

ANALISIS DE REGULACIÓN DE TENSIÓN EN INSTALACIONES
PROVISIONALES TÚNEL PAMPLONA Y TÚNEL PAMPLONITA DEL
CORREDOR VIAL DOBLE CALZADA PAMPLONA - CÚCUTA PARA LA
EMPRESA SACYR COLOMBIA S.A.S

VICTOR ALONSO MERCHAN FLÓREZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA
PAMPLONA, 19 DE NOVIEMBRE DE 2020

ANALISIS DE REGULACIÓN DE TENSIÓN EN INSTALACIONES
PROVISIONALES TÚNEL PAMPLONA Y TÚNEL PAMPLONITA DEL
CORREDOR VIAL DOBLE CALZADA PAMPLONA - CÚCUTA PARA LA
EMPRESA SACYR COLOMBIA S.A.S

VICTOR ALONSO MERCHAN FLÓREZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO ELÉCTRICO

Director: M.S(c). Jesús Enrique Salamanca Jaimes
INGENIERO ELÉCTRICO
jexuz27@gmail.com

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA
PAMPLONA, 19 DE NOVIEMBRE DE 2020

DEDICATORIA

A Dios, a mi amada madre, a mi amado padre y hermano

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero darle gracias a Dios por ser mi guía en los momentos difíciles y bonitos de mi vida universitaria, a mis padres y hermano por motivarme cada día de mi existencia a ser mejor ser humano; un agradecimiento especial al ingeniero Jesús Salamanca Jaimes por su exigencia, colaboración y enseñanzas desde el quinto semestre de mi carrera hasta la finalización de este trabajo para la obtención de mi título.

Al cuerpo docente de la carrera de ingeniería eléctrica de la Universidad de Pamplona sede Villa del Rosario por cada asignatura dada y cada conocimiento otorgado en este largo caminar; a mi alma mater Universidad de Pamplona que me abrió las puertas siendo un menor de edad ayudándome a formar intelectualmente y como ciudadano de bien para la sociedad.

Un reconocimiento muy especial al ingeniero Roberto Maseda y al ingeniero Joselito Chero por impulsarme al cumplimiento de mis sueños profesionales, que gracias al running conocí estas dos grandes personas que me brindaron sus consejos.

A la empresa Sacyr Colombia S.A por otorgarme el voto de confianza para empezar la realización de mi vida profesional ayudándome en la formación y crecimiento laboral día a día; a todas las personas de los turnos rotativos de los frentes de trabajo del túnel Pamplona que me han ido enseñando conocimientos técnicos y personales especialmente a los ingenieros Cesar Manrique jefe de túnel, Adriana Moreno ingeniera junior, Elkin Prado coordinador SST, Ángel Ojeda y Adriana Rosas inspectores SST.

Una exaltación especial para el supervisor eléctrico túnel Pamplona Gerardo Vargas, al ingeniero Jaime Andrés Fonseca encargado de redes del proyecto doble

calzada Pamplona-Cúcuta y al supervisor mecánico túnel Pamplona Howard López que en el transcurso de mi estancia me aclararon y enseñaron más conocimientos técnicos profesionales de mi carrera, que con su paciencia me enseñaron día a día y me colaboraron con la realización de este trabajo de grado.

Al geólogo Cristhiam Rodríguez y a María Fernanda Cabezas inspectores del área de calidad por la colaboración continua en la realización de mi trabajo de grado brindándome consejos de redacción y exposición desde el comienzo de este.

Al ingeniero Erik Duran por volverse mi mentor en la parte eléctrica, por tener la oportunidad de trabajar en su empresa y empezar a conocer el campo profesional desde el termino de mi carrera técnica como electricista residencial, al ingeniero Julio Peña por abrirme las puertas de la empresa Energizett al brindarme la confianza en tan corta de edad en la realización de algunos trabajos.

A mi otra familia Runners Cúcuta por abrirme un espacio de integración, amor, solidaridad y de hábitos de vida saludable especialmente a Jesús Lozano y Viviana Casadiegos por ser como mis padres adoptivos en cada momento de competencia, en cada consejo brindado para mi realización personal, profesional y deportiva.

A mis compañeros de clase en especialmente a Steven Florez, Alejandro Correa, Angie Suarez, Eduwin Galindo, Iván Gómez, Stiwén Cogaria y Tatiana Rojas por hacerme parte de este proceso formativo en el cual enfrentamos días de felicidad y tristeza, trasnochadas y momentos especiales en lo largo de nuestra formación como ingenieros eléctricos.

Al equipo eléctrico de trabajo en los frentes de obra de túnel Pamplona por cada día ofrecerme conocimientos, por tener paciencia en la realización de trabajos eléctricos conmigo y brindarme su amabilidad junto con la confianza de un trabajo bien realizado.

A todos mis amigos y demás personas que estuvieron en este proceso de formación motivándome, impulsándome, enseñándome y cada día haciendo de mí actuar una mejor persona en mi vida profesional y personal, siempre dándome consejos y felicitándome por los pequeños logros obtenidos en este camino estudiantil.

TABLA DE CONTENIDO

	PÁG.
RESUMEN	16
INTRODUCCIÓN	17
1. JUSTIFICACIÓN	18
2. OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo general	19
2.2 Objetivos específicos	19
3. MARCO TEÓRICO	20
3.1 Referencias teóricas	20
3.1.1 Excavación y Sostenimiento de Túneles	20
3.1.1.1 Generalidades y definiciones.	20
3.1.1.2 Método constructivo.	22
3.1.1.3 Fase 1. Excavación.	23
3.1.1.4 Fase 2. Ventilación y Saneo.	23
3.1.1.5 Fase 3. Desescombros.	23
3.1.1.6 Fase 4. Instalación del soporte.	23
3.1.2 Conceptos Eléctricos	24
3.1.3 Sistema de Suministro Eléctrico	27
3.1.3.1 Generación.	27
3.1.3.2 Subestaciones.	27
3.1.3.3 Transmisión.	28
3.1.3.4 Distribución.	28
3.1.4 Caída de Tensión	28

3.1.4.1	Definición de caída de tensión.	28
3.1.4.3	Factores que inciden en la caída de tensión.	29
3.1.4.4	Métodos utilizados para mejorar la caída de tensión.	31
3.1.5	Regulación de Tensión	32
3.1.5.1	Normatividad eléctrica internacional y nacional en regulación de tensión.	33
3.1.5.2	Cálculo de regulación de tensión según norma CENS CNS-NT-02.	35
3.1.6	Equipos Involucrados en el Análisis de Regulación de Tensión	37
3.1.6.1.1	Ficha eléctrica del equipo robotizado para Shotcrete SPM 500 Wetkret.	37
3.1.6.2	Equipo robotizado para Shotcrete SPM 4210 Wetkret.	38
3.1.6.2.1	Ficha eléctrica del equipo robotizado para Shotcrete SPM 4210 Wetkret.	38
3.1.6.3	Equipo de perforación para túneles sandvik DT920i.	39
3.1.6.3.1	Ficha eléctrica del equipo de perforación para túneles sandvik DT920i.	39
3.1.6.4	Equipo de perforación para túneles sandvik DT1131.	39
3.1.6.4.1	Ficha eléctrica del equipo de perforación para túneles sandvik DT1131	40
3.2	Marco Contextual	40
3.2.1	Información General de la Empresa	40
3.2.1.1	Descripción.	40
3.2.1.2	Misión.	41
3.2.1.3	Visión.	41
3.2.1.4	Valores	41

3.2.1.5 Compromiso con la calidad.	41
3.2.1.6 Organigrama e inversion.	42
3.2.2 Información General del Proyecto Doble Calzada Pamplona-Cúcuta	43
3.2.2.1 Descripción.	43
3.2.2.2 Alcance	43
3.2.2.3 Ubicación geográfica de los túneles.	44
4. ANÁLISIS DE REGULACIÓN Y CAÍDA DE TENSIÓN	45
4.1 Caracterización de la red de cargas presentes en la instalación eléctrica	45
4.1.1 Obtención de Cálculos de Regulación de Tensión	51
4.2 Identificación de alternativas para el mejoramiento de los índices de regulación de tensión en la instalación eléctrica	54
4.2.1 Revisión del Calibre de Conductor en Uso	54
4.2.2 Diagnóstico del Buen Funcionamiento de los Equipos por Parte de los Operarios	56
4.3 Determinación de la viabilidad técnica y económica	62
4.3.1 Revisión Técnica por Medio del Programa DIGSILENT	62
4.3.2 Planteamiento de Alternativas a Evaluar Económicamente	72
4.4 Indicación de la alternativa viable económicamente y técnicamente	73
4.4.1 Evaluación Económica de las Alternativas Aprobadas Técnicamente	73
4.4.1.1 Viabilidad económica de la repotenciación por calibre de conductor 500MCM y reemplazo por un calibre de conductor mayor.	73
4.4.1.2 Viabilidad económica de los bancos de condensadores en la conexión de las cargas.	75
4.4.1.3 Viabilidad económica de los transformadores de baja a baja.	77

4.4.2 Selección de la Alternativa más Viable Económicamente y Técnicamente para la Mejora de los Índices de Regulación de Tensión	79
5. RESULTADOS	82
CONCLUSIONES	83
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	85

LISTA DE TABLAS

	PÁG.
Tabla 1 Límites de regulación de tensión según norma CENS	35
Tabla 2 Rangos de regulación de tensión según normatividades	35
Tabla 3 Factores de corrección según norma CENS	36
Tabla 4 Principales características eléctricas del equipo de perforación para túneles sandvik DT920i	39
Tabla 5 Principales características eléctricas del equipo de perforación para túneles sandvik DT1131	40
Tabla 6 Consumo y tensión de los equipos de túnel principal portal entrada	46
Tabla 7 Consumo y tensión de los equipos de galería de emergencia portal entrada	47
Tabla 8 Mediciones de tensión y corriente en subestación eléctrica portal entrada	48
Tabla 9 Cálculos de regulación de tensión portal entrada	53
Tabla 10 Cálculos de regulación de tensión portal salida	53
Tabla 11 Ampacidades permisibles en conductores aislados	55
Tabla 12 Costo repotenciación con cable 500MCM	74
Tabla 13 Costo reemplazo con cable 750MCM	75
Tabla 14 Costo banco de condensadores	77
Tabla 15 Costo transformadores	79

LISTA DE FIGURAS

	PÁG.
Figura 1 Excavación (perforación y voladura), carga y transporte	21
Figura 2 Instalación de Soporte (concreto lanzado, pernos, marcos metálicos, etc.)	21
Figura 3 Ejecución de bancada (excavación y soporte) e invert (si es necesario)	22
Figura 4 Jumbo hidráulico de 3 brazos	22
Figura 5 Aplicación de concreto lanzado	24
Figura 6 Capacidad efectiva instalada en Colombia 2019	27
Figura 7 Subestación eléctrica Portal Salida túnel Pamplona	27
Figura 8 Sistema eléctrico	28
Figura 9 Algunos factores que causan la presencia de caída de tensión	30
Figura 10 Efectos de la caída de tensión en un sistema eléctrico	31
Figura 11 Recomendaciones para mejorar la caída de tensión	32
Figura 12 Estabilidad de tensión	32
Figura 13 Estabilidad de tensión según el factor de potencia	33
Figura 14 Características de la bomba de hormigón integrada al equipo	37
Figura 15 Características del compresor integrado al equipo	37
Figura 16 Características del enrollacable del equipo que se conecta a la red eléctrica	37
Figura 17 Características de la bomba de hormigón integrada al equipo	38
Figura 18 Características del compresor integrado al equipo	38
Figura 19 Características del enrollacable del equipo que se conecta a la red eléctrica	38
Figura 20 Equipo de perforación para túneles sandvik DT920i	39
Figura 21 Equipo de perforación para túneles sandvik DT1131	39
Figura 22 Línea de tiempo acontecimientos relevantes de la compañía	40
Figura 23 Organigrama general e inversión	42

Figura 24	Trazado general del proyecto doble calzada Pamplona-Cúcuta	43
Figura 25	Ubicación geográfica túnel de Pamplona y túnel de Pamplonita	44
Figura 26	Diagrama unifilar portal entrada	45
Figura 27	Subestación eléctrica portal entrada	46
Figura 28	Diagrama unifilar portal salida	47
Figura 29	Evidencia de mediciones transformador 1	49
Figura 30	Evidencia de mediciones transformador 2	49
Figura 31	Evidencia electrónica de mediciones en jumbo de 3 brazos	50
Figura 32	Evidencia electrónica de mediciones en jumbo de 2 brazos	50
Figura 33	Evidencia mediciones en robojet	51
Figura 34	Jumbo en proceso de barrenación del frente túnel principal	57
Figura 35	Vista desde la cabina de mando del equipo en su proceso productivo	57
Figura 36	Operación de uno de los brazos del equipo	58
Figura 37	Manipulación del equipo por parte del operador	58
Figura 38	Sistema electrónico de control robojet	59
Figura 39	Manipulación del brazo de proyección por parte del operador	60
Figura 40	Datos de pantalla registrados por los operarios	61
Figura 41	Operación de brazo de lanzado de concreto	61
Figura 42	Sistema eléctrico portal entrada túnel Pamplona en DIGSILENT	62
Figura 43	Sistema eléctrico portal entrada túnel Pamplona compensación reactiva	63
Figura 44	Reporte perfiles de tensión portal entrada túnel Pamplona	64
Figura 45	Sistema eléctrico portal salida túnel Pamplona en DIGSILENT	65
Figura 46	Sistema eléctrico portal salida túnel Pamplona compensación reactiva	66
Figura 47	Reporte perfiles de tensión portal salida túnel Pamplona	67
Figura 48	Sistema eléctrico portal entrada túnel Pamplonita en DIGSILENT	67
Figura 49	Sistema eléctrico portal entrada túnel Pamplonita compensación reactiva	68
Figura 50	Reporte perfiles de tensión portal entrada túnel Pamplonita	69

Figura 51	Sistema eléctrico portal salida túnel Pamplonita en DIGSILENT	70
Figura 52	Sistema eléctrico portal salida túnel Pamplonita compensación reactiva	71
Figura 53	Reporte perfiles de tensión portal salida túnel Pamplonita	71
Figura 54	Precios por metro de calibres de conductores	73
Figura 55	Precio por metro de calibre de conductor 750KCMIL	74
Figura 56	Precio de banco de condensadores de 50kVAr	76
Figura 57	Precio de banco de condensadores de 400,500 y 600kVAr	76
Figura 58	Especificaciones técnicas transformadores a cotizar	78
Figura 59	Valor unitario de los transformadores y celdas	78
Figura 60	Especificaciones generales de los transformadores	80
Figura 61	Vistas del transformador en seco	80
Figura 62	Partes de constitutivas del transformador	81
Figura 63	Especificaciones generales del gabinete	81
Figura 64	Vistas del gabinete de protección	81

RESUMEN

Este proyecto se realiza con el fin de hacer un análisis a la caída de tensión en las excavaciones para túneles, en este caso en la excavación del túnel Pamplona y Pamplonita. Mirando así los efectos y alternativas necesarias que se deben tomar para tener una tensión de buena calidad que no produzca paradas en los procesos constructivos. Este proyecto puede ser el preámbulo a la solución de esta anomalía en las excavaciones que se realizan en el país.

Palabras claves: Caída de tensión, regulación de tensión, corrección, alternativas

INTRODUCCIÓN

Los procesos de excavación de minería subterránea, en especial aquellos enfocados en la construcción de túneles, registran niveles de caída de tensión; esto contribuye en gran manera a que se generen anomalías en la parte de producción, las cuales pueden causar paradas súbitas en los equipos y esto conlleva a que los costos aumenten, generando pérdidas para las empresas desarrolladoras de estos proyectos de infraestructura.

Es de gran importancia plantear alternativas de carácter técnico y económico, obteniendo un análisis de todas las causas y efectos presentados por la caída de tensión, que permitan una regulación de tensión adecuada dentro de los parámetros exigidos por los operadores de red en el territorio colombiano y las normativas eléctricas del país.

1. JUSTIFICACIÓN

En las instalaciones provisionales usadas en el proceso de excavación se hace necesario de alguna manera u otra corregir la caída de tensión provocada en algunos casos por la larga distancia que se presenta o por la carga instalada utilizada para llevar a cabo los procesos de perforación y lanzado de concreto; se necesita asegurar una buena calidad de servicio para la conexión de estos equipos que ofrezcan un óptimo desempeño del equipo y que no generen daños o paradas de producción que son perjudiciales para la empresa.

Se llevará a cabo un análisis en todos los procesos de excavación de los factores que producen esta caída de tensión que los más comunes son los ya mencionados o estudiando otros factores que se pueden producir en la instalación eléctrica.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer alternativas para mejorar la regulación de tensión en las instalaciones provisionales del proceso de excavación del túnel Pamplona y túnel Pamplonita del corredor vial doble calzada Pamplona - Cúcuta para la empresa SACYR Colombia SAS.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la red de cargas presentes en la instalación eléctrica provisional del proceso de excavación túnel Pamplona del corredor vial doble calzada Pamplona – Cúcuta.
- Identificar las posibles alternativas para obtener mejores índices de regulación de tensión en la instalación provisional existente y futura.
- Determinar la viabilidad técnica y económica de las alternativas propuestas para seleccionar la propuesta óptima para el túnel Pamplona y túnel Pamplonita.
- Indicar la alternativa que cumpla con la viabilidad técnica y económica analizada en las instalaciones provisionales túnel Pamplona y túnel Pamplonita.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 REFERENCIAS TEÓRICAS

3.1.1 Excavación y Sostenimiento de Túneles

Según el manual técnico de excavación y sostenimiento de túneles de la empresa Sacyr se tiene que tener en cuenta para la construcción lo siguiente:

- La elección del método constructivo a emplear en un túnel debe estar condicionada, a su vez, por las características geotécnicas del terreno y la geometría del túnel en sí.
- Se ha optado por plantear una tipología de excavación y sostenimiento basada en el llamado Nuevo Método Austriaco o NATM (New Austrian Tunneling Method). Este método de ejecución de túneles debe considerarse como una filosofía de diseño o actuación [1].

