

**ANÁLISIS PARA LA FUTURA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA RURAL DE ESSA  
E.S.P. A NIVEL DE TENSIÓN 7.62 kV.**

**GILBERTO CABALLERO MORENO  
GUILLERMO ANTONIO VARGAS CÁCERES**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA  
BUCARAMANGA  
2015**

**ANÁLISIS PARA LA FUTURA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA RURAL DE ESSA  
E.S.P. A NIVEL DE TENSIÓN 7.62 kV.**

**GILBERTO CABALLERO MORENO  
GUILLERMO ANTONIO VARGAS CACERES**

**Monografía presentada como requisito para optar al título de:  
Especialista en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica**

**Director:  
Mgs. JAIME GALINDO CÁRDENAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a Dios y a nuestras familias por brindarnos apoyo y comprensión para realizar este estudio.

A la Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., por su patrocinio y a los directivos de ESSA, por habernos seleccionado para realizar este estudio.

A la Universidad Industrial de Santander por su acogida durante el desarrollo del programa.

Al ingeniero Jaime Galindo Cárdenas, al profesor Dr. Gerardo Latorre Bayona y el Dr. Daniel Sierra, por sus orientaciones en la producción de esta monografía.

## TABLA CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>16</b>
<b>ANÁLISIS DE UN MODELO EN LA DISTRIBUCIÓN ACTUAL A 13.2 kV .....</b>	<b>16</b>
1.2. Modelado del sistema de distribución.....	16
1.3. Costos de inversión red a 13.2 kV.....	17
2.4. Pérdidas de potencia activa del sistema a 13.2 kV.....	18
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>20</b>
<b>ANÁLISIS DE UN MODELO DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA RURAL A 7.62 kV .....</b>	<b>20</b>
2.2. Características, simulación en ATP-DRAW del sistema en estudio y verificación de cumplimiento normativo. ....	23
2.3. Costos de inversión del sistema en estudio. ....	33
2.4. Pérdidas de potencia activa del sistema en estudio a 7.62 kV .....	34
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>35</b>
<b>ANÁLISIS COMPARATIVO A 13.2 kV Vs 7.62 kV .....</b>	<b>35</b>
3.1 Comparativo de costos .....	35
3.2 Comparativo de pérdidas de potencia activa.....	36
3.3 Proyección de pérdidas y costo de pérdidas.....	37
<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>39</b>
<b>5. RECOMENDACIÓN .....</b>	<b>40</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>41</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>43</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Red media tensión bifásica de 13.2kV. Tomada de [5].....	16
Figura 2. Red de distribución rural a 7.62 kV. Fuente: autores. ....	20
Figura 3. Esquema de conexión del sistema de puesta a tierra a 7.62 kV .....	21
Figura 4. Derivación red a 7.62kV de una red a 13.2kV. Fuente: autores. ....	22
Figura 5. Modelo circuito en ATP DRAW, red a 7.62 kV derivada de una red a 13.2 kV.....	26
Figura 6. GPR para 10 km de red troncal trifásica Icoci 2 kA, 1 $\phi$ y 3 $\phi$ .....	29
Figura 7. Potenciales transferidos vs km de red troncal trifásica tabla 5. ....	30
Figura 8. Potenciales transferidos vs km de red troncal trifásica tabla 6. ....	31
Figura 9. Potenciales transferidos vs km de red troncal trifásica tabla 7. ....	32

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Carga típica de una vivienda rural. ....	17
Tabla 2. Costos de construcción red de 13.2 kV.....	17
Tabla 3. Pérdidas técnicas red de 13.2 kV. ....	18
Tabla 4. Potenciales de contacto máximos permitidos. Tomada de [10] .....	27
Tabla 5. Resultados de simulación, $I_{coci}$ 1 $\phi$ de 2 kA y 3 $\phi$ de 2 kA .....	29
Tabla 6. Resultados de simulación, $I_{coci}$ 1 $\phi$ de 4 kA y 3 $\phi$ de 4 kA.....	30
Tabla 7. Resultados de simulación, $I_{coci}$ 1 $\phi$ de 5 kA y 3 $\phi$ de 5 kA.....	32
Tabla 8. Costos de construcción red de 7.62 kV.....	33
Tabla 9. Pérdidas técnicas del sistema a 7.62 kV.....	34
Tabla 10. Comparativo costos de construcción distribución a 13.2 kV vs 7.62 kV. .....	35
Tabla 11. Comparativo pérdidas potencia activa: distribución a 13.2 kV vs 7.62 kV. .....	36
Tabla 12. Proyección costo pérdidas energía activa a 30 años.....	37

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS .....	43
ANEXO B PLANOS UNIFILARES DEL SISTEMA EN ESTUDIO .....	44

## ABSTRAC

TÍTULO: ANALYSIS FOR A FUTURE RURAL POWER DISTRIBUTION AT  
VOLTAGE LEVEL 7.62 kV IN ESSA S.A.

AUTHOR: GILBERTO CABALLERO MORENO  
GUILLERMO ANTONIO VARGAS CÁCERES

KEYWORDS: Rural power grid, power distribution 7.62 kV, grounding  
neutral in many places, step voltages.

### DESCRIPTION:

Rural Electrification projects are considered "social projects" or "social responsibility"; the main objective is to generate welfare and progress in the community, through the provision of electricity, and no return in financial terms.

Looking for electric expansion in the rural zone, decreasing current costs in the ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A.; considering the low consumption energy of communities, It intends to make the rural power distribution voltage level of 7.62 kV using the neutral as shielding system. Analysis performed construction costs, calculating active power losses, compliance with existing regulations to ensure the safety of people and living things is reviewed by the free ATP-DRAW; finally a comparative analysis is performed between the current system and the proposed rural system.

\_\_\_\_\_

\*Monograph

\*\* Faculty of Engineering Physics and Mechanics. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Specialization in Distribution System Electric Power. Director: Mgs. Jaime Galindo Cárdenas.

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS PARA LA FUTURA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA RURAL DE ESSA E.S.P. A NIVEL DE TENSIÓN 7.62 kV.

**AUTORES:** GILBERTO CABALLERO MORENO  
GUILLERMO ANTONIO VARGAS CÁCERES

**PALABRAS CLAVE:** Red eléctrica rural, distribución 7.62 kV, neutro multi aterrizado, tensiones de paso.

### DESCRIPCIÓN:

Los proyectos de Electrificación Rural son considerados “proyectos sociales” o de “responsabilidad social”; es decir, que su principal objetivo es generar bienestar y progreso en la comunidad, por medio de la prestación del servicio de energía eléctrica, y no rentabilidad en términos financieros.

En la búsqueda de ampliar la cobertura rural en la Electrificadora de Santander S.A. E.S.P a un menor costo de construcción, teniendo en cuenta el bajo consumo de energía eléctrica de las comunidades ubicadas en las zonas rurales, sectores más vulnerables y de bajos recursos, se propone realizar la distribución eléctrica rural a nivel de tensión de 7.62 kV utilizando el neutro como sistema de apantallamiento, que será generado mediante la construcción de una malla de puesta a tierra en el punto de derivación. El sistema propuesto parte de una red eléctrica trifásica existente a nivel de tensión de 13.2 kV. Para cada uno de los sistemas eléctricos, se realizan análisis de costos de construcción, cálculo de pérdidas de potencia activa, y se revisa el cumplimiento de la norma vigente para garantizar la seguridad en las personas y seres vivos, mediante el programa gratuito ATP-DRAW. Finalmente se realiza un análisis comparativo entre el sistema eléctrico rural actual y el propuesto.

