



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**MONTAJE DE LA PLANTA AUTOMATIZADA DE AGREGADOS,
MINA MARLIN, SAN MIGUEL IXTAHUACÁN, SAN MARCOS**

Abimael Justiniano Orozco y Orozco

Asesorado por el Ing. Natanael Jonathan Requena

Guatemala, julio de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MONTAJE DE LA PLANTA DE AUTOMATIZADA DE AGREGADOS, MINA
MARLIN, SAN MIGUEL IXTAHUCÁN, SAN MARCOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ABIMAEEL JUSTINIANO OROZCO Y OROZCO

ASESORADO POR EL ING. NATANAEL JONATHAN REQUENA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, JULIO DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Marvin Hernández
EXAMINADOR	Ing. Carlos Quijibix
EXAMINADOR	Ing. Armando Rivera
SECRETARIO	Inga. Marcia Ivonne Veliz Vargas

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por bendecirme cada día de mi vida.
Mis padres	Justiniano Lorenzo Orozco Juárez y Antonia Cecilia Orozco de Orozco, por el amor, cariño y buen ejemplo que me brindaron.
Mis hermanos	Rosmery, Shený, Roosbelt y Osiel, por su apoyo incondicional en todo momento.
Mis abuelos	Dolores Juárez, Bartolo Orozco, Juan Orozco; flores sobre sus tumbas, y Julia Monzón con mucho cariño.
Mi esposa	Por el amor que me ha brindado.
Mi hijo	Por darme la ilusión y fuerzas de seguir adelante en los momentos más difíciles.
Amigos	Gracias por su apoyo.

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

MONTAJE DE LA PLANTA AUTOMATIZADA DE AGREGADOS, MINA MARLIN, SAN MIGUEL IXTAHUACÁN, SAN MARCOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha julio de 2006.



Abimael Justiniano Orozco y Orozco

Guatemala, 10 Abril 2007

Señor Coordinador del área de potencia
Escuela Mecánica Eléctrica
Facultad de ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

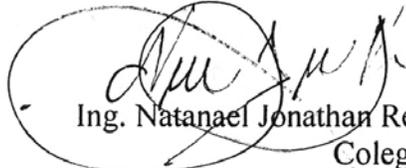
Muy atentamente lo saludo

Por este medio me permito informarle que he revidado el trabajo de graduación del estudiante ABIMAEEL JUSTINIANO OROZCO Y OROZCO, con carné 1998-30299, titulado: **MONTAJE DE LA PLANTA AUTOMATIZADA DE AGREGADOS, MINA MARLIN SAN MIGUEL IXTAHUACAN SAN MARCOS.**

Considero que sen han cumplido las metas propuestas al inicio del trabajo, por lo que recomiendo se apruebe en el entendido que el autor y el suscrito son responsables de lo tratado y de las conclusiones del mismo.

Atentamente,

Natanael J. Requena Gómez
INGENIERO ELECTRICISTA
COLEGIADO: 6240

V. B. 
Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez
Colegiado No. 6240
ASESOR



Ing. Renato Escobedo
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Presente

Guatemala, 30 de mayo de 2007
Ref. EPS. C. 322.05.07

Estimado Ingeniero Escobedo.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"MONTAJE DE LA PLANTA AUTOMATIZADA DE AGREGADOS, MINA MARLIN SAN MIGUEL IXTAHUACÁN, SAN MARCOS"**.

Este trabajo lo desarrolló el estudiante universitario, **ABIMAEEL JUSTINIANO OROZCO Y OROZCO**, quien fue asesorado por el Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez y supervisado por el Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del asesor y supervisor, en mi calidad de director apruebo su contenido; solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Ángel Roberto Sic García
Director Unidad de EPS



ARSG/jm



Guatemala, 30 de mayo de 2007
Ref. EPS. C. 322.05.07

Ing. Angel Roberto Sic García
Director Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Sic García.

Por este medio atentamente le informo que como Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) del estudiante universitario de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, **ABIMAEEL JUSTINIANO OROZCO Y OROZCO**, procedí a revisar el informe final de la práctica de EPS, titulado **"MONTAJE DE LA PLANTA AUTOMATIZADA DE AGREGADOS, MINA MARLIN SAN MIGUEL IXTAHUACÁN, SAN MARCOS"**.

Cabe mencionar que las soluciones planteadas en este trabajo, constituyen un valioso aporte de nuestra Universidad.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
Supervisor de EPS

Área de Ingeniería Mecánica – Eléctrica



KIER/jm



REF. EIME 20. 2011.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; ABIMAEEL JUSTINIANO OROZCO Y OROZCO titulado: MONTAJE DE LA PLANTA AUTOMATIZADA DE AGREGADOS MINA MARLIN SAN MIGUEL IXTAHUACÁN SAN MARCOS, procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

GUATEMALA, 22 DE FEBRERO 2,011.

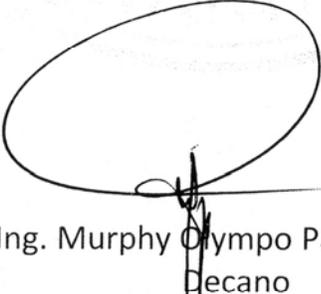




DTG. 220.2011

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **MONTAJE DE LA PLANTA AUTOMATIZADA DE AGREGADOS, MINA MARLIN, SAN MIGUEL IXTAHUACÁN, SAN MARCOS**, presentado por el estudiante universitario **Abimael Justiniano Orozco y Orozco**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 30 de junio de 2011.



/gdech

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	IX
OBJETIVOS	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. INFORMACIÓN GENERAL DE LA EMPRESA	
1.1. Antecedentes de la empresa.....	1
1.1.1. Reseña histórica.....	1
1.1.2. Área de explotación.....	1
1.1.3. Servicios que presta	2
1.2. Información general del área.....	2
1.2.1. Localización del área.....	2
1.2.2. Topografía del área	2
1.2.3. Componente Climatológico.....	3
1.2.4. Caracterización del municipio de San Miguel Ixtahuacán	4
1.3. Análisis de contaminación provocada por este tipo de proyectos	4
1.3.1. Fase de construcción.....	4
1.3.2. Emisiones a la atmósfera	5
1.3.3. Contaminación electromagnética.....	6
1.3.4. Contaminación por generación de calor.....	8

2.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO E INFORMACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO	
2.1.	Descripción del proceso planta de agregados	9
2.2.	Elementos que conforman la planta de mezclado.....	11
2.2.1.	Caja de mezclado	11
2.2.2.	Bandas transportadoras	11
2.2.3.	Tornillo alimentador de cemento	11
2.2.4.	Vibradores de tolva de alimentación.....	12
2.2.5.	Bomba de agua.....	12
2.3.	Montaje cable eléctrico	13
2.3.1.	Cableado eléctrico trifásico	13
2.3.2.	Control y PLC.....	14
3.	CÁLCULO DE CONDUCTORES E INTERRUPTORES TERMOMAGNÉTICOS	
3.1.	Conceptos y normas aplicables a instalaciones eléctricas.....	17
3.1.1.	Concepto de instalación eléctrica.....	17
3.1.2.	Normas aplicables a las instalaciones eléctricas	17
3.1.2.1.	<i>National Electrical Code NEC</i>	18
3.1.2.2.	<i>National Electrical Manufactures Association NEMA</i>	18
3.1.2.3.	<i>American National Standards Institute ANSI</i>	19
3.2.	Cálculo de calibre de conductor e interruptores termomagnéticos a motores	19
3.3.	Cálculo de calibre de conductor principal.....	21
3.4.	Cálculo de interruptor principal	22
3.5.	Cálculo de caída de tensión en la línea de 4.16 kV de acuerdo a la carga instalada.....	23

3.5.1.	Cálculo de la distancia media geométrica de la línea.....	24
3.5.2.	Cálculo de caída de tensión.....	27
3.6.	Cálculo de la corriente de cortocircuito.....	28
3.6.1.	Corto circuito	28
3.6.2.	Corto circuito en motores de inducción	30
3.6.3.	Tipos de falla	32
3.6.4.	Cálculo de corriente de corto circuito por el método de valores por unidad	34
4.	CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE TIERRA FÍSICA	
4.1.	Sistema de puesta a tierra	41
4.1.1.	Propósito de un sistema de puesta a tierra	41
4.1.2.	Criterios de seguridad.....	42
4.1.3.	Factores de diseño	42
4.2.	Construcción de pozo de tierra.....	44
4.2.1.	Ubicación y trazo	44
4.2.2.	Excavación de la zanja	44
4.2.3.	Manufactura de la malla de cobre y soldadura exotérmica	44
4.2.4.	Relleno para la malla	46
4.3.	Procedimiento	46
4.3.1.	Instalación de pozo a tierra común y de registro	46
4.3.2.	Medición de resistividad específica por método de Werner.....	47
4.4.	Cálculo de la resistencia de la red de tierra.....	49
5.	SINTONIZACIÓN DEL PID	
5.1.	Proceso.....	53

5.2. Descripción del comportamiento de las constantes del controlador	54
5.3. Sintonización del PID.....	57
CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de flujo planta de agregados	10
2.	Dibujo del cable utilizado	13
3.	Diagrama unifilar planta de agregados	25
4.	Circuito simple línea trifásica	26
5.	Diagrama de impedancia por unidad	36
6.	Esquema de instalación del cable para malla a tierra	45
7.	Conexión de telurómetro para medición del terreno	48
8.	Área del sistema de tierra	50
9.	Diagrama de secuencia del proceso de la planta de agregados	54
10.	Diagrama lazo de control	56
11.	Respuesta al escalón	58

TABLAS

I.	Estimación del ruido durante el montaje de estructuras	6
II.	Valores de exposición permisibles a campos eléctricos	7
III.	Elementos que conforman la planta de mezclado	12
IV.	Calibre de conductores y capacidad cable teck 90	14
V.	Factor para cálculo de interruptores termo magnéticos aplicado a los HP de los motores	20
VI.	Cálculo de conductores e interruptores termo magnéticos	20
VII.	Cálculo de conductor principal	22
VIII.	Cálculo de interruptor principal	23

IX.	Datos de la línea de transmisión 4.16KV	27
X.	Entradas y salidas digital/analógica del PLC	61

GLOSARIO

ANSI	<i>American National Standards Institute</i> : Instituto Nacional Americano de Estándares.
Baja tensión	Nivel de tensión igual o inferior a mil (1 000) Voltios.
EEGSA	Empresa Eléctrica de Guatemala S. A.
F.P.	Se define factor de potencia, de un circuito de corriente alterna, como la relación entre la potencia activa, P, y la potencia aparente, S.
Frecuencia	Es la frecuencia nominal del sistema eléctrico nacional con un valor de 60 HZ.
HP	Medida de potencia eléctrica <i>Horse Power</i> , caballos de fuerza.
Lixiviación	La solución de lixiviación con cianuro que disuelve el oro y la plata.
NA	Elemento de corte o seccionamiento normalmente Cerrado.
NEMA	<i>National Electrical Manufactures Association</i> : Instituto Nacional Estadounidense de estándares.

NC	Elemento de corte o seccionamiento normalmente abierto.
NEC	<i>National Electrical Code</i> : Código Nacional Eléctrico.
Ohm	Unidad e medida de resistencia.
Ph	Unidad de medida de acidez.
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> : Controlador Lógico Programable, diseñado para programar y controlar procesos secuenciales en tiempo real.
PU	El sistema por unidad pu de cualquier cantidad se define como la relación entre esta cantidad y la cantidad base y se expresa como un decimal.
S	La potencia compleja, cuya magnitud se conoce como potencia aparente de un circuito eléctrico de corriente alterna.
Sistema de tierra	Es un sistema de conductores, de los cuales uno de ellos o un punto de los mismos está efectivamente aterrizado, ya sea en forma sólida o a través de un dispositivo limitador de corrientes no interrumpibles.
VFD	Es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia

RESUMEN

La automatización industrial ha tomado un papel muy importante en los últimos tiempos, pudiendo mejorar la producción, bajar los costos y controlar tareas repetitivas y peligrosas; esto contribuye a la modernización y crecimiento de toda empresa, y del país, independientemente del producto a explotar.

Por estas razones la Mina Marlin, ubicada en San Miguel Ixtahuacán, San Marcos esta utilizando un sistema automatizado para proveer el concreto necesario para el relleno de la mina subterránea.

Con un sistema lógico programable se pueden obtener beneficios como: mayor facilidad para el mantenimiento y puesta en servicio, flexibilidad de configuración y programación, lo que permite adaptar fácilmente la automatización a los cambios del proceso dependiendo de la producción o la mezcla requerida para el relleno. El PLC (*Programmable Logic Controller*) por sus siglas en inglés o Controlador Lógico Programable utilizado, es el cerebro de toda la planta, controlará todos los equipos eléctricos y de instrumentación. También proporcionará un lazo cerrado necesario para la retroalimentación.

La planta automatizada de concreto también debe contar con un sistema de tierra estable basado en normas internacionales para asegurar la integridad de las persona y del equipo instalado, ya que en esta regiones del país se tiene constantemente descargas electro atmosféricas. Debido a que los suelos contienen diferentes componentes minerales y estos presentan cierto grado de oposición al paso de la corriente es necesario tomar medidas de resistividad del terreno para después proponer la malla adecuada.

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema eléctrico de una planta automatizada de concreto, para el relleno del túnel de la Mina Marlin, ubicada en San Miguel Ixtahuacán, San Marcos.

