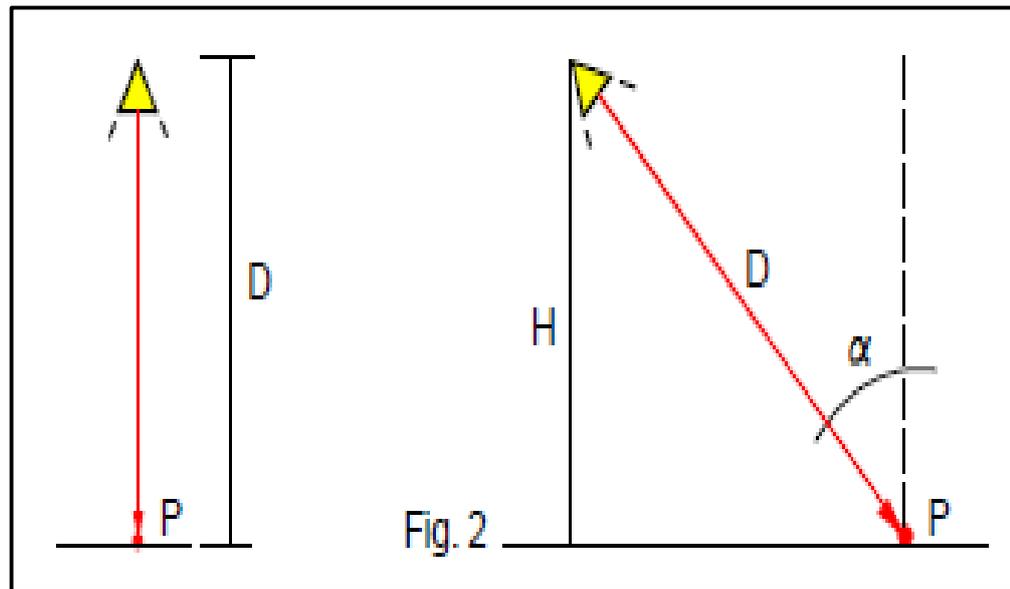
I: Intensidad luminosa.

D: Distancia entre la fuente de la luz y la superficie iluminada.

### Ley del coseno:

La iluminación es proporcional al coseno del ángulo de incidente (ángulo formado por la trayectoria del rayo incidente y la normal a la superficie en el punto de incidencia P.) como se muestra la figura 26 (LUMINOTECNIA; CAPITULO 6 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES, 2002)

Figura 26 Ley del coseno



Fuente: Calos Laszlo lighting design y Asoc. Consultora luminotécnica.

<http://www.laszlo.com.ar> [Consulta: 22 de Octubre de 2014].

$$E = (I/D^2) * \cos \alpha \quad (\text{ec. 3.2})$$

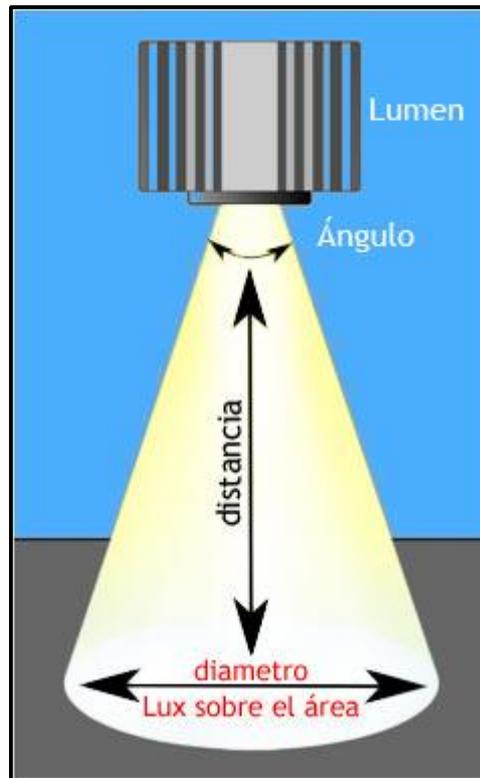
### **Iluminancia sobre una superficie.**

Para obtener comunicación por luz visible se debe conseguir entre 200 a 1000 luxes obteniendo el siguiente análisis:

En una luminaria LED viene indicado la cantidad de lúmenes que proporciona este dispositivo y es el flujo luminoso, pero lo que en realidad importa para un análisis es la iluminancia que se puede llegar a tener sobre una superficie definida.

En la figura 27, se puede observar ciertos parámetros al incidir la luz en una superficie. (EQUIVALENCIA DE LUMEN A LUX, 2010)

Figura 27 Parámetros que intervienen en la iluminación.



Fuente: Llumor, pasión por la eficiencia energética. <http://www.llumor.es> [Consulta: 09 de Febrero de 2015].

Como se ve en la figura 27 se tiene como constantes los siguientes valores:

$L_m$  = Lumen del LED (Flujo luminoso).

$D$  = Distancia entre el LED y la superficie definida.

$A$  = Ángulo de HAZ de led (Dato fabricante).

Una vez conocidos los valores se ha de aplicar la siguiente fórmula para conocer la cantidad de candelas de LED:

$$I_v = L_m / \Omega \quad (\text{ec. 3.3})$$

$I_v$  = Intensidad de luz (cd- Candelas).

$L_m$  = Flujo luminoso (lumen).

$\Omega$  = Ángulo sólido.

Para conocer la Iluminancia sobre la superficie dada se aplica la siguiente fórmula:

$$E_v = I_v / r^2 \quad (\text{ec. 3.4})$$

$E_v$  = Iluminancia sobre la superficie (LUXES).

$I_v$  = Intensidad de luz (cd- Candelas).

$r^2$  = Radio al cuadrado.

### 3.2 Modelo de canal VLC

Para lograr iluminación y comunicación con LEDs es necesario definir la intensidad luminosa transmitida y la potencia óptica, el brillo de LED se expresa con la intensidad luminosa.

La transmisión óptica de potencia se da por la energía total radiada por la intensidad luminosa de LED, es el flujo luminoso dado por un ángulo sólido. Dado por:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (\text{ec. 3.5})$$

$\Phi$  = Flujo luminoso.

$\Omega$  = Ángulo espacial, se pueden calcular a partir del flujo de energía  $\Phi_e$ .

$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (\text{ec. 3.6})$$

$V(\lambda)$  = Curva de luminosidad estándar.

$K_m$  = Máximo de luminosidad 683 lm/W a 555nm de longitud de onda.

La potencia óptica transmitida se define por:

$$P_{t=K_m} \int_{\Delta_{\min}}^{\Delta_{\max}} \int_0^{2\pi} \Phi_e d\theta d\lambda \quad (\text{ec. 3.7})$$

$\Delta_{\max}$  y  $\Delta_{\min}$  se determinan a partir de la curva de sensibilidad del fotodiodo.

Como se ve en la figura 28, se tiene iluminación LED de patrón de iluminación Lambertiana, intensidad de radiación en una superficie:

$$I(\theta) = I(0) \cos^{ml}(\theta) \quad (\text{ec. 3.8})$$

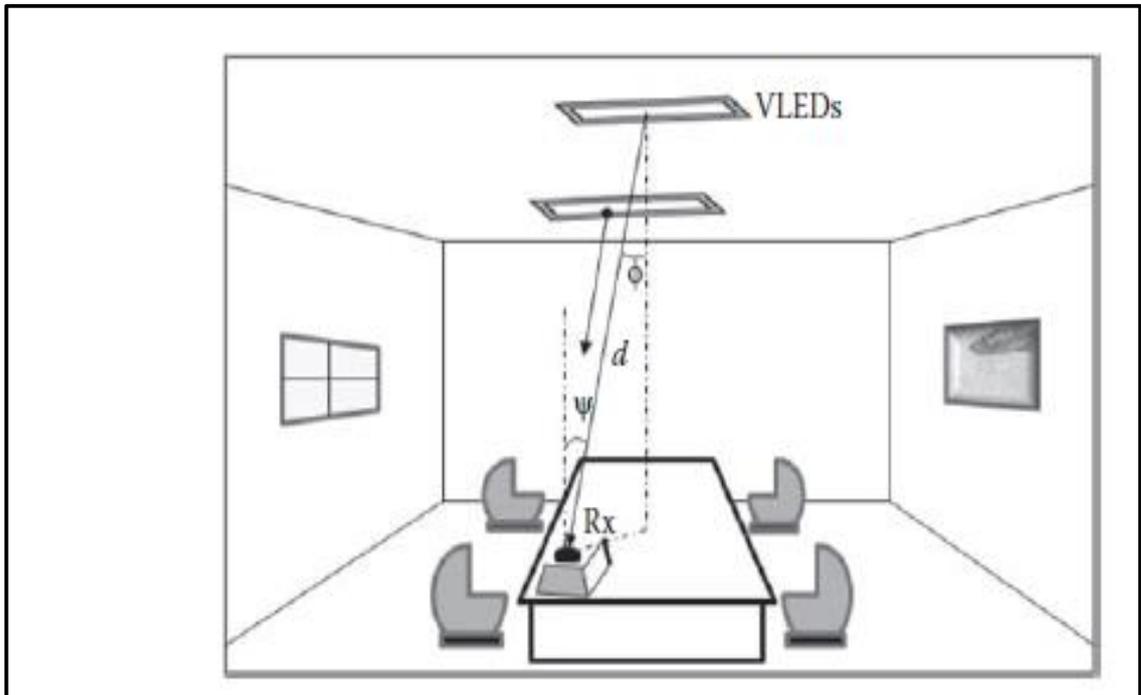
$\theta$  = Angulo de irradiación con respecto a la normal del trasmisor.

$I(0)$  = Centro de la intensidad luminosa.

$m_l$  = Orden de emisión Lambertiana, que se define como:

$$m_l = \frac{\ln(2)}{\ln(\cos\frac{\theta_1}{2})} \quad (\text{ec. 3.9})$$

Figura 28 Iluminación VLEDs



Fuente: GHASSEMLOOY Z, POPOOLA W., RAJBHANDARI S.. Optical Wireless Communications. System and Channel Modelling with MATLAB. 6000 Broken Sound Parkway NW. 2013.

Se calcula la iluminancia horizontal, intensidad en el punto X,Y:

$$I_{hor} = I(0)\cos^{m_l}(\theta)l^2 * \cos(\Psi) \quad (\text{ec. 3.10})$$

Potencia recibida:

$$Pr = Pt \frac{(m_l+1)}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\theta) * T_s(\Psi) * g(\Psi) * \cos(\Psi) \quad (\text{ec. 3.11})$$

$$0 \leq \Psi \leq \Psi_{con}$$

$\Psi$  = Ángulo de inclinación con respecto a la normal de la superficie del receptor.

$T_s(\Psi)$  = Filtro de transmisión.

$g(\Psi)$  = Ganancia del campo de visión.

$\Psi_{\text{con}}$  = Concentrador del campo de visión.

$d$  = Distancia entre el LED y receptor.

