

# MEMORIAS DE CALCULO

SISTEMA FOTOVOLTAICO - TOCA - BOYACÁ

Diseño de un sistema fotovoltaico de riego para la empresa el Cactus S.A.

WILVER GUARIN CASTRO  
JORGE RUIZ AVENDAÑO

**DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

- A. ANÁLISIS Y CUADRO DE CARGAS**
- B. ANÁLISIS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO ELÉCTRICO**
- C. ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO Y FALLA A TIERRA**
- D. ANÁLISIS DE NIVEL DE RIESGO POR RAYOS Y MEDIDAS DE**
- E. ANÁLISIS DE RIESGOS DE ORIGEN ELÉCTRICO Y MEDIDAS PARA MITIGARLOS.**
- F. ANÁLISIS DEL NIVEL DE TENSIÓN REQUERIDA**
- G. CÁLCULO DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS**
- H. CÁLCULO DE TRANSFORMADORES**
- I. DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**
- J. CÁLCULO ECONÓMICO DE CONDUCTORES**
- K. VERIFICACIÓN DE CONDUCTORES**
- L. CÁLCULO MECÁNICO DE ESTRUCTURAS Y DE ELEMENTOS DE SUJECIÓN DE EQUIPOS**
- M. CÁLCULO Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES CONTRA SOBRECORRIENTES**
- N. CÁLCULOS DE CANALIZACIONES**
- O. CÁLCULOS DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA**
- P. CÁLCULOS DE REGULACIÓN**
- Q. DISTANCIAS DE SEGURIDAD**
- R. ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN COMPLEMENTARIAS**

En el presente documento se muestran las memorias de cálculo que soportan el diseño eléctrico de la instalación de un sistema solar fotovoltaico para una finca de la empresa agrícola el Cactus en el municipio de Toca – Boyacá.

El proyecto consiste en la instalación de un sistema solar fotovoltaico interconectado a la red domestica del predio, para ser interconectado a la red de EBSA con inyección de excedentes.

Conexión de 108 paneles solares de 445 Wp marca JINCO SOLAR para capacidad instalada de generación total de 48,060 kW, conectado a través de un inversor SOLAR TEX nivel 1 (208 Vac); y conectado a la red de EBSA a través de un MEDIDOR BIDIRECCIONAL ISKRAEMECO BASICO MT-174.

En general, el diseño se hizo siguiendo las recomendaciones de la NTC 2050 y RETIE en las secciones que le apliquen.

#### A. ANÁLISIS Y CUADRO DE CARG

| Tablero General de Cargas |             |     |                         |     |                 |         |            |                         |                |        |        |           |
|---------------------------|-------------|-----|-------------------------|-----|-----------------|---------|------------|-------------------------|----------------|--------|--------|-----------|
| TABLERO                   | DESCRIPCION | CTO | NIVEL DE TENSION<br>[V] | F.P | CARGA INSTALADA |         | CORRIENTE  | PROTECCION DEL CIRCUITO | CARGA POR FASE |        |        | CONDUCTOR |
|                           |             |     |                         |     | W               | VA      | NOMINAL IN |                         | [VA]           |        |        |           |
|                           |             |     |                         |     |                 |         | [A]        |                         | A              | B      | C      |           |
| T-D                       | MOTOR 12 HP | 1   | 208                     | 0,9 | 8948            | 9942,2  | 27,63      | 3X40 A                  | 3314,1         | 3314,1 | 3314,1 | 3X8 AWG   |
|                           | MOTOR 5 HP  | 2   | 208                     | 0,9 | 3728            | 4142,2  | 11,51      | 3X30 A                  | 1380,7         | 1380,7 | 1380,7 | 3X10 AWG  |
|                           | RESERVA     | 3   |                         |     |                 |         |            |                         |                |        |        |           |
|                           | RESERVA     | 4   |                         |     |                 |         |            |                         |                |        |        |           |
|                           | RESERVA     | 5   |                         |     |                 |         |            |                         |                |        |        |           |
|                           | RESERVA     | 6   |                         |     |                 |         |            |                         |                |        |        |           |
| TOTALES                   |             |     | 208                     |     | 12676           | 14084,4 | 39,14      | 3X50                    | 4694,8         | 4694,8 | 4694,8 | 3X6 AWG   |

#### B. ANÁLISIS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO ELÉCTRICO

La coordinación del aislamiento tiene por objeto determinar las características de aislamiento necesarias y suficientes de los equipos conectados a las redes eléctricas, para garantizar que el nivel de tensión soportada por el aislamiento del equipo sea mayor que la tensión que pueda aparecer como resultado de una sobretensión transitoria.

Los cables de Baja Tensión tendrán un nivel de aislamiento de 600 V para el nivel de tensión de 208V, lo cual significa que tendrá un factor de seguridad de 2,88 veces.

El Interruptor de Baja Tensión posee categoría de sobretensión III (4000 V) para el nivel de tensión usado (208 V), lo cual significa que tendrá un factor de seguridad de 19,23 veces.

### C. ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO Y FALLA A TIERRA

Se realiza análisis de corto circuito para tablero de inyección y tablero de distribución principal.