3.1.1.1 Generalidades y definiciones. Para ejecutar las labores de construcción de túneles, se realiza en 2 fases que son conocidas como actividades de excavación y sostenimiento.

Excavación: Es la remoción de materiales, esto depende de la forma del terreno y del diseño del proyecto, la excavación se puede dar de forma mecánica o con voladura [1].

Sostenimiento: Conjunto de elementos que se instalan en el túnel que sirven de resistencia después de realizarse la excavación y que ofrecen una estabilidad hasta la colocación del revestimiento [1].

3.1.1.2 Método constructivo. El nuevo método austriaco (NATM), se basa en la consideración de la utilización del terreno que rodea a la sección del túnel como elemento de resistencia frente a los incrementos de tensión que se producen durante la excavación. Consiste en relajar el estado tensional del macizo rocoso del entorno del túnel, asegurando una deformación hasta alcanzar un punto de equilibrio, para que en la fase de sostenimiento sea capaz de hacer frente a la tensión generada por el terreno y controlar también la deformación del mismo [1].

En las siguientes figuras se explica el proceso del nuevo método austriaco mediante excavación por voladura:

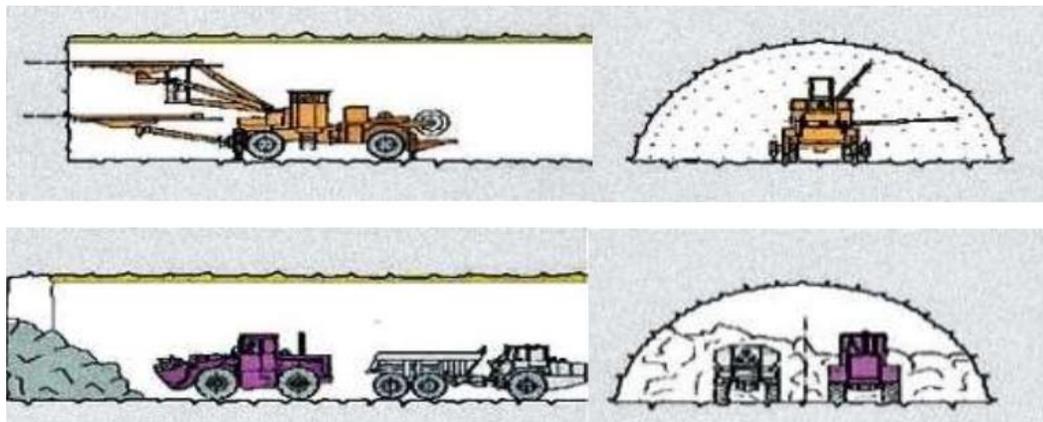


Figura 1 Excavación (perforación y voladura), carga y transporte

Fuente: Manual técnico de excavación y sostenimiento

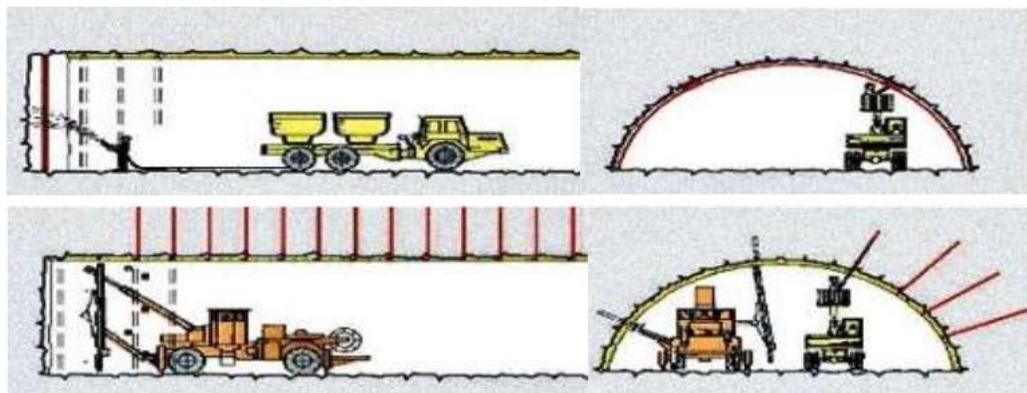


Figura 2 Instalación de Soporte (concreto lanzado, pernos, marcos metálicos, etc.)

Fuente: Manual técnico de excavación y sostenimiento

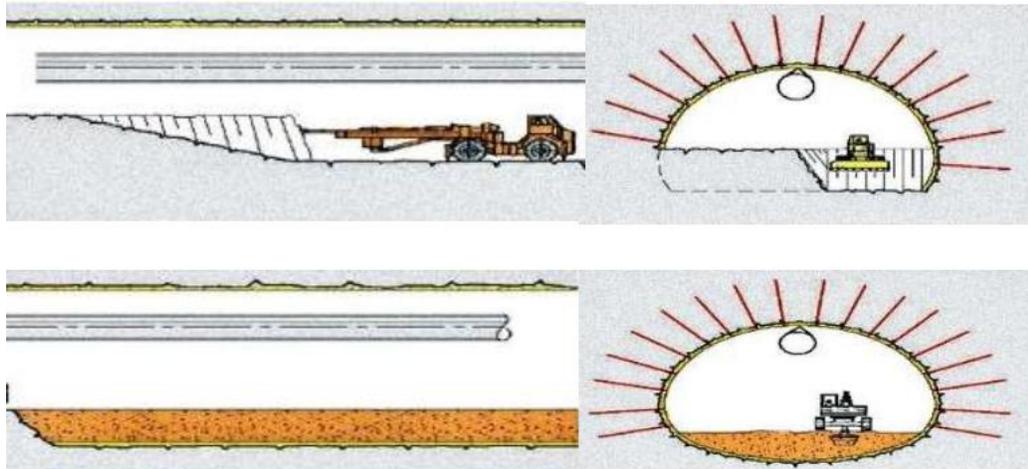


Figura 3 Ejecución de bancada (excavación y soporte) e invert (si es necesario)
Fuente: Manual técnico de excavación y sostenimiento

3.1.1.3 Fase 1. Excavación. La excavación de los túneles del proyecto y las galerías de emergencia se realizará mediante excavación por perforación y voladura o por medio de excavación mecánica. La excavación por perforación y voladura se llevará a cabo gracias al manejo de un equipo llamado jumbo hidráulico automatizado, que nos garantiza altas productividades, calidad en las perforaciones y mayor confortabilidad para los operarios [1].

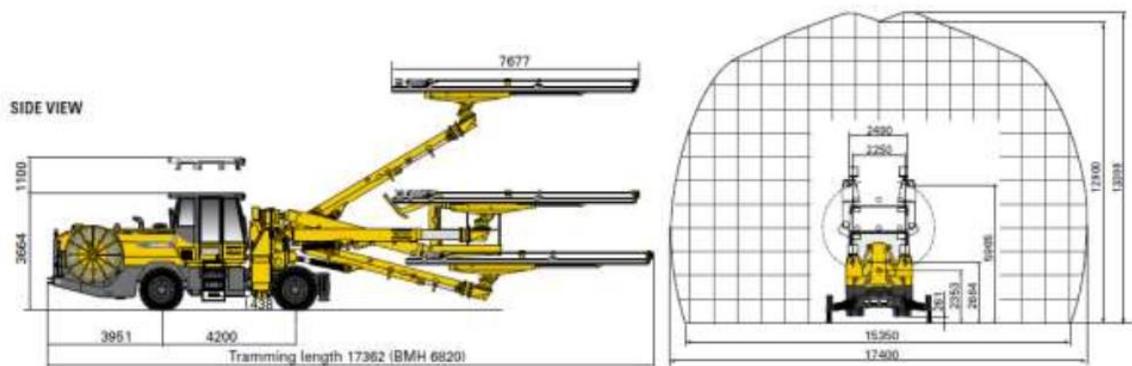


Figura 4 Jumbo hidráulico de 3 brazos
Fuente: Manual técnico de excavación y sostenimiento

Perforación y carga de la voladura: La perforación se realiza mediante un jumbo electrohidráulico. El jumbo tiene un dispositivo de paralelismo automático para asegurar el direccionamiento correcto de los taladros.

Para realizar la carga de la voladura se utilizará una canasta para situar a los operarios en determinada altura, al terminar la carga y comprobarse que se cumplen todas las medidas de seguridad se procede a realizar la detonación de la voladura [1].

3.1.1.4 Fase 2. Ventilación y Saneo. En aquellas secciones de excavación donde se ejecuta proceso de perforación y voladura se debe ejecutar ventilación del frente de excavación, que permita eliminar los gases nocivos. Una vez que se ha adecuado con la ventilación suficiente y se ha medido con los instrumentos dispuestos para revisar la calidad del aire circundante se procede al saneo de la roca del perímetro [1].

3.1.1.5 Fase 3. Desescombro. Se lleva a cabo la extracción del material de voladura del interior del túnel hasta las zonas dispuestas para el depósito del material de excavación, esta fase cuenta con la participación de un cargador frontal neumático y camiones articulados tipo volqueta [1].

3.1.1.6 Fase 4. Instalación del soporte. El sostenimiento consistirá en lanzar concreto con fibra metálica y dependiendo del tipo de soporte se deberá aplicar marcos metálicos, pernos y malla electrosoldada. El concreto lanzado se colocará a lo largo de toda la superficie de los pases de excavación; el método general de proyección se denomina vía húmeda en el que los componentes del concreto se mezclan junto con la fibra metálica en un tiempo menor a 3 minutos [1].

Colocación del concreto lanzado: Se aplicará mediante un equipo de proyección húmeda. Las ventajas de estos equipos son:

- Fácil aplicación del concreto en cualquier área del túnel
- Se utiliza en secciones grandes como en secciones reducidas como los entronques y galerías de emergencias
- Alto rendimiento con una proyección alrededor de 30m³/h



Figura 5 Aplicación de concreto lanzado
Fuente: Manual técnico de excavación y sostenimiento

3.1.2 Conceptos Eléctricos

Tensión eléctrica: Es la energía suministrada para un flujo de electrones a través de un circuito eléctrico, la medición se realiza entre dos puntos en un sistema eléctrico; uno conocido como tierra o de potencial cero y el otro una de las fases a medir; también se puede realizar la medición entre dos fases. Su unidad de medida es el voltio(V) [2].

Corriente eléctrica: Es la cantidad de electrones que fluyen en un conductor con una misma dirección durante un instante de tiempo dado, esta energía que entregan los electrones se utiliza para realizar un trabajo. La unidad de medida es el amperio(A) [2].

Resistencia eléctrica: Es la oposición que ofrece un material a determinado paso de flujo de electrones. La unidad de medida es el ohmio(Ω) [2].

Potencia eléctrica: es la energía absorbida o que necesita cualquier equipo para llevar a cabo algún trabajo en determinado instante de tiempo. La unidad de medida se da en watts (W) [2].

Carga eléctrica: Cualquier dispositivo que necesita de un fluido eléctrico y que es el responsable de la circulación de corriente en un conductor de un circuito eléctrico [2].

Circuito eléctrico: En la mayoría de los casos está formado por una fuente de energía, un interruptor, un conductor y una carga que forman una trayectoria cerrada entre estos elementos y puede alimentar a otras derivaciones de circuitos [2]

Acometida: Derivación de la red local de servicio público de energía eléctrica, que llega hasta el registro de corte del inmueble, también puede llegar a algunos inmuebles hasta el registro de corte general [3].

Acometida Aérea: Conductores de acometida que van desde el ultimo poste o soporte aéreo hasta la entrada de la acometida a la estructura o inmueble con el servicio de fluido eléctrico [3].

Acometida Subterránea: Aquellos conductores que se encuentran enterrados por medio de canalizaciones que van desde la red de distribución de soporte aéreo hasta el primer punto de conexión del tablero general de la estructura e inmueble con el servicio de fluido eléctrico [3].

Carga Continua: Es aquella carga cuya corriente máxima se prevé que circule durante un periodo de tres horas o más [3].

Carga lineal: Carga eléctrica que al operar en estado estacionario presenta impedancia constante a través del ciclo de tensión aplicado [4].

Carga no lineal: Carga eléctrica que extrae la corriente de forma discontinua o que tiene una variación en la impedancia durante cada ciclo de la forma de onda de tensión de corriente alterna [4].

Carga critica: Es aquella que cuando deja de funcionar u opera de forma inadecuada pone en peligro la seguridad de las personas y ocasiona grandes perjuicios económicos [4].

Circuito ramal: Son los conductores de un circuito que se encuentran entre el dispositivo final de protección y las salidas [3].

Circuito ramal de uso general: aquel circuito ramal que alimenta diversas salidas para alumbrado y artefactos [3].

Equipo: Termino general que incluye materiales, accesorios, dispositivos, artefactos utilizados como parte de una instalación eléctrica [3].

Equipo eléctrico utilitario: Es aquel equipo que utiliza energía eléctrica para propósitos electrónicos, electromecánicos, químicos, de alumbrado y similares [3].

Factor de potencia: Es la relación existente entre la potencia activa y la potencia aparente en un sistema eléctrico [3].

Salida: Punto eléctrico de una instalación en el cual se toma corriente para suministrarla a los equipos en operación [3].

Sobrecarga: Funcionamiento de un equipo por encima de sus parámetros normales a plena carga o de un conductor por encima de la capacidad que tiene este como capacidad nominal; si llega a observarse este fenómeno en un tiempo

suficientemente alto puede causar daños y calentamiento peligroso por pérdidas en efecto joule [3].

3.1.3 Sistema de Suministro Eléctrico

3.1.3.1 Generación. Es el proceso por el cual la energía cinética se transforma en energía eléctrica, actualmente en Colombia se han venido impulsando proyectos en los cuales se busca el surgimiento de las energías no convencionales en el país [5].

CAPACIDAD EFECTIVA INSTALADA EN COLOMBIA

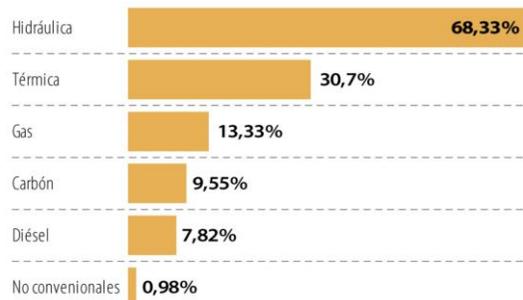


Figura 6 Capacidad efectiva instalada en Colombia 2019

Fuente: Grupo Bancolombia

3.1.3.2 Subestaciones. Son las encargadas de elevar o disminuir los niveles de tensión dependiendo de su ubicación en el sistema. En algunas subestaciones se presenta compensación de potencia reactiva [5].



Figura 7 Subestación eléctrica Portal Salida túnel Pamplona

Fuente: Autor

3.1.3.3 Transmisión. A la transmisión de energía eléctrica se le conoce como el método de llevar esta energía desde una central de generación hacia los centros poblados, hacia las grandes industrias o hacia las ciudades alejadas que necesitan abastecerse con el suministro eléctrico [5].

3.1.3.4 Distribución. Su función es también la de transportar energía, pero ya realizándolo en tensiones adecuadas para el consumo doméstico e industrial, es muy necesario tener subestaciones de distribución para transformar los niveles de tensión y de corriente [5].

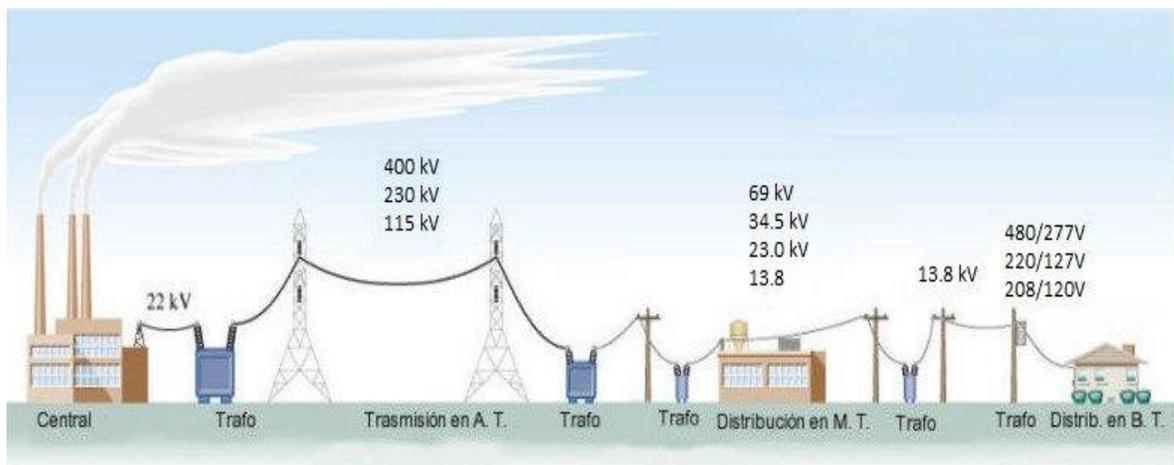


Figura 8 Sistema eléctrico
Fuente: Research Gate

3.1.4 Caída de Tensión

3.1.4.1 Definición de caída de tensión. Se puede definir que la caída de tensión es la eficiencia medible de una instalación eléctrica, todo esto es visto desde la diferencia en la tensión aplicada desde el lado de la fuente y la tensión vista en el lado de la carga [6].

