INFORME DE RESULTADOS: MEMORIA DE CÁLCULO MECÁNICO DE CONDUCTORES Y SELECCIÓN DE ESTRUCTURAS

PROYECTO: RED DE ALUMBRADO PÚBLICO Y BAJA TENSIÓN – CORREDOR SOGAMOSO - TIBASOSA (BOYACÁ).

1. INTRODUCCIÓN Y ALCANCE

El presente componente del informe técnico describe los criterios, metodologías y procedimientos de ingeniería eléctrica y civil aplicados para la validación mecánica del conductor y la selección definitiva de las estructuras de soporte de la red aérea de baja tensión y alumbrado público proyectada para el corredor Sogamoso - Tibasosa.

El análisis se divide en dos fases secuenciales y complementarias: primero, el estudio del comportamiento termo mecánico del conductor multiplex mediante la Ecuación de Cambio de Estado; segundo, la determinación de la idoneidad estructural de los apoyos a través del Método Analítico de Sumatoria de Momentos de Flexión en la sección de empotramiento. De igual manera se incluye una fase adicional de verificación mediante el método propuesto por las normas de diseño para redes de baja tensión de la Empresa de Energía de Boyacá EBSA S.A.E.S.P. (Capitulo 2. CÓDIGO: EBSA 3.3-CT. VERSIÓN 1-2025).

2. ANÁLISIS TERMOMECÁNICO DEL CONDUCTOR (ECUACIÓN DE CAMBIO DE ESTADO)

2.1. Criterio de Inicialización y Condición EDS (Every Day Stress)

Para garantizar que el conductor multiplex Tríplex 2x2+2 AWG (con neutro portante aislado de ACSR) no sufra fenómenos de fatiga por vibración eólica o deformaciones plásticas permanentes a lo largo de su vida útil, la tensión mecánica inicial de tendido se parametrizó bajo el criterio de EDS (Every Day Stress) fijado rigurosamente en el 18% de su carga de rotura nominal.

2.2. Metodología de Cálculo y Formulación

A partir de dicha condición base, el comportamiento del cable ante las variaciones climáticas extremas de la Zona III de Boyacá (Altiplano) se modeló mediante la Ecuación de Cambio de Estado. Esta ecuación gobierna la transición de tensiones y flechas entre una hipótesis inicial conocida (Condición 1: EDS) y una hipótesis final por evaluar (Condición 2), considerando las propiedades mecánicas y térmicas intrínsecas del material del mensajero.

La formulación matemática empleada responde a la siguiente expresión cúbica:

$$\sigma_{02}{}^3 + A\sigma_{02}{}^2 - B = 0$$

$$A = \alpha E(\theta_2 - \theta_1)cos\delta + \frac{w_{r1}^2 L^2 E(cos\delta)^3}{24A^2\sigma_{01}^2} - \sigma_{01}$$

$$B = \frac{w_{r2}^2 L^2 E(cos\delta)^3}{24A^2}$$

2.2.1. Cargas Resultantes e Hipótesis Climáticas Evaluadas

El parámetro crítico *T* (carga resultante sobre el conductor) y la flecha *f* resultante se determinaron para cada escenario con la variación de la temperatura y velocidad del viento respecto a la condición de estado inicial. Se trabajaron cuatro hipótesis de estado, descartando la influencia del manguito de hielo dada la inexistencia de la condición en la zona objeto de estudio.

HIPÓTESIS	VELOCIDAD DEL VIENTO [km/h]	TEMPERATURA [°C]
I (Velocidad de viento máxima)	100	9
II (Temperatura mínima)	36	4
III (Condición diaria)	7	14
IV (Temperatura máxima)	0	25

- ✓ Las hipótesis I y II son determinantes para el cálculo de esfuerzos en la estructura y conductores.
- ✓ La hipótesis III permite verificar el cumplimiento de los factores de diseño, en condiciones normales de funcionamiento.
- ✓ La hipótesis IV permite definir la máxima flecha en los vanos y así poder verificar el cumplimiento de las distancias de seguridad, por medio de la definición de la altura de las estructuras a emplear.
- ✓ Los resultados de los cálculos para las hipótesis I y II deben concordar en que los conductores no estarán sometidos a una tensión mecánica superior a l 40% de su carga de rotura.