Se hace uso de la siguiente fórmula:

$$I_{cc} = \frac{0,8 * U}{R}$$

Donde:

- $I_{cc}$ : Intensidad de cortocircuito máxima en el punto considerado, en amperios.
- $U$ : Tensión de alimentación Fase-Neutro (208V)
- $R$ : Resistencia de los conductores entre el punto considerado y la alimentación.

Para el cálculo de  $R$ , se considerará que los conductores se encuentran a una temperatura de 20 °C, para obtener así el valor máximo posible de  $I_{cc}$ .

En este caso, consideremos calcular la corriente de cortocircuito en la llegada al tablero principal, por lo tanto:

La resistencia eléctrica de un conductor viene dada por la fórmula:

$$R = \rho \frac{2l}{S}$$

Donde:

$R$  = Resistencia eléctrica del conductor

$\rho$  = Coeficiente de resistividad

$l$  = Longitud del conductor

$S$  = Sección transversal del conductor

Para el cobre:

$\rho = 1.71 \times 10^{-8} \Omega m$

$S_{\#4} = 2.1 \times 10^{-6} m^2$

$l_{\#4} = 8$

$R_{\#4} = 0.13028 \Omega$

Por lo tanto, la intensidad de corto circuito máxima es:

$I_{cc} = 1277.24 A$

Por lo tanto, se seleccionan protecciones con poder de corte de 6 kA y curva de disparo C

#### **D. ANÁLISIS DE NIVEL DE RIESGO POR RAYOS Y MEDIDAS DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS**

Se determina a partir de rango de la densidad de descargas a tierra (DDT) dada por:

Rayos / Km<sup>2</sup> x Año, para el área de Boyacá se encuentra entre 1 y 2.

La corriente pico absoluto promedio: corresponde a 40 KA para un 50% de ocurrencia

Con estos dos datos y observando la tabla 1 Anexo A de la norma NTC 4552; para:

DDT < 5 y 20 ≥ I ABS ≥ 40 obtenemos un índice de exposición Bajo.

##### 2. Determinar el Indicador de Gravedad

Se tienen en cuenta tres índices:

Índice A: Uso de la estructura

Índice B: Tipo de la estructura

Índice C: Altura y área de la estructura

Para este proyecto se asume de la siguiente manera:

$$I_G = I_A + I_B + I_C$$

Según la norma y para nuestro caso tendremos los siguientes indicadores:

IA = 30 (Estructura Clase B)

IB = 20 (Para un tipo de estructura Mixta)

IC = 5 (Para un área menor a 900 metros cuadrados y una altura menor a 25 metros)

Observando la tabla 2 de la NTC 4552 tenemos se obtiene Índice de Gravedad Medio.

Una vez determinados los dos índices requeridos y evaluándolos en la matriz de nivel de riesgo, nos arroja UN NIVEL DE RIESGO BAJO; para el cual las acciones recomendadas son las siguientes según la norma en referencia:

- Realizar la puesta a tierra de la instalación según lineamientos de la NTC 2050

**E. ANÁLISIS DE RIESGOS DE ORIGEN ELÉCTRICO Y MEDIDAS PARA MITIGARLOS.**

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| <p><b>RIESGO: ARCOS ELÉCTRICOS.</b><br/> <b>POSIBLES CAUSAS:</b> Malos contactos, cortocircuitos, aperturas de interruptores con carga, apertura o cierre de seccionadores.<br/> <b>MEDIDAS DE PROTECCIÓN:</b> Utilizar materiales envolventes resistentes a los arcos, mantener una distancia de seguridad, usar gafas de protección contra rayos ultravioleta.</p>                               | <p>APLICA:<br/> <b>SI</b></p> |
| <p><b>RIESGO: AUSENCIA DE ELECTRICIDAD.</b><br/> <b>POSIBLES CAUSAS:</b> Apagón o corte del servicio, no disponer de un sistema ininterrumpido de potencia - UPS, no tener plantas de emergencia, no tener transferencia.<br/> <b>MEDIDAS DE PROTECCIÓN:</b> Disponer de sistemas ininterrumpidos de potencia y de plantas de emergencia con transferencia automática.</p>                         | <p>APLICA:<br/> <b>NO</b></p> |
| <p><b>RIESGO: CONTACTO DIRECTO.</b><br/> <b>POSIBLES CAUSAS:</b> Negligencia de técnicos o impericia de no técnicos.<br/> <b>MEDIDAS DE PROTECCIÓN:</b> Distancias de seguridad, interposición de obstáculos, aislamiento o recubrimiento de partes activas, utilización de interruptores diferenciales, elementos de protección personal, puesta a tierra, probar ausencia de tensión</p>         | <p>APLICA:<br/> <b>NO</b></p> |
| <p><b>RIESGO: CONTACTO INDIRECTO.</b><br/> <b>POSIBLES CAUSAS:</b> Fallas de aislamiento, mal mantenimiento, falta de conductor de puesta a tierra.<br/> <b>MEDIDAS DE PROTECCIÓN:</b> Separación de circuitos, uso de muy baja tensión, distancias de seguridad, conexiones equipotenciales, sistemas de puesta a tierra, interruptores diferenciales, mantenimiento preventivo y correctivo.</p> | <p>APLICA:<br/> <b>NO</b></p> |
| <p><b>RIESGO: CORTOCIRCUITO.</b><br/> <b>POSIBLES CAUSAS:</b> Fallas de aislamiento, impericia de los técnicos,</p>  |                               |