La ganancia del concentrador óptico del receptor se define por:

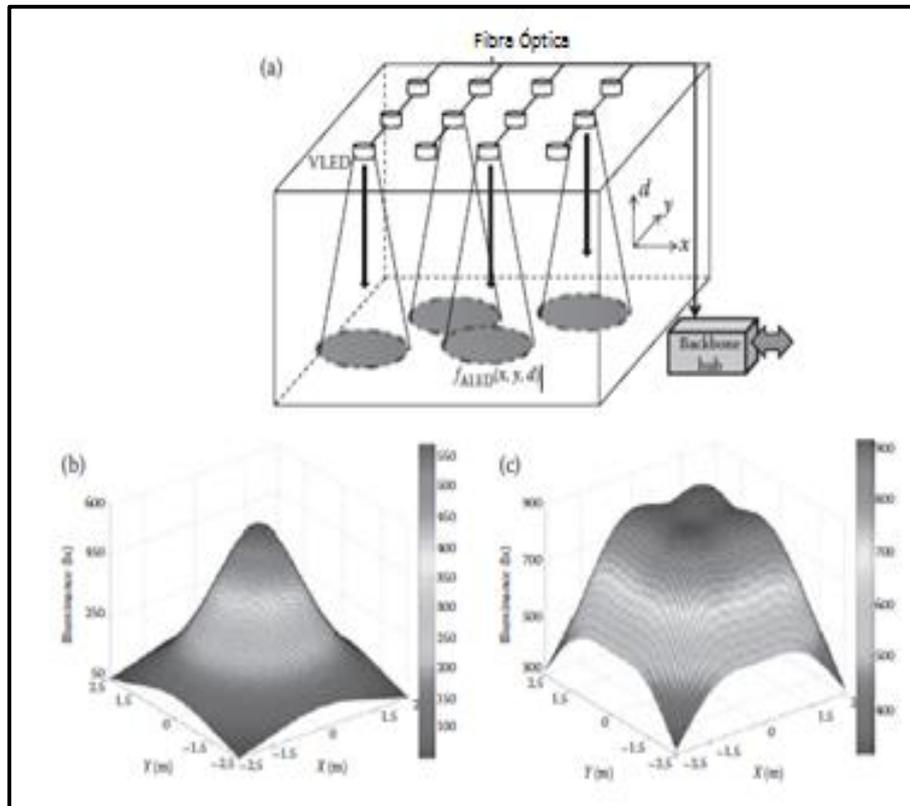
$$g(\Psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_{\text{con}}}, & 0 \leq \Psi \leq \Psi_{\text{con}} \\ 0, & 0 \geq \Psi \end{cases} \quad (\text{ec. 3.12})$$

$n$  = Índice de refracción.

Debido que en lugares cerrados se requieren varios LEDs, se realiza un arreglo matriz de estos como se observa en la figura 29, y haciendo el estudio tridimensional de cada uno de éstos se ve como una huella de radiación definida, la iluminación producida en el suelo de llama patrón de iluminación básica y se define en términos de ángulo sólido como:

$$f_{\text{ALED}}(x, y, d) = \frac{f(\Theta)}{(x^2 + y^2 + d^2)} \quad (\text{ec. 3.13})$$

Figura 29 (a) Matriz de LED y distribución de iluminación.(b) un transmisor y (c) cuatro transmisores.

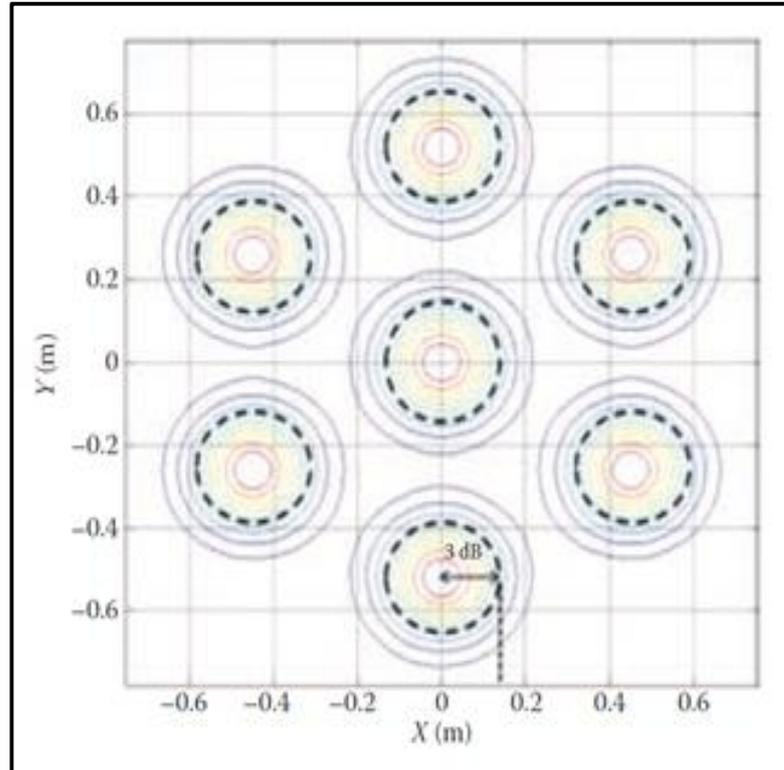


Fuente: GHASSEMLOOY Z, POPOOLA W., RAJBHANDARI S.. Optical Wireless Communications. System and Channel Modelling with MATLAB. 6000 Broken Sound Parkway NW. 2013.

Al existir varias fuentes de emisión se puede dar interferencia entre símbolos, en especial al tener grandes velocidades de transmisión, para esto, hay varias maneras de superar estos inconvenientes, por ejemplo reduciendo el campo de iluminación, técnicas de codificación y multiplexación.

El campo de iluminación útil para lograr una comunicación es de 3dB tomado desde el centro del radio de iluminación, como se ve en la figura 30, siendo así se debe controlar el campo de luminaria para conseguir una cobertura amplia tanto de iluminación como de comunicación. (GHASSEMLOOY, POPOOLA, & RAJBHANDARI, 2013)

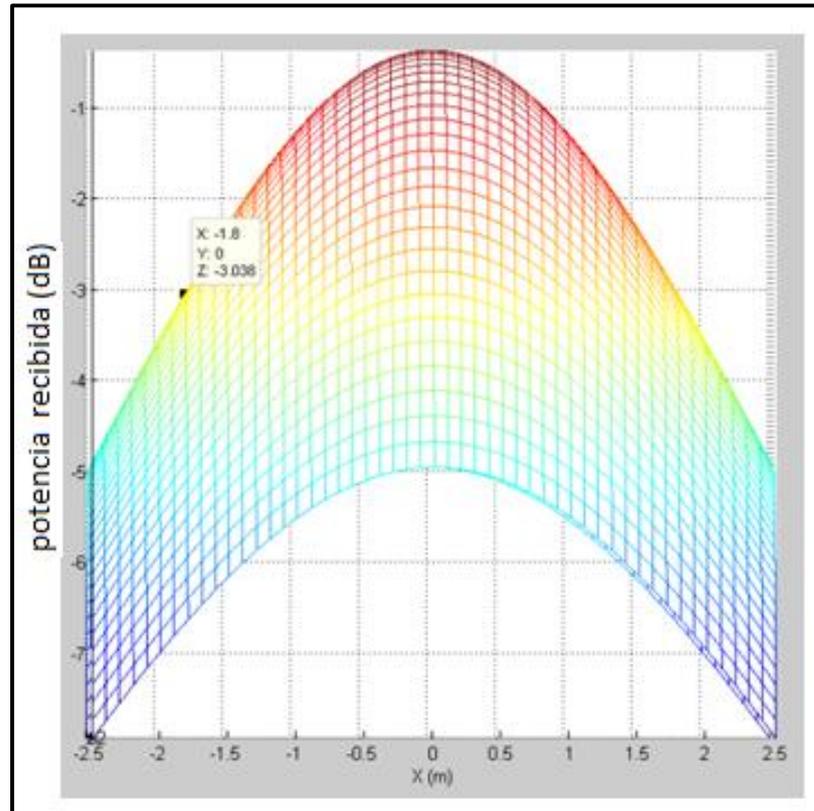
Figura 30 Predicción grafica de la cobertura para la comunicación a 3dB.



Fuente: GHASSEMLOOY Z, POPOOLA W., RAJBHANDARI S.. Optical Wireless Communications. System and Channel Modelling with MATLAB. 6000 Broken Sound Parkway NW. 2013.

Desde el punto de concentración más alto hasta tener una variación de 3 dB será la zona de cobertura útil para lograr una comunicación, como se ve en la gráfica 31.

Figura 31 Variación de la potencia recibida (mínimo a 3dB para obtener comunicación)



Fuente: GHASSEMLOOY Z, POPOOLA W., RAJBHANDARI S.. Optical Wireless Communications. System and Channel Modelling with MATLAB. 6000 Broken Sound Parkway NW. 2013.

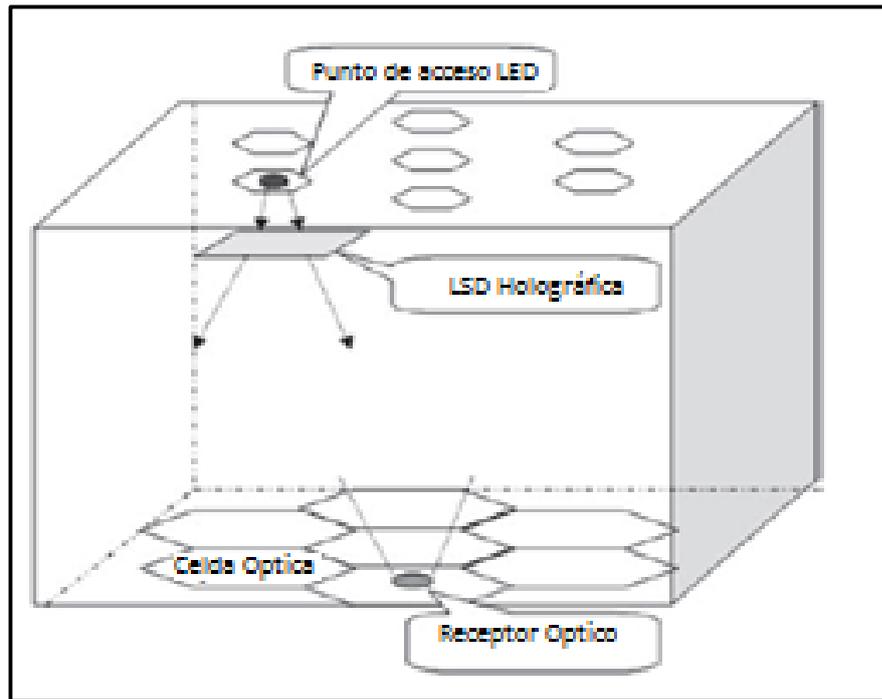
### 3.3 Geometría Celular

Se utilizará una estructura celular con una sola longitud de onda, sin reutilización. La superposición entre las áreas de cobertura deben ser mínimas logrando así una óptima eficiencia de energía.

Se puede utilizar varias formas celulares como: circulares, cuadradas, hexagonales, esta última es la más utilizada ya que tiene mayor superficie sin dejar regiones descubiertas obsérvese en la figura 32, cada LED representaría una estación base ubicado en el centro del hexágono necesitando la menor cantidad de energía

asegurando la salud visual, usar LED con campos de visión estrechos aseguran la transmisión en grandes velocidades, sin embargo reduce la cobertura necesitando más dispositivos para lograr una cobertura óptima, para solventar los inconvenientes se utiliza un difusor holográfico de luz para ampliación de campo de visión.

Figura 32 Interior de un Sistema Celular VLC.



Fuente: GHASSEMLOOY Z, POPOOLA W., RAJBHANDARI S.. Optical Wireless Communications. System and Channel Modelling with MATLAB. 6000 Broken Sound Parkway NW. 2013.

La coexistencia de células de diferente tamaño es la particularidad de sistemas celulares, la zona de cobertura se divide en zonas más pequeñas llamadas células.

La geometría celular se utiliza para definir la forma geométrica más conveniente para el sistema y la agrupación de cada una de éstas. Para esto es necesario instalar los dispositivos a una sola altura que si bien se verá formas circulares, éstas se solapan disminuyendo la eficiencia del sistema, por tal motivo, se hace el estudio de hexágonos.