2.3. Resultados de cálculo (Cargas, flechas y factores de seguridad)

El análisis de cambio de estado se realizó determinando el cantón que nos arroje el vano regulador más crítico y considerando el tiro del conductor *To* = 18% de la carga de rotura del conductor, igualmente los desniveles entre estructuras no superan el 10% de la longitud del vano, de donde se obtienen las siguientes conclusiones de diseño:

- ✓ Determinación de la *Tmax*: Este valor crítico de Tensión Máxima se define como vector de fuerza horizontal para el cálculo de los postes.
- ✓ Garantía del Factor de Seguridad del Cable: Se verifica que bajo ninguna de las hipótesis extremas la tensión calculada supere el límite elástico del material ni el porcentaje de rotura permitido por el RETIE y las normas técnicas colombianas.
- ✓ Control de Distancias de Seguridad: A través del cálculo de la flecha máxima en la hipótesis de temperatura máxima, se comprueba que el conductor mantenga las distancias verticales mínimas de seguridad asegurando que la catenaria del cable no vulnere las distancias normativas ante el paso de vehículos de gran altura.

Características mecánicas del conductor Tríplex 2x2+2 AWG (con neutro portante aislado de ACSR)

CARACTERÍSTICA DEL CONDUCTOR	2X35+35MM NEUTRO AISLADO
Calibre [AWG]	2
Carga de Rotura [kg]	1290
Área del neutro portante [mm^2]	33,60
Peso unitario del haz de conductores [kg/m]	0,424
Módulo de Elasticidad E [kg/mm^2]	6300
Coeficiente de dilatación térmica α [1/°C]	2,30E-05
Diámetro del conductor [mm]	20,62
Capacidad de corriente [A]	150

Selección del cantón crítico para análisis de tensiones en el conductor: Revisando el trazado de la red de alumbrado se seleccionó el cantón más grande en longitud con el fin de garantizar una condición de cumplimiento para los demás cantones que hacen parte de la red.

CANTÓN CRÍTICO PARA ANÁLISIS MECÁNICO		
ID Vano	Longitud Vano real [m]	a_i^3
1	39	59319
2	32	32768
3	31	29791
4	31	29791
5	30	27000
Vano Regulador (Vr) [m]	33,1078	

Datos en entrada ecuación de cambio de estado	
Longitud del vano L [m]	33,1078
Desnivel de los apoyos h [m]	0,1
Carga horizontal en el vértice To [kg]	232,2

Se obtuvieron los siguientes resultados por hipótesis de calculo determinando que la *Tmàx* (Tensión critica de diseño) para el cálculo de los apoyos es de 328,62 kg.

HIPÓTESIS	Tsoporte [kg]	FS FINAL	FLECHA FINAL (*f*) [m]
I (Velocidad de viento máxima)	328,62	3,92	0,17
II (Temperatura mínima)	274,05	4,70	0,21
III (Condición diaria)	232,33	5,55	0,25
IV (Temperatura máxima)	193,19	6,67	0,30

3. PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN Y VALIDACIÓN DE POSTES (CÁLCULO DE MOMENTOS)

Para la validación estructural y selección definitiva de los apoyos de 12 metros, se empleó el modelo físico de viga en voladizo empotrada en su base (a ras de suelo), considerando una profundidad de enterramiento normalizada de 1,8m y una altura útil de 10,2m. El objetivo central de este procedimiento es determinar el Momento Volcador Total (M_{v_total}) que actúa sobre la sección crítica de empotramiento de cada poste del corredor Sogamoso - Tibasosa.

Para cubrir la totalidad de la topología del proyecto, el análisis discriminó y agrupó las fuerzas de acuerdo con la función específica de cada apoyo en la red, evaluando las siguientes tipologías estructurales:

- ✓ **Estructuras de Suspensión / Alineamiento:** Ubicadas en tramos rectos donde las tracciones longitudinales del conductor se encuentran en equilibrio teórico.
- ✓ **Estructuras de Ángulo / Esquina:** Posicionadas en los vértices del trazado donde se genera una fuerza resultante transversal en el sentido de la bisectriz interna del giro de la vía.
- ✓ **Estructuras de Retención de Cantón (o Anclaje):** Utilizadas para seccionar mecánicamente la red en tramos rectos largos, encargadas de absorber desequilibrios de tensión por mantenimiento o fallas.
- ✓ **Estructuras de Retención Final / Terminal:** Dispuestas en los extremos finales del tendido, sometidas a la tracción unilateral y máxima del conductor sin compensación posterior.