|   |                              |
|---|------------------------------|
| <p>accidentes externos, vientos fuertes, humedades.</p> <p><b>MEDIDAS DE PROTECCIÓN:</b> Interruptores automáticos con dispositivos de disparo de máxima corriente o cortacircuitos fusibles.</p>   | <p>APLICA:<br/><b>SI</b></p> |
| <p><b>RIESGO: ELECTRICIDAD ESTÁTICA.</b></p> <p><b>POSIBLES CAUSAS:</b> Unión y separación constante de materiales como aislantes, conductores, sólidos o gases con la presencia de un aislante.</p> <p><b>MEDIDAS DE PROTECCIÓN:</b> Sistemas de puesta a tierra, conexiones equipotenciales, aumento de la humedad relativa, ionización del ambiente, eliminadores eléctricos y radiactivos, pisos conductivos.</p>   | <p>APLICA:<br/><b>NO</b></p> |
| <p><b>RIESGO: EQUIPO DEFECTUOSO.</b></p> <p><b>POSIBLES CAUSAS:</b> Mal mantenimiento, mala instalación, mala utilización, tiempo de uso, transporte inadecuado.</p> <p><b>MEDIDAS DE PROTECCIÓN:</b> Mantenimiento predictivo y preventivo, construcción de instalaciones siguiendo las normas técnicas, caracterización del entorno electromagnético.</p>   | <p>APLICA:<br/><b>SI</b></p> |
| <p><b>RIESGO: RAYOS.</b></p> <p><b>POSIBLES CAUSAS:</b> Fallas en el diseño, construcción, operación, mantenimiento del sistema de protección.</p> <p><b>MEDIDAS DE PROTECCIÓN:</b> Pararrayos, bajantes, puestas a tierra, equipotencialización, apantallamientos, topología de cableados. Además, suspender actividades de alto riesgo, cuando se tenga personal al aire libre.</p>                                   | <p>APLICA:<br/><b>SI</b></p> |
| <p><b>RIESGO: SOBRECARGA.</b></p> <p><b>POSIBLES CAUSAS:</b> Superar los límites nominales de los equipos o de los conductores, instalaciones que no cumplen las normas técnicas, conexiones flojas, armónicos.</p> <p><b>MEDIDAS DE PROTECCIÓN:</b> Interruptores automáticos con relés de sobrecarga, interruptores automáticos asociados con cortacircuitos, dimensionamiento adecuado de conductores y equipos.</p> | <p>APLICA:<br/><b>NO</b></p> |

## **F. ANÁLISIS DEL NIVEL DE TENSIÓN REQUERIDA**

La tensión requerida en este caso será la misma existente en el tablero del interruptor trifásico principal antes del tablero de distribución del uso final, la cual es de régimen de neutro T-N 208/120V, la cual concuerda con los voltajes normalizados por el operador de red.

## **G. CÁLCULO DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS**

Para este proyecto de instalaciones eléctricas de usuario final, no aplican cálculos de campos electromagnéticos.

## **H. CÁLCULO DE TRANSFORMADORES**

Para este proyecto de instalaciones eléctricas de usuario final, no aplican cálculos de transformadores ya que este existente.

## **I. DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

Según la NTC 2050 en su artículo 690- Los conjuntos fotovoltaicos montados en el tejado de las viviendas deben tener un sistema de detección e interrupción de fallas a tierra que proteja contra fallas a tierra y así reducir el riesgo de incendio. El circuito de protección contra fallas a tierra debe ser capaz de detectar una falla a tierra, abrir el circuito y aislar el conjunto que compromete la instalación.

Tanto los circuitos de corriente continua como los de alterna se encuentran conectados equipotencialmente a tierra y esta conexión se realiza de tal manera que no afecte a las condiciones de la puesta a tierra de la red de distribución. Para esto el marco de aluminio de cada uno de los paneles solares se encuentra interconectado con toda la estructura de aluminio mediante las grapas de sujeción cumpliendo con la norma NTC 2050 690-4c, de la misma manera, el inversor se encuentra interconectado a la estructura; la estructura se conecta al barraje de tierras del tablero general de distribución de la casa por medio de un alambre de cobre AWG el cual se encuentra sólidamente aterrizado a la varilla de puesta de tierra existente en el predio. SE GARANTIZA UN SISTEMA EQUIPOTENCIALIZADO.