---

\* Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Especialización en Sistema de Distribución de Energía Eléctrica. Director: Mgs. Jaime Galindo Cárdenas.

## INTRODUCCIÓN

La Electrificación Rural es la prestación del servicio público de energía eléctrica en las zonas de un país que no se encuentran interconectadas a la red del sistema eléctrico nacional, principalmente por su ubicación distante de las ciudades y centros de consumo. Generalmente, la Electrificación Rural se lleva a cabo ampliando la cobertura de las redes eléctricas en las zonas apartadas o en algunos casos implementando sistemas de autogeneración mediante los cuales la comunidad satisface sus propias necesidades energéticas, utilizando plantas de generación con combustibles fósiles o tecnologías alternativas (energías renovables) de producción de energía.

Los proyectos de Electrificación Rural son considerados “proyectos sociales”; es decir, que su principal objetivo es generar bienestar y progreso en la comunidad, por medio de la prestación del servicio de energía eléctrica, y no rentabilidad en términos financieros. En Colombia, estos proyectos son ejecutados en su mayoría por las empresas de energía de cada región en sus áreas de influencia y, dependiendo de sus costos, pueden ser financiados en gran parte por entidades estatales locales, nacionales y en algunos casos por organismos internacionales.

En Santander, la Electrificadora del Departamento (ESSA S.A E.S.P) es quien lidera este tipo de proyectos en convenios con el Ministerio de Minas y Energía, Alcaldías de los Municipios, o terceros, para obtener el apoyo financiero necesario ya que como se mencionó anteriormente estos proyectos no son muy atractivos financieramente para las empresas, porque no generan ganancias, al menos durante muchos años.

A través del tiempo la Electrificadora de Santander S.A. (ESSA) ha venido realizando la expansión eléctrica rural mediante la construcción de redes a nivel de tensión de 13.2kV, sin neutro. Sin embargo, los costos asociados a la inversión en la infraestructura han ido incrementando notablemente, en razón a la lejanía y dispersión de las viviendas del sector rural, lo que dificulta ampliar la cobertura eléctrica en este sector [5].

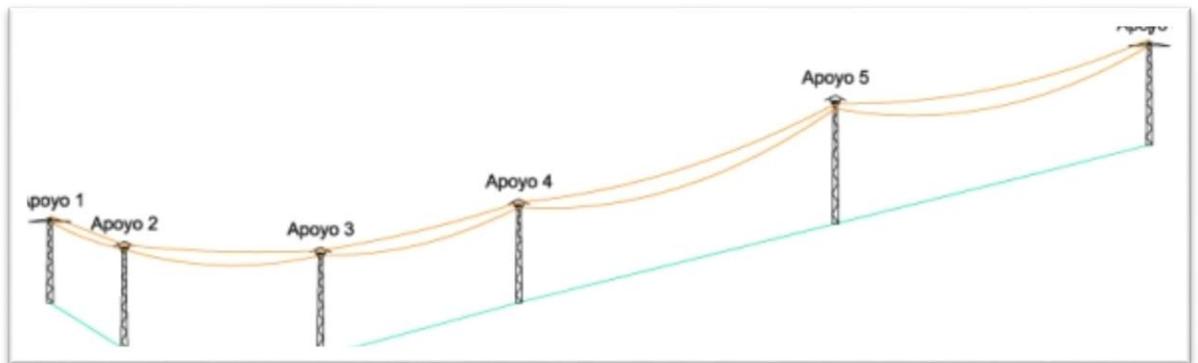
Esta monografía pretende analizar la viabilidad para realizar la distribución eléctrica rural de ESSA E.S.P., a nivel de tensión 7.62 kV; partiendo de una red de media tensión trifásica trifilar a nivel de tensión 13.2 kV. Para ello, se determinarán los costos de inversión y las pérdidas para un sistema de 13.2kV actual y otro a 7.62 kV; realizando la comparación de resultados..

## CAPÍTULO I

### ANÁLISIS DE UN MODELO EN LA DISTRIBUCIÓN ACTUAL A 13.2 kV

Este capítulo contiene, los datos técnicos, costos de inversión y pérdidas de energía activa de un sistema de distribución rural actual a 13.2 kV.

#### 1.2. Modelado del sistema de distribución



**Figura 1.** Red media tensión bifásica de 13.2kV. Tomada de [5]

Para modelar el sistema se tomó un prototipo de un proyecto de electrificación rural con una longitud de 5 km, a partir de la red de 13.2 kV existente de ESSA.

Con los siguientes parámetros:

km de red del proyecto:	5
Número de beneficiarios:	41
Red área 13.2 kV en cable:	ACSR N° 2
Demanda por usuario:	1128 VA
Resistencia ACSR N° 2:	0.8499 mΩ/m

En la tabla 1 se muestra la carga típica de una vivienda rural.

**Tabla 1.** Carga típica de una vivienda rural.

CIRCUITO	LUCES	TOMAS	T. ESP	FASE A	W	F.P	CARGA VA	A	CAL	PROT	OBSERVACIONES
1	3	1	1	600	600	0.95	631.58	5.26	12 Cu	1x15 A	TV - Nevera
2			1	1200	1200	1	1200	10	12 Cu	1x15 A	Plancha
TOTALES	3	1	2	1800	1800	1.95	1831.58	15.26			

Demanda Máxima Individual (W)	1100
Factor de Potencia de Cálculo	0,975
Demanda Máxima Individual (VA)	1128

### 1.3. Costos de inversión red a 13.2 kV.

Tomando como base los precios de los proyectos aprobados por la UPME para Santander en 2014, se realizó el presupuesto y se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 2.** Costos de construcción red de 13.2 kV.

ACTIVIDAD		VALOR
Red de media tensión		\$ 76,543,898
Red de baja tensión		\$ 123,631,180
Subestaciones		\$ 18,941,675
Acometidas e instalaciones internas		\$ 49,959,522
Costo directo		\$ 269,076,275
Administración	10%	\$ 26,907,628
Imprevistos	5%	\$ 13,453,814
Utilidad	5%	\$ 13,453,814
Subtotal 1		\$ 322,891,531
Interventoría técnica	10%	\$ 26,907,628
Certificación RETIE	1%	\$ 2,690,763
Subtotal 2		\$ 352,489,922
Interventoría administrativa y financiera	4%	\$ 14,099,597
Administración y asistencia técnica	6%	\$ 21,149,395
Total Proyecto		\$ 387,738,914

Los resultados de la tabla 2 se obtuvieron del análisis de precios unitarios que se puede apreciar en el anexo A.

Para este proyecto en particular, el costo promedio por vivienda es \$9.457.047; presupuesto que no está al alcance de los habitantes del sector rural, que en su mayoría son de escasos recursos.