Específicos

1. Diseñar el sistema eléctrico de tal forma que sea confiable a través de cálculo de caída de tensión, cálculo de corto circuito, cálculo de calibre de conductores e interruptores termomagnéticos.
2. Diseñar el sistema de control del proceso de automatización de planta de concreto.
3. Calcular el sistema de tierra física de la planta de agregados, basándose en la normativa de la NFPA (*National Fire Protection Association*) y el IEEE (*institute of Electrical and Electronics Engineers*).
4. Calcular los conductores e interruptores termomagnéticos que se usaran en el montaje de la planta.

INTRODUCCIÓN

En las empresas industriales el tiempo es un factor muy importante y se requiere que los sistemas eléctricos estén diseñados para alimentar cargas en forma segura y confiable que proporcione continuidad de servicio. Aun tomando todas las precauciones de diseño las fallas ocurren por causas fuera del alcance, falta de mantenimiento, errores humanos o por factores externos. Para minimizar al máximo las fallas se diseñaron las protecciones, calibre de conductor y la malla de tierra, cuidadosamente para que la planta opere de forma segura y confiable tanto para las personas como para el equipo instalado.

Tomando como base que un sistema automatizado debe actuar como interface entre una computadora y el proceso de fabricación, debemos tener un sistema eléctrico estable con un sistema de puesta a tierra que proporcione protección para los equipos eléctricos y electrónicos.

El sistema de puesta a tierra se diseñó para controlar las corrientes indeseables y prevenir interferencias que puedan distorsionar las señales y/o dar mediciones erróneas.

El PLC instalado en la planta nos proporciona grandes ventajas, ya que con la programación podemos variar el proceso de acuerdo a los requerimientos de la mina. Se usa un protocolo o lenguaje *modbus* de 4 a 20 mA para comunicar los equipos instalados.

1. INFORMACIÓN GENERAL DE LA EMPRESA

1.1. Antecedentes de la empresa

1.1.1. Reseña histórica

Montana Exploradora de Guatemala S.A, subsidiaria de *Glamis Gold, Ltd.* con oficinas centrales en Estados Unidos de Norte América, que opera con propósitos comerciales como una corporación canadiense, ha iniciado la construcción y operación de una mina combinada a cielo abierto/subterránea de oro y plata e instalaciones de proceso utilizando técnicas de lixiviación en tanques con cianuro para separar el mineral. La Mina Marlin, está localizada en las montañas del occidente de Guatemala, aproximadamente a 275 km de la ciudad de Guatemala, en el departamento de San Marcos.

La Corporación Financiera Internacional (CFI), la subdivisión del Banco Mundial que proporciona fondos para proyectos del sector privado, ha proporcionado un préstamo por US\$ 45 millones para la construcción de las instalaciones de la Mina Marlin, cuya obra está localizada en una región remota y montañosa de roca volcánica, a unos 2 000 metros de altitud, el cual tiene épocas húmedas, secas muy marcadas y está habitada en su mayor parte por campesinos indígenas Mames (mayas).

1.1.2. Área de explotación

Por lo menos unas 32 hectáreas serán explotadas a cielo abierto con una profundidad aproximada de 250 m. y unos 70 m. de profundidad con trabajos

subterráneos. Se estima que generará aproximadamente 38 millones de toneladas de roca procesada.

La vida útil de la mina Marlin puede variar entre 10 y 13 años, dependiendo de los resultados futuros de la perforación y exploración que aún continúan en la región y del precio mundial del oro y la plata.

1.1.3. Servicios que presta

Montana Exploradora de Guatemala, S. A. subsidiaria de *Glamis Gold, Ltd.* se dedica a la producción y explotación de oro y plata, en minas combinadas a cielo abierto y subterránea. El material es llevado al patio de almacenamiento para después ser procesado en la planta con una técnica de lixiviación en tanques con cianuro.

1.2. Información general del área

1.2.1. Localización del área

El área del proyecto se encuentra localizada en el municipio de San Miguel Ixtahuacán del departamento de San Marcos, la zona se caracteriza por actividades humanas, habitación, agricultura y escasos tramos de bosques remanentes. El área de influencia estudiada constituye un polígono con una superficie de aproximadamente veintitrés kilómetros cuadrados (23 km²),

1.2.2. Topografía del área

El área del proyecto se encuentra en la zona denominada Cadena Volcánica de Guatemala, por lo cual presenta un relieve de ondulado a

escarpado. Por ser sus terrenos de una topografía cambiante, encontramos entre sus accidentes orográficos la Sierra Madre, las montañas Ixcujá, Tuichilibe y Xol; Los Cerros Armenia, Asajar, Bramadero, Caballo Blanco, Cayoc, Chijnán, Chuen Grande, Ixcuc, Ixcujá, Juas, Lamaca, La Mina, Loma del Berro, Tixic, Tuichej y Xunubá. Con un rango de alturas que oscila entre los 2 450 y 2 950 metros sobre el nivel del mar.

1.2.3. Componente climatológico

En Guatemala existen tres regiones climáticas principales:

Las llanuras tropicales húmedas del Litoral del Pacífico y la Costa del Atlántico, y el Petén (tierra caliente).

Los bosques del Altiplano - Sierra Madre (tierra fría).

La región entre las anteriores que va de 900 a 2 000 metros (tierra templada).

El análisis climatológico del presente estudio está basado en el análisis de los datos recabados por las Estaciones Meteorológicas del INSIVUMEH. El área del proyecto se encuentra en clima frío, dentro de la clasificación B'3b'Bi: semifrío con invierno benigno húmedo. San Miguel Ixtahuacán pertenece a los climas templados subhúmedos con inviernos benignos, con lluvias en verano, verano fresco, isotermal, con marcha de la temperatura tipo ganges.

La precipitación pluvial promedio anual es de 1 500 a 2 000 mm, distribuidos en los meses de mayo a octubre, con una evapotranspiración aproximada del 35%.

Se reportan temperaturas mínimas anuales de 11 °C y máximas de 22 °C con una temperatura media anual de 14 °C. También se reportan temperaturas de -3 °C en ocasiones de heladas severas. Los vientos predominantes en la zona tienen dirección N-S, en la época seca normalmente soplan en dirección N-S y en la época de lluvias en dirección S-N.

1.2.4. Caracterización del municipio de San Miguel Ixtahuacán

San Miguel Ixtahuacán es un municipio del departamento de San Marcos. Nombre geográfico oficial: San Miguel Ixtahuacán. Colinda al Norte con Concepción Tutuapa; al Este con Santa Bárbara; al Sur con Tejutla y Comitancillo; al Oeste con Concepción Tutuapa.

La cabecera de San Miguel Ixtahuacán, esta al Sur del río CANCELÁ y al Oeste con del río Agua Caliente, Sierra Madre. Colinda al Norte con Concepción Tutuapa, San Gaspar Ixchil y San Ildefonso Ixtahuacán, al Este con Santa Bárbara, al Sur con Sipacapa, Tejutla, Comitancillo y al Oeste con Concepción Tutuapa. El acceso principal es la que conduce de la cabecera Municipal hacia la cabecera departamental de San Marcos a una distancia de 64 km, asfaltados. También cuenta con caminos, que unen poblados y propiedades rurales entre sí y con los municipios vecinos. Entre los indígenas mames, la cabecera ha sido conocida con su nombre aborigen *Saquejoj*.

1.3. Análisis de contaminación provocada por este tipo de proyectos

1.3.1. Fase de construcción

Durante la fase de construcción del proyecto, se prevé que las únicas posibles fuentes de contaminación, fueron las relacionadas con los trabajos de

movilización de tierra, actividad que generó la acumulación de materiales inorgánicos (suelo), el cual en su mayoría utilizado en el relleno, de soporte de la estructura y el resto retirado inmediatamente por los camiones utilizados para las tareas relativas a la instalación de la planta.

Otra posible fuente de contaminación fueron los residuos de los cables de conducción, y restos de materiales utilizados en el montaje mecánico los cuales también fueron retirados en forma inmediata.

Durante la fase de construcción se previó que las únicas posibles fuentes de contaminación, fueron las relacionadas con los trabajos de limpieza del terreno, tales como trabajos de limpieza de maleza, retiro de basura y el traslado de los residuos sólidos inorgánicos y algunos orgánicos, generados por las actividades inherentes a la misma, y algunos derrames de líquidos.

1.3.2. Emisiones a la atmósfera

Durante la construcción del proyecto, no se tuvieron contempladas emisiones mayores a la atmósfera, únicamente que existan emisiones de ruido durante la fase de construcción. Es de hacer mención que debido a lo duro del terreno, la mayoría de las excavaciones se realizaron con maquinaria. Para la construcción de la planta se evitó que existieran emisiones de polvo durante la fase de excavación y movimiento de tierras durante la conformación del terreno y durante la preparación de los productos de concreto, pero éstas fueron de corta duración y muy localizadas, que no afectaron el entorno.

El ruido, durante las operaciones de montaje, producido por la maquinaria o herramientas utilizadas, no provocó índices de ruido mayores a lo normado por la NOMS1 (85 dB), tampoco incremento el ruido existente, ya que

no se utilizó por períodos largos de tiempo. En el caso de las excavaciones manuales, el ruido fue inapreciable.

Tabla I. **Estimación del ruido durante el montaje de estructuras**

FUENTE	DISTANCIA	dB
Mezcladora	5 m	85
Mezcladora	20 m	75
Mezcladora	50 m	60
Martilleo en concreto	3 m	65
Martilleo en concreto	20 m	60
Martilleo en concreto	50 m	60
Actividades con grúa	10 m	60
Actividades con grúa	20 m	55
Actividades con grúa	50 m	55

Fuente: informe impacto ambiental Montana Exploradora de Guatemala 2006.

Esto fue evidenciado con las mediciones de ruido llevadas a cabo durante las jornadas de trabajo (entre 8:30 y 12:00 horas) en trabajos similares con este tipo de maquinaria.

1.3.3. Contaminación electromagnética

En cualquier parte que exista una corriente eléctrica, existirá también un campo magnético. Cuando las cargas eléctricas no se mueven, las fuerzas de atracción y repulsión crean “campos eléctricos” cuya intensidad depende del voltaje del circuito; cuando las cargas se mueven crean “campos magnéticos”

El campo magnético depende del movimiento de las cargas y su intensidad es proporcional a la corriente que hay en el circuito.

Tabla II. **Valores de exposición permisibles a campos eléctricos**

Trabajadores	Campo eléctrico	Campo magnético
Día completo de trabajo	10 kV/m	500 μ T
Exposiciones cortas (2 horas)	30 kV/m	5 000 μ T
Exposición de extremidades	----	25 000 μ T
Público en general		
Exposiciones cortas	10 kV/m	1 000 μ T
Hasta 24 horas/día	5 kV/m	1 000 μ T

Fuente: informe impacto ambiental Montana Exploradora de Guatemala, 2006.

En Guatemala, la corriente alterna tiene una frecuencia de sesenta *Hertz* (60 Hz), por lo que el sistema de energía eléctrica genera también campos magnéticos y eléctricos de sesenta *Hertz* (60 Hz), la cual es considerada como una “frecuencia extremadamente baja”.

1.3.4 Contaminación por generación de calor

En términos generales, se considera que las temperaturas por debajo de los treinta y dos punto ocho grados centígrados (32.8 °C) son adecuadas para realizar actividades laborales y de habitación.

Temperaturas superiores a los treinta y dos punto ocho grados centígrados (32.8 °C) pueden hacer dificultoso el trabajo y hasta ser intolerables, llegando a causar sudoración de hasta tres punto cinco (3.5) litros por hora, provocando cuadros clínicos que varían desde leve deshidratación, pasando por fatiga y por calor.

Cuando una planta de este tipo está en operación, el equipo que genera calor en su funcionamiento son los motores y el transformador. Las temperaturas que generan estos equipos son del orden de los veinticinco grados centígrados (25°C), y mientras se aleja del equipo, la radiación calorífica se torna imperceptible y se detectan las condiciones ambientales naturales. Esto se debe a los sistemas aislantes y de ventilación propios de los equipos.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO E INFORMACIÓN DEL SISTEMAL ELÉCTRICO

2.1. Descripción del proceso planta de agregados

La planta fue designada para producir material agregado para la mina Marlin. Esta mina es una combinación de subterráneo y cielo abierto localizada en el occidente del país. El material agregado consiste en agregar material selecto, cemento y agua para producir el *batch* de diferente tamaño y proporción.