La resistencia eléctrica de un conductor viene dada por la fórmula:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Donde:

R = Resistencia eléctrica del conductor

$\rho$  = Coeficiente de resistividad

l = Longitud del conductor

S = Sección transversal del conductor

Para el cobre:

$\rho = 1.71 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$

S =  $8.36 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  (cable de cobre 8 awg)

En la instalación se usarán 50m de cable de cobre 8 AWG, por lo tanto, la resistencia eléctrica del conductor es:

R = 0.1022  $\Omega$

## 1. CÁLCULO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

El sistema de puesta a tierra es el conjunto de elementos conductores de un sistema eléctrico específico sin interruptores ni fusibles, que conectan los equipos eléctricos con el terreno una masa metálica. El sistema de puesta a tierra debe someterse a mantenimiento en baja tensión debe hacerse inspección visual cada año y cada 5 años, inspección visual y mediciones. Los objetivos del sistema de puesta a tierra son: la seguridad de las personas, la protección de las instalaciones y la compatibilidad electromagnética. Artículo 15 del RETIE: para el conductor del electrodo de puesta a tierra o conductor de tierra Además del Cobre se pueden usar otros materiales conductores o aleación de ellos siempre que se garantice su protección contra la corrosión durante la vida útil de la puesta a tierra y la resistencia del conductor no comprometa la efectividad de la puesta a tierra para baja tensión se debe seleccionar con la tabla 250 - 94 de la norma NTC 2050. Calibre mínimo es el número 8 AWG en corriente alterna. Artículo 15.3.1

Puesta a tierra: Para efectos del RETIE los electrodos de puesta a tierra deben cumplir con este artículo en todas sus partes, Especialmente con la tabla 15 - 2 en donde el diámetro para una varilla de Cu es de 12.7 mm. Este electrodo debe quedar enterrado a 15 cm como mínimo de la superficie y soldado al conductor de tierra con soldadura exotérmica. Los requisitos de los electrodos de puesta tierra son.

1. Alta conductividad eléctrica
2. Alta conductividad térmica
3. Alta resistencia a la corrosión
4. Mínima dilatación lineal
5. Mínima elongación permanente
6. Gran estabilidad estructural
7. Resistencia al ataque electroquímico

El reglamento interno de instalaciones eléctricas RETIE y el artículo 250 de la norma NTC 2050 establece que toda instalación eléctrica cubierta por dicho reglamento debe disponer de un sistema a tierra en forma tal que cualquier punto accesible a las personas que transiten o permanezcan en la instalación no estén sometidas a tensiones de paso o de contacto que superen los niveles de

soportabilidad del cuerpo humano en caso de presentarse una falla que produzca la conducción de corrientes de falla a tierra a través del cuerpo humano.

La resistencia máxima de la puesta a tierra para el proyecto debe ser de 25  $\Omega$  ohmios máximo para acometida de servicio según el RETIE y para los cálculos tomamos la medida de resistencia aparente del terreno.

### 9.1 Medición de la resistividad del terreno.

#### Medición de Resistividad Aparente

Existen diversas técnicas para medir la resistividad aparente del terreno. Para efectos del presente reglamento, se puede aplicar el método tetraelectrónico de Wenner, que es el más utilizado para aplicaciones eléctricas y que se muestra en la Figura 15.4 del RETIE. Se pueden usar otros métodos debidamente reconocidos y documentados en las normas y prácticas de la ingeniería.

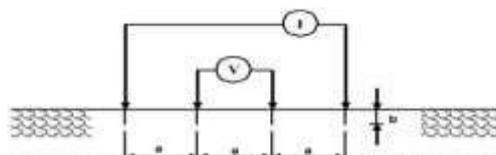


Figura 15.4. Esquema de medición de resistividad aparente

Tabla 2. Medición de la resistividad del terreno. Fuente: El autor

| METODOLOGIA      |                     |   |      |
|------------------|---------------------|---|------|
| METODO DE WENNER |                     |   |      |
| EQUIPO UTILIZADO |                     |   |      |
| MARCA:           |                     | Earth-Insulation Tester<br>MI2088 METREL  |      |
| TIPO:            |                     | Medidor de resistencia -<br>Resistividad del terreno,<br>Aislamiento y continuidad. |      |
| PROYECTO:        |                     |   |      |
| DIRECCION:       | Agrícola Cactus S.A | MUNICIPIO:  | Toca |

Evidencia fotográfica:



Tabla medida de resistividad del terreno. Cumpliendo con los valores establecidos del RETIE Tabla

15.1 y la normatividad IEEE80.

| Medida | Separación (m) | Resistividad (Ω/m) |
|--------|----------------|--------------------|
| 1      | 3              | 38.8               |
| 2      | 5              | 55.7               |
| 3      | 10             | 73.8               |

La resistividad promedio para este caso es de: 56,1 (Ω/m)

La resistencia de puesta a tierra total tiene tres componentes:

- ✓ (a) La resistencia del conductor conectado al sistema de puesta a tierra, que es función de su resistividad, longitud y sección
- ✓ (b) La resistencia de contacto entre la superficie del electrodo y el suelo, este valor es usualmente pequeño si el electrodo está libre de pintura o grasa, esto se elimina efectuando un buen contacto entre el electrodo y tierra.
- ✓ (c) La resistencia de la tierra alrededor del electrodo que es la resistencia principal que influirá en la resistencia total de la puesta a tierra.