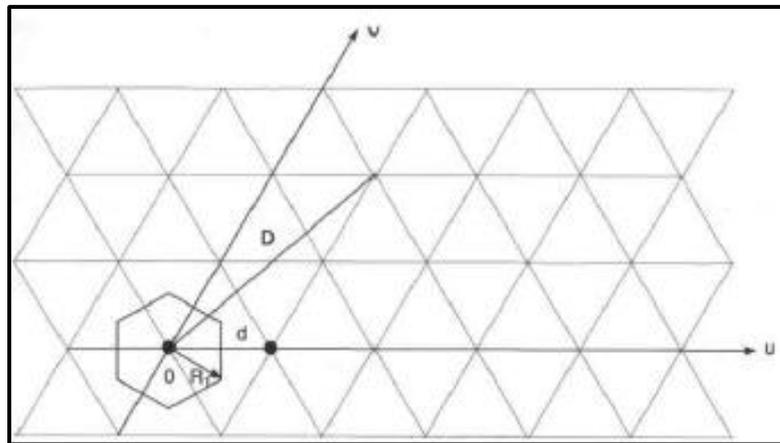
Como se ve en la figura 33, los lados de los hexágonos son perpendiculares a los ejes, la apotema es igual a la mitad de la distancia entre los dos transmisores o nodos, tiene la relación:

$$d = R\sqrt{3} \quad (\text{ec. 3.14})$$

d = distancia.

R = radio

Figura 33 Representación de una célula en el eje de coordenadas.



Fuente: RABANOS, José María. Transmisión por radio. 6ta edición. Madrid febrero de 2008.

Se tiene una distancia de reutilización D, se reutilizará la frecuencia y se define por:

$$\left(\frac{D}{d}\right)^2 = J \quad (\text{ec. 3.15})$$

J = números enteros, obtenidos de un del nodo ubicado en las coordenadas i, j, se puede definir también:

$$J = \frac{1}{3} \left(\frac{D}{R}\right)^2 \quad (\text{ec. 3.16})$$

Este arreglo formaran un rombo cocanal, encierra un conjunto de transmisores que será repetitivo consecutivamente, entonces el área de este rombo cocanal es:

$$S_r = \frac{D^2\sqrt{3}}{2} \quad (\text{ec. 3.17})$$

Se calcula también el área de cada célula o transmisor:

$$S_c = \frac{3\sqrt{3}R^2}{2} \quad (\text{ec. 3.18})$$

La cobertura de cada rombo es:

$$J = \frac{S_r}{S_c} = \frac{1}{3} \left( \frac{D}{R} \right)^2 \quad (\text{ec. 3.19})$$

Entonces J es el tamaño de la agrupación, relación de protección. (RABANOS, 2008)

## CAPÍTULO 4

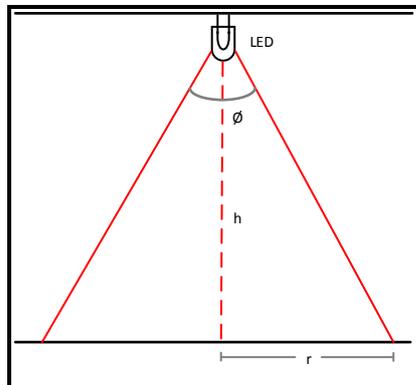
### DESARROLLO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

#### 4.1 Análisis de iluminancia por superficie.

Una vez conocido el tipo de luminaria para aplicar en una mina, en este caso reflectores LED para ubicaciones peligrosas de tipo industrial, es necesario realizar en análisis de iluminancia sobre superficie para lograr una correcta comunicación y para esto el rango en Luxes esta entre 200 a 1000.

Como se ve en la figura 34 como datos conocidos se tiene la altura que será directamente proporcional a la altura de la mina a trabajar y el ángulo de visión del LED (dato de fabricante).

Figura 34 Parámetros para la correcta comunicación vía LED.



Fuente: Autores

$h$  = Altura entre led y superficie a iluminar.

$r$  = Radio de zona de cobertura útil.

$\varnothing$  = Ángulo de visión del LED (dato de fabricante).

Con estos datos se calcula el radio de cobertura que se tendrá en cada lámpara:

$$r = h * \tan \frac{\emptyset}{2} \quad (\text{ec. 4.1})$$

En donde:

$r$  = Radio de zona de cobertura útil.

$h$  = Altura entre led y superficie a iluminar.

$\emptyset$  = Ángulo de visión del LED (dato de fabricante).

Aplicando la teoría de iluminancia sobre una superficie, se calcula la cantidad de lúmenes necesarios para alcanzar con el radio obtenido la cantidad entre 200 a 1000 Luxes, para esto se tiene:

#### **Intensidad de luz (cd- candelas)**

$$I_v = L_m / \Omega \quad (\text{ec. 4.2})$$

$I_v$  = Intensidad de luz (cd- Candelas).

$L_m$  = Flujo luminoso (lumen).

$\Omega$  = Ángulo sólido.

#### **Ángulo sólido**

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\emptyset}{2}\right) \quad (\text{ec. 4.3})$$

$\Omega$  = Ángulo sólido.

$\emptyset$  = Ángulo de visión del LED (dato de fabricante).

#### **Iluminancia sobre la superficie (luxes)**

$$E_v = I_v / r^2 \quad (\text{ec. 4.4})$$

$E_v$  = Iluminancia sobre la superficie (Luxes).

$I_v$  = Intensidad de luz (cd- Candelas).

$r^2$  = Radio al cuadrado.

Despejando de la ecuación 4.4 la intensidad luminosa en candelas se tendrá:

$$I_v = E_v * r^2 \quad (\text{ec. 4.5})$$

Basado en la ecuación 4.2 se reemplazará la intensidad luminosa en la ecuación 4.5 teniendo:

$$\frac{L_m}{\Omega} = E_v * r^2 \quad (\text{ec. 4.6})$$

Llegando a conocer la cantidad de lúmenes necesarios conociendo el ángulo sólido, radio y la iluminancia necesaria sobre una superficie.

$$L_m = E_v * r^2 * \Omega \quad (\text{ec. 4.7})$$

Este desarrollo se realizó en LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) (Anexo 1.)

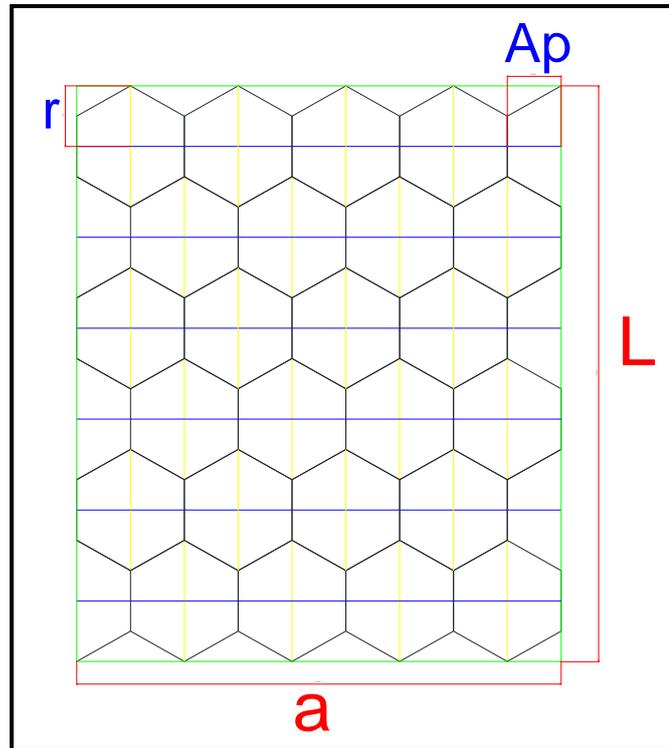
#### **4.2 Ubicación de cada luminaria led.**

Se usa conceptos de geometría celular para definir que la cobertura útil de cada lámpara LED no es un círculo, sino más bien un hexágono regular con el radio llamado celda óptica.

Se realiza una optimización de distribución de cada lámpara para tener la mayor cobertura de comunicación mediante luz visible, en donde se tendrá como parámetros de entrada el largo (L), el ancho (a) de las galerías de la mina, así como también el radio y apotema de cada hexágono regular.

A partir de estos parámetros se proyectará un esquema como se muestra continuación en la figura 35:

Figura 35 Esquema de cobertura celular en una galería de mina.



Fuente: Autores

$$DF_1 = \sum_{i=1}^a (i \text{ ap} ; j r) \quad (\text{ec. 4.8})$$

$DF_1$  = distancia de la fila 1.

$a$  = ancho de la galería de la mina.

$ap$  = apotema del hexágono regular.

$r$  = radio del círculo en donde será inscrito el hexágono.

$i = 1, 3, 5$  (números impares).

$j$  = se mantiene constante en la primera fila (1).

En la figura 35 se observa que el primer hexágono se ubicará a un ancho equivalente a un apotema y a un largo igual al radio, tomando como referencia la esquina

superior izquierda como punto (0,0), el segundo hexágono se ubicará a 3 apotemas a lo ancho y a un radio de largo, el tercer hexágono se colocará a 5 apotemas a lo ancho y a un radio de largo y así sucesivamente hasta que la suma de los apotemas sea menor o igual al ancho de la galería. Por lo tanto se concluirá que los hexágonos de la primera fila se colocaran de la siguiente manera:

Tabla 5 ubicación de los hexágonos en la primera fila

<b>PRIMERA FILA</b>	<b>“X” ancho (distancia)</b>	<b>“Y” largo (distancia)</b>
<b>Primer hexágono</b>	1 Apotema	1 radio
<b>Segundo hexágono</b>	3 Apotemas	1 radio
<b>Tercer hexágono</b>	5 Apotemas	1 radio
<b>Cuarto hexágono</b>	7 Apotemas	1 radio

$$DF_2 = \sum_{i=2}^a (i ap ; j r) \tag{ec. 4.9}$$

DF<sub>2</sub> = distancia de la fila 2.

a = ancho de la galería de la mina.

ap = apotema del hexágono regular.

r = radio del circulo en donde será inscrito el hexágono.

i = 2, 4, 6 (números pares).

j = se mantiene constante en la segunda fila (2,5 es decir 1,5 más que en la fila anterior).

Para la segunda fila se deberá colocar el primer hexágono a dos apotemas de distancia a lo ancho y a dos radios y medio de alto, (siempre y cuando esta distancia no exceda el largo de la galería) el segundo hexágono se colocara a cuatro apotemas de ancho y a dos radios y medio de alto, el tercer hexágono se colocara a seis apotemas de ancho y a dos radios y medio de largo, y así sucesivamente hasta que la suma de los apotemas sea menor o igual al ancho de la galería. A continuación se detalla en la tabla 6.

Tabla 6 ubicación de los hexágonos en la segunda fila.

<b>SEGUNDA FILA</b>	<b>“X” ancho (distancia)</b>	<b>“Y” largo (distancia)</b>
<b>Primer hexágono</b>	2 Apotema	2,5 radios
<b>Segundo hexágono</b>	4 Apotemas	2,5 radios
<b>Tercer hexágono</b>	6 Apotemas	2,5 radios
<b>Cuarto hexágono</b>	8 Apotemas	2,5 radios

$$DF_3 = \sum_{i=1}^a (i \text{ ap} ; j r) \quad (\text{ec. 4.10})$$

$DF_3$  = distancia de la fila 3.

$a$  = ancho de la galería de la mina.

$ap$  = apotema del hexágono regular.

$r$  = radio del círculo en donde será inscrito el hexágono.

$i = 1, 3, 5$  (números impares).

$j =$  se mantiene constante en la tercera fila (4 es decir 1,5 más que en la fila anterior).

En la tercera fila se deberá colocar el primer hexágono a un apotema de distancia a lo ancho (tal y como se colocó en la primera fila) y a cuatro radios de alto, (una vez más se deberá tener en cuenta que esta distancia no exceda el largo de la galería) el segundo hexágono se colocara a tres apotemas de ancho y cuatro radios de alto, el tercer hexágono se colocara a 5 apotemas de ancho y a cuatro radios de largo, y así sucesivamente hasta que la suma de los apotemas sea menor o igual al ancho de la galería.

Tabla 7 ubicación de los hexágonos en la tercera fila.