3.1.4.3 Factores que inciden en la caída de tensión. Se ha analizado que la resistencia está íntimamente ligada con la caída de tensión que ocurre en los sistemas eléctricos, la resistencia puede aumentarse o disminuir debido a algunos factores.

- Longitud del conductor
- Área transversal del conductor
- Temperatura
- Otros

Existen materiales que son mejores conductores que otros, es el caso del cobre que es mejor conductor eléctrico que el aluminio debido a sus propiedades, así sucesivamente es mejor que el acero, esto es debido a sus propiedades fisicoquímicas. Por tanto, la resistencia eléctrica no será la misma en todos los materiales. Los diámetros y calibres de los conductores también tendrán influencia en la resistencia eléctrica es por eso que entre más grande sea el diámetro o calibre será baja su resistencia [2].

También se puede denotar que la resistencia no va a ser la misma en un circuito de fuerza con longitudes mayores que en circuitos con menores longitudes, ya que a más distancia mayor será su resistencia eléctrica en el circuito. No se puede despreciar los efectos de la temperatura, ya que la resistencia no será la misma en un clima cálido que un clima frío o en condiciones de intemperie, el aumento de la temperatura ambiente ocasiona mayor resistencia [2].

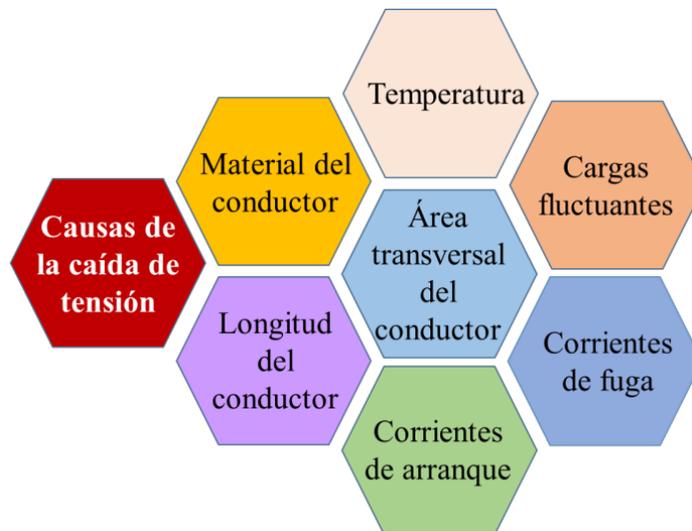


Figura 9 Algunos factores que causan la presencia de caída de tensión

Fuente: Luis A Ruiz y E A López

La corriente de fuga es otro factor que puede ocasionar caídas de tensión en los sistemas eléctricos, según el artículo de investigación es “la corriente que circula directamente hacia tierra o a través de los conductores en los circuitos eléctricamente sanos” [2].

Los factores mencionados siempre se deben de tomar en cuenta en el diseño y selección de los materiales para instalaciones eléctricas de uso final ya que se debe ofrecer una calidad de servicio optima y evitar en lo posible tener una caída de tensión. La mayoría de valores mencionados como son resistencias, impedancias y reactancias son suministrados por los fabricantes de los equipos, conductores, etc [2].

3.1.4.4 Métodos utilizados para mejorar la caída de tensión. La caída de tensión se presenta en mayor o menor grado en instalaciones eléctricas de baja y media tensión, las cargas no lineales que operan de manera intermitente tienen altas demandas de energía instantánea en un corto periodo de tiempo, esto ocasiona uno de los problemas de caída de tensión dado que se presenta de manera reiterativa. En las instalaciones con cargas como motores de alta potencia, las corrientes de arranque de estos dispositivos alcanzan valores muy altos que ocasionan caídas de tensión y efectos colaterales si no se regula [2].



Figura 10 Efectos de la caída de tensión en un sistema eléctrico
Fuente: Luis A Ruiz y E A López

Si no se controla la caída de tensión excesiva en cualquier sistema eléctrico pueden presentarse efectos perjudiciales, que afectaran las máquinas y herramientas utilizadas para los procesos productivos; al incrementarse la corriente se provoca un mayor calentamiento en los conductores, todo esto ocasiona deterioro en el aislamiento de los equipos y la instalación eléctrica. El incremento de corriente significa un mayor consumo energético es decir un mayor gasto financiero [2].

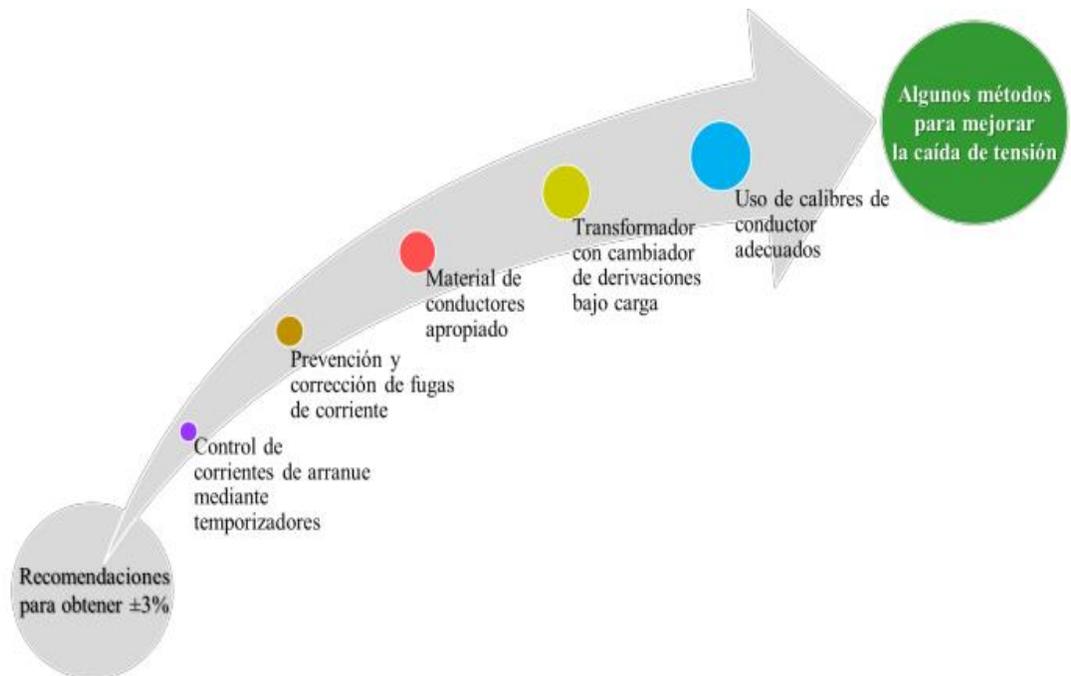


Figura 11 Recomendaciones para mejorar la caída de tensión

Fuente: Luis A Ruiz y E A López

3.1.5 Regulación de Tensión

En palabras de este autor la regulación de tensión es la capacidad que un sistema eléctrico de potencia tiene para entregar tensión constante, todo esto se debe tener en cuenta desde la inyección de tensión en la fuente de alimentación hasta su entrega en el extremo de la carga a alimentar.

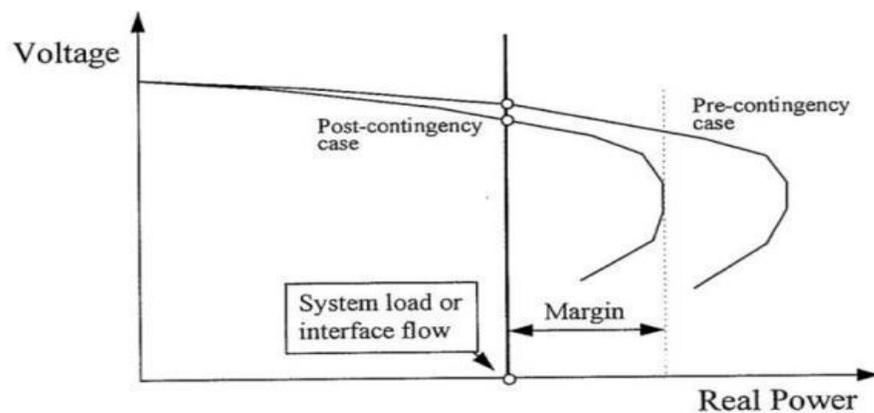


Figura 12 Estabilidad de tensión

Fuente: Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica. McGraw Hill

En gran parte para que los perfiles de tensión se mantengan y se encuentre una anomalía o caída de tensión en ellos se debe realizar una regulación de tensión adecuada.[5]

La no aplicación de cálculos de caída o de regulación de tensión pueden repercutir en el tiempo con fallas en los equipos y también en casos más súbitos o peligrosos con la pérdida total de los equipos o en paradas de procesos productivos.

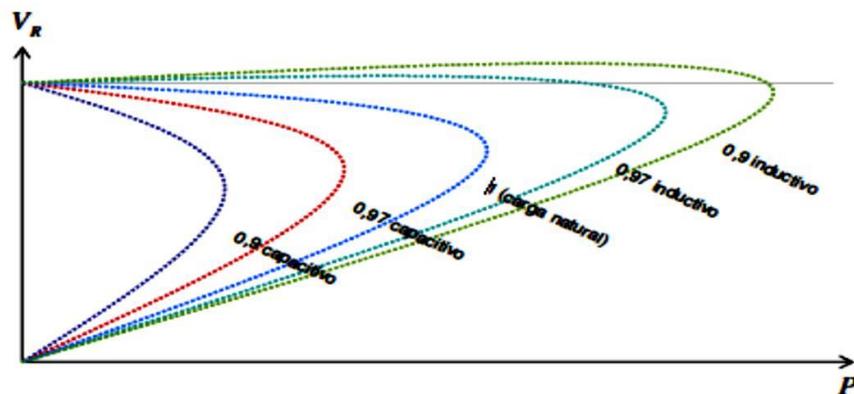


Figura 13 Estabilidad de tensión según el factor de potencia
Fuente: Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica. McGraw Hill

3.1.5.1 Normatividad eléctrica internacional y nacional en regulación de tensión. Para la regulación de tensión eléctrica debe cumplir unos parámetros por normatividad, las normas internacionales que determinan estos rangos son las siguientes: IEEE Std 242-1986 y la IEEE Std 141-1993.

Según la IEEE Std 242-1986 “las tensiones de las compañías eléctricas y empresas generadoras son iguales a los valores nominales sin carga, aunque se debe regular la tensión en un rango de $\pm 5\%$ de su valor nominal” [7].

Según la IEEE Std 141-1993 “Para permitir realizarse las contingencias operativas, los sistemas eléctricos generalmente operan sus niveles de tensión aproximadamente un 5-10% por debajo de la tensión nominal del sistema” [8].

En la normativa eléctrica colombiana, se consigna en la norma NTC 2050 los siguientes rangos de variación de regulación de tensión para una caída de tensión que no ocasione efectos perjudiciales:

Según la NTC 2050; sección 210-19, inciso a, nota 4 “Los conductores de circuitos ramales, con un calibre que evite una caída de tensión superior al 3% en las salidas más lejanas de fuerza, calefacción, alumbrado o cualquier combinación de ellas y en los que la caída máxima de tensión de los circuitos alimentador y ramal hasta la salida más lejana no supere al 5%, ofrecen una eficacia razonable de funcionamiento. Para la caída de tensión en los conductores del alimentador” [3].

Según la NTC 2050; sección 215-2, inciso b, nota 2 “Los conductores de alimentadores, con un calibre que evite una caída de tensión superior al 3% en las salidas más lejanas para potencia, calefacción, alumbrado o cualquier combinación de ellas y en los que la caída máxima de tensión de los circuitos alimentador y ramales hasta la salida más lejana no supere el 5%, ofrecen una eficacia de funcionamiento razonable” [3].

Se debe tener también en cuenta para la realización de todos los cálculos correspondientes la norma de diseño CENS, la cual establece límites de regulación de tensión [9].

El operador de red establece que la regulación máxima de tensión desde la acometida hasta el punto más lejano del circuito ramal no debe ser superior al 5% [9].

Tabla 1 Límites de regulación de tensión según norma CENS

Nivel de tensión	Área	Límites de regulación de voltaje
Circuitos de baja tensión	Zona urbana	3%
	Zona Rural	3%
	Alumbrado público	3%
	Acometidas	2%
Circuitos de media tensión	Para expansión de redes derivadas de un circuito alimentador principal	Menor o igual al 1 % a partir del barraje de la subestación de distribución
	Para acometidas de uso exclusivo	Menor o igual al 0.03% a partir del punto de conexión

Fuente: CENS EPM

Tabla 2 Rangos de regulación de tensión según normatividades

Normatividad eléctrica internacional y nacional para regulación de tensión			
IEEE Std 242-1986	IEEE Std 141-1993	NTC 2050	CNS-NT-02
±5% del valor nominal de tensión	+5 a -10% debajo de la tensión máxima del sistema	±3 a 5% según sea circuitos de fuerza, alimentador o ramal	3% para circuitos de baja tensión en zonas rurales, urbanas y alumbrado público; 2% para acometidas

Fuente: Autor

3.1.5.2 Cálculo de regulación de tensión según norma CENS CNS-NT-02. La regulación de tensión, se aplicará por medio de las siguientes ecuaciones según la norma CENS [9].

$$\%R = F_c * \frac{K_G}{V_L^2} * M \quad (1)$$

Donde:

Fc= Factor de corrección

M= Momento eléctrico. Se calcula como el producto de la potencia aparente en (kVA) y longitud del tramo en metros (m)

VL= Voltaje de línea (V)

KG=Constante de regulación generalizada del conductor y se calcula como:

$$K_G = KG * 100 \quad (2)$$

En el cual:

$$KG = (r \cos \phi + XL \sin \phi) \quad (3)$$

Donde:

r= Resistencia por unidad de longitud del conductor (ohm/km)

ϕ = Angulo del factor de potencia de la carga

XL= Reactancia inductiva por unidad de longitud del conductor (ohm/km)

Para establecer los valores de los factores de corrección dependiendo su tipo de conexión y tipo de sistema del circuito se hará su indicación en la siguiente tabla[9]

Tabla 3 Factores de corrección según norma CENS

Tipo de Subestación	Tipo de red		
	Monofásica (FN)	bifilar (FF)	Trifilar (FFN)
Monofásica.	8,00	2,00	2,00
Trifásica	6,00	1,732	2,25

Fuente: CENS EPM

3.1.6 Equipos Involucrados en el Análisis de Regulación de Tensión

3.1.6.1.1 Ficha eléctrica del equipo robotizado para Shotcrete SPM 500 Wetkret. En las siguientes figuras se presentan algunas características eléctricas del equipo mencionado que facilitaran el análisis de regulación correspondiente

BOMBA DE HORMIGÓN PUTZMEISTER PM 1810	
Tipo	Doble pistón, accionamiento hidráulico
Caudal máx. (teór.)	4 – 30 m ³ /h)
Diámetro cilindro de transporte	180 mm
Presión máx. (teór.) sobre el hormigón	75 bar
Árido máx.	16 mm
Potencia del motor eléctrico	55 kW
Alimentación	400 V 50 Hz - 440V 60 Hz - 480 V 50/60 Hz, 660 V 50/60 Hz - 1.000 V 50/60 Hz

Figura 14 Características de la bomba de hormigón integrada al equipo
Fuente: Putzmeister

COMPRESOR	
Alimentación	400 V 50 Hz / 440 V 60 Hz
Presión de trabajo máx.	7,5 bar
Caudal de aire máx.	11 m ³ /min

Figura 15 Características del compresor integrado al equipo
Fuente: Putzmeister

ENROLLACABLES	
Operación	Hidráulico
Colector	4 x 300 A, 36 rpm
Longitud del cable	50 m / 100 m opcional
Diámetro del cable	53-61 mm
Alimentación	400 V 50 Hz - 440 V 60 Hz
Diámetro	1.400 mm
Freno	Hidráulico

Figura 16 Características del enrollacable del equipo que se conecta a la red eléctrica
Fuente: Putzmeister

3.1.6.2 Equipo robotizado para Shotcrete SPM 4210 Wetkret.

3.1.6.2.1 Ficha eléctrica del equipo robotizado para Shotcrete SPM 4210 Wetkret. En las siguientes figuras se presentan algunas características eléctricas del equipo mencionado que facilitaran el análisis de regulación correspondiente.