$$R = \frac{\rho}{2\pi * L} \ln \frac{2L}{r}$$

Donde:

R: Resistencia de puesta a tierra

$\rho$ : Resistividad del terreno

L: Longitud del electrodo

r: Radio del electrodo

$\rho$ : 56.1Ω/m

L: 2.40m

r: 0.008m (5/8ø)

| RESISTENCIA DE SPT | VALORES      |
|--------------------|--------------|
| $\rho$ =           | 56,1         |
| $2\pi L$ =         | 15,07        |
| L=                 | 2,4          |
| r=                 | 0,008        |
| $\ln$ =            | 6,39         |
| R=                 | 23,787569124 |

## **J. CÁLCULO ECONÓMICO DE CONDUCTORES**

Se calcularán las pérdidas de energía mediante la siguiente ecuación:

$$E = R * I_{MAX}^2 * \Delta t$$

Donde:

E: Pérdidas de energía

R: Resistencia del conductor

I: Corriente máxima

$\Delta t$ : Diferencial de tiempo (1 hora)

Previamente se calculó la resistencia total del conductor desde el inversor hasta el tablero principal, dando como resultado:

$$R_{\#4} = 0.13028 \Omega$$

$$I_{max} = 39.14 \text{ A}$$

Por lo tanto,

$$E = 199.58 \text{ Wh}$$

Las horas de sol pico para el municipio de Toca están calculadas en 5 HSP.

El precio del kWh en promedio en el sector se cotiza en 684.8 COP

Debido a que el inversor solo entrará en operación en las HSP mencionadas, las pérdidas por día serán:

$$E = 683.36 \text{ COP por día}$$

## **K. VERIFICACIÓN DE CONDUCTORES**

Para la verificación de conductores considerando el tiempo de disparo de los interruptores y la corriente de cortocircuito se utilizará la siguiente ecuación:

$$S \geq I_{cc} \frac{\sqrt{t}}{C}$$

donde  $I_{cc}$  = Corriente de cortocircuito admisible,  $S$  = Sección del conductor en  $\text{mm}^2$ ,  $t$  = Tiempo de duración del cortocircuito en seg y  $C$  = Coeficiente que depende de la naturaleza del conductor y de sus temperaturas al inicio y final del cortocircuito. Para el uso de esta ecuación se supone:

Fenómeno de duración limitada.

- La temperatura antes del cortocircuito es la máxima admisible en régimen permanente, para cada tipo de aislamiento.

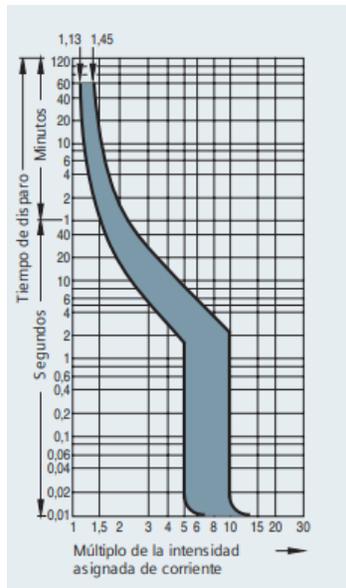
- La temperatura al final del cortocircuito es la máxima admisible por el aislamiento para este régimen.

- Todo el calor generado se acumula en la masa del conductor incrementando su temperatura y por consiguiente el que se transmite al exterior es nulo (proceso adiabático).

Utilizamos la  $I_{cc}$  calculada anteriormente:

$$I_{cc} = 1277.24 \text{ A}$$

El tiempo de disparo para la  $I_{cc}$  calculada es de 0.02 s de acuerdo con las curvas de desconexión características (Curva C)



El coeficiente C para el cobre, con un aislamiento en PVC menor a 300mm<sup>2</sup>, temperatura inicial 70°C y temperatura final 160°C es 115.

Los resultados del cálculo se muestran a continuación:

| Conductor | Sección requerida por $I_{cc}$ (mm <sup>2</sup> ) | Sección seleccionada (mm <sup>2</sup> / AWG) |
|-----------|---|--|
| Cu THHN   | 1.57  | 21.14 / 4                                    |

En la tabla anterior se observa que los conductores seleccionados cumplen con los requisitos mínimos de sistema por corrientes de corto circuito.

### L. CÁLCULO MECÁNICO DE ESTRUCTURAS Y DE ELEMENTOS DE SUJECCIÓN DE EQUIPOS

El campo de módulos fotovoltaicos se sitúa sobre una estructura que se deposita sobre el terreno a nivel del suelo con una inclinación de 10° con respecto a la horizontal. En el municipio de Toca, las ráfagas de viento pueden llegar hasta los 30 m/s y en promedio, la velocidad del viento es de 5 m/s ( $v_b$ ) a una altura de 10m, según el atlas de viento del IDEAM.