3.1. Factores Generales Considerados en la Sumatoria de Momentos

El cálculo analítico combinó todas las fuerzas externas que inducen esfuerzos de flexión sobre el cuerpo del poste. Cada fuerza se multiplicó por su altura real de aplicación (*h*) medida desde la línea de tierra para modelar de forma precisa su brazo de palanca (*M=F*h*). De manera general, el sistema de ecuaciones integró los siguientes componentes:

- Acción del Viento sobre el Poste (*Mvp*): Se calculó el empuje horizontal del viento sobre la superficie expuesta del poste. Debido a su geometría troncocónica, se modeló el área proyectada trapezoidal y se determinó su centro de gravedad para concentrar la fuerza equivalente distribuida.
- Acción del Viento sobre los Conductores (*Mvc*): Representa la presión del viento transmitida al poste por el cable multiplex Tríplex 2x2+2 AWG.
- Cargas Singulares del Conjunto de Alumbrado Público (*Malumbrado*): Debido a las dimensiones del sistema de iluminación implementado, este componente requirió un desglose de alta relevancia:
    - Fuerza Transversal del Viento: El empuje del viento golpeando el área expuesta del brazo y la luminaria LED, aplicado puntualmente en la cima útil (10,1m), como ubicación critica de instalación.
    - Momento por Excentricidad (Carga Vertical): Factor crítico en este diseño donde el brazo posee una longitud de 3 metros. El peso propio del brazo y de la luminaria actúa de forma perpendicular al eje del poste. Al estar desplazado horizontalmente 3 metros hacia la calzada, genera un brazo de palanca permanente que induce un momento de flexión constante hacia la vía, el cual fue sumado vectorialmente al sistema.
- Tiros Longitudinales y Transversales por Tracción del Cable (*Mtiro*): Factor gobernado por la Tensión Máxima (*Tmáx*) calculada en la ecuación de cambio de estado. Dependiendo del tipo de estructura, este factor modeló desde el equilibrio perfecto (suspensión), pasando por la fuerza de desvío angular (estructuras de esquina), hasta el tiro unidireccional puro al 100% y del 40% de la capacidad de diseño (estructuras de retención terminal y de cantón respectivamente).

3.2. Obtención de la Fuerza Equivalente Final en la Punta (*Feq*)

Una vez consolidados vectorialmente todos los momentos flectores parciales, se obtuvo el Momento Volcador Total Real de cada apoyo:

$$M_{v_total} = Mvp + Mvc + Malumbrado + Mtiro$$

Con el fin de homologar este impacto contra la Carga de Trabajo comercial de los postes normalizados bajo la norma NTC 1329 (la cual mide la resistencia de fábrica mediante un ensayo de fuerza neta aplicado a 20 cm de la punta), se transformó el momento resultante de la base en una **Fuerza Horizontal Equivalente Concentrada en la Punta, dividiendo el momento total acumulado entre la altura útil del poste.

$$F_{eq} = \frac{M_{v_total}}{10{,}2\ m}$$

Esta fuerza equivalente es el parámetro final que determina si la estructura seleccionada opera de manera segura por debajo de su límite nominal (510kgf) o si requiere de manera obligatoria la implementación de retenidas (vientos) a tierra para absorber los esfuerzos excedentes.

3.3. Datos de entrada y Resultados finales

Se utilizó como referencia poste de concreto de 12m x 510kgf, esto debido a que presentan dimensiones mayores a las del poste metálico de 12m x 510kgf en cuanto a superficie de contacto contra el viento. Por lo que el cálculo es más conservador y cumpliría para ambos tipos de poste.