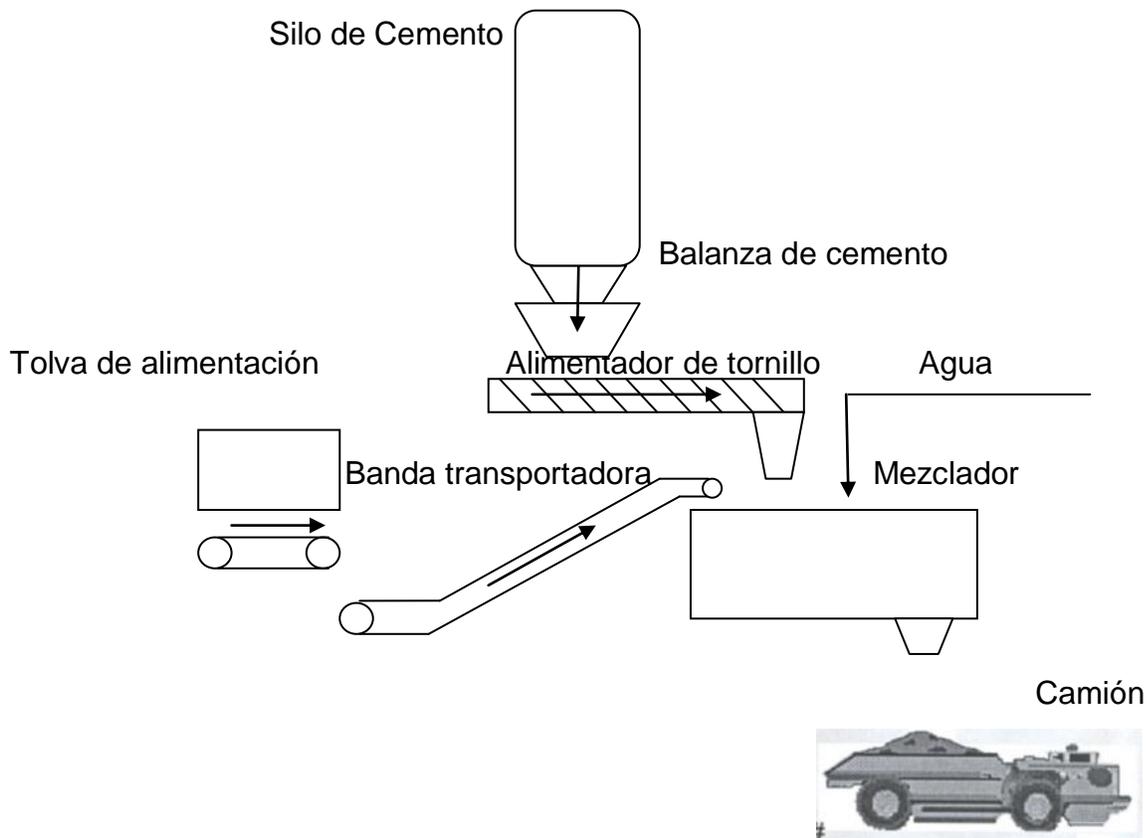
La planta de agregados se construirá en el área del portal del túnel de la mina subterránea y mover el material preparado con camiones para realizar el relleno de las áreas o frentes de trabajo que ya no se explotarán y que es necesario por la construcción del túnel rellenar.

El proceso inicia con la programación de las variables agua, cemento, material selecto. De acuerdo a la mezcla que necesita el usuario y a la producción que se necesita para un día específico.

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo de la planta. El proceso inicia cuando el cargador llena la tolva de alimentación, se arrancan las bandas transportadoras y el material selecto va hacia el mezclador, al mismo tiempo el alimentador de tonillo dosifica cemento al mezclador gobernado por un variador de frecuencia que mantiene la alimentación de acuerdo al ajuste programado

anteriormente en el PLC, luego se adiciona agua al proceso y se mezcla a través de dos motores que mueven los agitadores del mezclador.

Figura 1. **Diagrama de flujo planta de agregados**



Fuente: diagrama de flujo planta de agregados.

Cuando se obtiene la mezcla de acuerdo a la programación del operador de la planta, un camión de acarreo se posiciona bajo el mezclador y recibe el material para ser transportado al interior del túnel.

La planta fue diseñada para producir 100 mts³ de material durante un día de operación, a continuación se describen los equipos que conforman la planta de concreto.

2.2. Elementos que conforman la planta de mezclado

2.2.1. Caja de mezclado

Los elementos más importantes que conforman la planta de mezclado son los motores grandes, de 40 HP y son los encargados de mover el mezclador en la planta. Estos son motores de inducción y cada uno cuenta con su respectivo arrancador.

2.2.2. Bandas transportadoras

El motor que mueve la banda para la alimentación es de 25 HP. Es necesario tener un motor grande para alimentación porque en este punto descargan los camiones el material que se agrega para producir la mezcla. Luego debe ser transportado por la banda No. 1 que utiliza un motor de 15 HP y esta llega hasta la caja de mezclado como lo indica la figura 1. Esta banda cuenta con una balanza de banda transportadora y mide la cantidad de toneladas por hora de material que pasa en ese momento por la banda y entra a la caja mezcladora.

2.2.3. Tornillo alimentador de cemento

El tornillo alimentador de cemento utiliza un motor de 5 HP gobernado por un variador, para conseguir la mezcla requerida es necesario variar la velocidad del tornillo y para que el mismo no se tape con el flujo de cemento.

Este tornillo alimentador cuenta un medidor de peso que utiliza celdas de carga para medir la cantidad de cemento que entra a la caja mezcladora.

2.2.4. Vibradores de tolva de alimentación

Los motores de la tolva de alimentación son de 1 HP y son los encargados de hacer vibrar la tolva para que el material fluya constantemente por el transportador de alimentación.

Tabla III. **Elementos que conforman la planta de mezclado**

No.	Descripción
1	M1 = Mezclador 1
2	M2 = Mezclador 2
3	M3 = Motor banda alimentación
4	M4 = Motor banda transportadora
5	M5 = Alimentador de cemento VFD
6	M6 = Motor vibrador 1
7	M7 = Motor vibrador 2
8	M8 = Bomba de agua
9	T1 = Transformador
10	Tolva alimentación de material
11	Transportador alimentador
12	Transportador No. 1
13	Balanza de banda transportadora No. 1
14	Colector de polvo
15	Silo de cemento
16	Balanza de cemento
17	Alimentador de cemento
18	Tanque de agua
19	Flujo metro
20	Mezclador
21	CCM
22	PLC

Fuente: *Mechanical Manual, Marlin Project* Montana Exploradora de Guatemala, S. A.

2.2.5. Bomba de agua

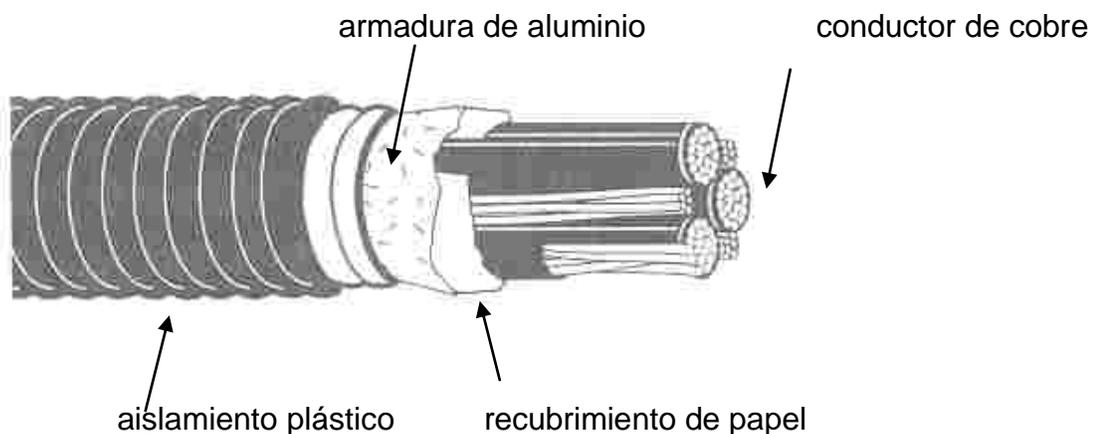
La bomba de agua tiene un motor de 7.5 HP y bombea directamente agua a la caja mezcladora. La tubería de agua cuenta con un medidor de flujo magnético y envía la señal de cantidad de agua a la sala de control para controlar la mezcla. La tabla III muestra los equipos eléctricos que fueron listados en campo y que le daremos un número correlativo para este trabajo.

2.3. Montaje de cable eléctrico

2.3.1. Cableado eléctrico trifásico

El cableado trifásico correspondiente a cada motor y alimentación principal fue realizado con cable Teck 600 V 90°C, que cuenta con aislamiento plástico, una armadura de aluminio, diseñado para circuitos de potencia en plantas industriales localizadas a intemperie. En la figura 2 se puede observar el aislamiento del cual se compone el cable.

Figura 2. Dibujo del cable utilizado



Fuente: catálogo Anixter inc 1999, página 2-17.

Todo el cableado se montó sobre bandeja eléctrica porta-cable por ser rápida en la instalación, segura, económica y de fácil montaje, favoreciendo el mantenimiento y ampliaciones futuras.

La tabla IV fue tomada del catálogo de anixter página 2-17 y muestra las capacidades en amperios de cada calibre de conductor AWG y muestra las características de aislamiento del cable teck 90 utilizado para la instalación y distribución de energía eléctrica en la planta de mezclado.

Tabla IV. **Calibre de conductores y amperajes cable teck 90**

Anixter Number	Cond. Size	No. of Strands	Ground Wire Size	Insul. Thick. IN	Armor Thick. IN	Overall Jacket Thick. IN	Nominal Diameter Over		Approx Wt. Lbs. 1000 Ft.	Amps Per Cond.
	AWG/ kcmil		AWG				Armor	Jacket		
							IN	IN		
7RA-1403	14	7	1#14*	.030	.027	.050	0.68	0.79	259	25**
7RA-1203	12	7	1#12*	.030	.027	.050	0.68	0.79	276	30**
7RA-1003	10	7	1#12*	.030	.027	.050	0.71	0.82	368	40**
7R-0803-3G	8	7	3#14	.045	.027	.050	0.74	0.85	428	55
7R-0603-3G	6	7	3#12	.045	.027	.050	0.85	0.96	610	75
7R-0403-3G	4	7	3#12	.045	.027	.050	0.97	1.09	814	95
7R-0203-3G	2	7	3#10	.045	.031	.050	1.14	1.26	1157	130
7R-1013-3G	1/0	19	3#10	.055	.035	.050	1.42	1.54	1709	170
7R-2023-3G	2/0	19	3#10	.055	.035	.050	1.55	1.69	2014	195
7R-4043-3G	4/0	19	3#8	.055	.039	.060	1.82	1.96	2954	260
7R-2503-3G	250	37	3#8	.065	.043	.060	1.99	2.14	3395	290
7R-3503-3G	350	37	3#6	.065	.047	.060	2.31	2.46	4916	350
7R-5003-3G	500	37	3#6	.065	.051	.075	2.66	2.84	6461	430

* 14, 12 & 10 AWG have 1 grounding conductor to facilitate termination, 3 grounding conductor constructions are also stocked, use "-3G" suffix.

** Unless otherwise specifically permitted in the NEC, the overcurrent protection shall not exceed 15 AMPS for 14, 20A for 12, 30A for 10 AWG.

Fuente: Catálogo Anixter inc 1999, página 2-17.

2.3.2. Control y PLC

Es necesario separar el cableado de potencia y el de control ya que en los cables de señal se maneja de 4-20 mA. Se utilizó un cable Teck 480 V 90°C que cuenta con una armadura de aluminio, diseñado para circuitos de potencia y señal en plantas industriales localizadas a intemperie.

El sistema de control está basado en un PLC (*Programmable logic controller*) designado para operar la planta automáticamente con un rutina de operación diaria.

El modelo de PLC es 984-A120 Compcat PLC's Versión 4.0 marca Schneider Electric, que trabaja en modo de comunicación protocolo Modbus de 4-20 mA. Utilizado para gobernar la planta desde el CCM (centro de control de motores).

3. CÁLCULO DE CONDUCTORES E INTERRUPTORES TERMOMAGNÉTICOS

3.1. Concepto y normas aplicables a instalaciones eléctricas

3.1.1. Concepto de instalación eléctrica

Conjunto de elementos y dispositivos necesarios para conducir la energía eléctrica para luego ser utilizada en industrias y otros usuarios del servicio de energía eléctrica.

Son la base para la utilización de la energía eléctrica, en el desarrollo de la mayoría de productos y servicios sobre los cuales está basada la civilización moderna. Gracias al acelerado cambio tecnológico en el cual nos vemos inmersos, hoy podemos hacer uso de la electricidad en diversas aplicaciones.

3.1.2. Normas aplicables a las instalaciones eléctricas

Las instalaciones eléctricas se rigen por varias normas, de las cuales describimos las más importantes. En Guatemala nos basamos en las Normas Técnicas de Diseño y Operación del servicio de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, en su Artículo 4, deberán utilizarse materiales y equipos que cumplan con las normas nacionales y/o internacionales vigentes correspondientes, tales como las normas IEC y ANSI. Estos materiales y equipos deberán resistir y soportar las condiciones mínimas operativas climáticas y ambientales, tales como salinidad, polución, vientos fuertes, etc., que garanticen la calidad del servicio.

3.1.2.1. National Electrical Code de la NFPA. “NEC”

Sus reglas están escritas para proteger la seguridad de las personas contra riesgos de incendios. El NEC establece normas del diseño de las instalaciones eléctricas y la práctica a seguir, para la instalación eléctrica y equipo propiedad del consumidor. El NEC también puede complementarse con reglas locales relativas a los sistemas eléctricos que requieren medidas más exigentes de seguridad. Este código establece una serie de lineamientos de seguridad, no de diseño, pero que a postre afectan los criterios de diseño.

Tomando en cuenta que el código no es un manual de diseño, la aplicación de este código en una instalación eléctrica, de conformidad con lo establecido en él, minimiza los riesgos de incendio y accidentes, pero no garantiza la operación satisfactoria o eficiente del sistema.