BOMBA DE HORMIGÓN PUTZMEISTER PM 1507

Tipo	Doble pistón, accionamiento hidráulico
Caudal máx. (teór.)	20 m ³ /h (variable 4 – 20 m ³ /h)
Diámetro cilindro de transporte	150 mm
Presión máx. (teór.) sobre el hormigón	65 bar
Árido max.	16 mm
Potencia del motor eléctrico	37 kW
Alimentación	400V 50 Hz, ó, 440V 60 Hz

Figura 17 Características de la bomba de hormigón integrada al equipo

Fuente: Putzmeister

COMPRESOR ELÉCTRICO

Potencia	37 kW
Presión de trabajo máx.	7,5 bar
Caudal de aire máx.	6,5 m ³ /min (230 cfm)

Figura 18 Características del compresor integrado al equipo

Fuente: Putzmeister

ENROLLACABLES

Operación	Manual
Cable	50 m / 100 m opcional
Alimentación	400 V 50 Hz, 440 V 60 Hz
Diámetro	900 mm (50 m cable) / 1.000 mm (100 m cable)

Figura 19 Características del enrollacable del equipo que se conecta a la red eléctrica

Fuente: Putzmeister

3.1.6.3 Equipo de perforación para túneles sandvik DT920i.



Figura 20 Equipo de perforación para túneles sandvik DT920i
Fuente: Autor

3.1.6.3.1 Ficha eléctrica del equipo de perforación para túneles sandvik DT920i.

Tabla 4 Principales características eléctricas del equipo de perforación para túneles sandvik DT920i

Potencia total de entrada	180 kW
Tensiones nominales	380...690VAC – 50/60Hz
Tensión opcional	1000VAC
Fluctuación de tensión	Máximo $\pm 10\%$

Fuente: Sandvik

3.1.6.4 Equipo de perforación para túneles sandvik DT1131.



Figura 21 Equipo de perforación para túneles sandvik DT1131
Fuente: Autor

3.1.6.4.1 Ficha eléctrica del equipo de perforación para túneles sandvik DT1131

Tabla 5 Principales características eléctricas del equipo de perforación para túneles sandvik DT1131

Potencia total de entrada	260 kW
Tensiones nominales	380...690VAC – 50/60Hz
Tensión opcional	1000VAC – 50Hz
Fluctuación de tensión	Máximo ±10%

Fuente: Sandvik

3.2 MARCO CONTEXTUAL

3.2.1 Información General de la Empresa

3.2.1.1 Descripción. Sacyr es un grupo global comprometido a afrontar cualquier reto de transformación de nuestra sociedad, tiene presencia en cerca de 30 países buscando la mejora de los servicios a los ciudadanos e infraestructura; su talento humano global está formado por 37700 mujeres y hombres encargados de crear un mundo más próspero y sostenible apostando por la innovación y expansión internacional siendo una compañía de referencia internacional, además cotiza en la bolsa de valores española.



Figura 22 Línea de tiempo acontecimientos relevantes de la compañía

Fuente: Sacyr

Sacyr es el inversor número uno de infraestructuras en Colombia y México y el cuarto en Chile, además en Latinoamérica es la segunda mayor multinacional de infraestructuras, según el ranking que realiza la publicación de Engineering News-Record (ENR).

3.2.1.2 Misión. Desarrollar proyectos complejos de infraestructuras y servicios que:

- Contribuyan a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos.
- Ofrezcan oportunidades de desarrollo personal y profesional a nuestros empleados.
- Generen valor a nuestros clientes, socios y accionistas.

3.2.1.3 Visión. Ser un grupo líder con vocación internacional y de referencia.

- Desarrollando proyectos innovadores de alto valor.
- Creciendo de forma rentable y sostenida.
- Ofreciendo oportunidades de empleo de calidad para nuestros empleados.
- Siendo respetuosos con el medioambiente.

3.2.1.4 Valores

- Espíritu de equipo: Confianza, Colaboración, Lealtad
- Excelencia: Rigor, Talento, Pasión.
- Innovación: Imaginación, Creatividad, Valentía.
- Adaptabilidad: Resiliencia, Pragmatismo, Austeridad.
- Integridad: Honestidad, Transparencia.

3.2.1.5 Compromiso con la calidad. Sacyr asume, lidera e impulsa el compromiso con la calidad facilitando los recursos necesarios en busca de la excelencia, estableciendo medidas apropiadas para asegurar una política de calidad que sea practicada por todos sus empleados.

Sacyr cuenta con un sistema integrado de gestión de calidad y gestión ambiental conforme con las normas ISO 9001, ISO 14001 y EMAS, normativas referentes en materia internacional y europea, actualmente se disponen de 31 certificaciones según la norma ISO 9001, 26 certificaciones según la ISO 14001, 1 certificación según la ISO 50001 y 3 certificaciones según el reglamento EMAS.

En lo que calidad se refiera, este sistema de gestión contribuye a dar cumplimiento a los requisitos del cliente, a establecer los procesos necesarios que permitirán una mejor continua y garantizan en conformidad la normativa de aplicación correspondiente.

Desde el año 2003 Sacyr cuenta con la licenciataria de Madrid Excelente, que es una marca que reconoce a la empresa como comprometida con la excelencia y refleja la apuesta de Sacyr por la innovación y mejora constante contribuyendo al desarrollo económico, social y ambiental.

3.2.1.6 Organigrama e inversion.



Figura 23 Organigrama general e inversión
Fuente: Sacyr

3.2.2 Información General del Proyecto Doble Calzada Pamplona-Cúcuta

3.2.2.1 Descripción. Este proyecto es una solución a la movilidad de frontera entre Colombia y Venezuela, así como con el nororiente de Colombia, siendo en este momento la obra de infraestructura vial más importante de Norte de Santander. Aumentará la competitividad del país y la conectividad de la región con la construcción de 50.2km de vía nueva y la rehabilitación de 72.2km de vía existente.

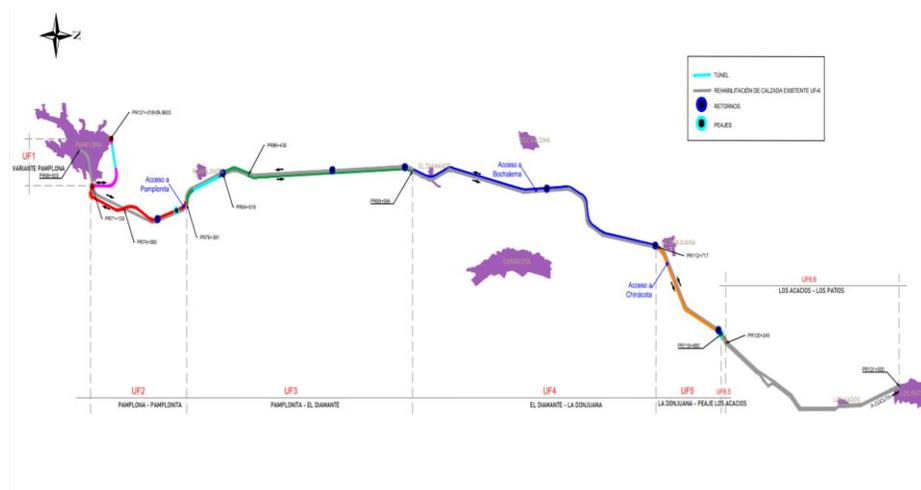


Figura 24 Trazado general del proyecto doble calzada Pamplona-Cúcuta
Fuente: Sacyr

3.2.2.2 Alcance

- Longitud total: 122,4 kilómetros.
- Longitud origen-destino: 62,2 kilómetros.
- Rehabilitación vía existente: 72,2 kilómetros.
- Construcción vía nueva: 50,2 kilómetros (doble calzada y calzada sencilla)
- Construcción: 25 puentes, dos túneles, cuatro puentes peatonales, dos glorietas, dos zonas de pesaje, dos áreas de servicio, un Centro de Control de Operaciones, un peaje.
- Municipios área de influencia: Pamplona, Pamplonita, Bochalema, Chinácota, Los Patios.

3.2.2.3 Ubicación geográfica de los túneles. La construcción del proceso de excavación de túneles va a conllevar una distancia de 1.4km de túnel Pamplona conjuntamente con 900 metros de galería de emergencia, así mismo en el túnel Pamplonita su distancia será de 1.1km de construcción.



Figura 25 Ubicación geográfica túnel de Pamplona y túnel de Pamplonita

Fuente: Sacyr

4. ANÁLISIS DE REGULACIÓN Y CAÍDA DE TENSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA RED DE CARGAS PRESENTES EN LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA

En primer lugar, para poder entender el sistema eléctrico del área a realizar el respectivo análisis se debe hacer una revisión exhaustiva del diagrama unifilar existente y los consumos que se tienen en los procesos productivos.

Es por esto que en las siguientes figuras se presenta los diagramas unifilares correspondientes:

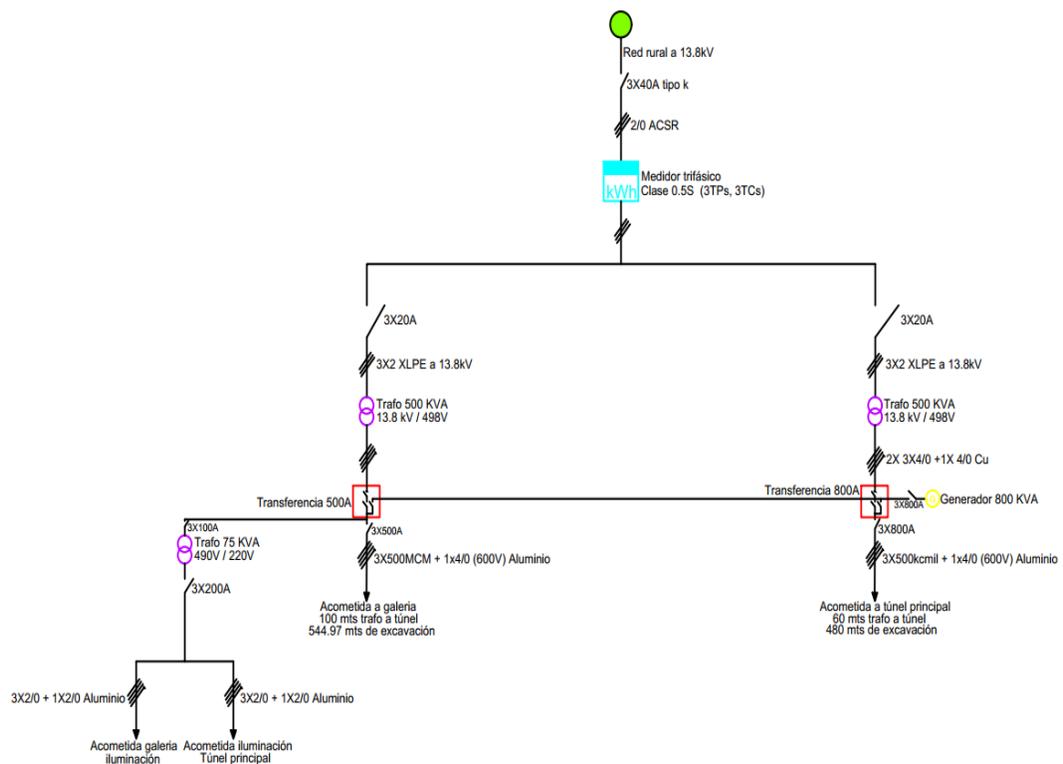


Figura 26 Diagrama unifilar portal entrada
Fuente: Sacyr

En el diagrama anterior se puede observar que en el frente de obra portal entrada del túnel Pamplona existe una subestación eléctrica de 13.8kV/498V, la cual la

conforman dos transformadores, que alimentan a la galería de emergencia y al túnel principal que actualmente están en construcción, además de esto el sistema eléctrico del sitio cuenta con un generador de emergencia que es usado en los casos de interrupciones del servicio de energía o en cualquier otro evento de índole eléctrico.



Figura 27 Subestación eléctrica portal entrada
Fuente: Autor

Se tiene las siguientes estimaciones de consumo de los equipos involucrados en los procesos productivos del frente de obra:

Tabla 6 Consumo y tensión de los equipos de túnel principal portal entrada

EQUIPOS	CONSUMO POTENCIA ACTIVA (kW)	TENSION DE LINEA NOMINAL(V)
JUMBO TUNEL	260	480
ROBOJET	90	480

Fuente: Sacyr

Se tiene como tensión nominal de línea 480V y actualmente la subestación está diseñada para una tensión de 498V; esto no es un problema para el desempeño de los equipos, ya que estos tienen un rango del 10% por encima y por debajo de su tensión nominal sin causar en los equipos daños súbitos. En la tabla anterior se ve

reflejado los consumos que se registran en el proceso de construcción del túnel principal.

Tabla 7 Consumo y tensión de los equipos de galería de emergencia portal entrada

EQUIPOS	CONSUMO POTENCIA ACTIVA (kW)	TENSION DE LINEA NOMINAL(V)
JUMBO GALERIA	180	480
ROBOJET	90	480

Fuente: Sacyr

A comparación de la tabla 1 en la galería de emergencia se encuentra en operación un equipo jumbo más pequeño el cual cuenta con dos brazos y referencia de fábrica diferente al de túnel principal, el cual brinda una menor potencia y también necesitará menos cantidad de corriente, el robojet en cada excavación subterránea será el mismo, el cual se estará alternando entre el lanzado de concreto en túnel principal y en galería de emergencia. A continuación, se muestra el diagrama unifilar existente en el túnel principal de portal salida:

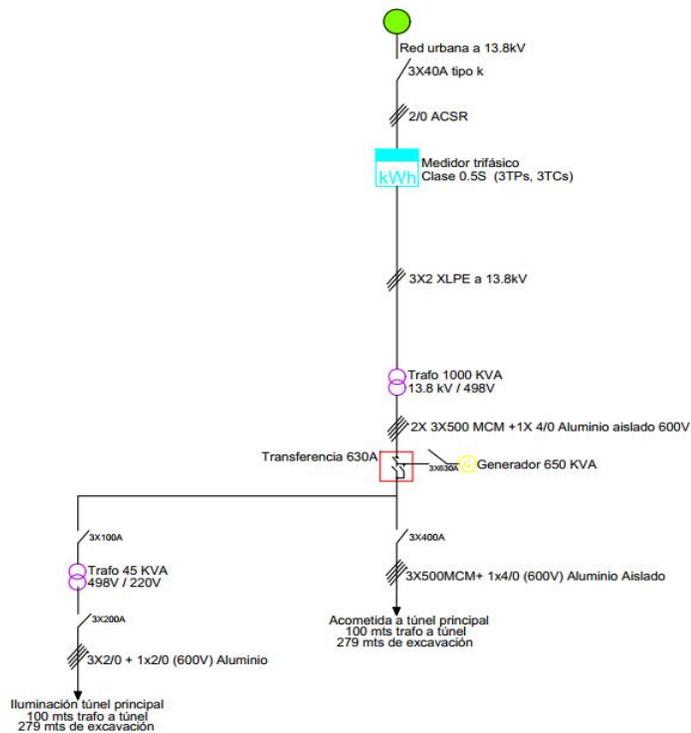


Figura 28 Diagrama unifilar portal salida

Fuente: Sacyr

En el frente de obra portal salida se encuentra también una subestación eléctrica que tiene los mismos niveles de tensión 13.8kV/498V que la ya antes mencionada de portal entrada; la diferencia que se ve plasmada en los diagramas unifilares radica en que el transformador de portal salida es una sola maquina eléctrica con una potencia de 1000KVA, la cual contara también con un generador de emergencia conectado por medio de una transferencia que entrara a operar si se presenta una interrupción de servicio o una falla eléctrica en el sistema eléctrico del frente de obra.

Se establece que los diagramas unifilares existentes dan una información veraz de los equipos existentes para los procesos de producción, aunque se determina realizar la medición de tensión y corriente en los extremos receptor y emisor (en este caso en la subestación eléctrica de cualquiera de los frentes de obra y en el tablero de avance para conexión de los equipos). Al momento de efectuarse las mediciones, se obtuvieron los siguientes registros:

Tabla 8 Mediciones de tensión y corriente en subestación eléctrica portal entrada

MEDICIONES	TRAFO 1 PORTAL ENTRADA	TRAFO 2 PORTAL ENTRADA
L12	480V	506V
L23	473V	498V
L13	470V	496V
L1N	265V	285V
L2N	271V	286V
L3N	270V	279V
I1	71,7A	12,1A
I2	74,4A	11,9A
I3	77,7A	9,4A

Fuente: Autor

Se pudo observar en las mediciones realizadas y obteniendo los valores correspondientes, la confirmación que en el transformador 2 se presenta una baja corriente de trabajo, ya que no se encontraba en operación ninguna maquina asociada en la producción diaria del proceso de excavación, estos valores pueden corresponder a algunos artefactos conectados a la subestación eléctrica.

Se efectuó en los equipos para llevar a cabo su análisis también las mediciones correspondientes, arrojando los siguientes resultados en el jumbo de dos y tres brazos junto con el robojet.