#### 2.4. Pérdidas de potencia activa del sistema a 13.2 kV

En la siguiente tabla se aprecian las pérdidas de energía activa del sistema en estudio:

**Tabla 3.** Pérdidas técnicas red de 13.2 kV.

TRAMO	LONGITUD	USUARIOS	F. DIVERS	POTENCIA	CALIBRE	CORRIENTE	RESISTENCIA	PERDIDAS
	METROS	NUMERO		kVA	CONDUCTOR	A	ohms	W
1-2	950	41	2.4854	18.611	2	1.41	0.807	1.61
2-3	1342	33	2.3986	15.522	2	1.18	1.141	1.58
3-4	300	9	1.8789	5.404	2	0.41	0.255	0.04
3-5	600	24	2.2712	11.922	2	0.90	0.510	0.42
5-6	193	6	1.7167	3.943	2	0.30	0.164	0.01
5-7	410	18	2.1561	9.419	2	0.71	0.348	0.18
7-8	1698	11	1.9592	6.334	2	0.48	1.443	0.33
TOTAL								4.17

4.17 W\*h, son las pérdidas instantáneas para el proyecto en estudio. Esto significa que si los usuarios tuvieran un consumo promedio de energía durante 8 horas al día, cada uno genera al sistema de distribución una pérdida de 24.4 W.h/mes. Si

se tiene en cuenta que el valor del kW.h/mes, es de \$392,6673<sup>1</sup>; esto equivaldría a \$9,58 pesos mensuales por usuario.

En el siguiente capítulo se revisarán las tensiones de paso transferidas en diferentes puntos de la red, los costos de la construcción y las pérdidas para nivel de 7.62 kV del sistema propuesto.

---

<sup>1</sup> Valor tomado de [www.essa.com.co](http://www.essa.com.co) el 10 de enero de 2015.

## CAPÍTULO II

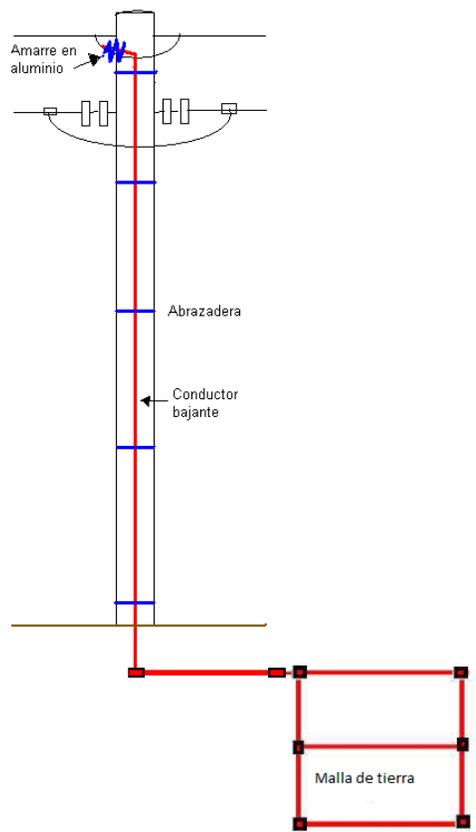
### ANÁLISIS DE UN MODELO DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA RURAL A 7.62 kV

En este capítulo se presenta el modelo propuesto para realizar la distribución rural a 7.62 kV, donde se calculan las tensiones de paso transferidas en diferentes puntos de la red, mediante simulaciones en el programa ATP-DRAW, y se comparan contra las mínimas tensiones permitidas según RETIE de agosto de 2013. asimismo se estiman las pérdidas técnicas y los costos de inversión para la construcción de una red eléctrica a este nivel de tensión, partiendo de una red trifásica de 13.2 kV existente.



**Figura 2.** Red de distribución rural a 7.62 kV. Fuente: autores.

La figura 2 muestra la disposición de una red monofásica a nivel de 7.62 kV, donde el conductor superior es el neutro; con el fin de utilizarlo como apantallamiento del sistema.



**Figura 3.** Esquema de conexión del sistema de puesta a tierra a 7.62 kV

La figura 3 muestra cómo se genera el neutro para la red de 7.62 kV en el punto de derivación de la red de 13.2 kV. Igualmente este mismo sistema se utiliza para multi-aterizar el neutro de acuerdo con NESC IEEE 2, National Electric Safety Code [6].

## 2.1. Parámetros del modelo de distribución eléctrica rural a 7.62 kV



**Figura 4.** Derivación red a 7.62kV de una red a 13.2kV. Fuente: autores.

Para modelar el sistema se tomó un prototipo de un proyecto de electrificación rural con una longitud de 5 km, a nivel de 7.62 kV, derivado de la red a 13.2 kV, como se aprecia en la figura 4, con los siguientes parámetros:

km de red del proyecto:	5
Número de beneficiarios:	41
Red área 7.62 kV en cable:	ACSR N° 2
Demanda por usuario:	1.128 VA
Resistencia ACSR N° 2:	0.8499 mΩ /m
Corriente mínima de corto $1\phi^2$	1 kA

---

<sup>2</sup> Los niveles de corto circuito, son tomadas de la base de datos de ESSA, las cuales fueron medidas en bornes de salida de las subestaciones.

Corriente máxima de corto 1 $\phi$	5 kA
Corriente mínima de corto 3 $\phi$	1 kA
Corriente máxima de corto 3 $\phi$	5 kA

El cuadro de carga típica para una vivienda rural es el mismo de la tabla 1.

## **2.2. Características, simulación en ATP-DRAW del sistema en estudio y verificación de cumplimiento normativo.**

A través del tiempo y actualmente la Electrificadora de Santander S.A E.S.P ha realizado los proyectos de electrificación rural, mediante redes de distribución monofásicas bifilares, partiendo de una red trifásica a 13.2 kV, sin neutro. Estos diseños constructivos cumplen con el RETIE de agosto de 2013.

Para revisar el cumplimiento del RETIE de agosto de 2013 en redes a 7.62 kV, se desarrolló un prototipo de circuito, partiendo de una red trifásica a 13.2 kV existente sin neutro. La red de 7.62 kV lleva una fase y un neutro, el cual se genera en el punto de la derivación para cumplir la condición<sup>3</sup> del RETIE que el retorno de corriente no se realice físicamente por tierra, como se observa en la figura 3. Este neutro debe estar aterrizado mínimo 4 veces por cada milla, de acuerdo a lo establecido en NESC IEEE C2 (National Electrical Safe Code) en su artículo 097 del literal C [6].

---

<sup>3</sup> RETIE, agosto 2013, numeral 31.4.

Teniendo presente las condiciones y los parámetros anteriores, se procedió a realizar un estudio de sensibilidad utilizando el programa ATP-DRAW; para obtener el análisis de los potenciales transferidos GPR (Ground Potential Rise) a lo largo del circuito. Lo que se pretende es caracterizar las tendencias de esos potenciales cuando ocurre una falla monofásica cerca al punto de carga, de tal forma que éstos no generen problemas de seguridad a personas, animales, instalaciones y/o equipos [9] .