3.1.2.2. National Electrical Manufactures Association

NEMA es la organización más grande de fabricantes de productos eléctricos en los Estados Unidos, y sus 500 compañías miembros son firmas nacionales cuyo tamaño varía desde pequeñas hasta grandes compañías diversificadas. NEMA desarrolla normas para los fabricantes de equipos eléctricos, las cuales establecen capacidades nominales, dimensiones y requisitos de rendimiento para equipo eléctrico. La función primordial de las normas NEMA es definir un producto comercialmente normalizado sujeto a manufactura repetitiva.

3.1.2.3. American National Standards Institute ANSI

El ANSI se formó debido a las necesidades de uniformidad y a los problemas económicos observados en la industria de los oficios de la construcción. En Estados Unidos, el sistema de normas voluntarias está bien desarrollado y la mayoría de las organizaciones coordinan sus actividades por intermedio de ANSI. El ANSI promueve, coordina y aprueba documentos como *American National Standards*, los que han sido preparados de acuerdo con sus reglas ANSI. Entre los primeros documentos aprobados bajo los auspicios de esta organización podemos citar la normalización de las abreviaturas y símbolos de ingeniería y la elaboración de un glosario de términos usados en ingeniería eléctrica.

3.2. Cálculo de calibre de conductor e interruptores termomagnéticos a motores

Para el cálculo de conductores e interruptores termo-magnéticos debemos tener en cuenta que la potencia eléctrica requerida deber ser transportada con total seguridad, que dicho transporte se efectúe con un mínimo de pérdidas de energía y mantener los costos de la instalación en valores aceptables.

Para seleccionar el conductor eléctrico de sección adecuada para alimentar una carga específica, se usó el procedimiento llamado “Criterio de corriente”. En este criterio se selecciona el calibre del conductor con base al consumo de corriente de la carga únicamente. Para el cálculo por el criterio de corriente, el NEC recomienda no cargar a un conductor sobre el 80% de su capacidad nominal, ya que, como toda instalación eléctrica, es un sistema

dinámico y pueden existir sobrecargas y desbalances, lo que hace necesario dejar un margen de seguridad en el cálculo del conductor.

Tabla V. **Factor para cálculo de interruptores termomagnéticos aplicado a los HP de los motores**

HP	Factor
0 a 10	2
10 a 25	1.75
25 >	1.5

Fuente: Enríquez Harper. Guía práctica para el cálculo de las instalaciones eléctricas.

La tabla VI muestra el cálculo de conductores, según la norma NEC que establece que no se puede cargar más del 80 % de su capacidad nominal, y para cálculo de interruptores termo-magnéticos se usa la tabla V, factor para cálculo de interruptores termo magnéticos aplicado a los HP de los motores.

Tabla VI. **Cálculo de conductores e interruptores termo magnéticos**

CÁLCULO DE CONDUCTORES E INTERRUPTORES TERMOMAGNÉTICOS										
						Inom =Corriente Nominal	Corriente de diseño	Conductor Teck		
	Descripción	HP	Potencia KW	Eficiencia	F. P.	Volts	(HP X 746) / (Ef X Fp X V X √3)	Inom/0.8	3 cables Teck No.	Corriente de interruptor
M1	Mezclador 1	40	29.84	0.91	0.85	480	46.40	58.00	# 6	58
M2	Mezclador 2	40	29.84	0.91	0.85	480	46.40	58.00	# 6	58
M3	Motor banda alimentación	25	18.65	0.88	0.85	480	29.99	37.49	# 6	52
M4	Motor banda transportadora	15	11.19	0.85	0.85	480	18.63	23.29	# 10	33
M5	Alimentador de cemento VFD	5	3.73	0.8	0.85	480	6.60	8.25	# 12	13
M6	Motor Vibrador 1	1.5	1.119	0.8	0.85	480	1.98	2.47	# 12	4
M7	Motor Vibrador 2	1.5	1.119	0.8	0.85	480	1.98	2.47	# 12	4
M8	Bomba de agua	7.5	5.595	0.85	0.85	480	9.31	11.64	# 12	19
T1	Transformador		3	1	0.85	480	3.75	4.69	# 12	8

Fuente: Datos tomados de la placa de los motores instalados en la planta de agregados, Montana Exploradora de Guatemala, S.A.

En este caso se seleccionó el interruptor termomagnético en función de la corriente nominal de conductor según tabla IV del capítulo 2; para los calibres # 14, 12, y 10 con doble asterisco, hace mención que las protecciones se elegirán 15, 20 y 30 amperios respectivamente.

3.3. Cálculo de calibre de conductor principal

Para el cálculo del conductor principal se utilizó la fórmula del método “criterio de corriente” y, basados en la norma NEC se calculó con la fórmula siguiente. El criterio de corriente máxima es representativo para conductores de longitud pequeña, en el caso de la planta de agregados la longitud más larga del MCC a los motores es de 10 metros, por lo que este método es el ideal para el cálculo de calibre de conductor.

$$\text{Corriente conductor principal} = (\text{Corriente nominal mayor} \times 1.25) + \sum \text{corrientes nom. faltantes} \quad (1)$$

La tabla VII muestra los detalles del cálculo de conductor principal para alimentación de los motores.

$$\text{Corriente de alimentación} = (\text{Corriente de motor mayor} \times 1.25) + \sum \text{Corriente de otros motores}$$

$$\text{Corriente de alimentación (A)} = 221 \text{ A} \quad 4 \text{ cable teck } \# 4/0$$

La corriente eléctrica de alimentación es 221 A y según la tabla IV del capítulo dos, se puede seleccionar el conductor apropiado 4 cables teck 90 # 4/0.

Tabla VII. **Cálculo del conductor principal**

Cálculo del conductor principal					
		Inom =Corriente nominal	Corriente de diseño		
	Descripción	(HP X 746) / (Ef X Fp X V X √3)	Inom/0.8	I motor mayor X 1.25	∑ Corrientes
M1	Mezclador 1	46.40	58.00	73	
M2	Mezclador 2	46.40	58.00		58.00
M3	Motor banda alimentación	29.99	37.49		37.49
M4	Motor banda transportadora	18.63	23.29		23.29
M5	Alimentador de cemento VFD	6.60	8.25		8.25
M6	Motor Vibrador 1	1.98	2.47		2.47
M7	Motor Vibrador 2	1.98	2.47		2.47
M8	Bomba de agua	9.31	11.64		11.64
T1	Transformador	3.75	4.69		4.69
					148.30

Fuente: Datos tomados de la placa de los motores instalados en la planta de agregados, Montana Exploradora de Guatemala, S.A.

3.4. **Cálculo de interruptor principal**

Para el cálculo de la protección principal por el método de corriente se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Corriente nominal} = (\text{HP} \times 746) / (\text{Ef} \times \text{F.p.} \times \text{V} \times \sqrt{3}) \quad (2)$$

Con esta fórmula encontramos la corriente nominal y, para hallar la corriente de diseño, según la norma NEC, se debe multiplicar por un factor de 1.75 obteniendo la capacidad en amperios. La tabla VIII muestra los detalles del cálculo del interruptor termo-magnético principal para alimentación de los motores.

Tabla VIII. **Cálculo de interruptor principal**

Cálculo de interruptor principal						
	Ef	F.P.	V	Corriente nominal		Corriente (A) nominal interruptor
\sum HP de todos los motores	Eficiencia	Factor de Potencia	Voltaje	$(HP \times 746) / (Ef \times Fp \times V \times \sqrt{3})$	Factor	I nom X Factor
136	0.87	0.85	480	165	1.75	289

Fuente: Datos tomados de la placa de los motores instalados en la planta de agregados, Montana Exploradora de Guatemala, S.A.

Según el cálculo anterior, se debe utilizar un interruptor termo-magnético aproximado de 3 X 300 amperios para la alimentación principal.

En la figura 3 diagrama unifilar del sistema eléctrico se detalla los interruptores termo-magnéticos usados en cada motor, calculados en la tabla VI de este capítulo.

3.5. Cálculo de caída de tensión en la línea de 4.16KV de acuerdo a la carga instalada

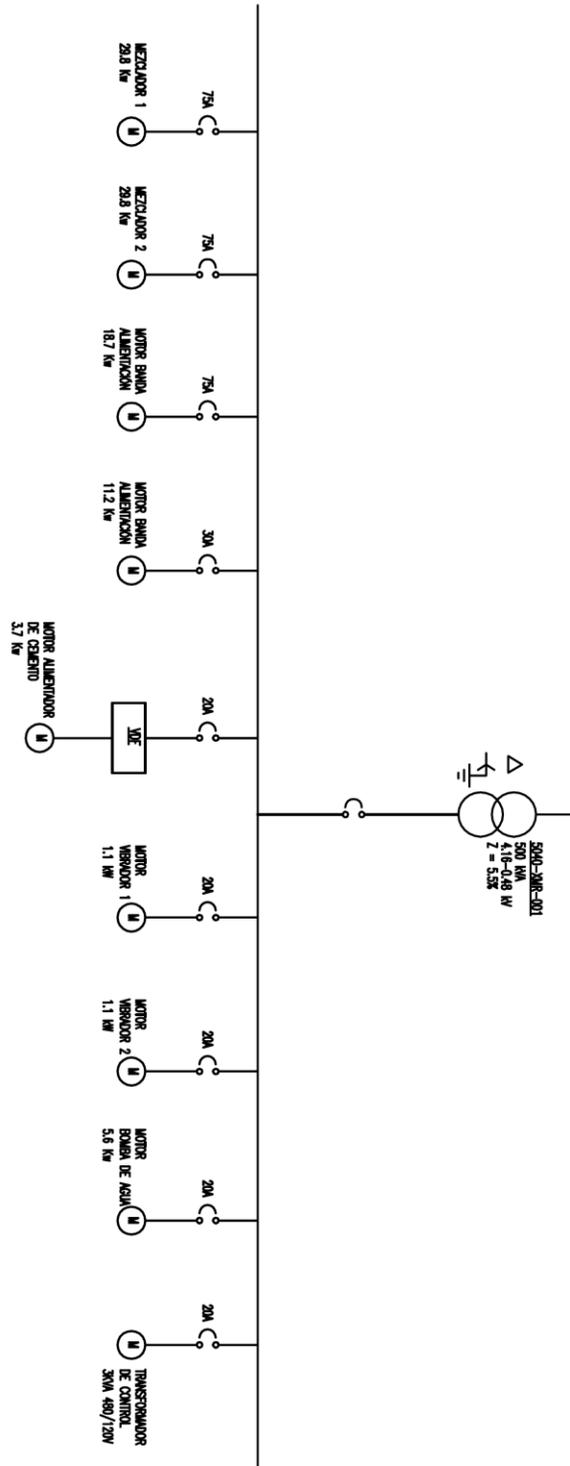
Llamamos caída de tensión de un conductor a la diferencia de potencial que existe entre los extremos del mismo. Este valor se mide en voltios y representa el gasto de fuerza que implica el paso de la corriente por ese conductor. Así mismo, la caída de tensión es medida frecuentemente en tanto por ciento de la tensión nominal de la fuente de la que se alimenta. No existe un conductor perfecto, pues todos presentan una resistividad al paso de la corriente por muy pequeña que sea, por este motivo ocurre que un conductor incrementa la oposición al paso de la corriente, a medida que también va aumentando su longitud. Si esta resistencia aumenta, por consiguiente,

aumenta el desgaste de fuerza, es decir, la caída de tensión. Podríamos decir que la caída de tensión de un conductor viene determinada por la relación que existe entre la resistencia que ofrece este al paso de la corriente, la carga prevista en el extremo más lejano del circuito y la tensión que se aplicará a los extremos.

3.5.1. Cálculo de la distancia media geométrica de la línea eléctrica que alimenta la planta de agregados

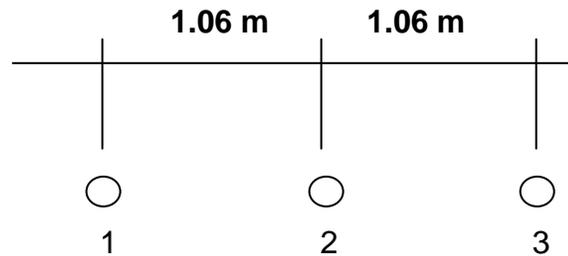
El cálculo de la distancia media geometría para un circuito simple, se hace necesario para encontrar la impedancia de la línea. A continuación se detalla el cálculo y en la figura 4 se puede observar las distancias de la línea eléctrica trifásica.

Figura 03. Diagrama unifilar planta de agregados



Fuente: diagrama unifilar Montana Exploradora de Guatemala S.A. plano A1-7622-20-65-005.