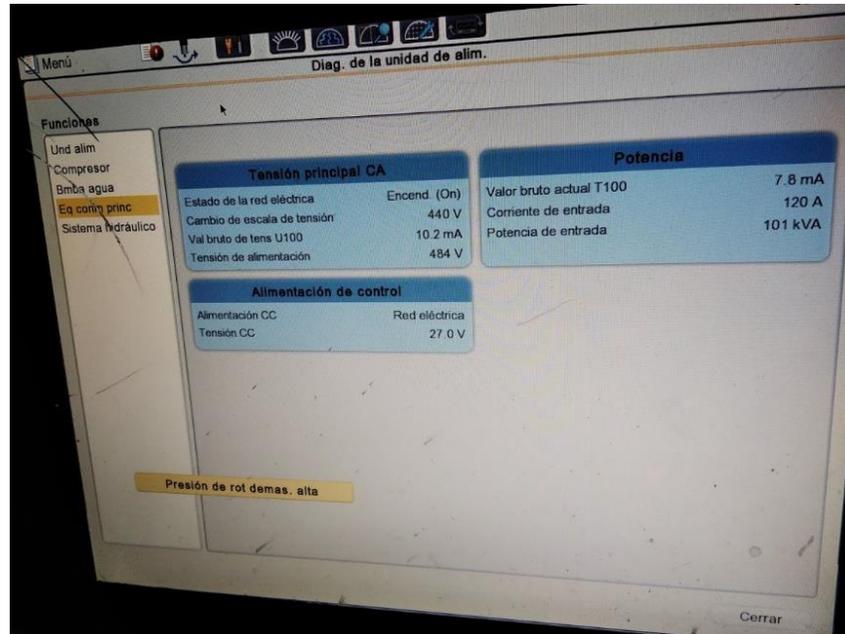


Figura 31 Evidencia electrónica de mediciones en jumbo de 3 brazos
Fuente: Autor

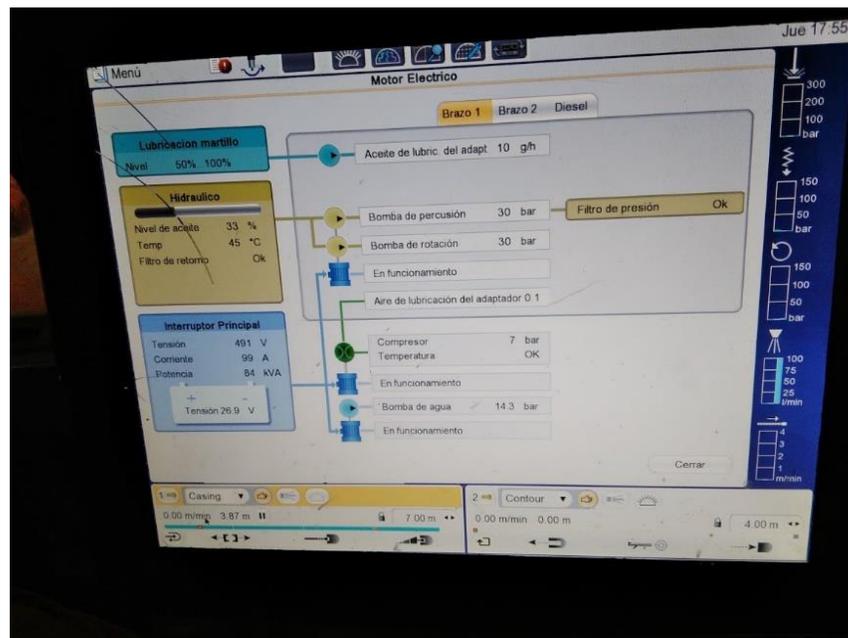


Figura 32 Evidencia electrónica de mediciones en jumbo de 2 brazos
Fuente: Autor

En este equipo debido a su magnitud y complejidad de operación ofrece para el operador y encargados del mantenimiento una interfaz amigable con el usuario para ver ocurrencias de falla y llevar a cabo su monitoreo. Seguido a esto también se realizaron las mediciones en el robojet obteniendo lo siguiente:



Figura 33 Evidencia mediciones en robojet
Fuente: Autor

En la toma de mediciones de los equipos involucrados al momento de empezar la operación, se determinó visualmente el decremento de tensión producido por entrar en la red estos equipos, se debe establecer alternativas más adelante para mejorar estos índices que se calcularan para obtener un mejor aclaramiento del problema presentado.

4.1.1 Obtención de Cálculos de Regulación de Tensión

En la identificación de la problemática y su desarrollo en este proyecto en la obtención de las alternativas que más adelante se evaluarán se realizaron los cálculos de regulación de tensión por medio de la normatividad efectuada por el operador de red, en este caso por el operador centrales eléctricas Norte de Santander, este método fue documentado en el capítulo 4 de este trabajo y se verán sus resultados junto con su procedimiento de la siguiente forma:

Para obtener la demanda maxima de los equipos se hara por medio del calculo siguiente.

Demanda max Robojet galeria

$$= \left(\frac{1 * 90}{0.8} * 100 \right) + \left(\frac{0 * 180}{0.8} * 100 \right) + \left(\frac{0 * 260}{0.8} * 100 \right)$$

$$\text{Demanda max Robojet galeria} = 112.5 \text{ KVA}$$

Demanda max Robojet principal

$$= \left(\frac{1 * 90}{0.8} * 100 \right) + \left(\frac{0 * 180}{0.8} * 100 \right) + \left(\frac{0 * 260}{0.8} * 100 \right)$$

$$\text{Demanda max Robojet principal} = 112.5 \text{ KVA}$$

$$\text{Demanda max Jumbo DT920i} = \left(\frac{0 * 90}{0.8} * 100 \right) + \left(\frac{1 * 180}{0.8} * 100 \right) + \left(\frac{0 * 260}{0.8} * 100 \right)$$

$$\text{Demanda max Jumbo DT920i} = 225 \text{ KVA}$$

$$\text{Demanda max Jumbo DT1131} = \left(\frac{0 * 90}{0.8} * 100 \right) + \left(\frac{0 * 180}{0.8} * 100 \right) + \left(\frac{1 * 260}{0.8} * 100 \right)$$

$$\text{Demanda max Jumbo DT1131} = 325 \text{ KVA}$$

$$\text{Demanda max Robojet Portal salida} = \left(\frac{1 * 90}{0.8} * 100 \right) + \left(\frac{0 * 180}{0.8} * 100 \right)$$

$$\text{Demanda max Robojet Portal salida} = 112.5 \text{ KVA}$$

$$\text{Demanda max Jumbo DT920i Portal salida} = \left(\frac{0 * 90}{0.8} * 100 \right) + \left(\frac{1 * 180}{0.8} * 100 \right)$$

$$\text{Demanda max Jumbo DT920i Portal salida} = 225 \text{ KVA}$$

Asi mismo tambien se calculo el momento electrico el cual es importante para el calculo de regulacion de tension, los resultados son los siguientes:

$$\text{Momento electrico Robojet galeria} = 707.67 * 112.5 = 79612.875 \text{ KVA} - m$$

*Momento electrico Robojet principal = 621.55 * 112.5 = 69924.375 KVA – m*

*Momento electrico Robojet portal salida = 415 * 112.5 = 46687.5 KVA – m*

*Momento electrico Jumbo DT920i = 707.67 * 225 = 159225.75 KVA – m*

*Momento electrico DT 920i portal salida = 415 * 225 = 93375 KVA – m*

*Momento electrico Jumbo DT1131 = 621.55 * 325 = 202003.75 KVA – m*

En especificaciones del conductor por parte del fabricante se tiene que la resistencia del conductor es igual a 0.12777 ohm/km y su reactancia inductiva es igual a 0.08797 ohm/km, estas se necesitan para llevar a cabo los calculos de KG del conductor.

$$KG = ((0.12777 * \cos^{-1} 0.8) + (0.08797 * \sin^{-1} 0.8)) * 100$$

$$KG = 17.25918$$

Con estos datos y calculos previamente obtenidos se realiza el calculo de regulacion de tension por medio de la norma cens tomo 1, que ayudara con realizar el analisis correspondiente y determinara como lograr estos indices.

Tabla 9 Cálculos de regulación de tensión portal entrada

TRAMO DE ACOMETIDA	LONGITUD (MTS)	Robojet (90kW)	Jumbo DT920i (180kW)	Jumbo DT1131 (260 kW)	%Trabajo	Fp	DEMANDA MAXIMA (kVA)	MOMENTO (kVA-m)	Tension de Linea (V)	CONDUCTOR AWG 75°C	TIPO DE RED	Fc DE RED	R Conductor	XL Conductor	KG Conductor	% REGULACION PARCIAL	% REGULACION ACUMULADA
Trafo-Frente tunel principal	621,55	1			100%	0,8	112,5	69924,375	480	500 MCM	FFF	1	0,12777	0,08797	17,25918	5,238	5,238
Trafo-Frente galeria	707,67	1			100%	0,8	112,5	79612,875	480	500 MCM	FFF	1	0,12777	0,08797	17,25918	5,964	5,964
Trafo-Frente tunel principal	621,55			1	100%	0,8	325	202003,75	480	500 MCM	FFF	1	0,12777	0,08797	17,25918	15,132	20,370
Trafo-Frente galeria	707,67		1		100%	0,8	225	159225,75	480	500 MCM	FFF	1	0,12777	0,08797	17,25918	11,928	17,891

Fuente: Autor

Tabla 10 Cálculos de regulación de tensión portal salida

TRAMO DE ACOMETIDA	LONGITUD (MTS)	Robojet (90kW)	Jumbo DT920i (180kW)	%Trabajo	Fp	DEMANDA MAXIMA (kVA)	MOMENTO (kVA-m)	Tension de Linea (V)	CONDUCTOR AWG 75°C	TIPO DE RED	Fc DE RED	R Conductor	XL Conductor	KG Conductor	% REGULACION PARCIAL	% REGULACION ACUMULADA
Trafo-Frente tunel principal	415	1		100%	0,8	112,5	46687,5	480	500 MCM	FFF	1	0,12777	0,08797	17,2591769	3,497	3,497
Trafo-Frente tunel principal	415		1	100%	0,8	225	93375	480	500 MCM	FFF	1	0,12777	0,08797	17,2591769	6,995	10,492

Fuente: Autor

Se evidencia que en el portal de entrada correspondiente a la excavación del túnel Pamplona, se presenta una caída de tensión algo considerable para los equipos correspondientes al proceso de perforación, ya que son los dos equipos que tienen una demanda máxima mayor, a diferencia del equipo de lanzado de concreto que

maneja una regulación de tensión menor, es de resaltar que en el portal de entrada se lleva una longitud considerable de excavación es por eso que las cifras anteriormente calculadas no cumplen con la normatividad anteriormente estudiada en el capítulo anterior.

En portal de salida como muestra los cálculos obtenidos se presenta una regulación de tensión no muy lejos a los valores acordes a la normatividad sin embargo se tiene que mejorar, esto se debe en gran parte por la longitud de la excavación ya que no es una longitud considerable; pero a medida que la excavación va avanzando se van a presentar problemas con las maquinas que en gran parte pueden perjudicar la producción y causar daños en estas.

Estos niveles reflejados en cada uno de los portales de la excavación del túnel han causado algunos imprevistos en el proceso de producción que en la marcha se han tratado de solucionar de manera temporal, pero todavía no se da una alternativa definitiva para obtener una tensión de buena calidad.

4.2 IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LOS ÍNDICES DE REGULACIÓN DE TENSIÓN EN LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA

4.2.1 Revisión del Calibre de Conductor en Uso

En la instalación eléctrica en uso para el suministro de energía y operación de las maquinas correspondientes se tiene una alimentación de acometidas para túnel principal portal entrada, para galería de emergencia y túnel principal portal salida; la cual cuenta con un calibre de conductor exclusivo para la operación del jumbo y robojet de 500 MCM o kcmil.

Esta acometida con este calibre se tiene para cada frente ya que su capacidad de ampacidad en un principio cumple teniendo en cuenta la corriente que se midió para los equipos, obteniendo 200A en el funcionamiento del robojet y cerca de más de

100A para los equipos jumbo, los cuales se encontraban en operación con un solo brazo, pero en el 100% de la operación presentan niveles de corriente más arriba de 200A para el jumbo DT920i y de 300A para el jumbo DT1131.

El conductor que se utiliza por especificaciones tomadas de la norma NTC 2050 tiene una capacidad de corriente nominal que es de 350A lo cual hace que cumpla por carga instalada la corriente de trabajo en los equipos, pero por regulación de tensión es muy probable que no cumpla ya que hay una longitud considerable de excavación que puede ocasionar en el conductor calentamiento o perdidas por efecto joule.

Tabla 11 Ampacidades permisibles en conductores aislados

Tabla 310-15(b)(16).- Ampacidades permisibles en conductores aislados para tensiones hasta 2000 volts y 60 °C a 90 °C. No más de tres conductores portadores de corriente en una canalización, cable o directamente enterrados, basados en una temperatura ambiente de 30 °C*

Tamaño o designación		Temperatura nominal del conductor [Véase la tabla 310-104(a)]					
		60 °C	75 °C	90 °C	60 °C	75 °C	90 °C
mm ²	AWG o kcmil	TIPOS TW, UF	TIPOS RHW, THHW, THHW-LS, THW, THW-LS, THWN, XHHW, USE, ZW	TIPOS TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, ML, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THHW-LS, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	TIPOS UF	TIPOS RHW, XHHW, USE	TIPOS SA, SIS, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2
		COBRE			ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE		
0.824	18"	—	—	14	—	—	—
1.31	16"	—	—	18	—	—	—
2.08	14"	15	20	25	—	—	—
3.31	12"	20	25	30	—	—	—
5.26	10"	30	35	40	—	—	—
8.37	8	40	50	55	—	—	—
13.3	6	55	65	75	40	50	55
21.2	4	70	85	95	55	65	75
26.7	3	85	100	115	65	75	85
33.6	2	95	115	130	75	90	100
42.4	1	110	130	145	85	100	115
53.49	1/0	125	150	170	100	120	135
67.43	2/0	145	175	195	115	135	150
85.01	3/0	165	200	225	130	155	175
107.2	4/0	195	230	260	150	180	205
127	250	215	255	290	170	205	230
152	300	240	285	320	195	230	260
177	350	260	310	350	210	250	280
203	400	280	335	380	225	270	305
253	500	320	380	430	260	310	350
304	600	350	420	475	285	340	385
355	700	385	460	520	315	375	425
380	750	400	475	535	320	385	435
405	800	410	490	555	330	395	445
456	900	435	520	585	355	425	480
507	1000	455	545	615	375	445	500
633	1250	495	590	665	405	485	545
760	1500	525	625	705	435	520	585
887	1750	545	650	735	455	545	615
1013	2000	555	665	750	470	560	630

* Véase 310-15(b)(2) para los factores de corrección de la ampacidad cuando la temperatura ambiente es diferente a 30 °C.

** Véase 240-4(d) para limitaciones de protección contra sobrecorriente del conductor.

Fuente: NTC 2050

Viendo esta posible dificultad que se presenta por el calibre de conductor se puede establecer que una de las alternativas que se evaluarán sería la repotenciación de las acometidas que alimentan estos equipos, para poder mejorar los índices de regulación de tensión presentados y que mejoren hasta terminar el proceso de excavación.

La repotenciación se podría evaluar ya sea reemplazando todas las acometidas que hay existentes por un calibre de una dimensión mayor, en este caso se podría considerar un calibre 600MCM o kcmil, aunque otra opción que se puede surgir es enviar otra línea del mismo calibre que lleguen al tablero de avance de conexión de cada uno de los equipos. Estas opciones se evaluarán técnicamente y económicamente más adelante, para saber que alternativa es la mejor a usar.

4.2.2 Diagnóstico del Buen Funcionamiento de los Equipos por Parte de los Operarios

Dentro de los aspectos importantes a revisar para saber con certeza si la caída de tensión es producida por agentes inherentes a la instalación en estudio, se lleva a cabo una revisión del funcionamiento de los equipos involucrados en el problema de regulación de tensión, en este caso se revisó los equipos jumbo y robojet que desde un principio como se ha documentado se necesita mejorar su tensión de operación que ayude a la infraestructura eléctrica del proceso de excavación.

La revisión de los equipos jumbo y robojet se hizo en su operación, se realizó de manera visual evidenciando el modo como los encargados de estos equipos operaban el equipo, la idea principal de esto es tratar de observar que los equipos se operaran de buena manera sin sobrecargar la maquina o utilizarla de forma inadecuada.

Para el equipo de perforación jumbo se realizó el diagnostico de su funcionamiento en estado de barrenación para el cargue de voladura en el frente de túnel principal.



Figura 34 Jumbo en proceso de barrenación del frente túnel principal
Fuente: Autor



Figura 35 Vista desde la cabina de mando del equipo en su proceso productivo
Fuente: Autor

Se pudo observar que el equipo se opera en condiciones óptimas por parte del operario del jumbo esto se toma a consideración ya que el operador tiene conocimiento del problema de caída de tensión que la red eléctrica del sitio puede ocasionar problemas para el jumbo, la principal dificultad de la caída de tensión que perjudica al equipo es su tensión de entrada, la cual puede variar entre 380V hasta 690V pero para el sistema electrónico de este equipo se considera que la tensión nominal para su rectificación a corriente directa sea entre un rango de 440V hasta

480V teniendo este equipo un 10% de tolerancia a las fluctuaciones de tensión del sistema.



Figura 36 Operación de uno de los brazos del equipo
Fuente: Autor

Además de este problema, también puede generar paradas en el proceso de producción por disparos en los sistemas de protecciones del equipo, pérdida del aislamiento del equipo, funcionamiento defectuoso del equipo, salida de operación de los controladores de los motores y ocasionar pérdidas por calentamiento en los motores gracias al aumento de la corriente.



Figura 37 Manipulación del equipo por parte del operador
Fuente: Autor

Teniendo en cuenta lo mencionado se puede deducir que el operario del equipo jumbo como elementos de mitigación para no generar efectos graves a la maquina se plantea solo manejar el equipo con un solo brazo o máximo dos brazos en funcionamiento, tratando que estos brazos no funcionen al 100% de trabajo nominal o a su potencia máxima de operación.