En la figura 5 se muestra el modelo del circuito utilizado en la simulación. Para esto se emplearon valores de referencia utilizados por ESSA y está constituido con los siguientes parámetros técnicos:

- ✓ El circuito eléctrico existente es trifásico en estrella sin neutro hasta el punto identificado GPRKMO. A partir de ese punto se tiene una red a 7.62 kV, con neutro corrido superior, para que además sirva de cable de guarda, una longitud de 5 km. aproximadamente.
- ✓ La tensión de la fuente 13.2 kV.
- ✓ El valor de la puesta a tierra de la malla de la subestación es 2 ohms<sup>4</sup>.
- ✓ El valor de la puesta a tierra del primer km. a partir de la subestación es 10 ohms<sup>5</sup>.
- ✓ El valor de las puestas a tierra a partir del punto GPRKMO es 10 ohms.
- ✓ La instalación de las puestas a tierra se hace con base en lo establecido por el NESC IEEE C2 ( National Electrical Safe Code) en su artículo 097 del literal C; donde establece que los circuitos primarios y secundarios que

---

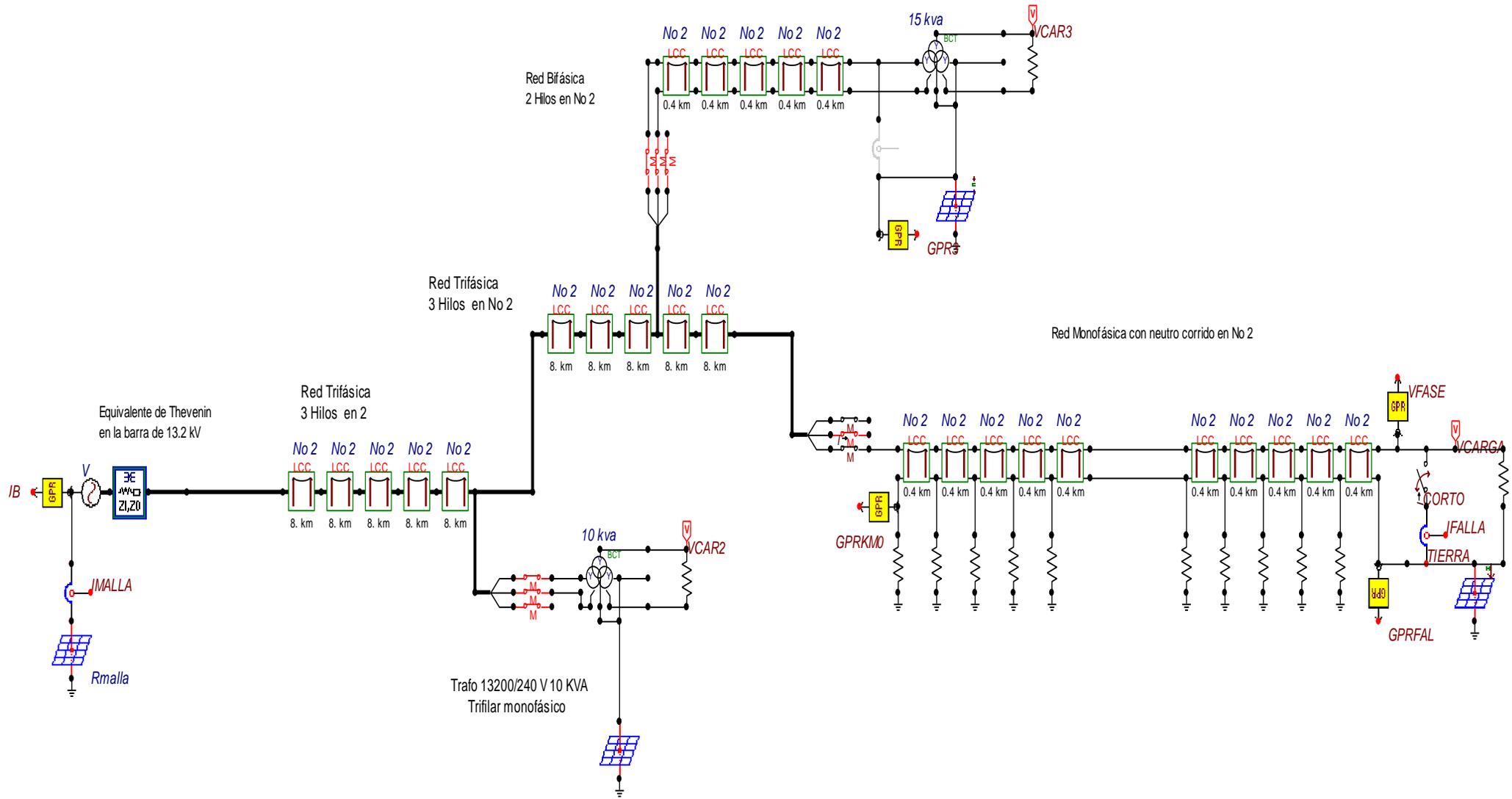
<sup>4</sup> RETIE, agosto 2013, numeral 15.4

<sup>5</sup> *Ibíd.*

utilicen un conductor como neutro común deberán tener al menos cuatro puestas a tierra de tal conductor, cada milla (1.6 km).

- ✓ Calibres: todos los conductores calibre No 2. ACSR.
- ✓ Niveles de corto circuito monofásico desde 2 kA hasta 5 kA y trifásico desde 2 hasta 5 kA (parámetro variable).
- ✓ Tiempo de duración de la falla monofásica: 50 ms.

La figura 5 muestra el circuito simulado en el aplicativo ATP-DRAW, con los parámetros enunciados anteriormente.



**Figura 5.** Modelo circuito en ATP DRAW, red a 7.62 kV derivada de una red a 13.2 kV.

Antes de obtener los datos de los potenciales transferidos, en la tabla 4 se muestran los potenciales máximos de contacto permitidos por el RETIE de agosto de 2013. Para una persona de 50 kg la resistencia es de 1000  $\Omega$  [9].

**Tabla 4.** Potenciales de contacto máximos permitidos. Tomada de [9]

Tiempo de despeje de la falla	Máxima tensión de contacto admisible (rms c.a.) según IEC 60479 para 95% de la población. (Público en general)	Máxima tensión de contacto admisible (rms c.a.) según IEEE 80 para personas de 50 kg (Ocupacional)
Mayor a dos segundos	50 voltios	82 voltios
Un segundo	55 voltios	116 voltios
700 milisegundos	70 voltios	138 voltios
500 milisegundos	80 voltios	164 voltios
400 milisegundos	130 voltios	183 voltios
300 milisegundos	200 voltios	211 voltios
200 milisegundos	270 voltios	259 voltios
150 milisegundos	300 voltios	299 voltios
100 milisegundos	320 voltios	366 voltios
50 milisegundos	345 voltios	518 voltios

A continuación se cita lo expuesto en el numeral 15.1 “Requisitos generales del sistema de puesta a tierra”, del RETIE de agosto de 2013, donde se explica el manejo de la tabla 4:

*“No se deben superar los valores dados en la tabla, que corresponden a la máxima tensión de contacto aplicada al ser humano (con una resistencia equivalente de 1000  $\Omega$ ), la cual está dada en función del tiempo de despeje de la falla a tierra, de la resistividad del suelo y de la corriente de falla. Estos son los valores máximos de soportabilidad del ser humano a la circulación de corriente y consideran la resistencia o impedancia promedio netas del cuerpo humano entre mano y pie, sin que se presenten perforaciones en la piel y sin el efecto de las resistencias externas adicionalmente involucradas entre la persona y la estructura puesta a tierra o entre la persona y la superficie del terreno natural.*”

*Para el cálculo se tuvieron en cuenta los criterios establecidos en la IEEE 80, tomando como base la siguiente ecuación, para un ser humano de 50 kilos.*