La acción del viento como fuerza perpendicular viene dada por la siguiente expresión:

$$q_e = q_b * c_e * c_p(N/m^2)$$

Donde:

- $q_b$  es el valor básico de la presión dinámica del viento
- $c_e$  es el coeficiente de exposición
- $c_p$  es el coeficiente de presión

El valor básico de la presión dinámica del viento viene dado por la siguiente expresión:

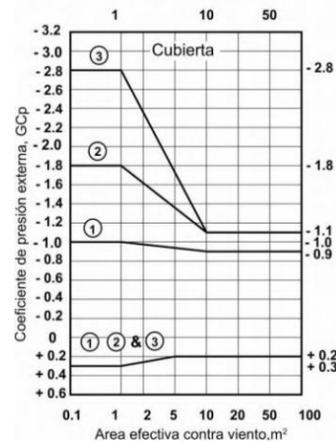
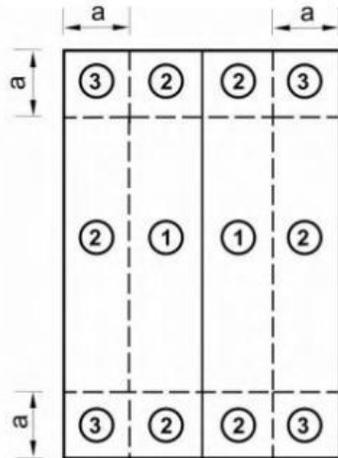
$$q_b = \frac{1}{2} * \delta * v^2 = \frac{1}{2} * \frac{0.95 \text{kg}}{\text{m}^3} * \left(\frac{5\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \frac{11.87\text{N}}{\text{m}^2}$$

Donde  $\delta$  representa la densidad del aire (0.95 para el municipio de Toca)

El coeficiente de exposición ( $c_e$ ) para el tipo de terreno y altura de la instalación de 8.7m según el reglamento colombiano NRS-10 es de  $c_e=0.7$

| Altura sobre el terreno Z<br>m | Exposición, Nota 1 |        |             |             |
|--------------------------------|--------------------|--------|-------------|-------------|
|                                | B                  |        | C           | D           |
|                                | Caso 1             | Caso 2 | Casos 1 y 2 | Casos 1 y 2 |
| 0 - 45                         | 0.7                | 0.57   | 0.85        | 1.03        |
| 6.0                            | 0.7                | 0.62   | 0.90        | 1.08        |
| 7.5                            | 0.7                | 0.66   | 0.94        | 1.12        |
| 9.0                            | 0.7                | 0.70   | 0.98        | 1.16        |
| 12.0                           | 0.76               | 0.76   | 1.04        | 1.22        |
| 15.0                           | 0.81               | 0.81   | 1.09        | 1.27        |
| 18.0                           | 0.85               | 0.85   | 1.13        | 1.31        |
| 20.0                           | 0.89               | 0.89   | 1.17        | 1.34        |
| 24.5                           | 0.93               | 0.93   | 1.21        | 1.38        |
| 27.5                           | 0.96               | 0.96   | 1.24        | 1.40        |
| 30.5                           | 0.99               | 0.99   | 1.26        | 1.43        |
| 36.5                           | 1.04               | 1.04   | 1.36        | 1.52        |
| 42.5                           | 1.09               | 1.09   | 1.36        | 1.52        |
| 49.0                           | 1.13               | 1.13   | 1.39        | 1.55        |
| 55.0                           | 1.17               | 1.17   | 1.43        | 1.58        |
| 60.0                           | 1.20               | 1.20   | 1.46        | 1.61        |
| 76.0                           | 1.28               | 1.28   | 1.53        | 1.68        |
| 90.0                           | 1.35               | 1.35   | 1.59        | 1.73        |
| 107.0                          | 1.41               | 1.41   | 1.64        | 1.78        |
| 122.0                          | 1.47               | 1.47   | 1.69        | 1.82        |
| 137.0                          | 1.52               | 1.52   | 1.73        | 1.86        |
| 152.0                          | 1.56               | 1.56   | 1.77        | 1.89        |

coeficiente eólico  $c_p$  depende de la forma y orientación de la superficie construida. Al estar situados los módulos con una inclinación de  $10^\circ$  sobre la horizontal y con área efectiva de  $23\text{m}^2$  se considera el valor máximo del coeficiente de presión exterior  $c_p = -1.1$  para succión y  $c_p = 0.2$  para presión, de acuerdo con la siguiente tabla.



Sustituyendo los valores se tiene:

$$q_e = 11.87 \text{ N/m}^2 * 0.7 * (-1.1) = -9.13 \text{ N/m}^2$$

$$q_e = 11.87 \text{ N/m}^2 * 0.7 * (0.2) = 1.66 \text{ N/m}^2$$

Los valores resultantes están por debajo de las presiones que puede soportar el panel solar seleccionado certificadas internacionalmente las cuales son  $-2400\text{N/m}^2$  y  $5400 \text{ N/m}^2$  respectivamente.