CARACTERISTICAS DEL POSTE		
Resistencia a la rotura [kg]	*R*	510
Longitud total [m]	*H*	12
Profundidad de enterramiento [m]	*t*	1,8
Altura Útil [m]	*Hu*	10,2
Diámetro en la cima [m]	*Dp*	0,14
Diámetro en la línea de empotramiento [m]	*Db*	0,293
Peso del poste [kg]	*Wp*	873
Factor de Seguridad	*FS*	2,5
Carga de trabajo nominal [kg]	*Tp*	204

DATOS DEL VIENTO (Vía Sogamoso - Tibasosa)		
Velocidad del viento [m/s]	V	27,8
Altitud de diseño de la red [m.s.n.m]	h	2570
Densidad del aire nivel del mar [kg/m3]	ρo	1,225
Densidad del aire corregida [kg/m3]	ρ	0,905
Presión dinámica del viento [Pa]	q	349,853
Presión dinámica del viento [kg/m2]	q	35,7

CARGAS DE CONDUCTORES Y LUMINARIA		
Multiplex Tríplex 2x35+35mm con neutro aislado ACSR		
Carga de Rotura [kg]		1290
Tensión de trabajo máximo [kg]	Tmax	328,62
Diámetro del conjunto [m]	dc	0,02062
Peso del conjunto [kg/m]	wc	0,424
Distancia del cable a punta del poste [m]		0,6
Punto de sujeción del cable [m]	Hc	9,6
Longitud de brazo luminaria [m]		3
diámetro del tubo de la luminaria [in]		2
Peso del brazo [kg]		13
Potencia de la lampara [W]		150
Peso de la lampara [kg]		4
Peso total vertical del conjunto [kg]		17
Ubicación de la luminaria en el poste [m]	hi	10,1

3.4. Resultados finales por tipo de estructura

Estructura de Suspensión / Alineamiento:

Vano atrás [m]	V1	39
Vano adelante [m]	V2	32
Vano viento [m]	Vm	35,5

Fuerzas de Viento transversal

$$F_{vc} = P_v \cdot d_c \cdot V_m$$

Viento sobre conductores 26,115 kg

Momento inducido por el cable M_{vc} 250,699 kg m

Viento sobre el poste

$$A_p = \left(\frac{D_p + D_b}{2}\right) \cdot H_u$$

Area de contacto 2,208 m2

$$F_{vp} = P_v \cdot A_p$$ 78,781 kg

Centro de gravedad de la altura util del poste 4,52 m

Momento inducido por el poste M_{vp} 356,091 kg m

Viento sobre luminaria y brazo

Area del brazo 0,181 m2

Area de la luminaria 0,078 m2

Area del conjunto 0,259 m2

Presión dinámica del viento 35,7 kg/m2

F_{vl} 9,2 kg

Momento inducido por viento en la luminaria M_{vl} 93,29 kg m

Momento por excentricidad de la luminaria M_{exc} 25,5 kg m

TOTAL, ESTRUCTURA DE SUSPENSIÒN

Momento volcador total	M_{v_susp}	725,577	Kg m
Fuerza equivalente en la punta	F_{eq}	71,13	kg
		CUMPLE	

Estructuras de Ángulo / Esquina

Angulo de deflexión	α	15 °	
Fuerza resultante angular	$F_r = 2 \cdot T_{max} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$	85,79	kg
Momento volcador angular	M_{v_ang}	823,556	kg m
Momento volcador total ángulo		1549,132	kg m
Fuerza equivalente en la punta		151,876	kg
		CUMPLE	

Estructuras de Retención de Cantón (o Anclaje):

HIPOTESIS A: OPERACIÓN NORMAL BALANCEADA
Viento trasversal sobre ambos vanos V1 Y V2 (caso crítico con ángulo)
Mismo calculo que la estructura de suspensión y de ángulo

Feq= 151,876 kg CUMPLE

HIPOTESIS B: ROTURA DE CONDUCTOR

Condición de emergencia vano de análisis		39m
Mecánicamente se convierte en una estructura terminal con carga 40%		147,739
		CUMPLE

Estructuras de Retención Final / Terminal:

Vano adelante	V2	39	m
Momento por tiro unilateral	M_{v_tiro}	3154,752	kg m
Fuerza del viento en sentido del tiro	$F_{vc_terminal}$	14,345	kg
Momento fuerza cable	$M_{vc_terminal}$	137,708	kg m
Momento volcador total	$M_{v_terminal}$	3767,338	kg m
Fuerza equivalente en la punta		369,347	kg
		NO CUMPLE	