Así mismo como se llevó acabo el diagnostico con el equipo jumbo, también se hizo una revisión del funcionamiento del equipo de lanzado de concreto llamado robojet, el cual es el encargado en las excavaciones de túneles de hacer el recubrimiento de concreto para el sostenimiento de la excavación antes de la realización del revestimiento final, este equipo tiene una tensión nominal de operación de 480V, aunque por especificaciones técnicas del fabricante puede variar según la frecuencia eléctrica del sistema eléctrico de suministro.

Para este equipo es un poco más complejo el problema de regulación de tensión ya que también como el anterior cuenta con un suministro de tensión de servicio que no sobrepase un rango no muy mayor de 480V para su conversión en el sistema de control de este que en gran parte está conformado por elementos electrónicos.



Figura 38 Sistema electrónico de control robojet

Fuente: Autor

En características generales en funcionamiento del equipo por parte de los operarios se evidencio que el equipo es utilizado según su capacidad de proyección de concreto según los m³/h que por especificaciones técnicas da el fabricante, también es bien sabido por los operarios que el problema de caída de tensión afecta en gran parte al equipo causando como el anterior los mismos problemas o efectos por una deficiente regulación de tensión; es por eso que los operadores de la maquina tratan de realizar el lanzamiento de concreto de forma que no sea apresurada y de la forma más paciente posible que no cause una sobrecarga en el equipo.



Figura 39 Manipulación del brazo de proyección por parte del operador
Fuente: Autor

Según los datos de pantalla y diagnostico echo el equipo no es sometido a su potencia máxima de operación o a un trabajo al 100% de su capacidad nominal debido a la concientización por parte de los operarios de los daños que puede ocasionar la deficiente regulación existente en las maquinas.



Figura 40 Datos de pantalla registrados por los operarios
Fuente: Autor

Después de este diagnóstico a los equipos se puede decir que para los operarios hay contemplado la problemática correspondiente a la caída de tensión, es por eso que ellos tratan de proteger sus equipos contra los daños que puede ocasionar este problema para sus máquinas y también para el proceso de excavación en el túnel.



Figura 41 Operación de brazo de lanzamiento de concreto
Fuente: Autor

4.3 DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA

4.3.1 Revisión Técnica por Medio del Programa DIGSILENT

Para determinar la confiabilidad de los cálculos obtenidos de regulación de tensión por norma CENS, se utilizó el programa DIGSILENT el cual se modeló los diagramas unifilares existentes en los frentes de obra de túnel Pamplona y la proyección para el túnel pamplonita con sus dos frentes de obra también.

El programa DIGSILENT, está encargado de realizar cálculos de flujo de potencia, de cortocircuito y compensación por medio de potencia reactiva, es muy utilizado en varias aplicaciones industriales y eléctricas a nivel mundial. Se determinó realizar con este programa la revisión técnica de la instalación eléctrica provisional en el proceso de excavación del túnel.

Llevando a cabo las simulaciones correspondientes se obtuvieron los siguientes resultados:

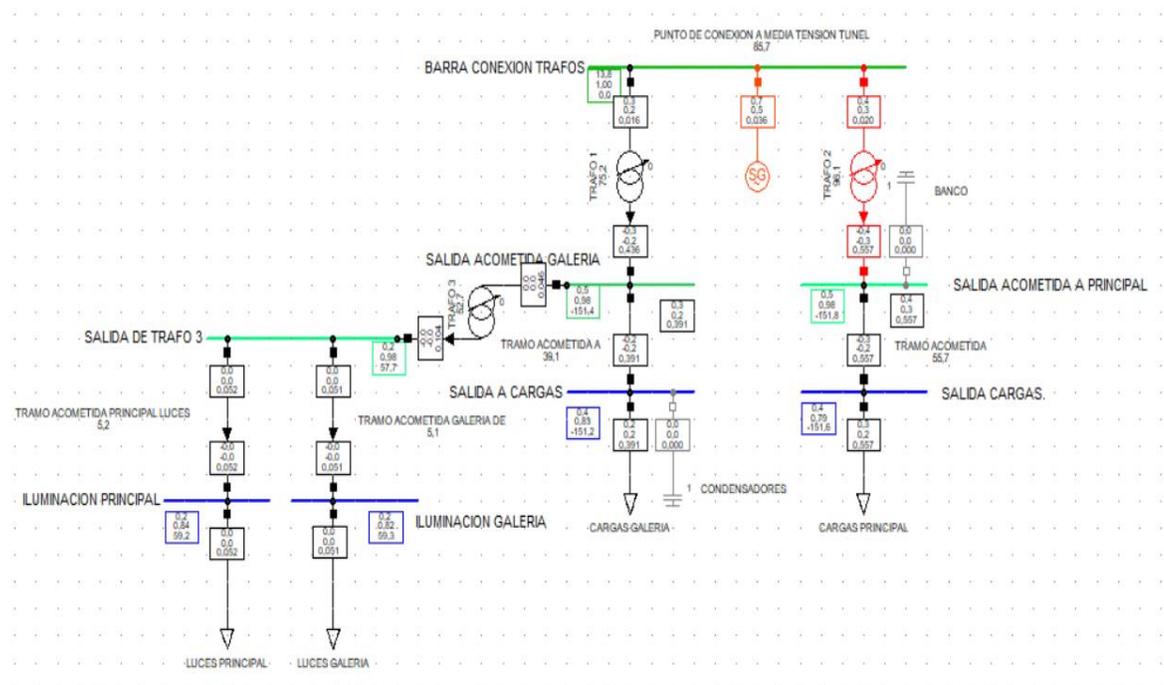


Figura 42 Sistema eléctrico portal entrada túnel Pamplona en DIGSILENT

Fuente: Autor

En la figura anterior se puede apreciar que el sistema eléctrico es confiable, se presenta en rojo el transformador 2 ya que este trabaja un poco por encima de sus valores eléctricos nominales pero por medio de refrigeración puede tener un óptimo desempeño; también se puede observar en la salida de las cargas la caída de tensión, estos parámetros con los calculados de regulación de tensión tienen similitud en las cargas principal; así también en las cargas de galería el porcentaje de regulación de tensión es el mismo al simulado que al calculado.

Una alternativa que plantea el software para la corrección de la caída de tensión y regularla bajo la normatividad correspondiente es instalar un banco de condensadores en las cargas que presentan este problema.

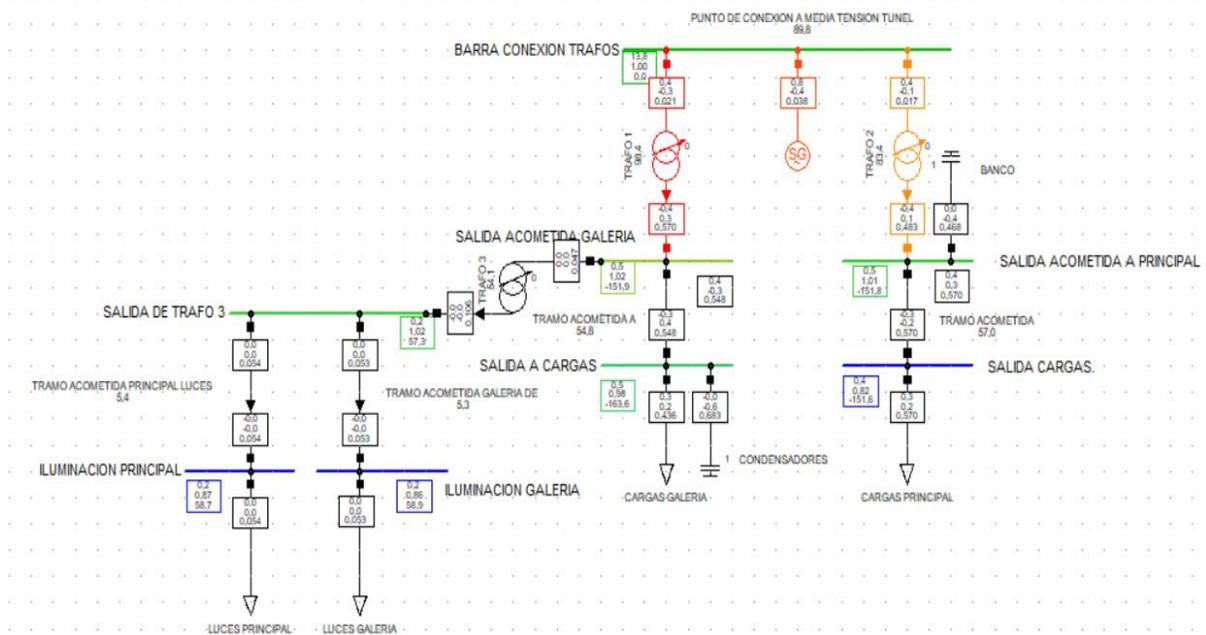


Figura 43 Sistema eléctrico portal entrada túnel Pamplona compensación reactiva
Fuente: Autor

Después de aplicar una compensación de potencia reactiva con banco de condensadores, se mejoró la caída de tensión en las cargas de galería, teniendo así una regulación de tensión menor al 5%; solo se aplicó el banco de condensadores en las cargas de galería, ya que en la experimentación de tener un banco de condensadores en las cargas de principal significaría sobrecargar de

manera exorbitante el transformador y causar en la vida real una explosión o estallido de este.

Junto a esto el programa genera un reporte de los perfiles de tensión presentes, en los cuales determina la desviación o regulación de tensión presente en cada barra del sistema eléctrico de potencia; en la que se observan en valores de tensión nominal y en valores por unidad el porcentaje de regulación de tensión presente en cada una de las barras anteriormente mencionadas.

		DigSILENT		Project:	
		PowerFactory		-----	
		15.1.7		Date: 11/22/2020	
Load Flow Calculation			Complete System Report: Voltage Profiles		
AC Load Flow, balanced, positive sequence		Automatic Model Adaptation for Convergence		No	
Automatic Tap Adjust of Transformers		Max. Acceptable Load Flow Error for		Nodes	
Consider Reactive Power Limits		Model Equations		0,01 kVA	
				0,10 %	
Grid: REDES EN DIGSILENT		System Stage: REDES EN DIGSIL		Study Case: Study Case	
				Annex: / 1	
		Bus - voltage		Voltage - Deviation [%]	
		[kV] [deg]		-10 -5 0 +5 +10	
rtd.V [kV] [p.u.]					
SALIDA A CARGAS					
0,50 0,833		0,41-151,22			
SALIDA DE TRAF0 3					
0,22 0,976		0,21 57,73			
ILUMINACION PRINCIPAL					
0,22 0,839		0,18 59,15			
ILUMINACION GALERIA					
0,22 0,822		0,18 59,31			
SALIDA ACOMETIDA A PRINCIPAL					
0,50 0,977		0,49-151,80			
SALIDA CARGAS.					
0,50 0,790		0,39-151,60			
SALIDA ACOMETIDA GALERIA					
0,50 0,983		0,49-151,42			
BARRA CONEXION TRAFOS					
13,80 1,000		13,80 0,00			

Figura 44 Reporte perfiles de tensión portal entrada túnel Pamplona
Fuente: Autor

Este análisis se realizó para el portal de salida también del túnel pamplona, así mismo se realizó una proyección de los portales de salida y entrada en el túnel pamplonita; se decidió tomar las mismas distancias del túnel Pamplona para el análisis, ya que los dos túneles serán cortos, pero presentarán el mismo problema de regulación de tensión. La diferencia entre estos dos túneles radicara en que el túnel Pamplonita tendrá de longitud 1.1kms y el túnel Pamplona 1.4kms estas longitudes no implicaran un inconveniente en la realización de los cálculos correspondientes.

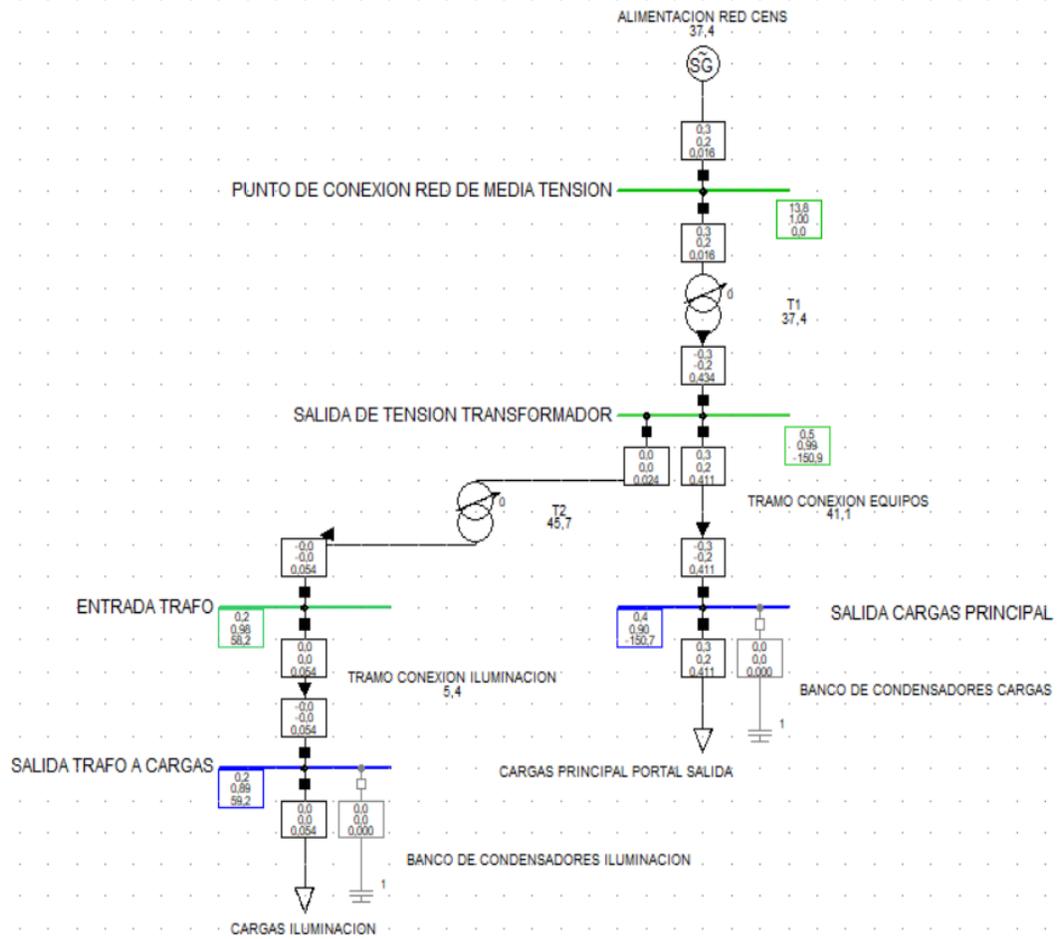


Figura 45 Sistema eléctrico portal salida túnel Pamplona en DIGSILENT
Fuente: Autor

En la simulación del sistema eléctrico de portal salida túnel Pamplona se evidencia una caída de tensión que dada por los cálculos contempla un 10% en las cargas de principal; estos valores con el simulado coinciden ya que por medio de esta se obtiene un 0.90 pu de tensión de alimentación, se estimó una compensación de potencia reactiva por medio de banco de condensadores en el extremo donde se conecta la carga principal.

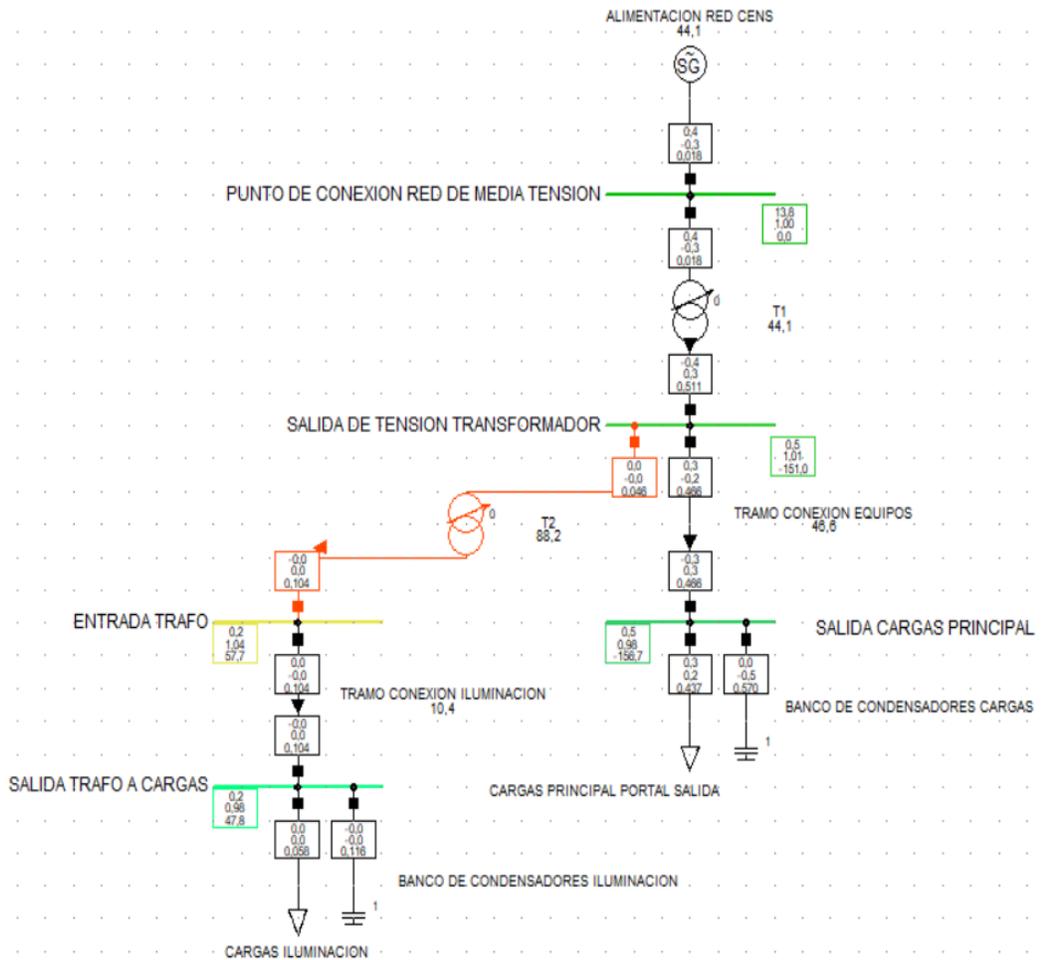


Figura 46 Sistema eléctrico portal salida túnel Pamplona compensación reactiva
Fuente: Autor

Al realizar la compensación mediante banco de condensadores, se presenta en el extremo de conexión de las cargas del túnel principal una regulación de tensión entre los porcentajes que la normatividad establece, también ofrece una estabilidad para el sistema eléctrico la cual no afectara la inserción en un futuro de este banco de condensadores.