Figura 4. **Circuito simple línea trifásica**



Fuente: línea de transmisión planta de agregados.

$$\epsilon_A = \left(\frac{1}{2} + 2 \ln \frac{2d}{D} \right) 10^{-4} \quad (3)$$

$$X = \omega \epsilon_A = 2f \pi \epsilon_A \quad (4)$$

Distancia entre conductor 1 y 2 $d_{12} = 1.06 \text{ mt}$

Distancia entre conductor 2 y 3 $d_{23} = 1.06 \text{ mt}$

Distancia entre conductor 1 y 3 $d_{13} = 2.12 \text{ mt}$

$$\text{Distancia Media Geométrica } D = (d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{13})^{1/3} \quad (5)$$

$$D = 1.335516313 \text{ mt}$$

Para la línea trifásica de circuito simple que alimenta la planta de agregados tenemos un distancia media geométrica de 1.33 m

3.5.2. Cálculos de caída de tensión

El conductor utilizado en la línea de transmisión es AAC-336.4, tiene un diámetro de 0.016891 m y la longitud de la línea es 0.986 km. En la tabla IX se completan los datos de la línea que nos servirán para calcular la caída de voltaje

Tabla IX. Datos de la línea de transmisión

Descripción			
Conductor utilizado	AAC-336.4		
Diámetro de conductor	d	0.016891 mts	
Longitud	L	0.986 km	
Distancia media geométrica	D	1.01314614 mts	
Resistencia	R	0.141233 Ω /km	0.1392557 Ω
Reactancia de auto-inducción	X	0.379795 Ω /km	0.374477 Ω
Impedancia de línea	Z	0.40520449 Ω /km	
Ángulo de impedancia	θ	69.6015612 Grados	
Carga a manejar	S	2,930,000 VA	
Voltaje de operación en la fuente	V1	4160 V	
Amperios debido a la carga	I	406.6433386 Amp	
Factor de potencia en la fuente	Fp1	Cos θ 1= 0.95	

Fuente: Línea de transmisión planta de agregados, Montana Exploradora de Guatemala, S.A.

Las consideraciones tomadas para el cálculo de caída de voltaje de la línea de transmisión son: línea equilibrada y estable, la tensión, la corriente y el factor de potencia tendrán la misma amplitud para cada fase. Resistencia y reactancia de autoinducción serán iguales en las tres fases.

Para la tensión en la carga

$$V_2 = [(V_1 \cos \theta_1 - \sqrt{3}RI)^2 + (V_1 \sin \theta_1 - \sqrt{3}XI)^2]^{1/2} \quad (6)$$

Sustituyendo datos según tabla IX

$$V_2 = \sqrt{[(4160 \cdot .95 - \sqrt{3} \cdot .13925 \cdot 406.643)^2 + (4160 \cdot .31225 - \sqrt{3} \cdot .37447 \cdot 406.643)^2]}$$

$$V_2 = \sqrt{[(14853624.3216 + 1072309.95]}$$

$$V_2 = 3990.73 \text{ V}$$

$$\text{Factor de potencia en la carga } \cos \theta_2 = (V_1 \cos \theta_1 - \sqrt{3}RI) / V_2 \quad (7)$$

$$\text{Por tanto: } V_2 = 3990.535673 \text{ V}$$

$$\cos \theta_2 = 0.965765408$$

$$\text{Porcentaje de caída de tensión } \Delta V (\%) = 4.07\%$$

La caída de voltaje en la línea de transmisión es 4.07%, porcentaje que es aceptable según las normas NEC 1996 (ver libro Guía práctica para instalaciones eléctricas de Enríquez Harper, página 105) que señala el máximo porcentaje permisible de caída de voltaje, es el 5 %.

3.6. Cálculo de la corriente de corto circuito

3.6.1. Corto circuito

En las instalaciones eléctricas de la planta de agregados se requiere conocer los valores de las corrientes de cortocircuito para distintas aplicaciones

como son: el diseño de la protección, la determinación de las características de los equipos de protección y el diseño de las redes de tierra entre otros.

Los sistemas eléctricos de la planta de agregados, se diseñaron para alimentar las cargas en una forma segura y confiable que proporcione continuidad de servicio. Uno de los aspectos a los que se les pone mayor atención en el diseño es el control adecuado de los cortocircuitos, o bien, de las fallas, como se les conoce comúnmente, ya que estos pueden producir interrupciones de servicio, con la consecuente pérdida de tiempo, la interrupción de facilidades importantes o servicios vitales en ocasiones y desde luego con el riesgo de daño a personas, equipos e instalaciones.

Los sistemas eléctricos se diseñan para estar tan libres de fallas como sea posible, mediante el uso de equipos especializados y diseños completos y cuidadosos, así como técnicas modernas de construcción y mantenimiento apropiado.

Aun con todas las precauciones y medidas mencionadas antes, las fallas ocurren. Algunas de las causas principales son las siguientes:

Sobretensiones de origen atmosférico, envejecimiento prematuro de los aislamientos, falsos contactos y conexiones, acumulación de polvo, presencia de elementos corrosivos, humedad, presencia de roedores, y errores humanos.

Cuando ocurre un cortocircuito, se presentan situaciones o inconvenientes que se manifiestan de diferente forma, entre ellas podemos mencionar:

- En el punto de la falla se puede presentar un fenómeno de arco eléctrico o fusión de los metales mismos
- Las corrientes de cortocircuito circulan de las fuentes (alimentación de la red y máquinas rotatorias) hacia el punto de falla
- Todas las componentes de la instalación por donde circulan las corrientes de cortocircuito se ven sujetas a esfuerzos térmicos y dinámicos, éstos varían con el cuadrado de la corriente (I^2) y de la duración de la corriente (seg.)
- Las caídas de voltaje en el sistema están en proporción a la magnitud de las corrientes de cortocircuito. La caída de voltaje máxima se presenta en el punto de ocurrencia de la falla. Es prácticamente cero para el valor máximo de falla.

El valor de la corriente de cortocircuito se relaciona directamente con el tamaño de la fuente (en cuanto a su capacidad) y es indispensable de la corriente de pre-falla o de carga del circuito protegido por un dispositivo de protección.

Como regla general, se puede establecer que si es mayor la capacidad de cortocircuito de la fuente de potencia, mayor es la corriente de cortocircuito.

3.6.2. Cortocircuito en motores de inducción instalados

En la planta de agregados, los motores de inducción instalados pueden ser fuente de cortocircuito debido a la inercia de la carga y el rotor del motor que tiene el mismo efecto en un motor síncrono, es decir, acciona el motor

después de que ocurre el corto circuito en el sistema. Existe, sin embargo, una diferencia importante, el motor de inducción no tiene devanado de excitación en corriente continua, pero existe un flujo en el motor de inducción durante la operación normal, el flujo actúa como el producido por el devanado de campo en corriente continua en el motor síncrono.

El campo del motor de inducción es producido por la inducción del estator, en forma análoga al que proviene del devanado de corriente continua. El flujo del rotor permanece normal en la medida que el voltaje es aplicado al estator por la fuente externa. Sin embargo, si la fuente externa de voltaje fuera súbitamente removida, como ocurre cuando se presenta un cortocircuito en el sistema, el flujo en el rotor no puede decaer instantáneamente, y también porque la inercia de las partes rotatorias accionan al motor de inducción, se genera un voltaje en el devanado del estator, esto produce una corriente de cortocircuito que circula hacia la falla, hasta que el flujo del rotor decae a cero. La corriente de cortocircuito desaparece casi por completo alrededor de cuatro ciclos, debido a que no hay una corriente de campo sostenida en el rotor para proporcionar un flujo, como en el caso de la máquina síncrona.

La magnitud de la corriente de cortocircuito producida por un motor de inducción depende de la impedancia del propio motor y de la impedancia del sistema en el punto de ocurrencia de la falla. La impedancia de la máquina, efectiva en el momento del cortocircuito corresponde aproximadamente a la impedancia del rotor bloqueado. Consecuentemente, el valor inicial de la corriente de cortocircuito es aproximadamente igual al valor de la corriente de arranque a rotor bloqueado del motor.

3.6.3. Tipos de falla

Es práctica común que en los sistemas eléctricos, analíticamente para los estudios de corto circuito se consideren los siguientes tipos de fallas:

- Corto circuito trifásico
- Corto circuito entre fases
- Corto circuito de fase a tierra
- Corto circuito de dos fases a tierra

El corto circuito más común es el monofásico o fase a tierra, representando la mayoría del total de las fallas, sus orígenes diversos.

La falla trifásica representa el caso más severo para todo el equipo eléctrico, y es por esta razón que las normas eléctricas establecen que para probar un equipo contra corto circuito se utilice una falla trifásica, ya que es la única que se considera por ser la que somete al equipo al mayor esfuerzo.

La simetría o asimetría de la corriente de corto circuito depende principalmente de los siguientes factores.

- El instante en que se produce la falla con relación a la onda de voltaje del sistema
- La relación de la reactancia a la resistencia del sistema en el punto de falla (X/R)

La onda de la corriente es totalmente asimétrica cuando la falla se produce en el momento en que la onda de voltaje se encuentra en su máximo

punto, y es completamente simétrica cuando en el momento de la falla la onda de voltaje pasa por cero.

El efecto de asimetría en una instalación industrial siempre está presente en mayor o menor grado y se manifiesta en un incremento que se da en el valor de la corriente de corto circuito simétrico, expresándose por un factor de asimetría (FA):

$$I_{CCas} = FA \times I_{CCs} \quad (8)$$

Donde:

I_{CCas} = corriente de corto circuito asimétrica

I_{CCs} = corriente de corto circuito simétrica

FA = factor de asimetría

La corriente de corto circuito simétrica se obtiene de los métodos conocidos de cálculo de corto circuito. El factor de asimetría (FA) depende básicamente de la relación X/R en el punto de la falla de la instalación.

Para tener estos valores, se toman como base las normas ANSI C37.13 que indica los siguientes puntos:

- Generalmente la capacidad interruptora del primer ciclo es el único valor requerido de corto circuito para fusibles e interruptores de bajo voltaje. Para este caso, se usa el valor de la reactancia subtransitoria en motores;
- Generalmente la capacidad interruptora del primer ciclo es el único valor requerido de corto circuito para fusibles e interruptores de bajo voltaje;

Para este caso, se usa el valor de la reactancia subtransitoria en motores;

- Lo motores de baja tensión se alimentan, por lo general, de tableros o centro de control de motores. Este grupo se puede representar como un equivalente cuyo valor de reactancia se considera 25% a sus kVA base. La contribución a la falla se toma como cinco veces la suma de la corriente nominal de los motores.

$$I_{falla} = 5(\sum I_{nmotores}) \quad (9)$$

la sumatoria de corriente se calculó en este capítulo en la tabla VII, la corriente es 148.30 A sustituyendo:

$$I_{falla} = 5(148.3A)$$

$$I_{falla} = 741.5 A$$

La contribución de falla de los motores es 741.5 A

3.6.4. Cálculo de corto circuito por el método de por unidad

El punto de partida es un diagrama unifilar del sistema y convirtiendo todos los valores por unidad, los datos de los equipos incluyendo la carga instalada se muestran en la figura 3. El procedimiento de detalla a continuación:

Para calcular la reactancia y la corriente de cortocircuito en la planta de agregados usando el método por unidad, se utilizaron los datos del diagrama unifilar que se muestra en la figura 5 y se tomó como potencia base la potencia consumida por la planta de agregados:

$$kVA_{base} = 2\,930\text{kVA}$$

Potencia de alimentación

$$S_{alimentación} = 20\text{MVA}$$

El cálculo de corriente de corto circuito inicia calculando la reactancia de alimentación y la reactancia del transformador, obteniendo así la impedancia de los elementos que conforman el sistema.

La reactancia de alimentación del sistema eléctrico se calcula con la potencia base consumida y la potencia de alimentación con la siguiente fórmula por unidad:

Reactancia de alimentación del sistema eléctrico en por unidad

$$X_{pu\ sistema} = kVA_{base} / kVA_{sistema} \quad (10)$$

$$X_{pu\ sistema} = 2\,930\text{kVA} / 20\,000\text{kVA} = 0.14\text{pu}$$

La reactancia de alimentación del sistema eléctrico es 0.14 pu, ahora se calcula la reactancia del transformador con los datos de potencia consumida $kVA_{base} = 2\,930\text{kVA}$ y datos de placa del transformador

Reactancia del transformador en pu.