4. VERIFICACIÓN FINAL: MEMORIA DE CÁLCULO MECÁNICO DE APOYOS POR EL MÉTODO SIMPLIFICADO DE LA NORMA EBSA

4.1. Criterios generales de diseño climático y geométrico

Para dar cumplimiento a las exigencias técnicas de la Empresa de Energía de Boyacá (EBSA), el diseño mecánico de las estructuras también se resolvió mediante el método normativo de Esfuerzo Nominal Requerido (***ENreq***) concentrado en la punta útil del apoyo. Las condiciones de contorno fijadas para el corredor Sogamoso - Tibasosa (Zona III, altitud > 2.300 m.s.n.m) y las características de los elementos que configuran la red son:

- ✓ Estructura Base: Poste de concreto de 12 metros, empotramiento real de 1,8m y altura útil operativa de 10,2m. Su esfuerzo nominal de fábrica a 20 cm de la punta es de 510kgf.
- ✓ Conductor Asociado: Cable multiplex Tríplex 2x2+2 AWG con neutro portante aislado de ACSR. La tracción del mensajero está gobernada por la Tensión Máxima (*Tmáx*) limitada normativamente al 40% de su Carga de Rotura Mínima Garantizada (1290 kgf) igual a 516 kgf. Diámetro del conductor de 20,62mm, peso unitario del haz de 0,424 kgf/m
- ✓ Conjunto de Alumbrado Público: Brazo metálico en tubo de 2" con una longitud de 3 metros y luminaria LED de alta eficiencia.
- ✓ Presión del Viento por Norma (Zona III): De acuerdo con la norma EBSA, para municipios situados en el altiplano boyacense por encima de los 2.300 msnm (como el corredor Sogamoso - Tibasosa), se fija una Presión de Diseño Horizontal (*Pv*) de **35kgf/m2**. Este valor normativo es mandatorio para el cálculo simplificado de esfuerzos transversales. Con vano de diseño promedio de 35m.

4.2. Cálculo de la fuerza base de viento en la punta (*Fv*)

La fuerza transversal total por viento es la suma del empuje sobre el conjunto del poste, el alumbrado público y la retención eólica sobre el cable y se rigen por las siguientes formula:

$$F_{VC} = Cv \times d \times q \times Vano\ (kgf)$$

$$F_{VP} = Cp \times dprom \times q \times H\ (kgf)$$

Donde Cv= coeficiente de forma (1,0 para conductores y formas cilíndricas), Cv= 0,7 (coeficiente de forma para secciones circulares).

4.2.1. Viento sobre el Conjunto de Alumbrado (*FAP*)

Como la norma EBSA no define datos estándar para el calculo de este valor, tomamos el valor de la fuerza producida sobre el conjunto de soporte y luminaria tomando las áreas reales y con C_L=1,2. La fuerza fija normalizada para el brazo de 3 metros y la luminaria LED bajo una presión de 35 kgf/m2:

$$F_{AP}=1,2*0,259*35= \mathbf{10,88\ kgf}$$

4.2.2. Viento sobre el Conductor (*FVC*) y viento sobre el poste (*FVP*)

$$F_{VC}=1,0*0,02062m*35*35m= \mathbf{25,26\ kgf}\ ;\quad F_{VP}=0,7*0,2165m*35*10,2m= \mathbf{54,1\ kgf}$$

Carga transversal resultante

$$F_V = F_{AP} + F_{VC} + F_{VP} = 90{,}24 \text{ kgf}$$

4.3. Cálculo y desarrollo por tipo de estructura

El esfuerzo longitudinal se calcula de acuerdo con los porcentajes de la *Tmax* de la tabla 49. La ecuación general de la norma EBSA para determinar el Esfuerzo Nominal Requerido en la punta es:

$$EN_{requerido} \leq EN_{poste}$$

$$EN_{requerido} = F_V + F_L + F_A$$

4.3.1. Estructuras de Alineamiento / Suspensión

- ✓ $F_A = 0$
- ✓ $F_L = 1*0{,}08 * 516 = 41{,}28$ kgf
- ✓ $EN_{req} = 90{,}24 + 41{,}28 + 0 = 131{,}52$ kgf
- ✓ Cumple para poste de 510 kgf