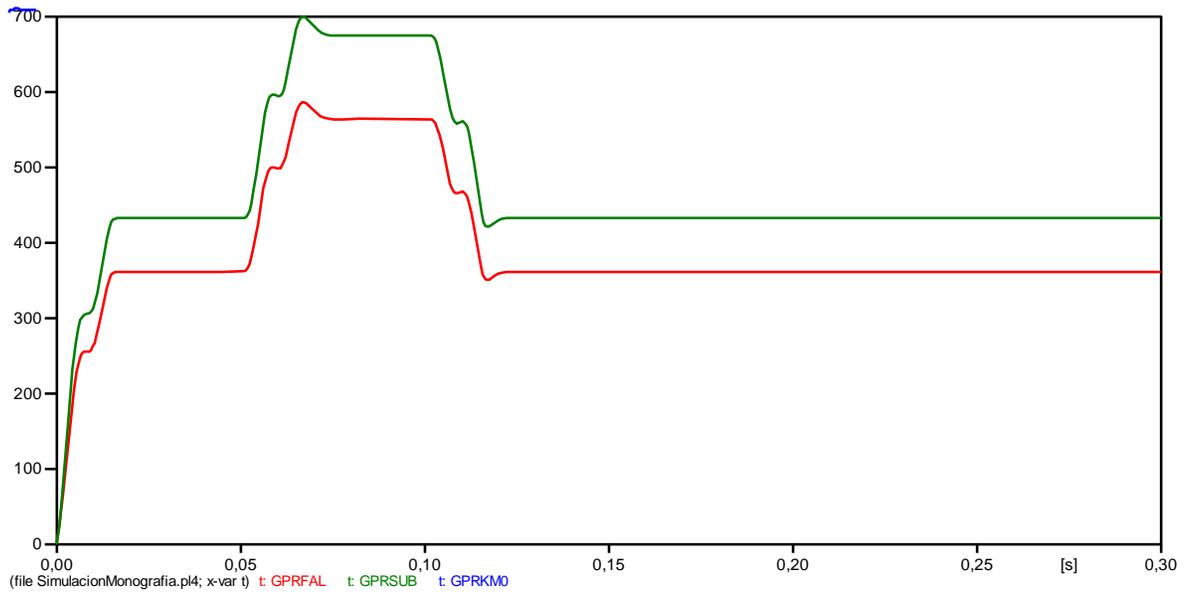
$$\text{Máxima tensión de contacto } \frac{116}{\sqrt{t}} [V, ac]$$

*La columna dos aplica a sitios con acceso al público en general y fue obtenida a partir de la norma IEC 60479 y tomando la curva C1 de la Figura 9.1 de este reglamento (probabilidad de fibrilación del 5%). La columna tres aplica para instalaciones de media, alta y extra alta tensión, donde se tenga la presencia de personal que conoce el riesgo y está dotado de elementos de protección personal<sup>6</sup>.*

Las tablas 5, 6 y 7 muestran los resultados de las simulaciones realizadas, variando los niveles de corto circuito monofásico y trifásico, las longitudes del ramal a 13.2 kV y tomando las tensiones transferidas en los siguientes puntos: la subestación (**GPR SE**), el punto de derivación de la red de 7.62 kV (**GPR KM0**), y en punto de la falla monofásica (**GPR falla**). Asimismo se construyeron las curvas de las figuras 6, 7 y 8, en donde se observa el GPR en función de la longitud del circuito y de los diferentes niveles de cortocircuito.

---

<sup>6</sup> RETIE, numeral 15.1, agosto 2013,

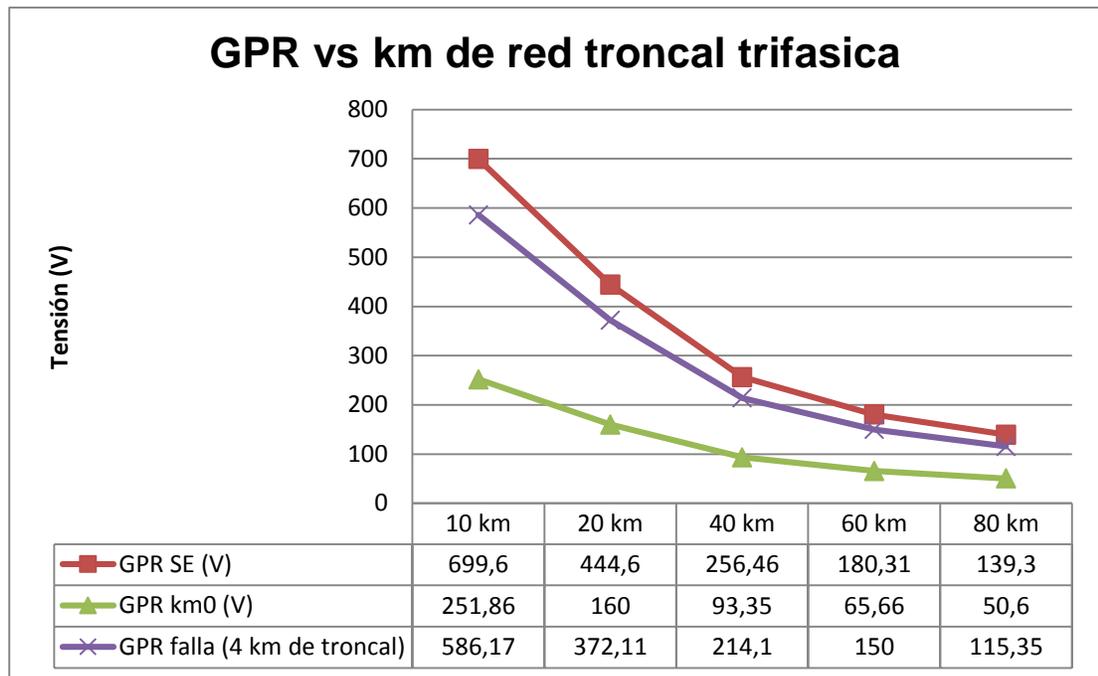


**Figura 6.** GPR para 10 km de red troncal trifásica  $I_{coci}$  2 kA,  $1\phi$  y  $3\phi$ .

En la figura 6 se muestran los potenciales eficaces transferidos al momento de la falla monofásica del lado de la carga; ésta es la primera simulación realizada para obtener los datos de las tablas 5 a 7.

**Tabla 5.** Resultados de simulación,  $I_{coci}$   $1\phi$  de 2 kA y  $3\phi$  de 2 kA

kA corto circuito: $1f = 2$ y $3f = 2$				
Red troncal Trifásica	GPR SE (V)	GPR km0 (V)	GPR falla (4 km de troncal)	Ifalla (A)
10 km	699.6	251.86	586.17	349.8
20 km	444.6	160	372.11	222.15
40 km	256.46	93.35	214.1	127.86
60 km	180.31	65.66	150	89.63
80 km	139.3	50.6	115.35	68.93