Se generó un reporte de los perfiles de tensión sin la conexión de este banco de condensadores en el cual se logra observar las deficiencias en regulación de tensión presentada en el portal de salida del túnel Pamplonita.

		DigsILENT	Project:
		PowerFactory	Date: 10/28/2020
		15.1.7	
Load Flow Calculation		Complete System Report: Voltage Profiles	
AC Load Flow, balanced, positive sequence		Automatic Model Adaptation for Convergence	No
Automatic Tap Adjust of Transformers	No	Max. Acceptable Load Flow Error for	
Consider Reactive Power Limits	No	Nodes	1,00 kVA
		Model Equations	0,10 %
Grid: Grid	System Stage: Grid	Study Case: Study Case	Annex: / 1
rtd.V	Bus - voltage	Voltage - Deviation [%]	
[kV]	[p.u.] [kV] [deg]	-10	-5 0 +5 +10
PUNTO DE CONEXION RED DE MEDIA TENSION			
	13,80	1,000	13,80 0,00
SALIDA DE TENSION TRANSFORMADOR			
	0,50	0,989	0,49-150,87
SALIDA CARGAS PRINCIPAL			
	0,50	0,897	0,45-150,71
ENTRADA TRAF0			
	0,22	0,981	0,22 58,16
SALIDA TRAF0 A CARGAS			
	0,22	0,887	0,20 59,16

Figura 47 Reporte perfiles de tensión portal salida túnel Pamplona
Fuente: Autor

En la realización de las simulaciones del sistema eléctrico del túnel Pamplonita se contempló los mismos diagramas unifilares; esto es debido que para el proceso de excavación se utilizaran los mismos equipos; se decidió utilizar las mismas longitudes de excavación para el análisis en ese frente de trabajo a futuro ya que la alternativa a considerar a implementar para mejorar los índices de regulación de tensión será la misma en el túnel Pamplona y Pamplonita.

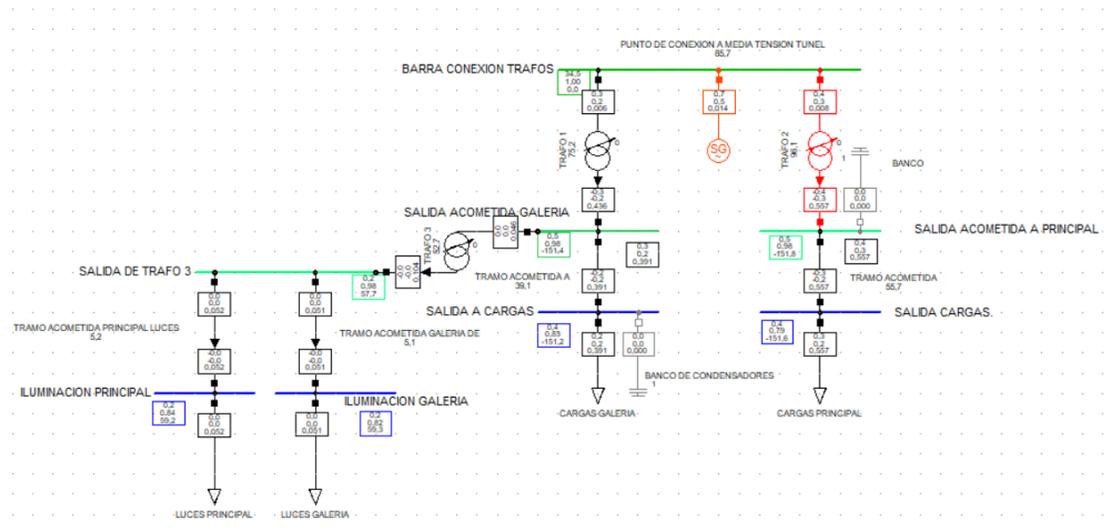


Figura 48 Sistema eléctrico portal entrada túnel Pamplonita en DIGSILENT
Fuente: Autor

banco de condensadores en las cargas de principal significaría sobrecargar de manera exorbitante el transformador y causar en la vida real una explosión o estallido de este.

Junto a esto el programa genera un reporte de los perfiles de tensión presentes, en los cuales determina la desviación o regulación de tensión presente en cada barra del sistema eléctrico de potencia; en la que se observan en valores de tensión nominal y en valores por unidad el porcentaje de regulación de tensión presente en cada una de las barras anteriormente mencionadas.

		DigSILENT		Project:		
		PowerFactory		15.1.7		
		Date:		11/22/2020		
Load Flow Calculation			Complete System Report: Voltage Profiles			
AC Load Flow, balanced, positive sequence	No	Automatic Model Adaptation for Convergence	No			
Automatic Tap Adjust of Transformers	No	Max. Acceptable Load Flow Error for	Nodes			
Consider Reactive Power Limits	No	Model Equations	1,00 kVA			
			0,10 %			
Grid: SISTEMA ELECTRICO PA System Stage: SISTEMA ELECTRI		Study Case: Study Case		Annex: / 1		
rtd.V	Bus - voltage		Voltage - Deviation [%]			
[kV]	[p.u.]	[kV] [deg]	-10	-5	0	+5
SALIDA A CARGAS	0,50	0,833 0,41-151,22				
ILUMINACION PRINCIPAL	0,22	0,839 0,18 59,15				
ILUMINACION GALERIA	0,22	0,822 0,18 59,31				
SALIDA DE TRAF0 3	0,22	0,976 0,21 57,73				
SALIDA ACOMETIDA A PRINCIPAL	0,50	0,977 0,49-151,80				
SALIDA CARGAS.	0,50	0,790 0,39-151,60				
SALIDA ACOMETIDA GALERIA	0,50	0,983 0,49-151,42				
BARRA CONEXION TRAFOS	34,50	1,000 34,50 0,00				

Figura 50 Reporte perfiles de tensión portal entrada túnel Pamplonita

Fuente: Autor

En la simulación del sistema eléctrico de portal salida túnel Pamplonita se evidencia una caída de tensión en las cargas de principal; se estimó una compensación de potencia reactiva por medio de banco de condensadores en el extremo donde se conecta la carga principal.

Es de resaltar que todas las compensaciones de potencia reactiva se evaluarán luego económicamente con las otras alternativas planteadas para una posible solución del problema que se presenta de regulación de tensión en el proceso de excavación de los túneles Pamplona y Pamplonita.

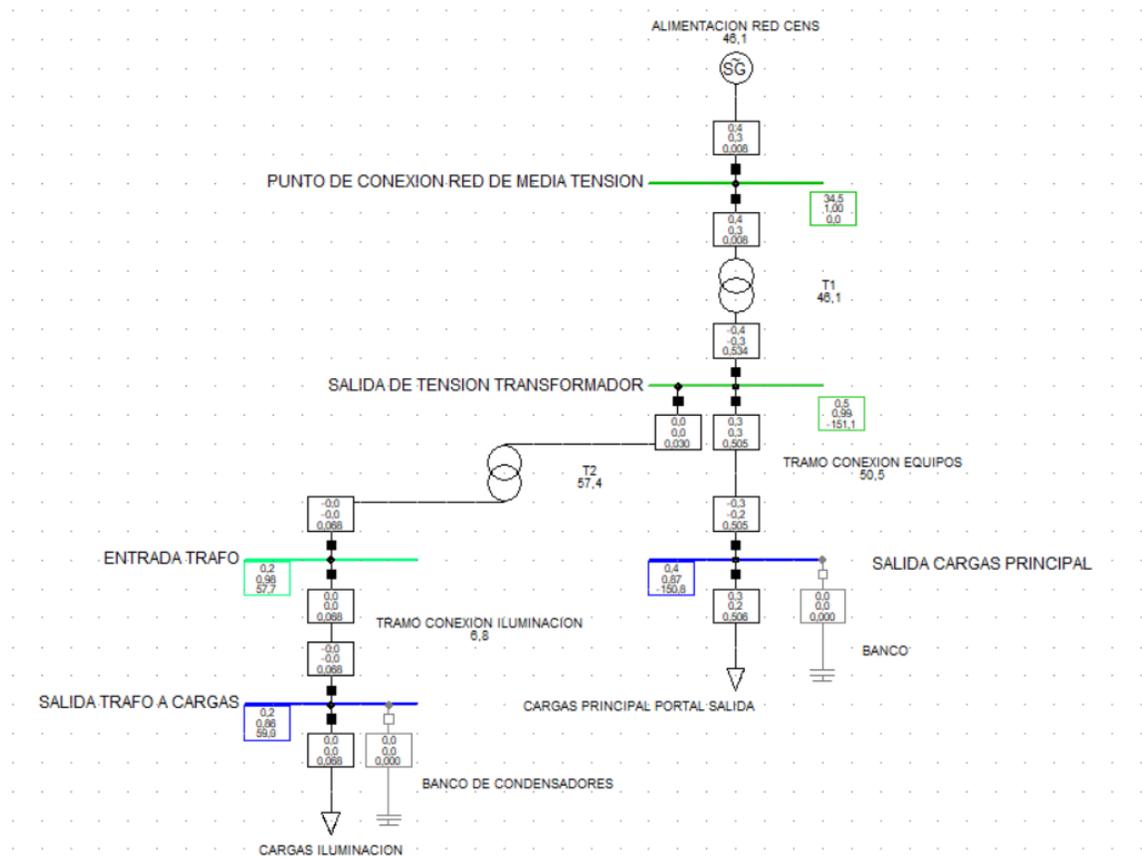


Figura 51 Sistema eléctrico portal salida túnel Pamplonita en DIGSILENT
Fuente: Autor

Esta compensación de potencia reactiva se aplicó satisfactoriamente a las cargas de túnel principal obteniendo una regulación de tensión acorde según las normatividades nacionales e internacionales, la cual dan un porcentaje inferior al 5%.

Después de los resultados obtenidos técnicamente en los cuales se refleja una regulación de tensión deficiente por la diversidad de las cargas y su demanda máxima en el sistema eléctrico existente y futuro se debe plantear tomar en cuenta que alternativas técnicas se deben estudiar en cuestión de costos para una toma de decisión precisa para indicar la alternativa más viable en términos económicos para una eventual implementación.

Con la implementación a futuro de la alternativa se espera que los equipos trabajen en óptimas condiciones, para no producir paradas en los procesos de excavación o producción, ya que la no corrección de los índices deficientes de regulación de tensión a largo plazo conllevará en pérdidas económicas por las intempestivas paradas de la maquinaria por daños en ella, también puede producir en futuro fallos en el aislamiento, pérdida de la vida útil y otros tipos de defectos de índole eléctrico que ocasionara restricciones en la operación de los equipos.

4.3.2 Planteamiento de Alternativas a Evaluar Económicamente

En las alternativas a implementar que técnicamente representan una viabilidad para mejorar los índices de regulación de tensión, se determinan según lo anteriormente analizado en este capítulo que son las siguientes:

- Repotenciación con una línea de 500MCM, que se podría instalar con la ya existente o el reemplazo de la línea existente por un calibre de conductor mayor en este caso 600MCM, si por fabricante no hay este calibre se estimara el costo económico para el calibre mayor siguiente a este
- Banco de condensadores en la conexión de las cargas en túnel principal y galería según lo simulado en el programa DIGSILENT
- Instalación de un transformador de baja a baja que eleve la tensión presente en el sistema eléctrico a una tensión nominal por encima de 500V, con el objetivo de instalarse en la conexión entre túnel principal y galería de emergencia que representa 500 metros según los diseños.

4.4 INDICACIÓN DE LA ALTERNATIVA VIABLE ECONÓMICAMENTE Y TÉCNICAMENTE

4.4.1 Evaluación Económica de las Alternativas Aprobadas Técnicamente

Después de plantear la aprobación de las alternativas técnicas, para mejorar los índices de regulación de tensión en el proceso de excavación para el funcionamiento de las maquinas involucradas en este se estudiarán los respectivos costos para cada alternativa.

4.4.1.1 Viabilidad económica de la repotenciación por calibre de conductor 500MCM y reemplazo por un calibre de conductor mayor. Para llevar a cabo esta alternativa que técnicamente se puede aplicar se necesita el costo de 4500 metros de cable 500MCM el cual se utilizara para la repotenciación con la línea existente para el túnel Pamplona y Pamplonita, estos metros de cable se utilizaran 500 metros por cada fase en galería de emergencia, portal de entrada y portal de salida en cada uno de los túneles mencionados anteriormente.

El costo por metro para este calibre es el que se muestra en la siguiente figura tomada del fabricante centelsa.

CÓDIGO FÁBRICA	CALIBRE AWG / kcmil	DIÁMETRO CONDUCTOR (mm)	ESPESOR AISLAMIENTO (mm)	DIÁMETRO SOBRE AISLAMIENTO (mm)	PESO TOTAL APROX (kg/km)	RESISTENCIA ELÉCTRICA DC a 20°C (ohm/km)	CAPACIDAD DE CORRIENTE ¹ (A)	PRECIO BASE DISTRIBUIDOR (\$/m)	COLORES DISPONIBLES
209781	6	4,38	1	6,38	63,63	2,16	60	2.906	NEGRO
209782	4	5,50	1,20	7,90	99	1,36	75	3.906	
209783	2	6,91	1,20	9,31	142	0,86	100	5.716	
209785	1/0	8,64	1,40	11,44	217	0,54	135	9.431	
209786	2/0	9,69	1,40	12,49	263	0,43	150	12.289	
209787	3/0	10,87	1,60	14,07	333	0,34	175	13.813	
209788	4/0	12,19	1,60	15,39	405	0,27	205	14.537	
209789	250	13,39	1,80	16,99	484	0,23	230	19.630	
209790	300	14,68	2,00	18,68	584	0,19	255	22.006	
209791	350	15,84	2,00	19,84	666	0,16	280	24.150	
209792	400	16,90	2,20	21,30	765	0,14	305	28.084	
209793	500	18,88	2,40	23,68	949	0,11	350	32.873	

Figura 54 Precios por metro de calibres de conductores

Fuente: Centelsa

Para los 4500 metros de conductor que se necesitarían en el proceso de excavación de los dos túneles para repotenciar las líneas ya existentes el costo de esta repotenciación por medio de esta alternativa es la siguiente:

Tabla 12 Costo repotenciación con cable 500MCM

DESCRIPCION ALTERNATIVA	UNIDADES(MTS)	COSTO POR METRO	TOTAL
CABLE 500 MCM	4500	32873	147928500

Fuente: Autor

Para llevar a cabo la repotenciación de la línea existente de los dos túneles con una línea del mismo calibre tiene un costo de 147.928.500 millones de pesos colombianos, todo esto sin contar con accesorios como terminales a utilizarse en la instalación de esta nueva línea eléctrica.

En el caso de reemplazar todo el conductor presente en la instalación por un calibre mayor en este caso los fabricantes en Colombia el calibre siguiente al 500 es el 750MCM que nos proporcionara mayor ampacidad en el conductor y nos ayudara a evitar el calentamiento en el conductor por perdidas de efecto joule que son la principal causa del efecto de caída de tensión en el conductor.

10028164 | 750KCMIL AL S8000THHN/THWN-2 TC 600V 90C | 435 | 29,0 | 1297 | 28.000

Figura 55 Precio por metro de calibre de conductor 750KCMIL

Fuente: Nexans

Para obtener el costo de los mismos 4500 metros de conductor en este caso para reemplazarlo en la instalación de los dos túneles en distancias equivalentes para cada frente de trabajo de 500 metros se tiene el siguiente costo para adquirir el cable a reemplazar.

Tabla 13 Costo reemplazo con cable 750MCM

DESCRIPCION ALTERNATIVA	UNIDADES(MTS)	COSTO POR METRO	TOTAL
CABLE 750 MCM	4500	28000	126000000

Fuente: Autor

Es de resaltar que todos estos costos no cuentan con una sumatoria de los accesorios y el transporte a obra de este conductor, este costo se ve reflejado en los dos túneles para su proceso de excavación en la instalación provisional.