$$X_{putrafo} = (X\%)(kVA_{base}) / (100)(kVA_{trafo}) \quad (11)$$

$$X_{putrafo} = (5.5)(2\,930\text{kVA}) / (100)(500\text{kVA}) = 0.32\text{pu}$$

La reactancia del transformador es 0.32 pu

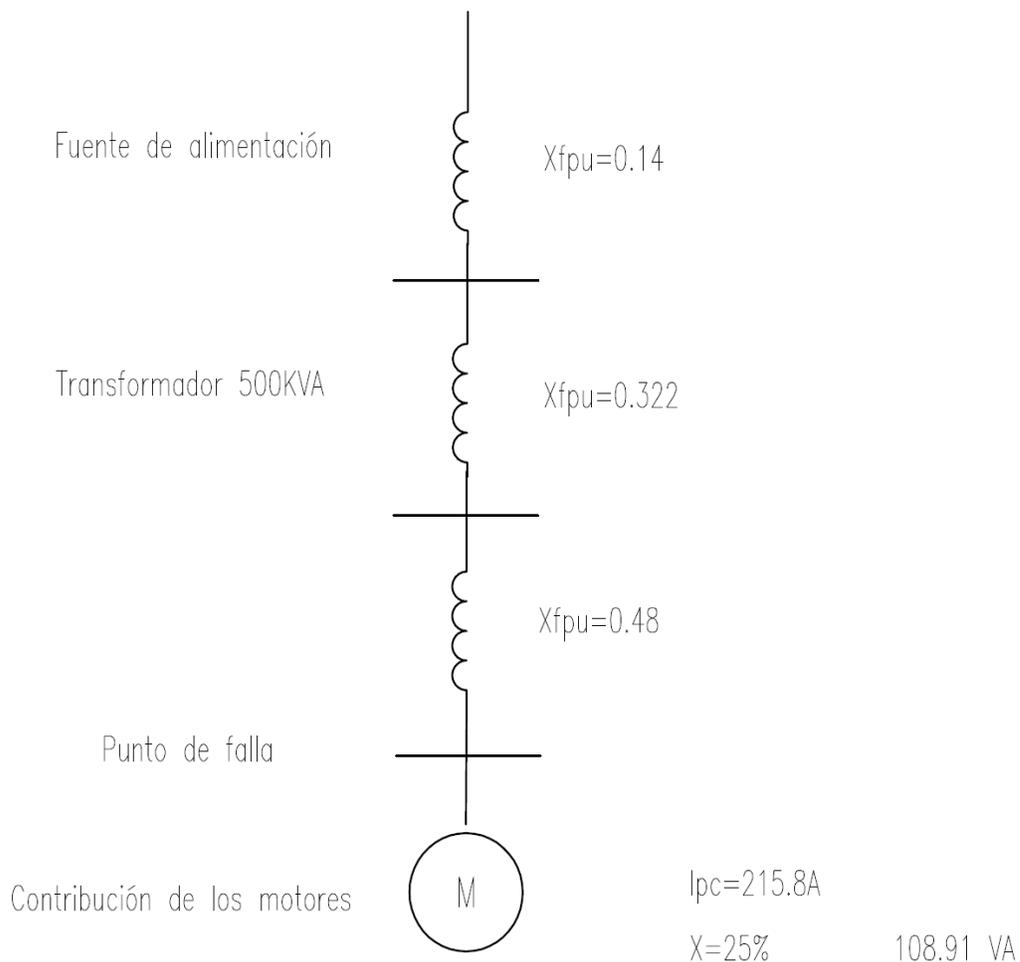
Resistencia del transformado por unidad se calcula de la siguiente manera:

$$R_{putrafo} = (R\%) (kVA_{base}) / (100) (kVA_{trafo}) \quad (12)$$

$$R_{putrafo} = (.83) (2930kVA) / (100) (500kVA) = 0.048pu$$

La resistencia del transformador 0.048 pu

Figura 5. Diagrama de impedancias en pu



Fuente: diagrama planta de agregados.

Con los valores calculados de reactancia del sistema y del transformador por unidad ya se puede dibujar el diagrama de impedancia transformado en valores por unidad, la figura 5 muestra los valores calculados.

Con los datos por unidad de cada componente se hacen las combinaciones en serie-paralelo para obtener los valores de resistencia y reactancia totales

Los valores totales se obtienen de la figura 5, sumando las componentes real e imaginario para obtener los valores de impedancia total.

$$R_t = 0.48$$

$$X_t = 0.14 + 0.32 = 0.462$$

La impedancia total por unidad del sistema se calcula como:

$$Z_t = (R_t^2 + X_t^2)^{1/2} \tag{13}$$

$$Z_t = (0.048^2 + 0.462^2)^{1/2} = 0.464 \text{ pu}$$

La impedancia total del sistema es 0.464 por unidad.

Para encontrar la corriente simétrica de corto circuito total, en el punto de falla, se suman la corriente de corto circuito simétrica en el punto de falla y el valor de la corriente simétrica con que contribuyen los motores.

$$\text{ICC simétrica} = I_{cc} + \text{Contribución simétrica de los motores} \tag{14}$$

El valor de la corriente de corto circuito simétrica en el punto de falla se calcula como:

$$I_{cc} = \frac{kVA_{base}}{\sqrt{3} (kV) (Z_t \text{ en pu})} \quad (15)$$

$$I_{cc} = \frac{2930kVA}{\sqrt{3} (0.48kV) (0.464)} = 7662.13A$$

La corriente de corto circuito en el punto de falla es 7662.13 A. A continuación se calcula la contribución de los motores y para eso debemos calcular la contribución asimétrica de los motores según la ecuación 16 y luego con la ecuación 17 se calcula la contribución simétrica.

$$\text{Contribución asimétrica los motores} = 5(\sum I_{n\text{motores}}) \quad (16)$$

El valor de la corriente a plena carga de los motores en la planta de agregados es 215.8 A

I_{pc} = corriente a plena carga del motor

Sustituimos datos en la ecuación 16

$$\text{Contribución asimétrica de los motores} = 5(215.8A) = 1079 A$$

El valor de la contribución simétrica del motor se puede calcular en forma aproximada con un factor de asimetría promedio que se toma como 1.25 ver ecuación 17

$$\text{Contribución simétrica de los motores} = \frac{\text{contribución asimétrica}}{1.25} \quad (17)$$

$$\text{Contribución simétrica de los motores} = \frac{1079}{1.25} = 863.2 A$$

El valor total de la corriente de corto circuito simétrico se calcula sumando la corriente de corto circuito del sistema y la corriente aportada por los motores según ecuación 14 y sustituyendo valores:

$$I_{\text{total cc sim}} = I_{\text{cc sim}} + \text{contribución simétrica de motores} \quad (18)$$

$$I_{\text{total cc simétrica}} = 7662.13 + 863.2$$

El valor de la corriente simétrica de corto circuito total es 8525.33 A

Ahora se procede a calcular la corriente de corto circuito asimétrica con los datos de la reactancia y la resistencia.

El valor asimétrico de la corriente de corto circuito se calcula como:

Se determina la relación X/R del sistema en el punto de falla

$$X/R = X_{\text{pu}}/R_{\text{pu}} \quad (19)$$

$$X/R = 0.462 / 0.048 = 9.625$$

La corriente de corto circuito asimétrica se calcula a continuación:

$$I_{\text{cc asim}} = I_{\text{total cc sim}} (\text{factor de asimetría}) \quad (20)$$

Sustituyendo datos ya calculados en la ecuación 18 tenemos la corriente de corto circuito simétrica total 8525.33 A

$$I_{\text{cc-asim}} = 8525.33 (1.2) = 10230 \text{ A}$$

El valor total de la corriente de corto circuito asimétrica se calcula sumando la corriente de corto circuito del sistema que se calcula con la ecuación 20 y la corriente aportada por los motores que se calculo anteriormente en la ecuación 17.

$$I_{\text{total cc asimétrica}} = I_{\text{cc asimétrica}} + \text{contribución asimétrica de motores} \quad (21)$$

$$I_{\text{total cc asimétrica}} = 10230 + 1079 = 11309 \text{ A}$$

$$I_{\text{total cc asimétrica}} = \mathbf{11309 \text{ A}}$$

El valor total de la corriente asimétrica de corto circuito total es 11309 A.

4. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE TIERRA FÍSICA

4.1. Sistema de puesta a tierra

Las puestas a tierra se establecen con el objetivo principal de limitar la tensión que con respecto a tierra pueden presentar en un momento dado las masas metálicas; asegurar la actuación de las protecciones y eliminar o disminuir el riesgo que supone una avería en los equipos instalados y en las personas.

La denominación de puesta a tierra comprende toda una armazón metálica y electrodos sin protecciones con el objetivo de conseguir que en el conjunto de instalaciones, equipos, edificios y superficies próximas del terreno, no existan diferencias de potencial peligrosas y que, al mismo tiempo, permitan el paso a tierra las corrientes de falla o las de descargas de origen atmosférico.

4.1.1. Propósito de un sistema de puesta a tierra

Es un sistema cuyo propósito es controlar las corrientes indeseables dentro de un sistema eléctrico y que sirve para prevenir daños y/o interferencias a personas y equipo instalado.

El control se ofrece por medio de tener una trayectoria de drenado de esa corriente (corto circuito y de descargas electro atmosféricas) a través de un conductor especialmente dimensionado para tal propósito.

4.1.2. Criterios de seguridad

Existen dos enfoques básicos para realizar el diseño de sistemas de puesta a tierra:

- Se diseña el sistema de puesta a tierra suponiendo que el diseño es seguro cuando la resistencia de conexión a tierra es inferior a un valor recomendado
- Se diseña de acuerdo a criterios de seguridad establecidos

Existen varias razones del porqué debemos tener un sistema de puesta a tierra; una muy importante es la seguridad de las personas que utilizan el equipo, la protección del equipo conectado y la economía y finalmente por el aspecto legal exigido por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica CNEE.

Un sistema de puesta a tierra es ideal para limitar voltajes causados por descargas atmosféricas o por contacto accidental con conductores de más alto voltaje; también nos ayuda a estabilizar el voltaje durante operaciones normales y facilitar la operación de los dispositivos de sobre corrientes.

4.1.3. Factores de diseño

Para diseñar e instalar el sistema de tierra nos basamos en las normas guatemaltecas proporcionadas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica CNEE Título II capítulo IV, según las normas técnicas de diseño, el objetivo es proporcionar métodos prácticos de puesta a tierra, para usarlos en lugares donde la puesta a tierra es requerida como uno de los medios para salvaguardar al público y los operarios del daño que pudiera causar el potencial eléctrico.

En los que se refiere a los conductores de puesta a tierra las normas nacionales en su capítulo IV Artículo 30. Conductor de puesta a tierra y medios de conexión, dice el siguiente:

La composición de los conductores de puesta a tierra. En todos los casos, los conductores de puesta a tierra deberán ser de cobre u otros metales o aleaciones que minimicen la corrosión durante su vida útil prevista. De ser posible, no deberán tener empalmes; si los empalmes son inevitables, deberán estar fabricados y conformados de tal forma que no se incremente notablemente la resistencia del conductor y también deberán tener adecuadas características mecánicas y de resistencia a la corrosión. La estructura metálica de un edificio o de otra construcción, puede servir como conductor de puesta a tierra y como un aceptable electrodo a tierra.

Con respecto al tamaño del conductor de la malla de tierra, la capacidad de corriente del conductor de puesta a tierra deberá determinarse con base en las condiciones de diseño y operación del circuito, pero no deberá ser de área de sección transversal menor de 8.37 mm² (No. 8 AWG) de cobre.

Los electrodos a utilizar deberán ser según el Artículo 31. capítulo IV deberán cumplir con lo siguiente: Cuando se utilicen electrodos artificiales, estos deberán penetrar, tanto como sea posible por debajo de un nivel de humedad permanente.

El electrodo de puesta a tierra deberá ser permanente y adecuado para el sistema eléctrico de que se trate. En todos los casos, los electrodos de puesta a tierra deberán ser de cobre u otros metales o aleaciones que minimicen la corrosión durante su vida útil prevista. Toda la superficie externa de los electrodos deberá ser conductora, esto es, que no tenga pintura, esmalte

u otra cubierta aislante. La cantidad y tamaño de los electrodos a seleccionar deberá considerar sus limitaciones de descarga de corriente y no deberán ser menores de 2.40 m de longitud y 12.5 mm de diámetro.

La resistencia a tierra de la malla la podemos ver en el Artículo 33. Capítulo IV Resistencia a Tierra. El sistema de tierras deberá consistir de uno o más electrodos conectados entre sí. Este sistema deberá tener una resistencia a tierra suficientemente baja, para minimizar los riesgos a las personas, en función de la tensión de paso y de contacto, el valor recomendado de resistencia a tierra es de 5 Ohmios.

4.2. Construcción del pozo de tierra

4.2.1. Ubicación y trazo

Definimos y ubicamos el área en donde se construirá la malla a tierra, y se definió el paso de las zanjas a excavar.

4.2.2. Excavación de la zanja

La excavación de la zanja se ejecutó siguiendo la ruta del trazo de la malla, a una profundidad de 1 000 mm y con un ancho de 500 mm figura 6, la zanja tiene que estar libre de piedras u otros materiales extraños en todo su recorrido.

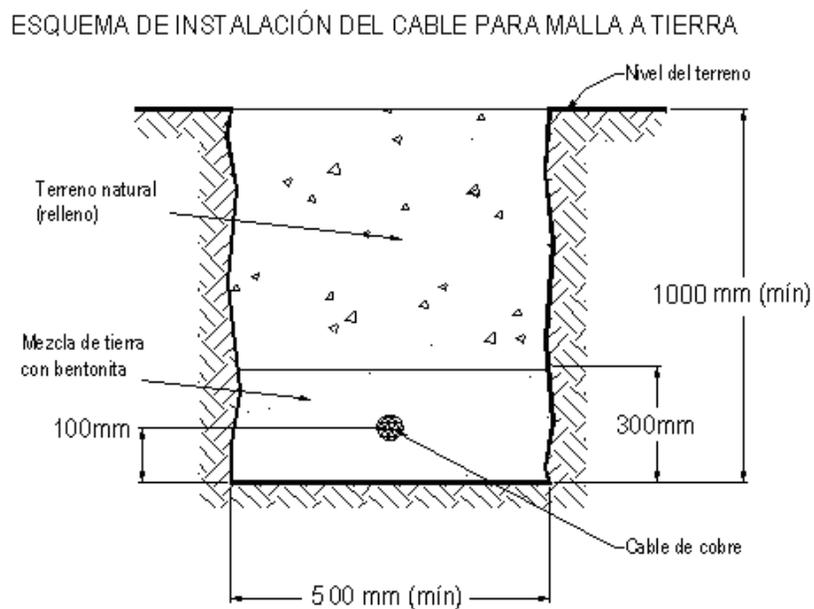
4.2.3. Manufactura de la malla de cobre y soldadura exotérmica

Se instaló el cable de cobre desnudo que luego de compactada la primera capa de tierra se construyó la malla.