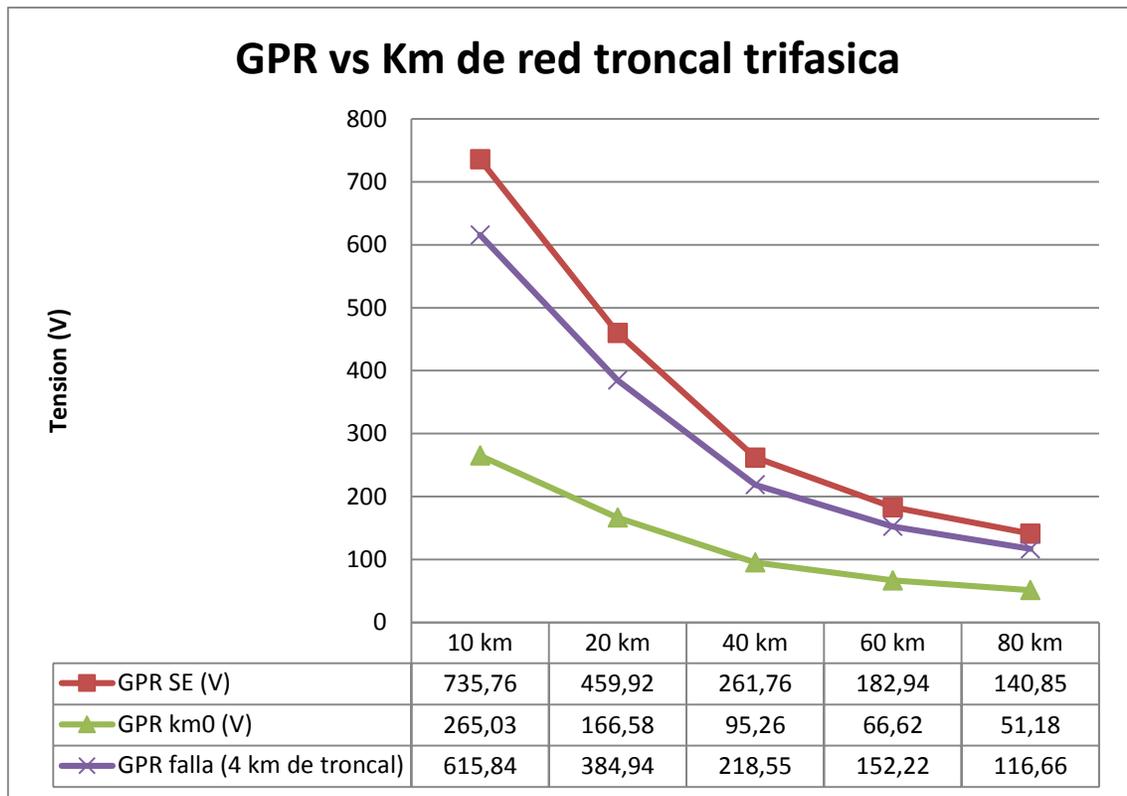


**Figura 7.** Potenciales transferidos vs km de red troncal trifásica tabla 5.

De la tabla 4 se observa que para una falla con duración de 50 milisegundos, el máximo potencial de contacto es 345 volts y 518 volts para personas que conocen el riesgo. Teniendo en cuenta lo anterior, para la distribución monofásica a 7.62 kV es viable o cumple cuando se derive de una red trifásica con más de 35 km aproximadamente; tanto para público en general como para personal ocupacional.

**Tabla 6.** Resultados de simulación,  $I_{coci} 1\phi$  de 4 kA y  $3\phi$  de 4 kA.

kA corto circuito: $1f = 4$ y $3f = 4$				
Red troncal Trifásica	GPR SE (V)	GPR km0 (V)	GPR falla (4 km de troncal)	$I_{falla}$ (A)
10 km	735.76	265.03	615.84	366.95
20 km	459.92	166.58	384.94	229.82
40 km	261.76	95.26	218.55	130.55
60 km	182.94	66.62	152.22	90.95
80 km	140.85	51.18	116.66	69.72

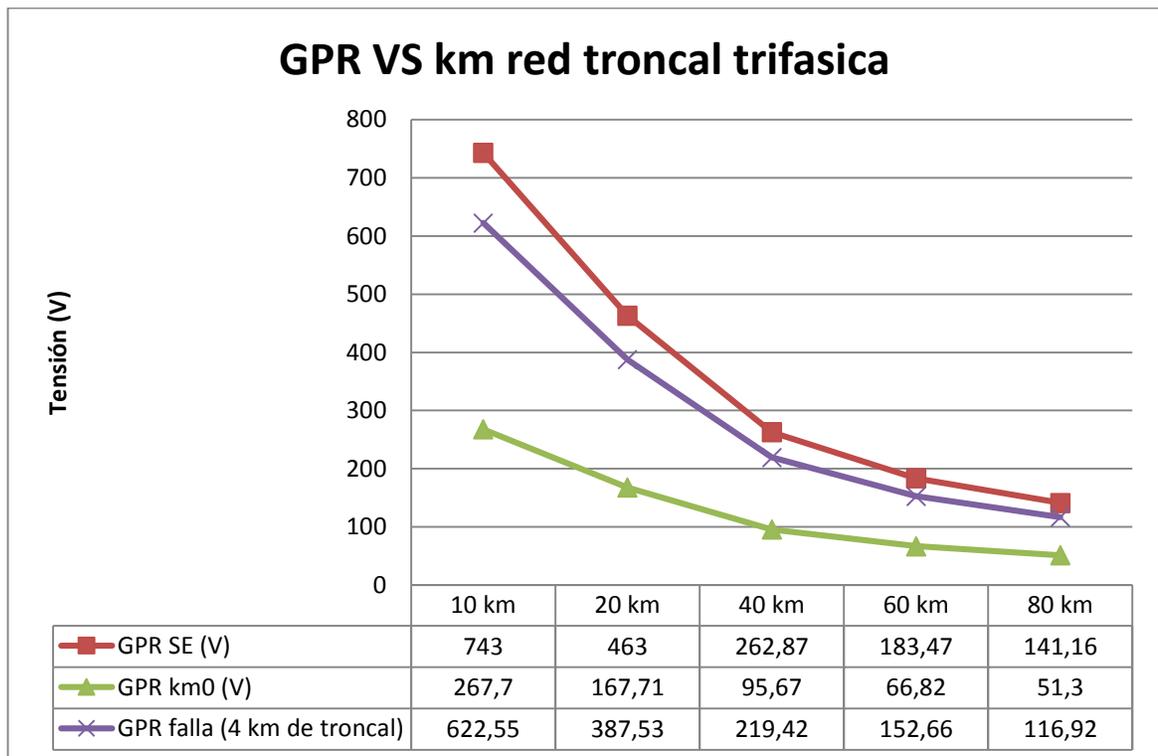


**Figura 8.** Potenciales transferidos vs km de red troncal trifásica tabla 6.

Realizando el mismo análisis entre la tabla 6 y 4, para la distribución monofásica a 7.62 kV es viable o cumple cuando se derive de una red trifásica con más de 37 km aproximadamente;, tanto para público en general como para personal ocupacional.

**Tabla 7.** Resultados de simulación,  $I_{coci} 1\phi$  de 5 kA y  $3\phi$  de 5 kA.

kA corto circuito: $1\phi = 5$ y $3\phi = 5$				
Red troncal Trifásica	GPR SE (V)	GPR km0 (V)	GPR falla (4 km de troncal)	$I_{falla}$ (A)
10 km	743	267.7	622.55	371.49
20 km	463	167.71	387.53	231.37
40 km	262.87	95.67	219.42	131.09
60 km	183.47	66.82	152.66	91.22
80 km	141.16	51.3	116.92	69.87



**Figura 9.** Potenciales transferidos vs km de red troncal trifásica tabla 7.

Realizando el mismo análisis entre la tabla 7 y 4, para la distribución monofásica a 7.62 kV es viable o cumple cuando se derive de una red trifásica con más de 40 km aproximadamente; tanto para público en general como para personal ocupacional.

Finalmente, analizando la condición más desfavorable y de riesgo, para poder implementar una red de distribución rural a 7.62 kV, la red existente a 13.2 kV, bien sea bifásica o trifásica, debe tener mínimo una longitud 40 km; teniendo en cuenta que las máximas corrientes de corto circuito para ESSA son de 5 kA, para las subestaciones que atienden el sector rural.