<b>TERCERA FILA</b>	<b>“X” ancho (distancia)</b>	<b>“Y” largo (distancia)</b>
<b>Primer hexágono</b>	1 Apotema	4 radios
<b>Segundo hexágono</b>	3 Apotemas	4 radios
<b>Tercer hexágono</b>	5 Apotemas	4 radios
<b>Cuarto hexágono</b>	7 Apotemas	4 radio

$$DF_4 = \sum_{i=2}^a (i ap ; j r) \quad (\text{ec. 4.11})$$

$DF_4$  = distancia de la fila 4.

$a$  = ancho de la galería de la mina.

$ap$  = apotema del hexágono regular.

$r$  = radio del círculo en donde será inscrito el hexágono.

$i = 2, 4, 6$  (números pares).

$j$  = se mantiene constante en la segunda fila (5,5 es decir 1,5 más que en la fila anterior).

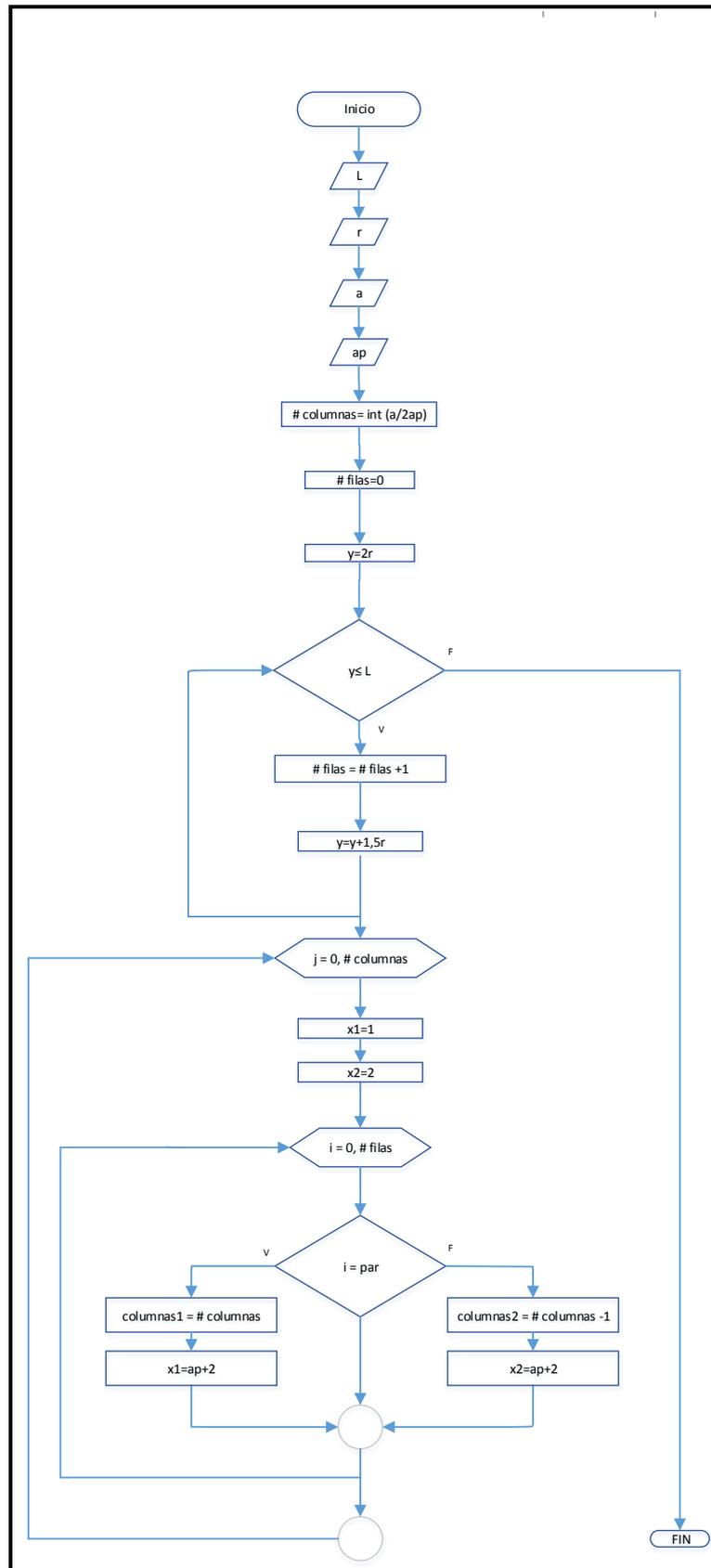
Para la cuarta fila se deberá colocar el primer hexágono a dos apotemas de distancia a lo ancho y a cinco radios y medio de alto, (siempre y cuando esta distancia no exceda el largo de la galería) el segundo hexágono se colocara a cuatro apotemas de ancho y a cinco radios y medio de alto, el tercer hexágono se colocara a seis apotemas de ancho y a cinco radios y medio de largo, y así sucesivamente hasta que la suma de los apotemas sea menor o igual al ancho de la galería. A continuación se detalla en una tabla.

Tabla 8 ubicación de los hexágonos en la cuarta fila

<b>CUARTA FILA</b>	<b>“X” ancho (distancia)</b>	<b>“Y” largo (distancia)</b>
<b>Primer hexágono</b>	2 Apotema	5,5 radios
<b>Segundo hexágono</b>	4 Apotemas	5,5 radios
<b>Tercer hexágono</b>	6 Apotemas	5,5 radios
<b>Cuarto hexágono</b>	8 Apotemas	5,5 radios

Una vez definido la secuencia lógica de la ubicación de cada hexágono se realiza el diagrama de flujo de la siguiente manera:

Figura 36 Esquema del funcionamiento del programa principal.



Fuente: Autores

En donde los datos de ingreso son:

$L$  = Largo de la mina.

$r$  = radio de cobertura útil del hexágono.

$A$  = Ancho de la mina.

$ap$  = apotema del hexágono.

El desarrollo se ve en el anexo 2.

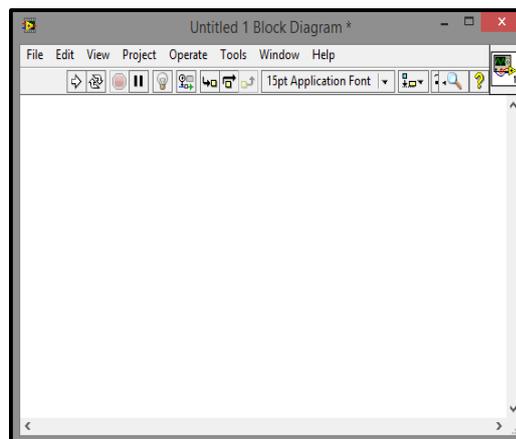
### 4.3 Modelado 3D en labVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench), es un método de programación gráfica más conocido como lenguaje G y cada programa creado se denomina “VI” instrumentos virtuales, cada uno tiene 3 partes principales:

#### Diagrama de bloques

Como se ve en la figura 37, Gráficamente se realiza la programación lógica, aquí el programador coloca entradas, salidas y funciones en bloques.

Figura 37 Pantalla principal del programa LabVIEW.

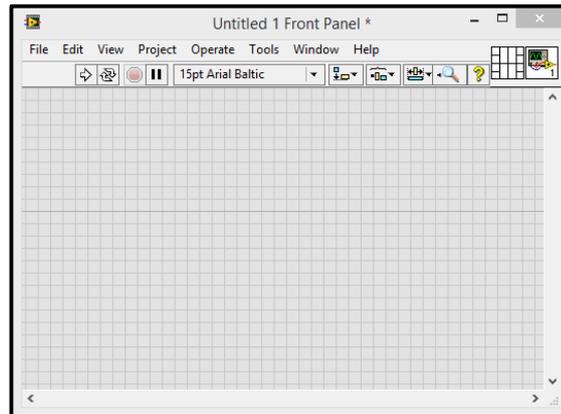


Fuente: Autores

### Panel frontal

Como se ve en la figura 38, aquí se visualiza las entradas y salidas que se ha manejado en el diagrama de bloques, al ser una interfaz gráfica se puede configurar tanto los controles como las salidas en forma de gráficas, tanques, números, texto.

Figura 38 Panel frontal del programa labVIEW.

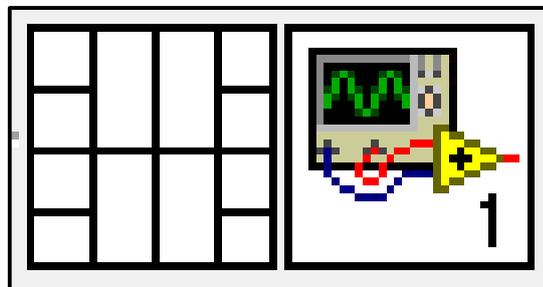


Fuente: Autores

### Panel de conexiones

Para evitar saturación visual en un programa se maneja subVI, subprogramas que se pueden usar en el programa principal. Como se ve en la Figura 39, se configura entradas y salidas para el subprograma que se utilizara, todo esto para tener orden y conocer plenamente las subrutinas que se ejecutan en el programa principal.

Figura 39 1 SubVI

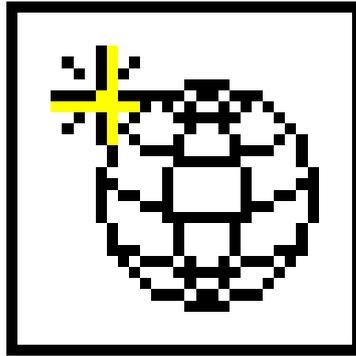


Fuente: Autores

### Modelado 3d

Para la creación de figuras en 3D existen figuras predefinidas, como esferas, cubos, pirámides llamado Create Sphere como se ve en la figura 40.

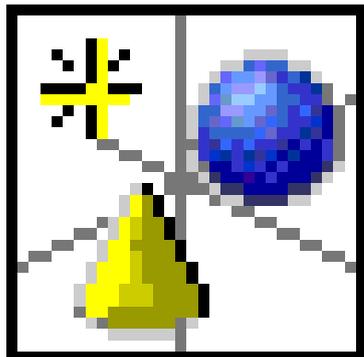
Figura 40 Creador de figuras en 3D.



Fuente: Autores

Es necesario crear escenas para figuras y para esto se usa Create Object, como se ve en la figura 41.

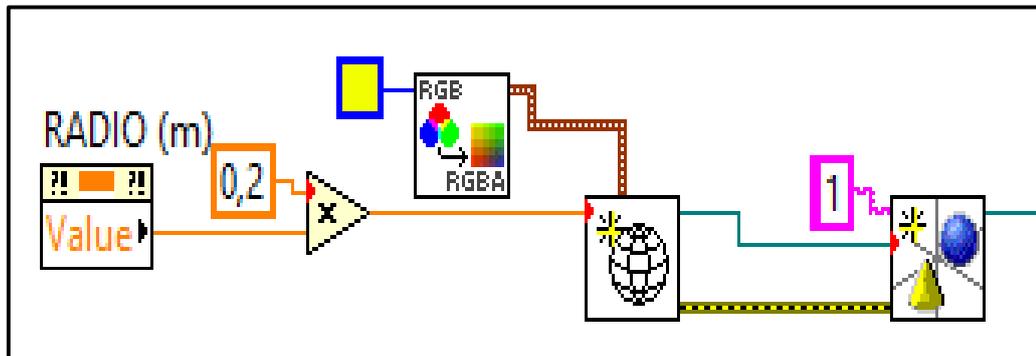
Figura 41 Creador de objetos en 3D.



Fuente: Autores

Entonces para ver graficas predefinidas tridimensionales se tiene el siguiente arreglo en condigo de programación LabVIEW, como se ve en la figura 42.

Figura 42 Arreglo en labVIEW para realizar figuras en 3D.