Para garantizar que la estructura soporta la acción del viento sobre la instalación fotovoltaica, se deben considerar los siguientes datos:

Peso total de los módulos: 2700 kg

Peso total estructura de aluminio: 270 kg

Peso total de bases de concreto: 1440 kg

PESO TOTAL: 4410 kg

FUERZA:  $4410 \text{ kg} * 9.8 \text{ m/s}^2 = 43218 \text{ N}$

Para este caso, la acción del viento puede considerarse despreciable debido a que su magnitud es hasta más de 10 veces menor al peso de la estructura y módulos fotovoltaicos.

### M. CÁLCULO Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES CONTRA SOBRECORRIENTES

Se seleccionan atendiendo lo recomendado en la Norma NTC 2050. La capacidad de corriente del conductor se limitó a la capacidad a 60°C según lo expresado en la tabla 310-16 de la NORMA NTC 2050.

Para el caso de los paneles fotovoltaicos al inversor se tiene que:

| CÁLCULO DE SECCIÓN DE CABLES DE CONTINUA |       |                           |                 |                  |     |
|--|-------|---------------------------|-----------------|------------------|-----|
| Datos a modificar (leer notas)           |       |                           | Sección teórica | CABLE A UTILIZAR |     |
| Corriente                                | Largo | Caida de tensión (volts): | mm <sup>2</sup> | mm <sup>2</sup>  | AWG |
| 64,86                                    | 6     | 1                         | 13,19           | 16               | 6   |

Por lo tanto, se selecciona interruptor termomagnético de 50 A.

- Inversor: Se instalará un interruptor termomagnético diferencial de 60 A para el circuito del inversor de acuerdo con las especificaciones del fabricante. El inversor cuenta con protección de sobrevoltaje incorporada de conformidad con la norma IEEE C62.41. Lo anterior se evidencia en el documento adjunto. El inversor contará con protección de frecuencia incorporada de conformidad con el documento adjunto. El inversor, cuenta con protección anti-isla de conformidad con las normas IEEE 1547-2003 y UL1741-2007 como se observa en la ficha técnica del inversor y en el documento adjunto "Anexo C2".

- Tablero Principal: De acuerdo con la instalación trifásica existente, se usará interruptor termomagnético bipolar de 60 A para conductor de calibre 4 AWG de conformidad con la norma NTC 2050. A continuación, se muestra el cálculo de la protección para el inversor:

- Protección por calcular = Inversor
- Tensión de servicio = 208 V
- Carga instalada = 50.000 VA
- Corriente equivalente para la capacidad nominal de la protección = 240,38 A
- Calibre AWG THHN 90°C conductor = No. 4

| CÁLCULO DE SECCIÓN DE CABLES DE ALTERNA |       |                           |                 |                  |     |
|---|-------|---------------------------|-----------------|------------------|-----|
| Datos a modificar (leer notas)          |       |                           | Sección teórica | CABLE A UTILIZAR |     |
| Corriente                               | Largo | Caida de tensión (volts): | mm <sup>2</sup> | mm <sup>2</sup>  | AWG |
| 240,38                                  | 8     | 3                         | 18,47           | 25               | 4   |

Por lo tanto, se selecciona interruptor termomagnético de 60 A.

## N. CÁLCULOS DE CANALIZACIONES

Para la selección de la tubería para los conductores del tramo que conecta el inversor con el tablero del interruptor; se debe calcular la fracción de ocupación del ducto Conduit y coraza liquid tight, dividiendo la sumatoria de las áreas de ocupación de los conductores entre el área interior de los ductos.

Según tabla No 1 del Capítulo 9 NTC2050, Porcentaje de la sección transversal en tubos conduit y tuberías flexibles tipo coraza liquid tight, para el llenado de conductores:

| <b>Número de conductores</b> | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>Mas de 2</b> |
|------------------------------|----------|----------|-----------------|
| Todos tipos de conductores   | 53%      | 31%      | 40%             |

Tubo conduit metálico intermedio (IMC)

| Diámetro interior. mm <sup>2</sup> | Sección total 100%, mm <sup>2</sup> | Dos hilos, 31%, mm <sup>2</sup> | Mas de dos hilos, 40%,mm <sup>2</sup> | Un hilo, 53%,mm <sup>2</sup> |
|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| 16,76                              | 220,64                              | 68,39                           | 88,39                                 | 116,77                       |
| 21,95                              | 378,06                              | 117,42                          | 151,61                                | 200,64                       |
| 28,07                              | 618,71                              | 191,61                          | 247,74                                | 327,74                       |
| 36,78                              | 1 061,93                            | 329,03                          | 424,52                                | 562,58                       |
| 42,75                              | 1 434,19                            | 444,52                          | 573,55                                | 758,00                       |
| 54,61                              | 2341,29                             | 725,81                          | 936,77                                | 1 240,64                     |
| 64,95                              | 3312,90                             | 1 027,09                        | 1325,16                               | 1 756,13                     |
| 80,67                              | 5110,96                             | 1584,51                         | 2 044,51                              | 2709,03                      |
| 93,24                              | 6828,37                             | 2116,77                         | 2731,61                               | 3619,35                      |
| 105,8,2,                           | 8794.18                             | 2 726.45                        | 3517.41                               | 4660.64                      |