### 2.3. Costos de inversión del sistema en estudio.

Para realizar el presupuesto de inversión de construcción del modelo de distribución a 7.62 kV, se tomó como referencia los análisis de precios unitarios (APU) de los proyectos aprobados por la UPME con redes de distribución a 13.2 kV del 2014 y se ajustaron a la red propuesta.

La tabla 8 resume las actividades para la construcción de la red a 7.62 kV, incluidos en el anexo A.

**Tabla 8.** Costos de construcción red de 7.62 kV

ACTIVIDAD		VALOR
Red de media tensión		\$ 62,911,204
Red de baja tensión		\$ 123,631,180
Subestaciones		\$ 17,776,745
Acometidas e instalaciones internas		\$ 49,959,522
Costo directo		\$ 254,278,651
Administración	10%	\$ 25,427,865
Imprevistos	5%	\$ 12,713,933
Utilidad	5%	\$ 12,713,933
Subtotal 1		\$ 305,134,382
Interventoría técnica	10%	\$ 25,427,865
Certificación RETIE	1%	\$ 2,542,787
Subtotal 2		\$ 333,105,034
Interventoría administrativa y financiera	4%	\$ 13,324,201
Administración y asistencia técnica	6%	\$ 19,986,302
<b>Total Proyecto</b>		<b>\$ 366,415,537</b>

El mayor costo lo presentan las redes de baja tensión para el proyecto en particular, esto debido a la cantidad de material como: los postes de 8 metros y el conductor para redes de baja tensión.

#### 2.4. Pérdidas de potencia activa del sistema en estudio a 7.62 kV

**Tabla 9.** Pérdidas técnicas del sistema a 7.62 kV

TRAMO	LONGITUD m	NUMERO USUARIOS	F. DIVERS	POTENCIA kVA	CALIBRE CONDUCTOR	CORRIENTE A	RESISTENCIA ohms	PERDIDAS W
1-2	950	41	2.4854	18.611	2	2.44	0.807	4.82
2-3	1342	33	2.3986	15.522	2	2.04	1.141	4.73
3-4	300	9	1.8789	5.404	2	0.71	0.255	0.13
3-5	600	24	2.2712	11.922	2	1.56	0.510	1.25
5-6	193	6	1.7167	3.943	2	0.52	0.164	0.04
5-7	410	18	2.1561	9.419	2	1.24	0.348	0.53
7-8	1698	11	1.9592	6.334	2	0.83	1.443	1.00
TOTAL								12.50

Las pérdidas de potencia activa para el sistema en análisis son 12.5 W.

En el capítulo siguiente se compara la red rural construida a nivel de tensión 13.2 kV con la red rural proyectada a 7.62 kV propuesta, se evalúan los costos de construcción y las pérdidas de energía activa en cada uno de los sistemas.

## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS COMPARATIVO A 13.2 kV Vs 7.62 kV

Ya habiendo realizado el estimado de costos de construcción y de pérdidas de energía activa en cada uno de los dos sistemas, en este capítulo se procede a realizar el análisis comparativo y finalmente se darán las conclusiones y recomendaciones.

#### 3.1 Comparativo de costos

**Tabla 10.** Comparativo costos de construcción distribución a 13.2 kV vs 7.62 kV.

ACTIVIDAD		VALOR 13.2 kV	VALOR 7.62 kV
Red de media tensión		\$ 76,543,898	\$ 62,911,204
Red de baja tensión		\$ 123,631,180	\$ 123,631,180
Subestaciones		\$ 18,941,675	\$ 17,776,745
Acometidas e instalaciones internas		\$ 49,959,522	\$ 49,959,522
Costo directo		\$ 269,076,275	\$ 254,278,651
Administración	10%	\$ 26,907,628	\$ 25,427,865
Imprevistos	5%	\$ 13,453,814	\$ 12,713,933
Utilidad	5%	\$ 13,453,814	\$ 12,713,933
Subtotal 1		\$ 322,891,531	\$ 305,134,382
Interventoría técnica	10%	\$ 26,907,628	\$ 25,427,865
Certificación RETIE	1%	\$ 2,690,763	\$ 2,542,787
Subtotal 2		\$ 352,489,922	\$ 333,105,034
Interventoría administrativa y financiera	4%	\$ 14,099,597	\$ 13,324,201
Administración y asistencia técnica	6%	\$ 21,149,395	\$ 19,986,302
Total Proyecto		\$ 387,738,914	\$ 366,415,537

De la tabla 10 se observa que la diferencia de costos de construir el proyecto a 7.62 kV generaría un ahorro de \$21,3 millones de pesos, lo que representa una disminución en el costo promedio por vivienda electrificada de \$520.082,3.

Como se puede apreciar en la tabla 10, la principal diferencia radica en la red de media tensión y las subestaciones; en donde se obtiene una economía en el nivel de aislamiento para los equipos de las subestaciones. Además incide que el conductor del neutro a nivel de 7.62 kV no requiere aislamiento, a pesar de incluir los sistemas de puesta a tierra cada 400 metros, según [6].

### 3.2 Comparativo de pérdidas de potencia activa.

**Tabla 11.** Comparativo pérdidas potencia activa: distribución a 13.2 kV vs 7.62 kV.

TRAMO	LONGITUD METROS	NUMERO USUARIOS	POTENCIA kVA	CALIBRE CONDUCTOR	RESISTENCIA A ohms	TENSIÓN 13.2 kV		TENSIÓN 7.62 kV		
						CORRIENTE (A)	PÉRDIDAS (VA)	CORRIENTE (A)	PÉRDIDAS (W)	
1-2	950	41	18.61	2	0.81	1.41	1.61	2.44	4.82	
2-3	1,342	33	15.52	2	1.14	1.18	1.58	2.04	4.73	
3-4	300	9	5.40	2	0.25	0.41	0.04	0.71	0.13	
3-5	600	24	11.92	2	0.51	0.90	0.42	1.56	1.25	
5-6	193	6	3.94	2	0.16	0.30	0.01	0.52	0.04	
5-7	410	18	9.42	2	0.35	0.71	0.18	1.24	0.53	
7-8	1,698	11	6.33	2	1.44	0.48	0.33	0.83	1.00	
TOTAL								4.17		12.50

En cuanto a las pérdidas de potencia activa, al realizar la distribución a 7.62 kV éstas se triplicarían en comparación con las pérdidas al realizar la distribución al nivel de tensión 13.2 kV; debido a que al disminuir el nivel de tensión para una misma carga, utilizando el mismo calibre del conductor, la corriente aumenta y por ende las pérdidas aumentan.

### 3.3 Proyección de pérdidas y costo de pérdidas

Realizando una proyección del valor de las pérdidas técnicas para el sistema de 13.2 kV y 7.62 kV, durante la vida útil de los activos de distribución (30 años) según resolución CREG 097 de 2008, se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 12.** Proyección costo pérdidas energía activa a 30 años.