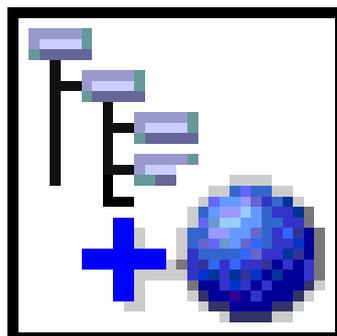


Fuente: Autores

Es necesario conocer también algunas herramientas necesarias para la aplicación que se quiere desarrollar:

Add Object: Adhiere objetos a nuestra gráfica final en 3D. Figura 43.

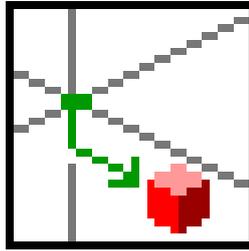
Figura 43 Agrega objetos a una gráfica.



Fuente: Autores

Traslation: Traslada objetos a la posición dada x, y, z. Figura 44.

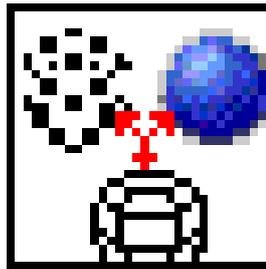
Figura 44 Traslación de gráficos en coordenadas.



Fuente: Autores

Set Drawing Style: grafica de objetos sólidos, puntos, líneas. Figura 45.

Figura 45 Agrega diferentes tipos de objetos en labview.



Fuente: Autores

Set Blending: Maneja la transparencia de objetos. Figura 46.

Figura 46 Cambia la tonalidad (transparencia) de objetos.

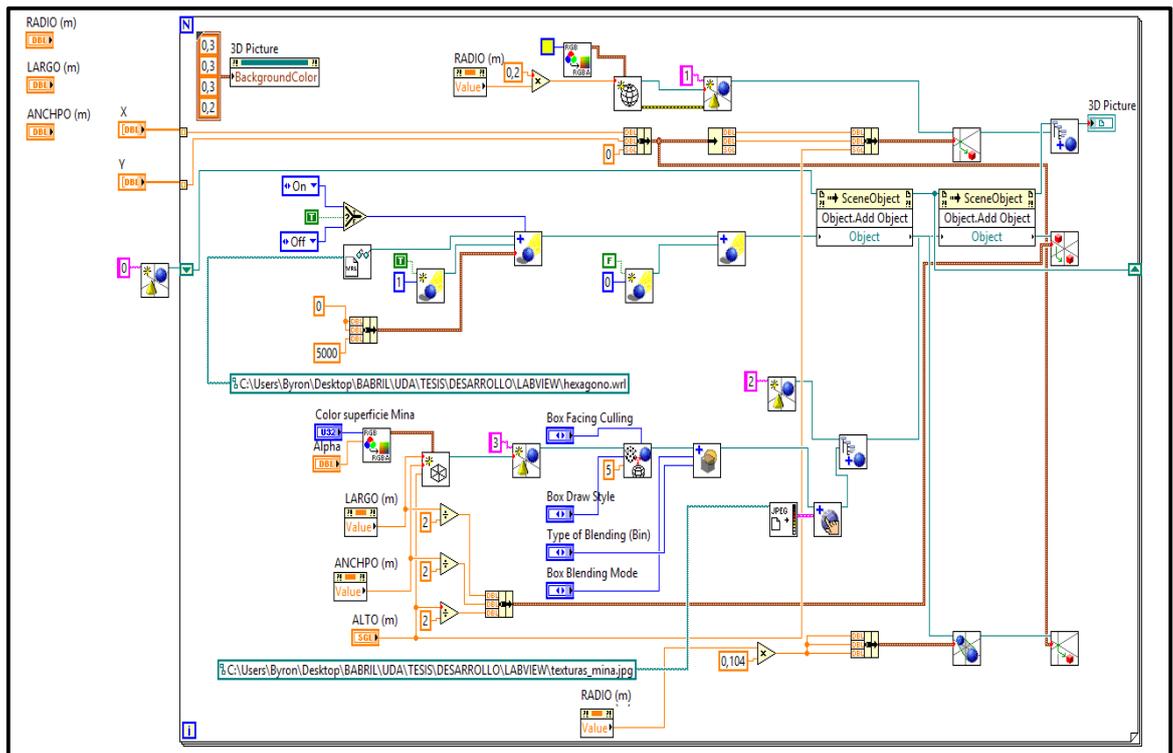


Fuente: Autores

Para modelar la mina en 3D se debe tener datos de entrada: ancho, largo, alto, radio, transparencia de la mina, coordenadas x,y de cada luminaria.

Como se ve en la figura 47 el diagrama de bloques se generan de la mina como un cuadrado con textura y transparencia con los valores de ancho, largo y alto.

Figura 47 Diagrama para dibujar una mina en 3D.

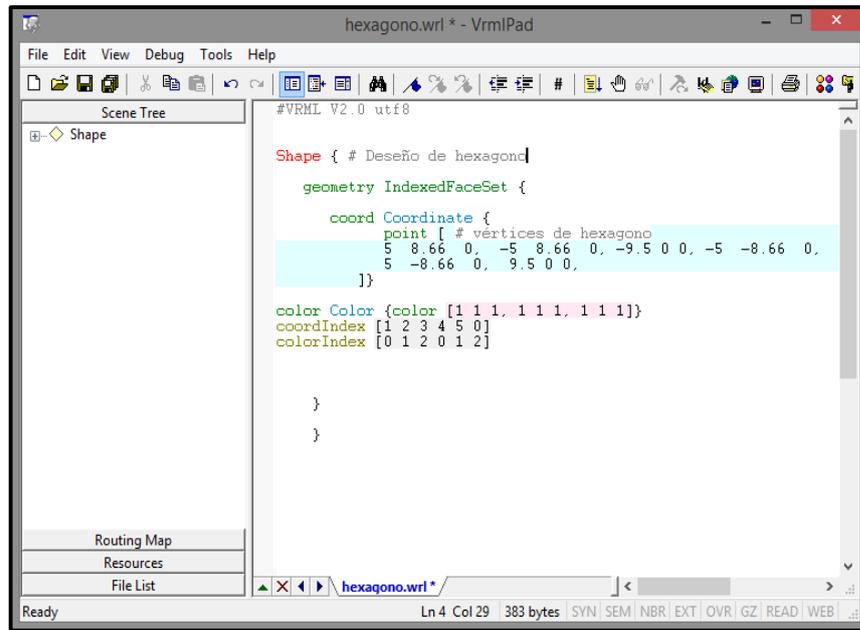


Fuente: Autores

Para graficar hexágonos es necesario importar una imagen .wrl, para estos es necesario manejar el software VrmIpad (Virtual Reality Modeling Language), diseño de objetos y escenas interactivas tridimensional.

Para esto se crea el código indicando vértices y color, como se ve en la figura 48

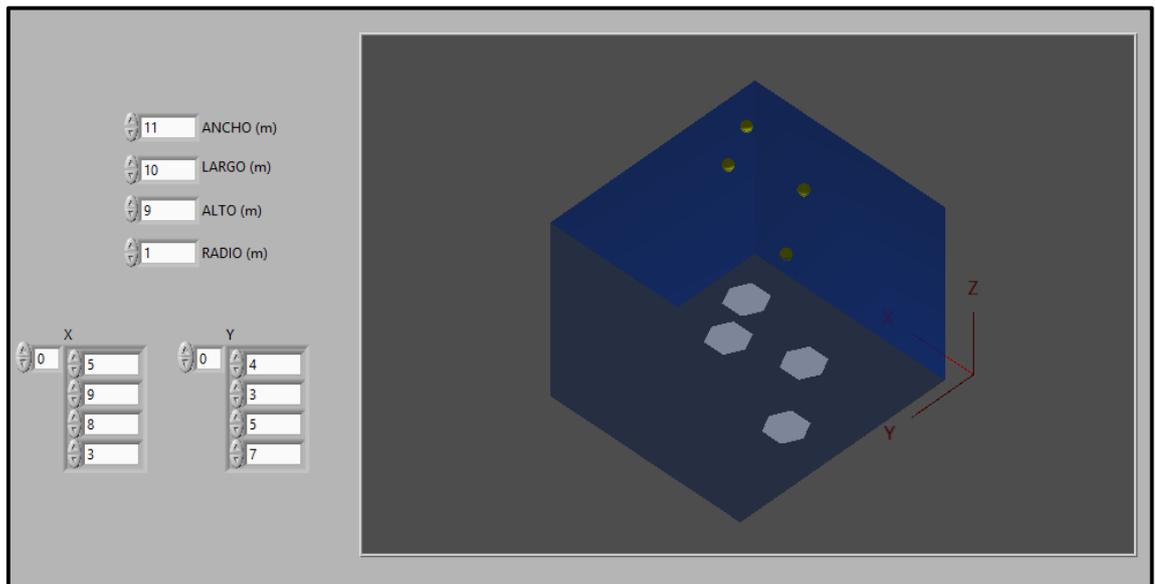
Figura 48 Programación en VrmIpad para graficar los hexágonos.



Fuente: Autores

El panel frontal se muestra en la figura 49, teniendo datos de entrada ancho, largo, alto, radio y las coordenadas x,y de cada hexágono.

Figura 49 Grafica principal del modelado de la mina en 3D.

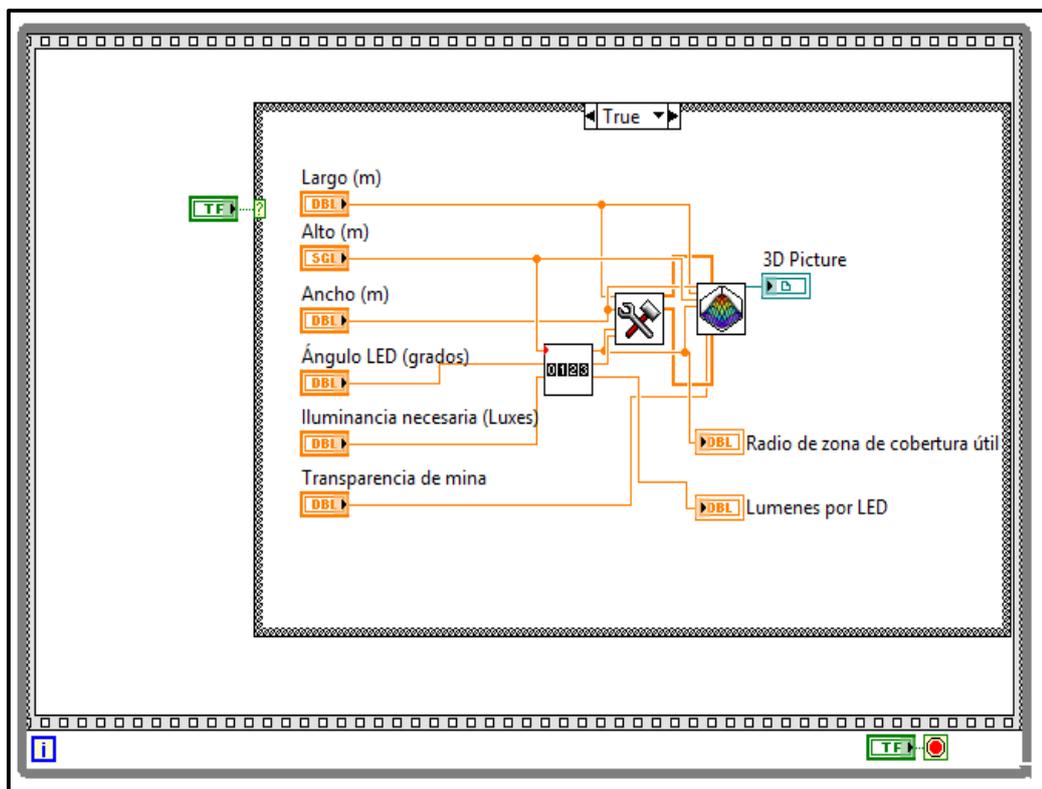


Fuente: Autores

#### 4.4 Software

Se desarrolla el software final con datos de ingreso: largo, alto, ancho y transparencia referente a la mina; ángulo de visión de LED e iluminancia por superficie. Como salidas se tiene el radio de zona de cobertura útil por led para lograr una comunicación entre los 200 a 1000 Luxes, lúmenes necesarios por LED, esto ayuda a dimensionar la cantidad de led y lúmenes necesarios para tener comunicación por luz LED, como se ve en figura 50.