4.4.1.2 Viabilidad económica de los bancos de condensadores en la conexión de las cargas. Según lo simulado en el programa DIGSILENT y la alternativa que este programa nos presenta para mejorar los índices de regulación de tensión se podría llevar a cabo la instalación de bancos de condensadores en el extremo en el cual se conectan las cargas ofreciendo así una compensación de potencia reactiva. Al realizar las simulaciones en el programa se tiene que se deben obtener para cada frente de obra en los túneles los siguientes bancos de condensadores.

- 1 banco de condensadores de 600 kVAr para conectarse en las cargas de galería de emergencia del portal de entrada en el túnel Pamplona y Pamplonita
- 1 banco de condensadores de 400 kVAr para conectarse en el transformador 2 en las subestaciones de portal entrada túnel Pamplona y Pamplonita
- 1 banco de condensadores de 500 kVAr para conectarse en las cargas de túnel principal en el portal de salida en el túnel Pamplona y Pamplonita
- 1 banco de condensadores de 45 kVAr para conectarse en las cargas concernientes a la iluminación del frente de obra portal de salida en el túnel Pamplona y Pamplonita.

Se realizará la estimación económica de estos bancos de condensadores para ver su viabilidad económica para establecer unos mejores índices de regulación de tensión que se encuentre entre los parámetros de las normatividades vigentes. La

estimación económica se realizó por medio de los precios de la empresa lifasa que es de origen europeo y en las siguientes figuras se mostraron los precios correspondientes.

Dimensiones Armario (HxLxP) / Dimensions Cabinet (HxWxD): 700x500x260 mm

Referencia <i>Part Number</i>	Qn(kvar) 440V	Composición <i>Composition</i>	Escalones <i>Steps</i>	Programa <i>Program</i>	Qn(kvar) 400V	Peso (kg) <i>Weight</i>	Precio (€) <i>Price</i>
BATM0844500	50	10+2x20	5x10	1.2.2	41.3	32	1.244
BATM0844550	55	5+10+2x20	11x5	1.2.4	45	35	1.307
BATM0844625	62.5	12.5+2x25	5x12.5	1.2.2	51.7	37	1.236
BATM0844687	68.75	6.25+12.5+2x25	11x6.25	1.2.4	56.8	38	1.364
BATM0844700	70	10+3x20	7x10	1.2.2	58	38	1.404
BATM0844750	75	5+10+3x20	15x5	1.2.4	62	39	1.603
BATM0844800B	80	2x10+3x20	8x10	1.1.2	66	39	1.653
BATM0844937	93.75	6.25+12.5+3x25	15x6.25	1.2.4	77.5	40	1.711
BATM08441000B	100	2x12.5+3x25	8x12.5	1.1.2	82.5	40	1.885
BATM08441050	105	15+3x30	7x15	1.2.2	87	41	1.591
BATM08441125	112.5	7.5+15+3x30	15x7.5	1.2.4	93	41	1.918

Figura 56 Precio de banco de condensadores de 50kVAR

Fuente: Lifasa

Referencia <i>Part number</i>	Qn(kvar) 440V	Composición <i>Composition</i>	Escalones <i>Steps</i>	Programa <i>Program</i>	Qn(kvar) 400V	Peso (kg) <i>Weight</i>	Precio (€) <i>Price</i>
BATLV8044375	375	25+50+3x100	15x25	1.2.4.	310	265	7.772
BATLV8044400	400	50+50+3x100	8x50	1.1.2.	330	270	8.160
BATLV8044450	450	50+4x100	9x50	1.2.2.	372	270	8.639
BATLV8044475	475	25+50+4x100	19x25	1.2.4.	393	275	8.798
BATLV8044500	500	50+50+4x100	10x50	1.1.2.	413	275	9.180
BATLV8044550	550	50+5x100	11x50	1.2.2.	455	280	9.940
BATLV8044575	575	25+50+5x100	23x25	1.2.4.	475	285	9.971
BATLV8044600	600	50+50+5x100	12x50	1.1.2.	496	285	10.200
BATLV8044650	650	50+6x100	13x50	1.2.2.	537	290	10.975
BATLV8044675	675	25+50+6x100	27x25	1.2.4.	558	295	11.220
BATLV8044700	700	50+50+6x100	14x50	1.1.2.	579	295	11.424
BATLV8044750	750	50+7x100	15x50	1.2.2.	620	300	12.169
BATLV8044800	800	8x100	8x100	1.1.1.	661	305	12.776

Figura 57 Precio de banco de condensadores de 400,500 y 600kVAR

Fuente: Lifasa

Como se puede apreciar los precios están dados en euros lo cual se debe realizar una conversión en pesos colombianos para saber su valor e implicación para la obtención en los frentes de trabajo, se tomó el valor de cambio de 4477.97 pesos colombianos por cada euro esto para la fecha del 3 de noviembre de 2020, según la estimación económica se obtuvo lo siguiente.

Tabla 14 Costo banco de condensadores

DESCRIPCION ALTERNATIVA	UNIDADES	COSTO EN EUROS	COSTO UNITARIO PESOS	TOTAL
BANCO DE 600 kVAr	1	10200	45675294	45675294
BANCO DE 500 kVAr	1	9180	41107764,6	41107764,6
BANCO DE 400 kVAr	1	8160	36540235,2	36540235,2
BANCO DE 50 kVAr	1	1244	5570594,68	5570594,68
Total	4	28784	128893888,5	128893888,5

Fuente: Autor

Realizada esta estimación económica para adquirir los bancos de condensadores correspondientes se tiene previsto este precio sin el transporte de exportación ni accesorios adicionales para la instalación de estos equipos en los dos túneles de los frentes de trabajo correspondientes.

4.4.1.3 Viabilidad económica de los transformadores de baja a baja. Para llevar a cabo la viabilidad económica de los transformadores a instalarse en los frentes de obra de los túneles Pamplona y Pamplonita que ayudara a mejorar los índices de regulación de tensión se tiene previsto que sean 3 transformadores con las siguientes especificaciones:

- Tensión Primario: 480V
- Tensión Secundario: 540/312V
- Conexión de entrada: Delta
- Conexión de salida: Estrella
- Grupo de conexión: Dyn5
- Regulación del tap: +2, -2 * 2.5%
- Frecuencia nominal: 60Hz

Se determinó el nivel de tensión del secundario debe de ser mas de 500 voltios para poder mantener una tensión nominal entre los parámetros establecidos de regulación de tensión en los equipos para cuando son conectados. Se plantea para un adecuado funcionamiento de la instalación eléctrica estos transformadores se instalen en las respectivas conexiones o entronques con la galería de emergencia que en distancia representa un total de 450 a 500 metros.

Se realizó una estimación económica con la empresa nacional de transformadores mediante la participación de la empresa Sacyr quien es la interesada en la búsqueda de alternativas para mejorar los índices de regulación de tensión.

MARCA	TESLA
CAPACIDAD (kVA)	630
FASES	TRIFÁSICO
TIPO	SCS B/B
VOLTAJE PRIMARIO (V)	480
VOLTAJE SECUNDARIO (V)	540/ 312
FACTOR K	1
CONEXIÓN DE ENTRADA	DELTA
CONEXIÓN DE SALIDA	ESTRELLA
GRUPO DE CONEXIÓN	Dyn5
REFRIGERACIÓN	ANAN
SERVICIO	CONTINUO
REGULACIÓN	+2 -2 * 2,5%
MONTAJE	EXTERIOR
NORMAS APLICABLES	NTC
FRECUENCIA NOMINAL (HZ)	60
ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR	1000

Figura 58 Especificaciones técnicas transformadores a cotizar

Fuente: Nacional de transformadores

La empresa nacional de transformadores estableció los siguientes precios para cada transformador y celda de protección de los transformadores correspondientes.

VALOR UNITARIO TRANSFORMADOR	\$ 25.300.000 + IVA
VALOR UNITARIO CELDA IP20	\$ 2.150.000 + IVA

Figura 59 Valor unitario de los transformadores y celdas

Fuente: Nacional de transformadores

La estimación económica correspondiente para los transformadores se va a llevar para 3, los cuales se piensan instalar uno para galería de emergencia y túnel principal en portal de entrada y otro para portal de salida en los túneles Pamplona y Pamplonita, el transformador restante queda de emergencia en caso de pérdida de alguno de los anteriores.

Tabla 15 Costo transformadores

DESCRIPCION ALTERNATIVA	UNIDADES	COSTO UNITARIO +IVA	TOTAL
TRANSFORMADOR	3	27450000	82350000

Fuente: Autor

Con la realización de los costos para las 3 alternativas planteadas al principio se puede evidenciar con las estimaciones económicas presentadas que el menor costo es la instalación de los transformadores en la conexión entre galería de emergencia y principal o después de 450 metros de excavación.

En otro lugar, la realización de la estimación económica de los bancos de condensadores se llevó a cabo para obtener su costo, pero técnicamente no garantiza que en toda la instalación eléctrica y en la conexión de las cargas se regule la tensión ya que por medio del programa DIGSILENT, se observa que en algunas conexiones de cargas no es posible conectarlos.

4.4.2 Selección de la Alternativa más Viable Económicamente y Técnicamente para la Mejora de los Índices de Regulación de Tensión

Según la realización de lo anterior basado en las estimaciones económicas y viabilidad técnica se establece que la alternativa más favorable para la corrección de los altos índices de regulación de tensión en el proceso de excavación túnel Pamplona y Pamplonita es la instalación de un transformador de baja a baja en cada uno de los frentes de trabajo de los túneles.

Esta alternativa se estableció ya que es la más económica y técnicamente garantiza con la regulación del tap del transformador conseguir una tensión nominal de servicio acorde a la caída de tensión presentada después de varios metros de excavación, que garantizara terminar el proceso de excavación de forma satisfactoria y proseguir con el buen funcionamiento de las maquinas que no entorpezcan la realización de los procesos productivos, así mismo salvaguardar los índices establecidos de regulación de tensión por la normatividad eléctrica internacional y nacional.

Los transformadores para su obtención se caracterizarán en su ficha técnica por presentar según la empresa cuyo valor fue otorgado lo siguiente:

Tensión serie (KV)	1.1/1.1
Voltios Primario (V)	Hasta 600
Voltios Secundario (V)	Hasta 600
Fases	3
Montaje	Interior
Frecuencia (Hz)	60
Grupo de conexión	Dyn-
Cambio de Taps	1-2-2½% o 1-1.3½-2.5% Bajo pedido
Calentamiento Devanados (°C)	T25
BL (KV)	10/10
Grado de protección	IP-00 IP-20 / IP-54 a solicitud del cliente
Refrigeración	AN
Clase de aislamiento	H

Figura 60 Especificaciones generales de los transformadores
Fuente: Nacional de transformadores

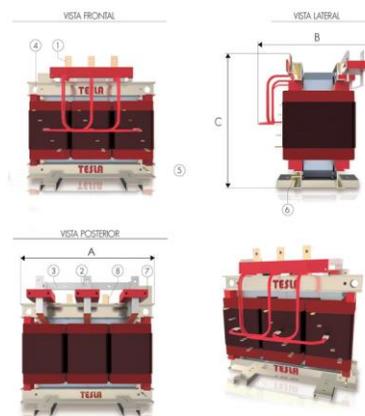


Figura 61 Vistas del transformador en seco
Fuente: Nacional de transformadores

- PARTES CONSTITUTIVAS**
- 1 Terminales fases devanado primario
 - 2 Terminales fases devanado secundario
 - 3 Terminal neutro
 - 4 Dispositivo para izar
 - 5 Taps de conmutación
 - 6 Terminal de puesta a tierra
 - 7 Placa de características
 - 8 Terminal de puesta a tierra neutro

Figura 62 Partes de constitutivas del transformador
Fuente: Nacional de transformadores

Para la protección de este transformador también se obtendrá una celda o gabinete que encerrará la maquina eléctrica que tendrá las siguientes especificaciones:

Potencia (KVA)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	Peso total con transformador (Kg)
10	670	620	750	170
15	670	620	750	175
20	740	800	750	175
25	740	800	750	200
30	740	800	820	205
45	790	850	850	257
75	800	910	870	342
112.5	940	1000	950	470
150	1000	1000	1000	555
225	1050	1050	1150	720
300	1060	1100	1200	860
400	1450	1320	1350	1120
500	1460	1350	1400	1200
630	1550	1400	1600	1300
800				
1000				
1250				
1600				
2000				

MEDIDAS Y PESOS SEGÚN
DISEÑO Y ESPECIFICACIONES

Figura 63 Especificaciones generales del gabinete
Fuente: Nacional de transformadores



Figura 64 Vistas del gabinete de protección
Fuente: Nacional de transformadores

5. RESULTADOS

Se pudo establecer con el desarrollo de este trabajo un modelo de análisis para la mejora de los índices de regulación de tensión presentados en los procesos de excavación de túneles; en este caso los túneles Pamplona y Pamplonita que su principal característica es la excavación de un túnel de longitud corta en el cual se pudo evidenciar las alternativas que se pueden lograr para mantener los índices de regulación de tensión adecuados. No solo este análisis es beneficioso para la regulación de tensión de los primeros túneles que se construyen en el departamento Norte de Santander, sino que puede ayudar en un futuro a solucionar la problemática de caída de tensión en los procesos productivos de túneles cortos en el país.

Para las empresas de infraestructura vial implicadas en la construcción de túneles este modelo de análisis puede ser interesante para ayudar a salvaguardar su maquinaria implicada en los procesos constructivos, ya que una parada traumática en estos procesos por parte de un déficit en los índices de caída de tensión podría causar daños irreparables en sus equipos; es decir pérdidas millonarias en paradas de producción. Se prevé que la inversión para la implementación de las alternativas planteadas a futuro sea insignificante al momento de obtener utilidades las empresas desarrolladoras de estos proyectos.

CONCLUSIONES

Al culminar la realización de este trabajo se puede concluir que dado el análisis de regulación de tensión hecho para la corrección de la caída de tensión en la instalación eléctrica provisional existente en los procesos de excavación de túneles se presentan índices elevados de regulación de tensión, los cuales afectan gravemente a los equipos causando disparo de protecciones, degradación de aislamiento y pérdidas totales de los equipos es por esto que se hace necesario la implementación de las alternativas que aquí se plantearon y estudiaron tanto técnica como presupuestal.

Estas alternativas cabe de resaltar que se dan solo para utilizarse en los túneles de longitudes cortas es decir en túneles de menos de 4 kilómetros de longitud total de excavación, para túneles que sobrepasen esta longitud se debe realizar un análisis similar pero con niveles de tensión de servicio más elevados ya que en la mayoría de los casos conocidos de túneles largos sus instalaciones eléctricas para alimentación de máquinas para excavación se caracteriza por un servicio en media tensión y utilizando cerca a la conexión de las cargas subestaciones reductoras o cada determinados kilómetros se encontraran subestaciones encargadas de reducir el nivel de tensión.

La alternativa elegida es la más viable económica y técnicamente ya que con su implementación se asegura que en determinados metros de excavación se garantice una regulación de tensión dentro de los estándares impuestos por las normatividades internacionales y nacionales, su economía en la consecución es una característica principal para que sea la opción más adecuada; además de suplir técnicamente por medio de la elevación de la tensión nominal de servicio, se plantea que también si los rangos no cumplen así se tenga esta alternativa de los transformadores en funcionamiento con solo subir el tap del transformador se

vuelvan a normalizar los índices de regulación de tensión en la instalación eléctrica y en la conexión de las cargas encargadas del proceso de producción.

También con la aplicación de esta alternativa las empresas desarrolladoras de proyectos de infraestructura vial y especializadas en la construcción de túneles garantizaran que los gastos económicos para la prevención de la caída de tensión no sean elevados, además de eso el no funcionamiento de los equipos implican paradas en los procesos productivos que representan pérdidas económicas por los daños y por la detención de forma abrupta de estos equipos que en algunos casos son propios de las empresas o alquilados; cada hora, día, semana o mes de no funcionamiento de la maquinaria representan un monto elevado de pérdidas económicas que podrían conllevar a un detrimento a las finanzas de estas empresas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] S. Romano and H. Ochoa, *MANUAL TECNICO EXCAVACIÓN Y SOSTENIMIENTO DE TÚNELES EMPRESA SACYR*, 2nd ed. 2019.
- [2] L. I. Ruiz, S. M. Ieee, and E. A. López, “En Un Sistema Eléctrico Industrial,” pp. 2–7, 2015.
- [3] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, “Código eléctrico colombiano NTC2050,” *Código Eléctrico Colomb.*, p. 847, 1998.
- [4] S. D. Douglas *et al.*, *IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment*, vol. 2005. 2005.
- [5] N. A. Astorayme Beraún, “Regulación del perfil de tensión en el sistema eléctrico de Paita-Piura usando un controlador basado en teoría de redes neuronales,” 2019.
- [6] J. M. A. Gómez, “APLICACIONES INDUSTRIALES de baja tensión Statistical analysis of the voltage drop in a low voltage electrical system,” *Ing. Energética*, vol. XXXIV, no. 2, pp. 151–162, 2013, [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59012013000200007&script=sci_arttext&lng=en%0Ahttp://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012013000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- [7] J. V. H. Sanderson, *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*, vol. 3, no. 2. 1989.
- [8] C. B. Cooper, *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*, vol. 2, no. 2. 1988.
- [9] C. N. T. Cns-nt-, “Parámetros De Diseño Cns-Nt-02,” pp. 1–63, 2016.
- [10] Putzmeister, “SPM 500 Wetkret.”
- [11] T. Specification, “Tunneling Drill,” pp. 1–4.