AÑO	PÉRDIDAS INSTANTÁNEAS		13.2 kV	7.62 kV	PROYECCIÓN TARIFA \$/kW/h	VALOR PÉRDIDAS A 13.2 kV	VALOR PÉRDIDAS A 7.62 kV
	PÉRDIDAS ACTIVA						
	13.2 Kv	7.62 kV	Acumulado Año	Acumulado Año			
2015	4.17	12.50	12.00	35.99	392.67	4,710.37	14,131.10
2016	4.46	13.39	12.85	38.55	409.46	5,261.62	15,784.86
2017	4.76	14.28	13.71	41.14	419.46	5,751.74	17,255.23
2018	5.08	15.24	14.63	43.90	433.91	6,349.10	19,047.30
2019	5.42	16.26	15.61	46.84	447.77	6,991.39	20,974.17
2020	5.77	17.32	16.63	49.89	461.75	7,678.49	23,035.46
2021	6.13	18.38	17.64	52.93	484.72	8,551.42	25,654.27
2022	6.50	19.50	18.72	56.15	492.40	9,215.89	27,647.66
2023	6.91	20.72	19.89	59.68	519.85	10,342.33	31,027.00
2024	7.37	22.11	21.23	63.69	551.60	11,710.09	35,130.27
2025	7.84	23.51	22.57	67.70	569.49	12,851.05	38,553.16
2026	8.33	24.99	23.99	71.96	586.32	14,064.03	42,192.10
2027	8.85	26.56	25.50	76.49	603.75	15,393.78	46,181.35
2028	9.41	28.23	27.10	81.31	621.62	16,847.38	50,542.13
2029	10.00	30.01	28.81	86.43	640.12	18,441.09	55,323.27
2030	10.63	31.90	30.62	91.87	659.17	20,185.61	60,556.84
2031	11.37	34.10	32.74	98.22	678.80	22,224.24	66,672.71
2032	12.08	36.25	34.80	104.41	699.12	24,330.47	72,991.41
2033	12.84	38.53	36.99	110.98	719.41	26,612.95	79,838.85
2034	14.13	42.39	40.69	122.08	742.04	30,195.17	90,585.51
2035	15.54	46.63	44.76	134.28	764.30	34,211.13	102,633.39
2036	17.10	51.29	49.24	147.71	787.23	38,761.21	116,283.63
2037	18.81	56.42	54.16	162.48	810.85	43,916.45	131,749.35
2038	20.69	62.06	59.58	178.73	835.17	49,757.34	149,272.01
2039	22.76	68.27	65.54	196.61	860.23	56,375.06	169,125.19
2040	25.03	75.09	72.09	216.27	886.03	63,872.95	191,618.84
2041	27.53	82.60	79.30	237.89	912.61	72,368.05	217,104.15
2042	30.29	90.86	87.23	261.68	939.99	81,993.00	245,979.00
2043	33.32	99.95	95.95	287.85	968.19	92,898.07	278,694.21
2044	36.65	109.94	105.55	316.64	997.24	105,253.51	315,760.53
					VPN	\$ 83,788.27	\$ 251,364.80

Si tenemos en cuenta los costos de construcción sumados con el valor presente de los costos de las pérdidas<sup>7</sup> de energía activa durante la vida útil del activo, el sistema de distribución a 7.62 kV sigue siendo más económico.

---

<sup>7</sup> Este cálculo se realizó con un interés correspondiente al WACC regulatorio de 13.9 %

#### 4. CONCLUSIONES

De la realización de la presente monografía se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Realizar la distribución rural a 7.62 kV en ESSA, está sujeta al cumplimiento de la norma en cuanto a las tensiones de paso. Por la configuración de la red propuesta, en la que el neutro sirve de apantallamiento y está aterrizado, la tensión de paso cobra gran importancia en el diseño de la red a 7.62 kV.

Para el sistema propuesto es más económico realizar la distribución rural a 7.62 kV, aterrizando el conductor del neutro como mínimo cada 400 metros. Además, el sistema es seguro si se puede garantizar que las puestas a tierra tengan una resistencia de máximo 10 ohm.

No obstante que las pérdidas técnicas se triplicarían con el sistema de distribución a 7.62 kV, el indicador de pérdidas de la empresa no se vería afectado; debido a que para aumentar una centésima se requiere aumentar las pérdidas en 260 000 kWh/mes.

Es posible pasar al nivel de 7.62 kV en redes de distribución rural de la empresa, manteniendo las tensiones de paso por debajo del límite máximo admisible, cuando esas redes se deriven de alimentadores de 13.2 kV que tengan más de 40 km de longitud; con corrientes máximas de cortocircuito de 5 kA. De los 270 circuitos a 13.2 kV que tiene ESSA actualmente, 137 cumplen con la esta condición; esto equivale al 50.74%.

## 5. RECOMENDACIÓN

Se debe establecer un cronograma de revisión y mantenimiento de las puestas a tierra en el sistema a 7.62 kV con el fin de garantizar la resistencia máxima de 10 ohmios, para que el sistema sea seguro durante su vida útil.

Con el fin de optimizar los cálculos de las tensiones transferidas y garantizar la seguridad se deben tomar las medidas de corriente de corto circuito, en los puntos de donde se va a derivar la red de 7.62 kV.

.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Departamento de Santander, Asamblea Departamental, Ordenanza 023 de 2006, disponible en <http://www.notinet.com.co/pedidos/39212.pdf>, consultado en julio de 2014.
- [2] Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., Reporte facturación cliente – municipio (FAC-CLIC-MUNIC), Sistema de administración comercial ESSA (SAC), 2014.
- [3] Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., Plan de Negocios ESSA, disponible en [http://www.essa.com.co/site/Portals/0/Docs/Plan\\_de\\_Negocios\\_Web\\_ESSA.pdf](http://www.essa.com.co/site/Portals/0/Docs/Plan_de_Negocios_Web_ESSA.pdf), consultado en junio 2014.
- [4] Empresas Públicas de Medellín, Norma Rural RA8-25 EPM, disponible en [https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro\\_de\\_documentos/proveedores\\_y\\_contratistas/normas\\_y\\_especificaciones/normas\\_aereas/grupo\\_8\\_normas\\_tecnicas/RA8-025\\_006.pdf](https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/proveedores_y_contratistas/normas_y_especificaciones/normas_aereas/grupo_8_normas_tecnicas/RA8-025_006.pdf), consultada en junio 2014.
- [5] Gustavo Caballero Suárez, Presentación ESSA aprobada por Junta directiva 440, Marzo – 2013.
- [6] NESC IEEE 2, National Electric Safety Code, article 097, disponible en <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/004/ieee.c2.1997.pdf>, consultado en junio 2014.
- [7] República de Colombia, Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética, Plan indicativo de expansión de cobertura de energía eléctrica 2014-2017, disponible en <http://www.upme.gov.co/Piec/piec/Home/formulariospiec/tabid/56/Default.html>, consultado en junio 2014.
- [8] República de Colombia, Ministerio de Minas y Energía, Decreto 1128 de 2008, disponible en <http://www.minminas.gov.co/>, consultado en julio 2014

[9] República de Colombia, Ministerio de Minas y Energía, Resolución 90708, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), Agosto de 2013.

[10] Sergio Andrés Morales Restrepo, Guillermo Antonio Vargas Cáceres. "Evaluación técnica y financiera del proyecto de electrificación rural del convenio 1271 entre la gobernación de Santander y la electrificadora de Santander", monografía de grado de especialización en gerencia de recursos energéticos, Universidad Autónoma de Bucaramanga, 2013.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS**

Análisis de precios unitarios para la construcción de redes de media y baja tensión, presentados a la UPME. En CD

**ANEXO B**  
**PLANOS UNIFILARES DEL SISTEMA EN ESTUDIO**

Los planos se encuentran en el CD.