Figura 50 Parámetros de entrada para poder graficar una mina con su respectiva iluminación.



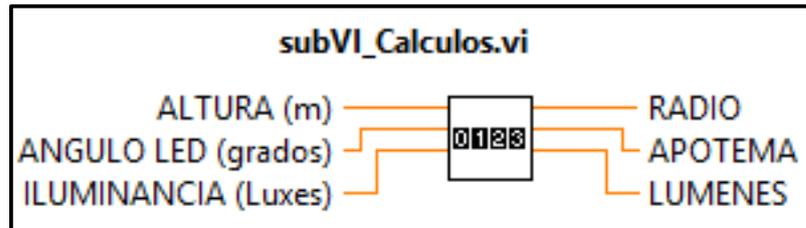
Fuente: Autores

Se segmentó en un subVI para tener un mejor orden y conocer plenamente la secuencia lógica que se está siguiendo:

### SubVI cálculos

Como se ve en la figura 51 se tiene datos de entrada: altura, ángulo de visión del LED e iluminancia necesaria; como datos de salida: radio, apotema, lúmenes. Ver anexo 1

Figura 51 Esquema de los parámetros principales de entrada y salida.

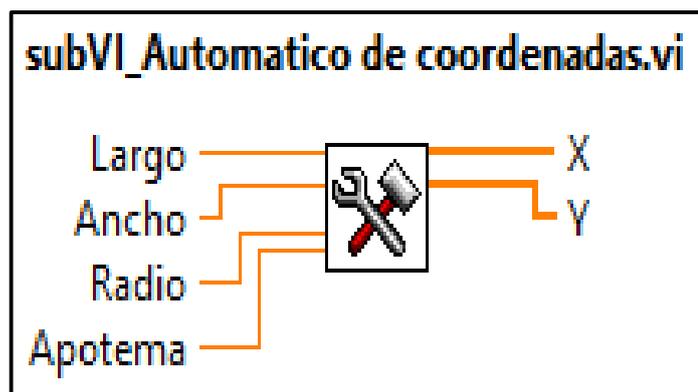


Fuente: Autores

### SubVI automático de coordenadas

Con los datos de entrada de largo, ancho, radio y apotema se ha de conseguir todas las coordenadas de cada una de las lámparas a usar en la mina, de tal manera que será directo la implementación de este, como se ve en la figura 52. Ver anexo 2

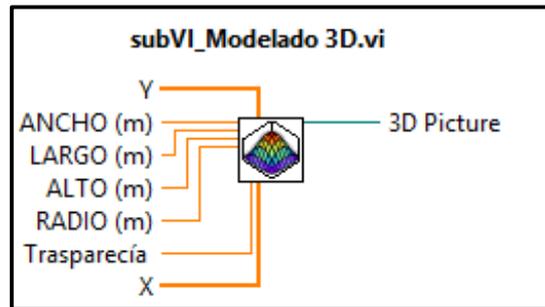
Figura 52 Parámetros que determinan las coordenadas para la colocación de las lámparas en la mina.



Fuente: Autores

Con el ingreso de largo, ancho, alto, radio, transparencia, coordenadas x,y se tiene la simulación tridimensional de la mina, con esto se llegará a visualizar como queda implementado el proyecto, como se ve en la figura 53.

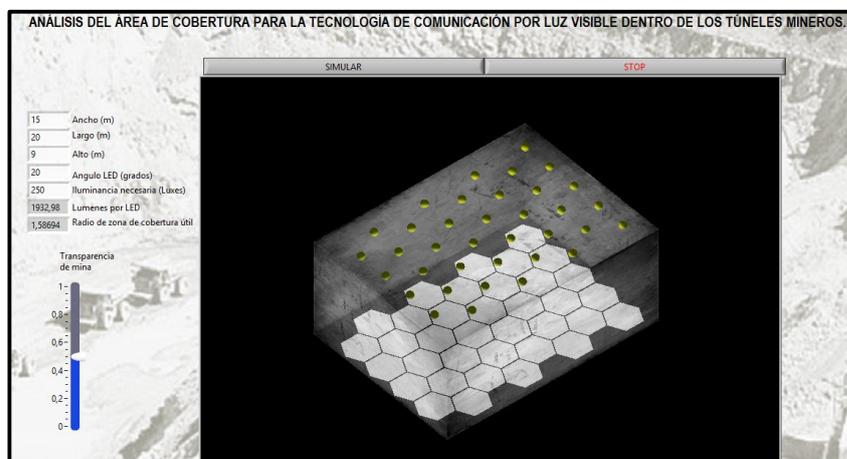
Figura 53 SubVI para el modelado en 3D dependiente de los parámetros de entrada.



Fuente: Autores

Finalmente, como muestra la figura 54, se tiene el panel frontal del software, básicamente se ingresa las dimensiones de la mina: ancho, largo, alto; ángulo de visión del LED que se tiene en el mercado y lúmenes necesarios para lograr una correcta comunicación. La transparencia de la mina es para visualizar con mayor facilidad la ubicación de cada celda óptica y conocer plenamente la distribución de cada lámpara LED.

Figura 54 Visualización de una mina con sus respectivas lámparas en 3D.

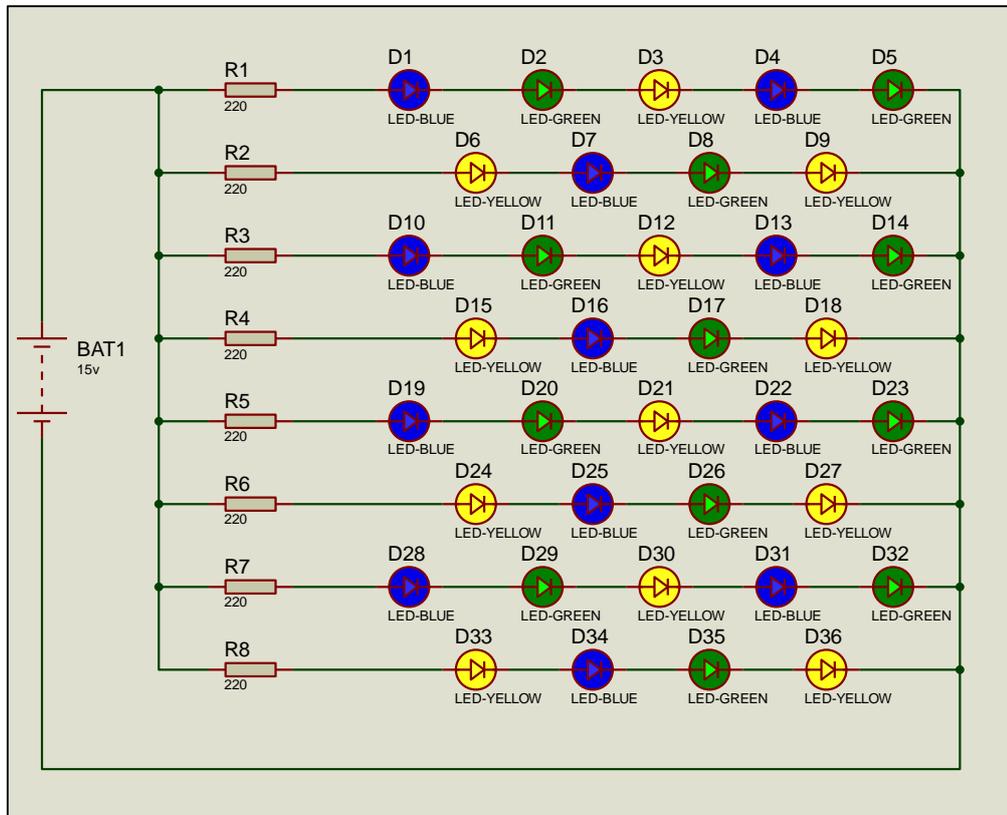


Fuente: Autores

## RESULTADOS

En la figura 55, se puede ver la distribución de los led que se utilizaron para el proyecto.

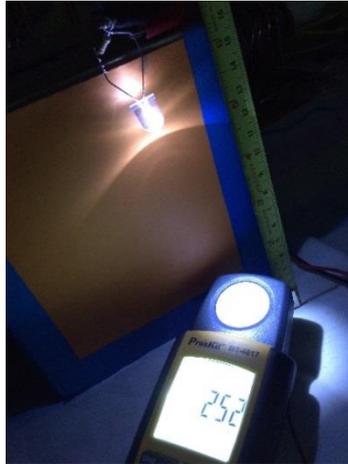
Figura 55 Distribución de los leds.



Fuente: Autores

- Se realiza pruebas de LED de 100mm que tiene un ángulo de visión de 20°, en este se tiene variaciones por color, como se ve en la figura 56, con un LED blanco se llega a los 252 luxes a una altura aproximada de 10cm.

Figura 56 Medición de luxes del led de color blanco con el luxómetro a 10cm.



Fuente: Autores

La Figura 57, alcanza 39 luxes con un color rojo de LED de diámetro 10mm a la misma altura.

Figura 57 Medición de luxes del led de color rojo con el luxómetro a 10cm.



Fuente: Autores

El color azul destaca con una cantidad de luxes de 399, como se ve en la figura 58.

Figura 58 Medición de luxes del led azul con el luxómetro a 10cm.



Fuente: Autores

Como se ve en la Figura 59, el color verde llega a los 255 luxes

Figura 59 Medición de luxes del led verde con el luxómetro a 10cm.



Fuente: Autores

Como se ve en la Figura 60, en la simulación se ve que el radio de la zona de cobertura útil será de 1,586cm, siendo el diámetro de 3,173cm.

Figura 60 Resultados a partir de los parámetros de entrada.

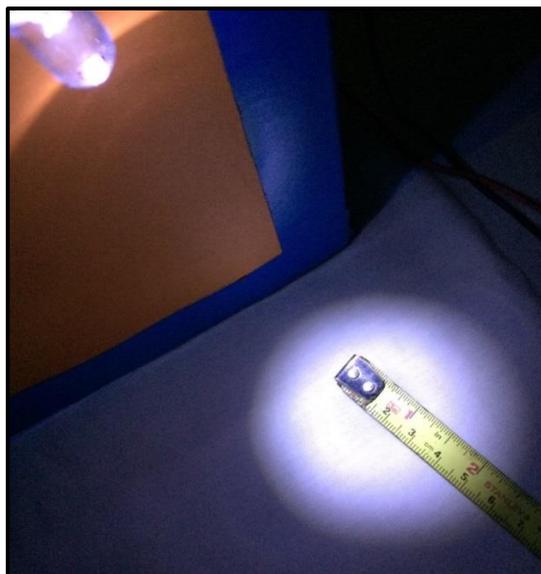
20	Angulo LED (grados)
250	Iluminancia necesaria (Luxes)
1932,98	Lumenes por LED
1,58694	Radio de zona de cobertura útil

Fuente: Autores

En la Figura 61 y figura 62 se comprueba que el diámetro de la zona de cobertura útil calculado, es aproximadamente el mismo que en el campo.

Claramente se ve en la figura 61 que en los bordes la huella de iluminación se difumina, perdiendo cada vez más la iluminancia por superficie; por lo que, en los bordes no se tendrá una comunicación estable.

Figura 61 Medición del Radio de cobertura.



Fuente: Autores

Como se ve en la figura 62, el panel frontal del modelado en 3D de una mina; se diseña una maqueta de la simulación mostrada en la figura 63, cumpliendo así la teoría con la práctica.

Figura 62 Panel frontal en labVIEW del modelado matemático en 3D.