La instalación se realizó cortando tramos cuya longitud y diámetro, se construyó de acuerdo a estándares del proyecto (línea principal: un cable desnudo calibre 4/0 AWG; líneas secundarias un cable desnudo calibre 2/0 AWG) todos los pases del cable desnudo por concreto se protegieron con tubería conduit de PVC diámetro 1" cédula 40.

Una vez tendido el cable, todos los puntos se unieron con soldadura exotérmica.

Figura 6. **Esquema de instalación del cable para malla a tierra.**



Fuente: Manual *Team Mixing Technologies Cement Backfill System Glamis Gold Ltd.* Montana Exploradora de Guatemala, S.A. 2006.

4.2.4. Relleno para la malla

Terminados todos los empalmes necesarios, y efectuada una buena limpieza de todos los restos en la zanja, se procedió a rellenar una segunda capa de tierra a una altura de 300m.m. compactando con abundante agua; terminada de compactar la segunda capa se procedió al relleno de la zanja con el material de la excavación libre de rocas; se compactó el terreno con capas de 150m.m., para lo cual se empleó una compactadora.

4.3. Procedimiento

4.3.1. Instalación del pozo sistema de tierra común y de registro

Para instalar un pozo a tierra (de electrodo vertical), se llevó a cabo la excavación, instalación y relleno según diseño realizado por *Team Mixing Technologies*. Se realizó una excavación de 3.3 metros de profundidad con una sección de 1.0x1.0 mt. Por la profundidad que tiene esta excavación se informó al departamento de Medio Ambiente mina Marlin cuando se alcanzó una profundidad de 1.20 mt, para que realicen el monitoreo de emanaciones de gases u otras sustancias; así mismo se solicitaron los permisos para trabajos en espacios confinados al departamento de seguridad industrial.

Concluida la excavación se instaló la varilla de Cooperweld de 19mm (3/4") de diámetro y 3 000mm de largo y se realizó el llenado del pozo con tierra zarandada, rellenando y compactando con abundante agua. La compactación se hizo con un compactadora manual por capas de cada 200mm hasta llegar a una altura de 300mm debajo del nivel del piso terminado. Solo personal previamente capacitado y con permiso para realizar trabajos de este tipo

realizaron las actividades: Así mismo el supervisor eléctrico de campo controló y verificó personalmente el cumplimiento de este procedimiento.

4.3.2. Medición de resistividad específica Método de Werner

Con objeto de medir la resistividad del suelo se hace necesario insertar los 4 electrodos en el suelo. Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno, y por el contrario no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra.

En la figura 7 se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se inyecta, a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores. La resistividad aparente está dada por la ecuación 22 tomando en cuenta que la distancia enterrada del electrodo es pequeña comparado con la separación entre electrodos.

La resistividad que obtengamos como resultado de las ecuaciones representa la resistividad promedio de un hemisferio de terreno de un radio igual a la separación de los electrodos.

Para obtener el valor de la resistividad media del terreno se debe aplicar la ecuación de Wenner:

$$\rho = 2\pi R D \quad (22)$$

Donde:

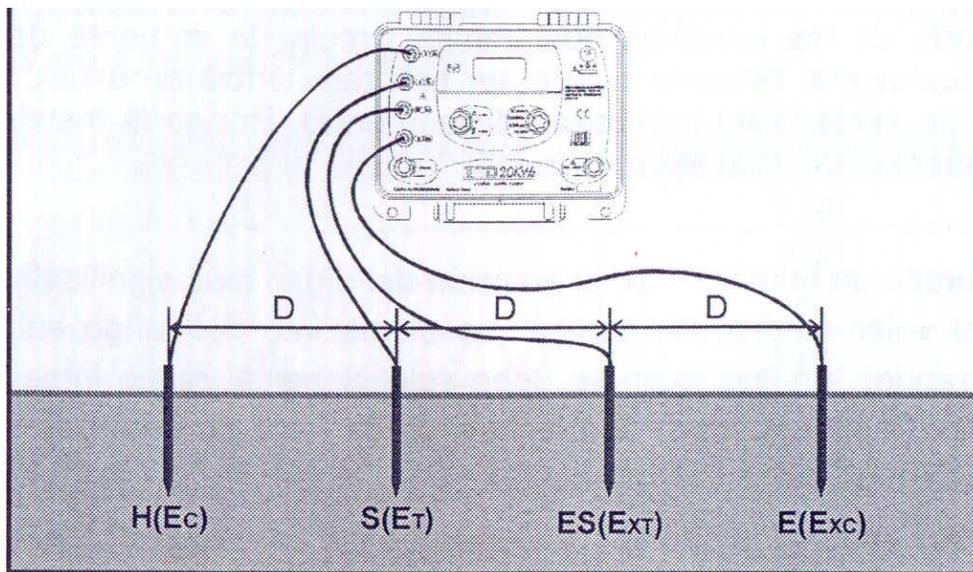
ρ = valor de la resistividad media del terreno, en ohms-metro

π = 3.14159

R = Resistencia medida por el telurómetro en ohms.

D = Distancia de entre las jabalinas, expresada en metros

Figura 7. **Conexión de telurómetro para medición del terreno**



Fuente: Manual de usuario AEMC instruments digital resistance testers model 3640.

Se obtiene así la resistividad media del terreno desde la superficie hasta una profundidad igual a la distancia D entre electrodos. Haciendo diversas mediciones con diferentes distancias entre electrodos se obtiene la información requerida para determinar la estratificación. Las distancias generalmente adoptadas son 1 m, 2m, 4m, 8m, 16m. nosotros utilizamos una distancia D = 8m; los cables se pueden distribuir como indica la figura 8.

Según las mediciones obtenidas con el telurómetro, se obtuvo $R = 0.56\Omega$ y, utilizando la fórmula 22 de Werner la resistividad específica del terreno es:

$$\rho = 2\pi (0.56)(8)$$

$$\rho = 28.14 \Omega\text{-m}$$

El equipo que se utilizó para la medición de la resistencia de puesta a tierra es:

TELURÓMETRO DIGITAL

Marca : Megabras.

Modelo : MTD – 20 KW.

Nº Electrodo:04.

Exactitud : $\pm 1\%$ del valor medido.

Rango de medición: 0,01 Ω hasta 20k Ω

4.4. Cálculo de la resistencia de la red de tierra

Una vez determinada la resistividad del terreno (ρ) la resistencia del mismo (R_t) depende del área de la red de tierra y la longitud de la malla (L) dada por la suma de todas las ramas de la red.

Para profundidades mayores entre 30 cm y 2.5 m se requiere una corrección por profundidad y entonces se puede calcular con la fórmula de Sverak:

$$R_t = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{(20A)}} \left[1 + \frac{1}{(1+h \sqrt{(20/A)})} \right] \right] \quad (23)$$

Donde:

R_t = resistencia de la red en Ω

ρ = resistividad medida en $\Omega\text{-m}$

L = longitud total incluyendo longitud de las varillas, en m

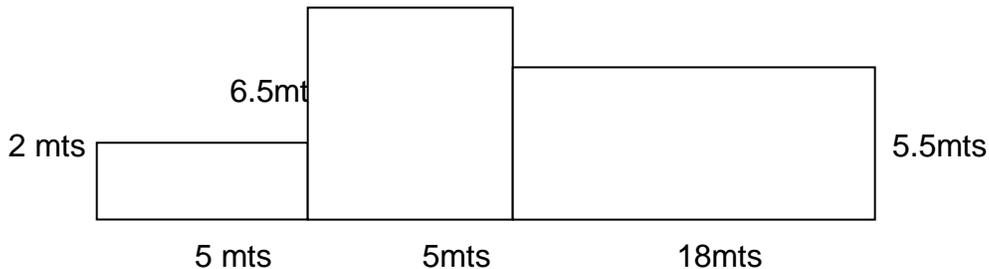
A = área de la malla, en m^2

h = profundidad de la malla, en m

Para una estimación más precisa de la resistencia de tierra se considera la resistencia de la malla más la producida por la suma de todos los electrodos.

De la figura 8 se obtienen la dimensiones en metros de las variables L, A, h.

Figura 8. **Área del sistema de tierra**



Fuente: Planta de agregados, Montana Exploradora de Guatemala, S.A.

Para calcular L se toma en cuenta la cantidad de electrodos que para esta malla se usaran 9 electrodos de 10 pies de longitud cada uno y la cantidad de acometida son 10 con una longitud de dos metros cada una.

$$A = 141.5 \text{ m}^2$$

L = Longitud del cable de cobre mas la longitud de todas las varillas de cobre y el cable de cada estructura aterrizada.

$$L = 123.932 \text{ m}$$

$$h = 0.5 \text{ m}$$

$$\rho = 28.14 \text{ } \Omega\text{-m}$$

Sustituyendo datos en la ecuación 23 para obtener R_t

$$R_t = 28.14 \left[\frac{1}{123.93} + \frac{1}{\sqrt{(20 \cdot 141.5)}} \left[1 + \frac{1}{(1 + 0.5 \sqrt{(20/1.14.5)})} \right] \right]$$

$$R_t = 1.18 \text{ } \Omega$$

Idealmente una conexión a tierra física debe tener una resistencia de cero Ohms. El conductor y los electrodos utilizados para la instalación de la malla cumple con las normas guatemaltecas proporcionadas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica CNEE especificadas en el Título II, capítulo IV Artículo 30 y 31.

La resistencia total de la malla de tierra en la planta de agregados obtenida en las mediciones y cálculos es $1.18 \text{ } \Omega$, valor que está por debajo del valor de $5 \text{ } \Omega$ que establece las normas guatemaltecas proporcionadas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica CNEE especificadas en el Título II, capítulo IV Artículo 33.

5. SINTONIZACIÓN DEL PID

5.1. Proceso

Con el propósito mantener constante la alimentación de cemento en la tolva del mezclador para obtener la mezcla deseada, la producción será por *batch* o lotes.

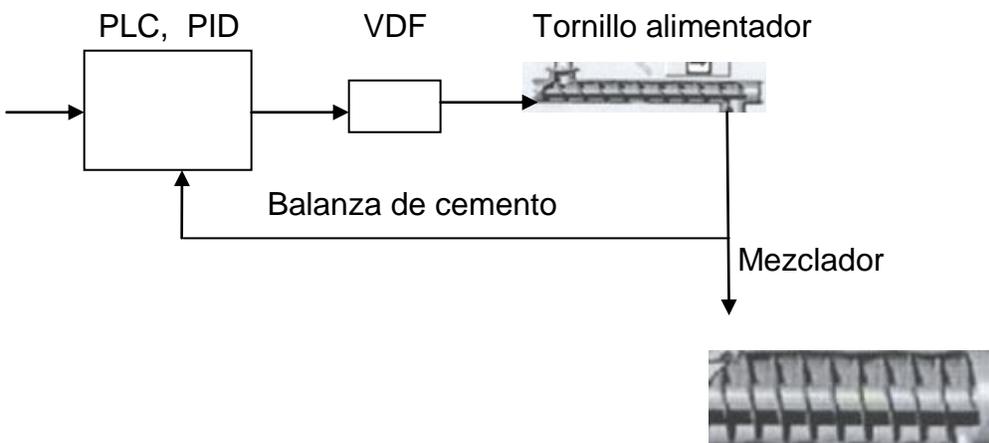
La sintonización de los controladores: proporcional – integral – derivativo o simplemente controladores PID, consiste en la determinación del ajuste de sus parámetros (K_c , T_i , T_d), para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable sin variaciones de conforme mitad con el desempeño establecido para la planta de agregados.

A lo largo de la historia, se han desarrollado y perfeccionado técnicas que han hecho del control automático toda un área de investigación y desarrollo, orientada a reducir costos de procesos, aumentar calidad de artículos, mejorar precisión de productos, e incrementar niveles de seguridad, entre otros.

El ajuste de parámetros proporcional, integral y derivativo, es frecuente en procesos industriales, no sólo en los trabajos de puesta en marcha, sino también cuando se detectan cambios sustanciales del comportamiento del proceso. Las técnicas experimentales están especialmente orientadas al mundo industrial, donde existen grandes dificultades para obtener una descripción matemática. La técnica de ajuste utilizada para la planta de agregados es prueba y error.

En la figura 9 se muestra el diagrama del sistema que necesitamos controlar, a través de un controlado lógico programable PLC y con el ajuste de los parámetros proporcional, integral y derivativo PID, se logrará mantener estable el sistema, gracias a la retroalimentación de la balanza de cemento podemos recibir información y corregir automáticamente haciendo variar la velocidad del motor alimentador por medio del variador de frecuencia VDF.

Figura 9. **Diagrama de secuencia del proceso de la planta de agregados**



Fuente: Planta de agregados Montana exploradora de Guatemala, S. A.

5.2. Descripción y comportamiento de las Constantes del controlador PID

La constante P, del Control Proporcional (P: Ganancia) ajusta la salida de control, basado en la diferencia entre el ajuste y el flujo actual medido. Un valor grande de P incrementa la sensibilidad del control, permitiendo que el PLC reaccione más rápido a cambios presentados en la variable medida, el inconveniente es que esta rapidez hace que el control sea menos estable, es decir más susceptible a oscilaciones.

El control no puede alcanzar el ajuste usando únicamente la constante P. Siempre existirá una pequeña diferencia entre estas dos variables. Esta diferencia (*offset*) o señal de error nunca llega a ser cero, que sería lo ideal. Tal vez, para el proceso, un pequeño valor de P puede llegar al ajuste, pero esto tomaría demasiado tiempo; es por eso que se requiere de la constante I, de control integral (I: Integral) para eliminar el *offset* creado por la constante proporcional.