4.3.2. Estructuras de Retención de Cantón / Anclaje

- ✓ Condición tramo recto en caso de fallo de un vano
- ✓ $F_A = 0$
- ✓ $F_L = 1*0{,}5 * 516 = 258$ kgf
- ✓ $EN_{req} = 90{,}24 + 258 + 0 = 348{,}24$ kgf
- ✓ Cumple para poste de 510 kgf

4.3.3. Estructuras de Ángulo / Esquina (α=15º)

- ✓ $F_A = 2*516 * \text{sen}(15/2) = 134{,}7$ kgf
- ✓ $F_L = 1*0{,}15 * 516 = 77{,}4$ kgf
- ✓ $EN_{req} = 90{,}24 + 77{,}4 + 134{,}7 = 302{,}34$ kgf
- ✓ Cumple para poste de 510 kgf

4.3.4. Estructuras Terminales / Retención Final

- ✓ $F_A = 0$
- ✓ $F_L = 1*1{,}00 * 516 = 516$ kgf
- ✓ $EN_{req} = 90{,}24 + 516 + 0 = 606{,}24$ kgf
- ✓ No cumple: se requiere instalar retenida o cambiar poste a 1050kgf

4.3.5. Estructuras de retención y derivación en T

- ✓ $F_X = F_V + F_L = 90{,}24 + 258 = 348{,}24$ kgf (Retención tipo cantón)
- ✓ $F_Y = 1*1{,}00 * 516 = 516$ kgf (Retención final)
- ✓ $EN_{req} = \sqrt{(348{,}24^2 + 516^2)} = 622{,}516$ kgf
- ✓ No cumple: se requiere instalar retenida, si el vano derivado cruza la vía se recomienda utilizar poste 1050kgf.

5. CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS:

Tras evaluar el comportamiento termo mecánico del conductor y los esfuerzos en los apoyos bajo la metodología de cálculo de momentos y la metodología de la norma EBSA E.S.P. (simplificada y más conservadora), se concluye:

- ✓ Conformidad del Conductor: El cable Tríplex 2 AWG (neutro ACSR) cumple rigurosamente con los límites mecánicos y de flechas exigidos por el RETIE. Bajo la condición climática más crítica (Hipótesis I - Viento Máximo), la tensión se estabiliza de forma segura en 328,62 kgf con un factor de seguridad de 3,92 garantizando el control de vibraciones eólicas y manteniendo las distancias verticales de seguridad sobre la vía.
- ✓ Aptitud de los Postes Base: Los postes de concreto y metálicos de 12m x 510kgf son estructuralmente idóneos para el uso de las cargas en las estructuras de Suspensión/Alineamiento (131,52kgf), Retención de Cantón/Anclaje (348,24kgf) y Ángulo de 15º (302,34kgf), operando siempre por debajo de su límite elástico de fábrica. La definición del tipo de material del apoyo se hará teniendo en cuenta los costos y la facilidad de acceso y desplazamiento para la instalación.
- ✓ Puntos Críticos y Acciones Correctivas: Las estructuras Terminales/Retención Final (606,24kgf) y las de Derivación en T a 90º (622,516kgf) superan de forma individual la capacidad nominal del poste de 510kgf, registrando utilizaciones del 118,8% y 122,1% respectivamente. Para subsanar esto y asegurar la aprobación de la interventoría, se define de carácter obligatorio:
    - Instalar retenidas a tierra (templetes) de acero galvanizado (colineal en postes terminales y derivaciones en T) para absorber los esfuerzos excedentes.
    - En puntos con restricciones físicas o de servidumbre que impidan instalar templetes, se deberá sustituir el apoyo por un poste de 12 m x 1050kgf para finales de circuito o para cruce de calzada con o sin derivación para mitigar fallas por ruptura de anclajes.

Atentamente,

ELVER ALEXANDER PARADA ALBA
ING. ELECTROMECÁNICO
Cel.: 3138215463
Mail: alexparadaing@gmail.com