Fuente: Autores

Figura 63 Prototipo a escala de iluminación en una mina subterránea.



Fuente: Autores

El la figura 64, se observa de forma lateral el comportamiento de la iluminación LED en una mina

Figura 64 Vista de la iluminación lateral a escala de una mina.



Fuente: Autores

En la figura 65, se visualiza la maqueta desde otra perspectiva, la cual consta de 36 LEDS

Figura 65 Maqueta desde una perspectiva cónica



Fuente: Autores

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

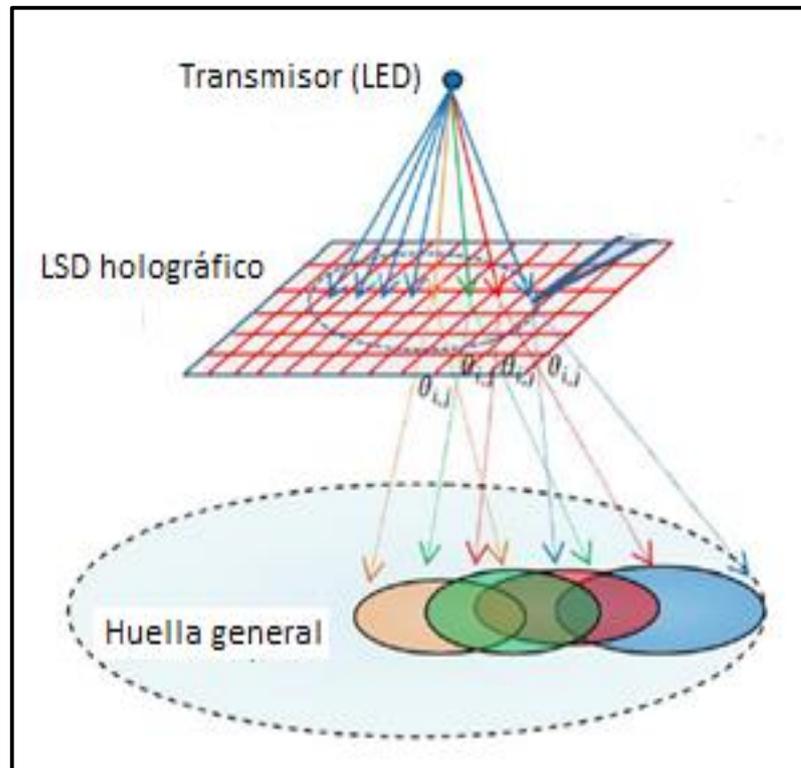
De los resultados obtenidos se puede concluir que:

- Se obtiene una mejor iluminación, se mejora el entorno de trabajo dentro de una mina teniendo en cuenta que no genera calor y se tiene bajo consumo de energía eléctrica.
- Al lograr una comunicación por luz visible disminuye tiempos de comunicación en la mina, como también se podría tener datos reales como: ubicación, estado del trabajador, avance del trabajo, etc.
- Debido a las condiciones de la mina los materiales a instalar deben ser de alta duración, para ubicaciones peligrosas, tolerantes a la humedad, compactas, de fácil mantenimiento.
- El modelado de canal VLC ayuda a encontrar la zona de cobertura útil de un emisor, que es a 3dB del punto de concentración más alto de la señal, sin embargo, para lograr una comunicación por luz visible es necesario delimitar la iluminancia sobre la superficie que deberá estar entre 200-1000 luxes.
- Cada celda óptica se define con un hexágono, puesto que es la zona de cobertura útil de cada lámpara LED, entonces, se tiene que realizar un análisis de geometría celular para alcanzar la máxima cobertura posible dentro de la mina.
- La distribución de cada lámpara tiene que ser exacta, para esto se debe conocer con exactitud el ángulo de visión del LED, radio de cobertura útil y dimensiones exactas de la mina.

## Recomendaciones

- Colocar bajo las lámparas LED un vidrio difusor holográfico (LSD Light shaping diffuser), extendiendo el ángulo de divergencia efectiva de un LED. Como se muestra en la figura 66.

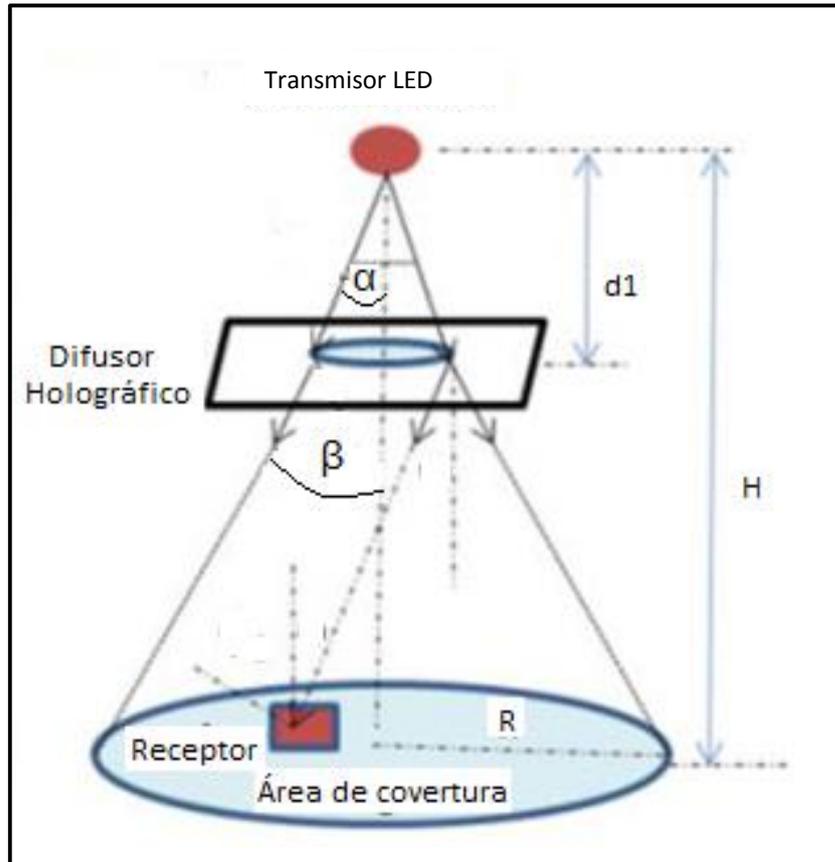
Figura 66 Divergencia de la luz.



Fuente: Northumbria Research Link. <http://nrl.northumbria.ac.uk>. [Consulta: 20 de Febrero de 2014].

- Como se ve en la figura 67, el ángulo de visión luego del difusor holográfico cambia, ampliando más el campo de visión de LED sin alterar la iluminancia sobre superficie que es para lograr la comunicación.

Figura 67 Cambio del ángulo de visión con el difusor.



Fuente: Northumbria Research Link. <http://nrl.northumbria.ac.uk>. [Consulta: 20 de Febrero de 2014].

- Tener precaución con el ángulo del LED, puesto que una pequeña variación de este altera todo el estudio y la distribución de cada uno.

## BIBLIOGRAFÍA

- AMSTRONG, J., & RAJI, M. (s.f.). MINAS Y CANTERAS. Obtenido de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/74.pdf>
- ANDRADE GALLARDO, S. (2008). GUIA METODOLÓGICA PARA PROYECTOS DE VENTILACION DE MINAS. Obtenido de <http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/seguridad/200812GuiaVentilacionMinas.pdf>
- ARCOM. (2010). Obtenido de <http://www.cne.org.ec>
- CENNELSA. (2015). Obtenido de <http://www.centelsa.com.co/archivos/2f2bc6e2.pdf>
- CODELCOEDUCA. (2012). Obtenido de [https://www.codelcoeduca.cl/procesos\\_productivos/tecnicos\\_exploracion\\_reconocimiento\\_minerales.asp](https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_exploracion_reconocimiento_minerales.asp)
- CORDOBA, C., & MOLINA, J. (2011). CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE VENTILACIÓN EN MINERÍA SUBTERRANEA. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n29/n29a06.pdf>
- DÍAZ, MARCELO RAÚL. (2009). SALUD Y SEGURIDAD EN TRABAJOS DE MINERÍA. Obtenido de [http://www.oitcinterfor.org/sites/default/files/salud\\_seg\\_mineria.pdf](http://www.oitcinterfor.org/sites/default/files/salud_seg_mineria.pdf)
- DMR REPUBLIC SOUTH AFRICA. (2011). Obtenido de <http://www.dmr.gov.za/health-statistics.html>
- GEOTECNIA AMBIENTAL. (s.f.). Obtenido de <http://www.geotecniaambiental.cl>
- GHASSEMLOOY, Z., POPOOLA, W., & RAJBHANDARI, S. (2013). Optical Wireless Communications. System and Channel Modelling with MATLAB. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- LASZLO, C. (s.f.). LASZLO. Obtenido de [http://www.laszlo.com.ar/Items/ManLumi/issue/Manual\\_de\\_Luminotecnica.PDF](http://www.laszlo.com.ar/Items/ManLumi/issue/Manual_de_Luminotecnica.PDF)

LLUMOR. (2010). Obtenido de <http://www.llumor.es/info-led/equivalencia-de-lumen-a-lux>

LOPERA BEDOYA, J. (2009). DISEÑO DE UNA ILUMINACIÓN EFICIENTE APLICADA A UNA CENTRAL DE GENERACION HIDROELECTRICA GUADALUPE III. Obtenido de [http://www.bdigital.unal.edu.co/851/1/1020394042\\_2009.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/851/1/1020394042_2009.pdf)

MINAS, M. D. (2007). EL ABC DE LA MINERIA EN EL ECUADOR. Obtenido de [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fobservatorio.cdes.org.ec%2Fdocumentos%2Fdoc\\_download%2F1008-abc-de-la-mineria&ei=XO4TVcnIKMagNuT\\_gcAC&usg=AFQjCNEKsYuljAkLHFO\\_QCP-G2\\_MBX16FQ&sig2](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fobservatorio.cdes.org.ec%2Fdocumentos%2Fdoc_download%2F1008-abc-de-la-mineria&ei=XO4TVcnIKMagNuT_gcAC&usg=AFQjCNEKsYuljAkLHFO_QCP-G2_MBX16FQ&sig2)

MINMINAS. (2010). Obtenido de <http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/archivosSoporteRevistas/7853.pdf>

PUBLIC HEALTH REPORTS. (2011). Obtenido de <http://www.publichealthreports.org/issueopen.cfm?articleID=2609>

RABANOS, J. M. (2008). Transmisión por Radio. Madrid: Editorial Universitaria Ramón Areces.