La constante I, del Control Integral (I: Integral) da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento. La constante control integral I: se emplea para incrementar o reducir la magnitud de la salida de control para eliminar la señal de error causado por la constante P. La constante I actúa sobre la acumulación de errores dentro de pequeños incrementos de tiempo. Puesto que el proceso alcanza el ajuste y el error tiende a ser menor, el efecto de la constante I disminuye. Un valor alto de la constante I, le permite al PLC reaccionar a cambios rápidos, pero este puede hacer que sea menos estable.

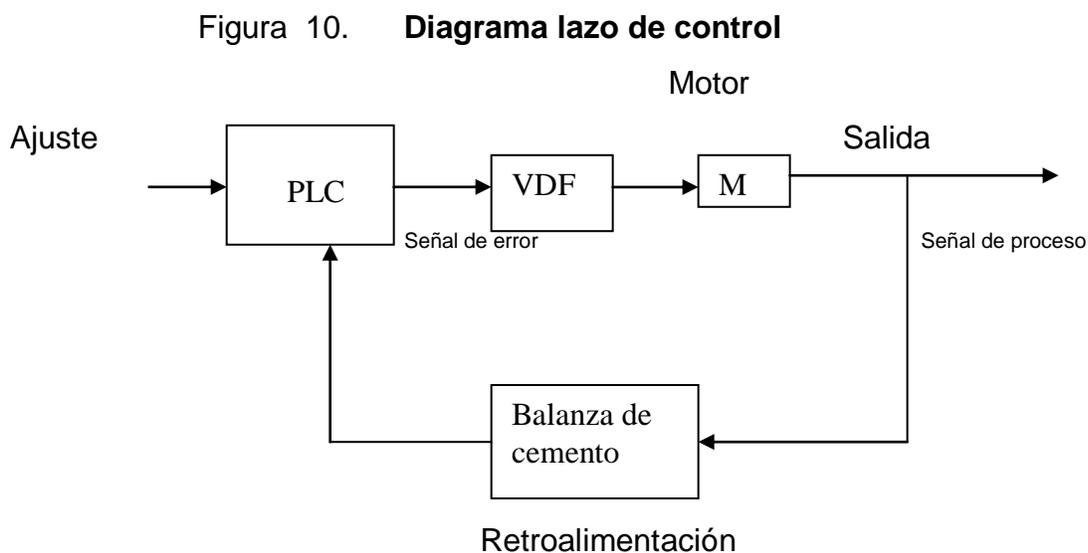
Las constante P e I son suficientes para muchas aplicaciones (pienso que esta es una de ellas). Sin embargo, si requerimos respuestas más rápidas, se hace necesario el empleo de magnitudes grandes de P e I. El inconveniente ahora es que estas hacen que el sistema se vuelva inestable. Así se hace necesario el empleo de la constante D (D: derivativa).

La constante D, del Control Derivativo (D: Derivativo) es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante, que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación. La acción de

control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que sólo es eficaz durante períodos transitorios.

Si encontramos un error constante, este valor derivativo no hará efecto en la variable de control. Cuando el error es muy grande, el control PD hace que la respuesta sea muy rápida. Cuando el error es pequeño, la constante derivativa hace que la variable de control se reduzca para evitar el rebasamiento del ajuste y, por consiguiente, de las oscilaciones. Una magnitud grande de P requiere un gran valor de D.

Mediante el lazo de control de la figura 10 se puede calcular la sintonización y llegar a la ecuación que regirá el lazo de control.



Fuente: Planta de agregados Montana exploradora de Guatemala, S. A.

5.3. Sintonización del control PID

Existen varios métodos para calcular las constantes PID. En este caso, se realizó con el método de respuesta al escalón o prueba y error, para obtener las constantes y poder modelar la ecuación siguiente:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p K_i \int e(t) dt + K_p K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (24)$$

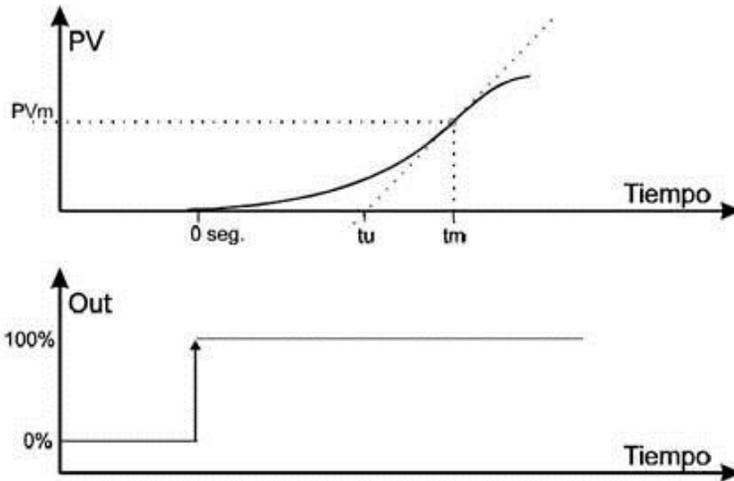
Este método es muy confiable pero implica alimentar con máximo caudal en un pequeño lapso de tiempo, lo cual puede llevar a taponamientos en el proceso.

En determinado instante ($t = 0$) activar el tornillo alimentador de cemento a la máxima velocidad. Esto se logra colocando un ajuste alto en el variador de velocidad de alimentación de cemento (ejemplo, pasar de 0 a 80kg/min). Se deben dejar los valores $I = 0$ y $D = 0$.

Observar la gráfica 12 de Caudal (Kg/min) Vs tiempo (seg). Se grafica hasta cuando el caudal ya no siga aumentando con el máximo de la velocidad del alimentador de tornillo.

Determinar el punto en la figura 12 en el que la curva obtuvo su mayor pendiente o velocidad de subida. Sean (t_m , PV_m) las coordenadas de ese punto. En la figura 11 trazar una recta tangente a este punto y corte el eje del tiempo en un tiempo t_u . El valor de t_u es el retardo característico del sistema, bastante similar al tiempo t de oscilación oscilaciones (t debe ser aproximadamente $2 t_u$)

Figura 11. Respuesta al escalón



Fuente: Controladores PID Virginia Mazzone Control Automático 1.

Los parámetros óptimos determinados por este método son los siguientes:

Se tomaron como datos $PV_m = 70$, $t_m = 7$, $t_u = 3$, $SP = 80$.

Para encontrar los valores de las constantes PID tenemos las ecuaciones 25, 26, 27 y 28.

Sustituyendo datos en las ecuaciones obtenemos el valor de PID

$$V_{max} = PV_m / (t_m - t_u) \quad (25)$$

$$V_{max} = 17.5$$

$$P = \sqrt{3} * V_{max} * t_u * 100\% / SP \quad (26)$$

$$P = 111$$

$$I = 0,5 * 10000 / t_u \quad (27)$$

$$I = 1667$$

$$D = t_u / 4 \quad (28)$$

$$D = 0.75$$

$$T_c = t_u / 2$$

$$T_c = 1.5$$

Se aplicó el método de sintonización de prueba y error, para determinar los parámetros del controlador PID dados en la función:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p K_i \int e(t) dt + K_p K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (29)$$

Sustituyendo $P = 111$, $I = 1667$, $D = 0.75$

$$m(t) = 111e(t) + 111 \cdot 1667 \int e(t) dt + 111 \cdot 0.75 \frac{de(t)}{dt}$$

Al final de la prueba, se hizo variar el ajuste, a fin de poner a prueba la capacidad de respuesta del controlador con estos parámetros, aún considerando que el ajuste suele mantenerse en un valor constante, y cuando varía, sus cambios no son mayores al 20%, aceptable para la aplicación de la planta de agregados.

Se puede deducir que las fórmulas de este método dan una aproximación a cada parámetro; sin embargo, al concluir dicha sintonización, si es necesario, se debe seguir optimizando el valor de los parámetros de acuerdo a la experiencia y dinámica del proceso adquirida mediante este mismo trabajo de sintonización.

Por último, cabe resaltar que este método es práctico y aplicable en procesos donde la respuesta puede tener cierto grado de error. En el caso de la minería no se necesita tener mucha exactitud: En la industria esto es suficiente para muchos lazos, también existen bastantes ciclos complejos y de bastante importancia donde un valor de error mayor suponen pérdidas de cualquier orden (producción, proceso, mecánicas, eléctricas, mayor mantenimiento = dinero) por lo que para estos casos se emplean técnicas avanzadas de control, así sea con control común PID “mejor sintonizado”.

Los puntos de entrada y salida del PLC son las entradas y salidas físicas que éste puede manejar, cada punto tiene su representación interna en la memoria del PLC, en la que se utilizan números para identificarlos.

Los puntos de entrada son designados como X0, X1, X2, X3..., mientras que los puntos de salida se identifican como Y0, Y1, Y2, Y3...

Las entradas y salidas del PLC utilizado en la planta de agregados se muestran en la tabla X. Las entradas y salidas analógicas varían de 4 a 20 mA.

Tabla X. Entradas y salidas digital/analógica del PLC

	Entrada Digital	Salida Digital	Entrada Analógica	Salida Analógica
Pesometro de cemento			X	
Peso metro del transportador			X	
Flujo metro de Agua			X	
Nivel de silo de cemento			X	
VDF Tornillo de cemento				X
Electro válvula de agua				X
M1 = Mezclador 1		X		
M2 = Mezclador 2		X		
M3 = Motor banda alimentación		X		
M4 = Motor banda transportadora		X		
M5 = Alimentador de cemento VFD		X		
M6 = Motor vibrador 1		X		
M7 = Motor vibrador 2		X		
M8 = Bomba de agua		X		
Tolva alimentación de material		X		
Transportador alimentador		X		
Transportador No. 1		X		

Fuente: Planta de agregados Montana Exploradora de Guatemala, S. A.

CONCLUSIONES

1. El montaje de la planta de agregados en la mina Marlin cumplió con las normas técnicas emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, para darle seguridad a personas y el equipo instalado.
2. El cálculo de caída de tensión en la línea de transmisión de 0.986 Km para el cable AAC-336.4 en porcentaje es de 4.07% porcentaje que es aceptable, según las normas NEC 1996 (ver libro Guía práctica para instalaciones eléctricas de Enríquez Harper página 105) que señala el máximo porcentaje permisible de caída de voltaje, es el 5 %, mismo que señala las normas técnicas emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
3. El sistema de tierra física en la planta de agregados, tiene un valor de 1.18Ω , este valor es aceptable, según la norma guatemalteca que establece como mínimo 5Ω , señaladas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica CNEE especificadas en el Título II, Capítulo IV, Artículo 33, normas técnicas de diseño.
4. De los resultados obtenidos con el método de prueba y error para la sintonización de los parámetros PID, se puede concluir que el método dio las constantes, con bastante aceptación porque el sistema es estable y cumple con la producción requerida por la mina subterránea. Cabe resaltar la importancia de un valor de error mayor porque puede ocasionar pérdidas de cualquier orden producción, proceso, mecánicas, eléctricas, y todo esto se refleja en costos de producción y mantenimiento.

RECOMENDACIONES

1. Para mejorar la caída de voltaje 3990.53V y poder aumentar la carga de la planta y el túnel, se debe cambiar el voltaje de 4.16KV a 13.8KV, con esto se reduciría la cantidad de corriente que circula por la línea y obtendremos un menor costo a largo plazo. Con esto no sería necesario cambiar el conductor de la línea de transmisión.
2. Para disminuir la resistencia del sistema de tierra, una manera eficaz es lograr que los electrodos a conexión a tierra física tengan una mayor profundidad. Por lo general, al duplicar la longitud del electrodo de tierra física, es posible reducir el nivel de resistencia en un 40% adicional. En ocasiones no es posible aumentar el tamaño del electrodo y otra manera de disminuir la resistencia es aumentando el número de electrodos de tierra física.
3. Cuando la planta esté en funcionamiento normal, se deben seguir variando los parámetros de acuerdo a la experiencia y condiciones de producción que se tengan para obtener los parámetros PID óptimos para esta aplicación con el mismo método prueba y error,
4. En el diseño de las instalaciones de la planta de agregados es necesario la ampliación de carga, puesto que en el futuro la mina subterránea estará aumentando su longitud, esto provoca caída de tensión y el posible aumento de temperatura en todos los dispositivos eléctricos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANIXTER INC. *Wire & cable catalog*. Belden. The United States. 1999
656 p.
2. ANSI/IEEE. *Standard for low-voltage AC, institute of Electrical and Electronics Engineers*. C37.13-2008. The United States: 1990. 357 p.
3. COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA. *Normas técnicas de diseño y operación de las instalaciones de distribución*. CNEE No. 47-99. Guatemala: 1999.
4. ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. *Elementos de diseño de las instalaciones eléctricas industriales*. 2a. ed. México: Limusa, 2004. 390 p. ISBN: 968-18-6381-X
5. ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. *Guía práctica para el cálculo de las instalaciones eléctricas*. 2a. ed. México D. F: Limusa, 2004, 455 p. ISBN 918-18-4919-18.1.
6. TEAM MIXING TECHNOLOGIES. *Cement backfill system manual Glamis Gold Ltd*. Montana Exploradora de Guatemala, S.A. 2006. 145 p.