SACHER, W., & ACOSTA, A. (2012). LA MINERIA A GRAN ESCALA EN EL ECUADOR. Obtenido de <http://www.rosalux.org.ec/attachments/article/498/mineria-ec.pdf>

SEGURIDAD MINERA. (2012). Obtenido de <http://revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/iluminacion-en-operaciones-mineras-exige-seguridad/>

SERNAGEOMIN. (2013). Obtenido de [http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/estadisticas/accidentabilidad\\_Minera/AccidentesFatales2013.pdf](http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/estadisticas/accidentabilidad_Minera/AccidentesFatales2013.pdf)

SIMCO. (2009). Obtenido de

[http://www.simco.gov.co/simco/documentos/Seg\\_Minera/Cables\\_Instalaciones\\_Electricas0001.pdf](http://www.simco.gov.co/simco/documentos/Seg_Minera/Cables_Instalaciones_Electricas0001.pdf)

UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO. (2002). Obtenido de

[http://www.ehu.es/alfredomartinezargote/tema\\_4\\_archivos/luminotecnia/06%20Principios%20fundamentales.pdf](http://www.ehu.es/alfredomartinezargote/tema_4_archivos/luminotecnia/06%20Principios%20fundamentales.pdf)

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID. (2007). Obtenido de

[http://oa.upm.es/21841/1/071101\\_L3\\_labores\\_subterranas\\_2.pdf](http://oa.upm.es/21841/1/071101_L3_labores_subterranas_2.pdf)

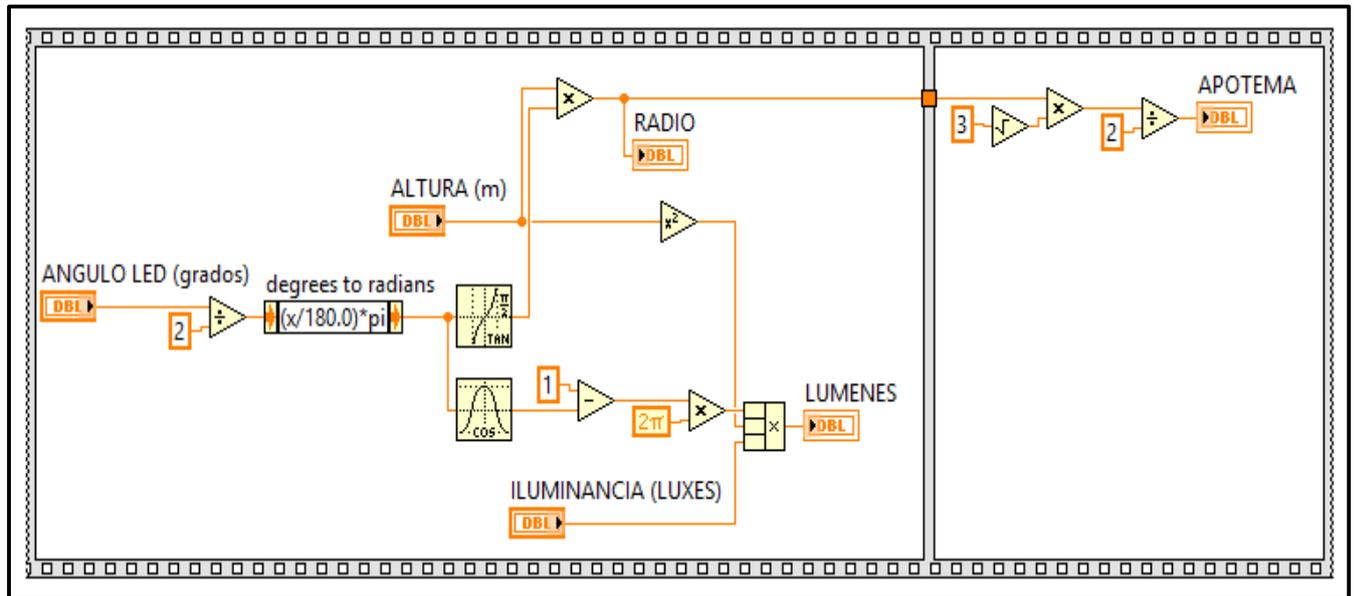
UNIVERSIDAD TECNICA NACIONAL DE CÓRDOVA. (2005). Obtenido de

[http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/InstalacionesIndustriales/Art\\_Interes/ConBasLum.pdf](http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/InstalacionesIndustriales/Art_Interes/ConBasLum.pdf)

## ANEXOS

### Anexo 1.

Se crea un subVI con el desarrollo de la ecuación 4.7.

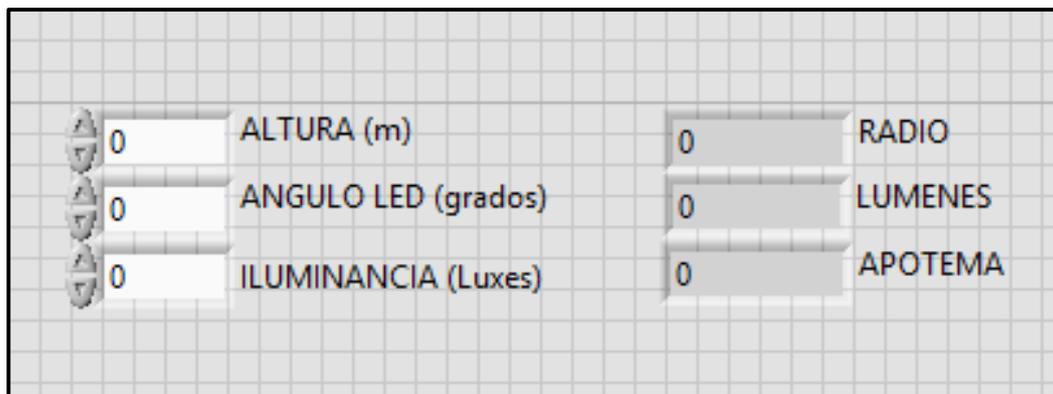


LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench), trabaja en radianes para eso se realiza toda la conversión de grados a radianes.

Una vez calculado el radio, se calculara también la apotema tomando la mitad del valor de la ec. 3.14

### Anexo 2.

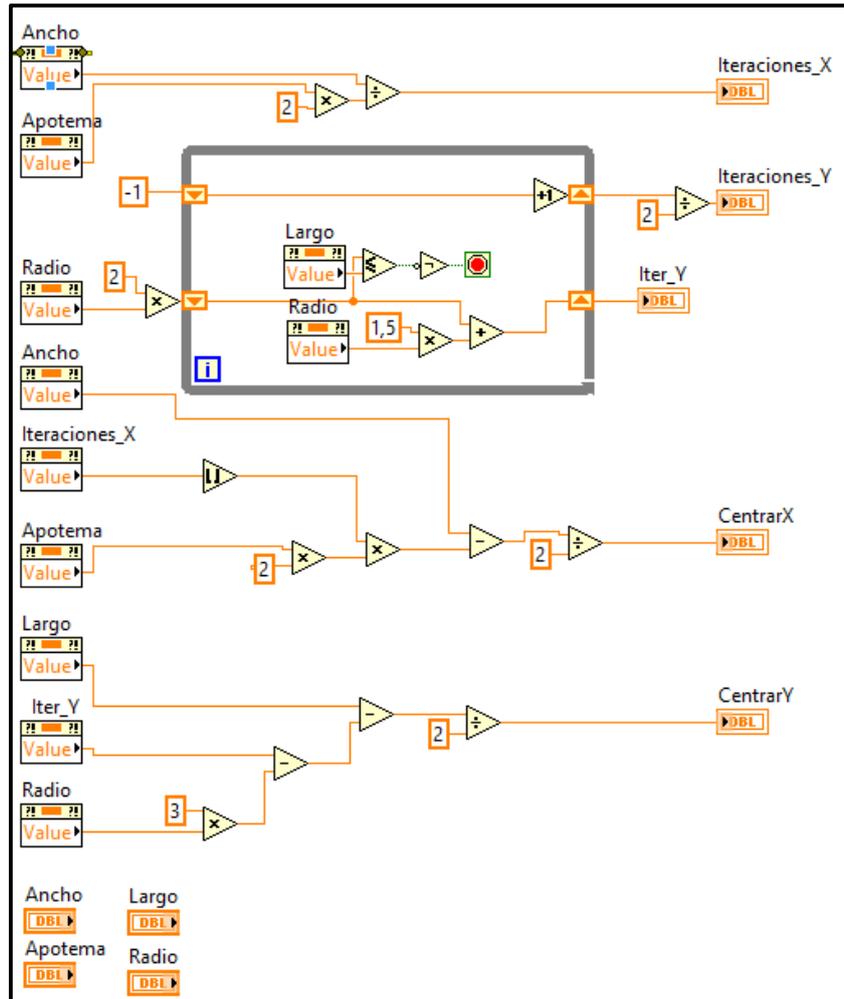
Datos de ingreso; es el ángulo de visión del LED, altura a la que se va a instalar, la iluminancia que se necesita en la superficie a iluminar y los datos de salida son: radio, apotema y lúmenes que debe tener la lámpara LED.



**Anexo 3**

Para encontrar el número de iteraciones en X (ancho), se divide el ancho de la mina para dos veces la apotema.

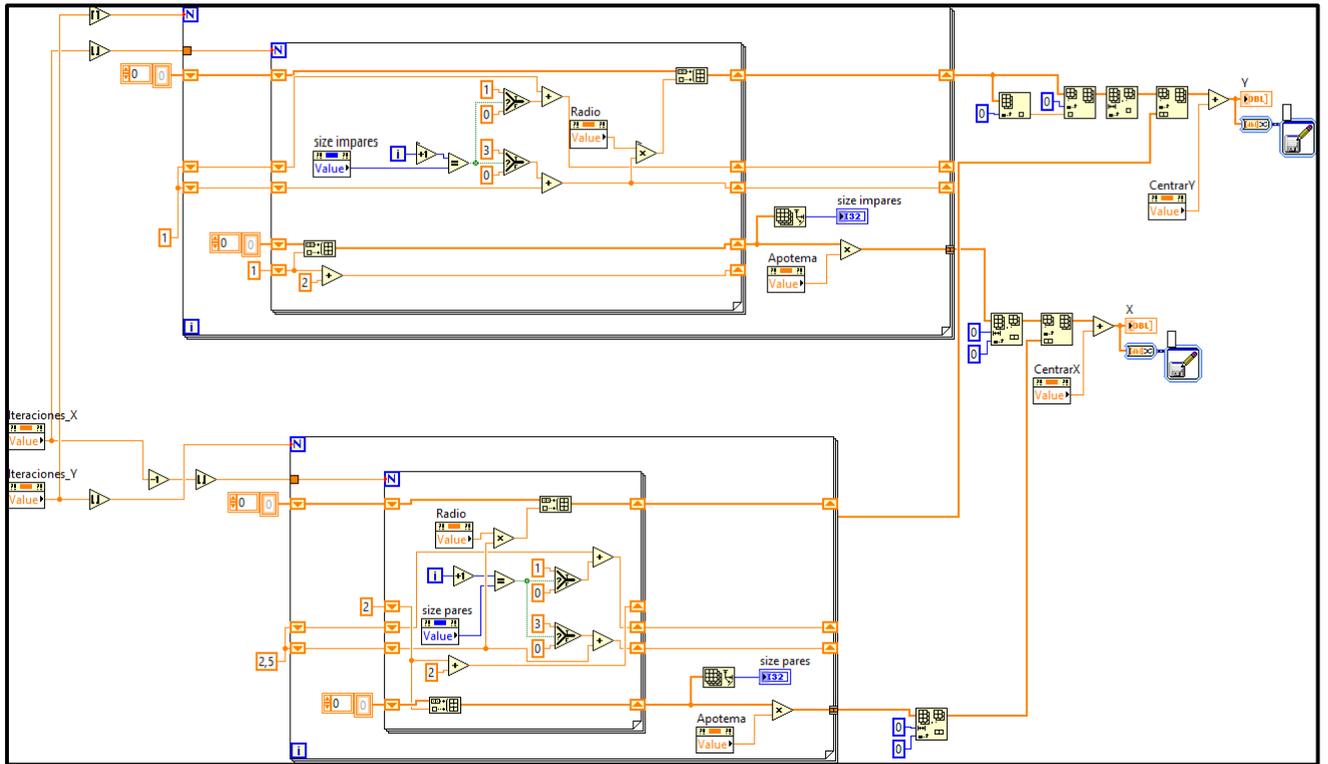
El número de iteraciones en Y (largo) se compara con las sumatoria del radio más 1,5 hasta que sea menor o igual al largo de la mina.



**Anexo 4.**

Como las coordenadas x,y no están centradas con respecto a la mina, se calcula el excedente tanto a lo largo como lo ancho para que sea repartido en la zonas libres; entonces, se tiene “CentrarX”, “CentrarY”, generando arreglos para guardar los valores generados, comparando y controlando el número de iteraciones en los ejes x,y.

Las coordenadas generadas se guardan en archivos .xls



**Anexo 5.**

Panel frontal, se crea un subVI con entradas de largo, ancho, radio y apotema. Dando como salida las coordenadas  $x$ ,  $y$  de cada lámpara LED.