| Tipos: AF, RHH*, RHW*, RHW-2*, RHHN, RHHW, THW, THW-2, TFN, TFFN, THWN, THWN-2, XF, XFF |                     |  |                      |   |
|---|---------------------|--|----------------------|---|
| Tipo  | Calibre AWG o kcmil | Sección Transv. cond. (mm <sup>2</sup> ) | Diámetro aprox. (mm) | Sección aprox. total (mm <sup>2</sup> ) |
| RHH*, RHW*, RHW-2*  | 12                  | 3,30                                     | 4,6                  | 16,8                                    |
|   | 10                  | 5,25                                     | 5,2                  | 21,5                                    |
| XFF   | 8                   | 8,36                                     | 6,8                  | 35,9                                    |
|   | 6                   | 13,29                                    | 7,7                  | 46,8                                    |
| THH, THW, AF, XF, XFF   | 4                   | 21,14                                    | 6,9                  | 62,8                                    |
|   | 3                   | 26,66                                    | 9,7                  | 73,2                                    |
| RHH*, RHW*, RHW-2*, THHW, THW, THW-2  | 2                   | 33,62                                    | 10,5                 | 86                                      |
|   | 1                   | 42,2                                     | 12,5                 | 122,6                                   |
| TW, THW   | 1/0                 | 53,50                                    | 13,5                 | 143,4                                   |
|   | RHH*                | 20                                       | 67,44                | 14,7                                    |
| RHW*  | 3/0                 | 85,02                                    | 16,0                 | 201,1                                   |
|   | 4/0                 | 107,21                                   | 17,5                 | 239,9                                   |
| RHW-2*  | 250                 | 126,67                                   | 19,4                 | 296,5                                   |
|   | 300                 | 152,01                                   | 20,3                 | 340,7                                   |
|   | 350                 | 177,34                                   | 22,1                 | 384,4                                   |
|   | 400                 | 202,68                                   | 23,3                 | 427,0                                   |
|   | 500                 | 253,35                                   | 25,5                 | 509,7                                   |
|   | 600                 | 304,02                                   | 28,3                 | 627,7                                   |
|   | 700                 | 354,69                                   | 30,1                 | 710,3                                   |
|   | 750                 | 380,02                                   | 30,9                 | 751,7                                   |
|   | 800                 | 405,36                                   | 31,8                 | 791,7                                   |
|   | 900                 | 456,03                                   | 33,4                 | 874,9                                   |
|   | 1000                | 506,70                                   | 34,8                 | 953,8                                   |
|   | 1250                | 633,38                                   | 39,1                 | 1200,1                                  |
|   | 1500                | 760,05                                   | 42,2                 | 1 399,7                                 |
|   | 1750                | 886,73                                   | 45,1                 | 1 598,3                                 |
|   | 2 000               | 1 013,40                                 | 47,8                 | 1794,7                                  |
| TEN   | 18                  | 0,82                                     | 2,1                  | 3,6                                     |
| TIFF  | 16                  | 1,31                                     | 2,4                  | 4,7                                     |
|   | 14                  | 2,08                                     | 2,8                  | 6,3                                     |
|   | 12                  | 3,30                                     | 3,3                  | 8,6                                     |
| THHN  | 10                  | 5,25                                     | 4,2                  | 13,6                                    |
|   | 8                   | 8,36                                     | 5,5                  | 23,6                                    |
| THWN  | 6                   | 13,29                                    | 5,5                  | 32,7                                    |
|   | 4                   | 21,14                                    | 8,2                  | 53,2                                    |
| THWN-2  | 3                   | 26,66                                    | 3,9                  | 62,8                                    |
|   | 2                   | 33,62                                    | 9,8                  | 74,7                                    |
|   | 1                   | 42,2                                     | 11,3                 | 100,8                                   |
|   | 1/0                 | 53,50                                    | 12,3                 | 119,7                                   |
|   | 2/0                 | 67,44                                    | 13,5                 | 143,4                                   |
|   | 3/0                 | 85,02                                    | 14,8                 | 172,8                                   |
|   | 4/0                 | 107,21                                   | 16,3                 | 2 08,8                                  |
|   | 250                 | 126,67                                   | 18,1                 | 2 56,1                                  |
|   | 300                 | 152,01                                   | 19,5                 | 2 97,3                                  |

## O. CÁLCULOS DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA

| CÁLCULO DE REGULACIÓN POR BAJA TENSIÓN |          |          |            |         |         |         |           |          |            |           |           |          |          |
|--|----------|----------|------------|---------|---------|---------|-----------|----------|------------|-----------|-----------|----------|----------|
| Inversor -<br>Tablero de<br>medida     | LONGITUD | USUARIOS | USUARIOS   | F.D     | DEMANDA | MOMENTO | CONDUCTOR | CTE REG  | REGULACIÓN |           | CORRIENTE | PERDIDAS | PERDIDAS |
|  | m        | PROPIOS  | DE CALCULO | kVA/USU | kVA     | kVA m   | THW COBRE | %/kVA-m  | PROPIA     | ACUMULADA | Amp       | KVA      | kW-h     |
|  | 8        | 1        | 1          | 50,59   | 50,59   | 404,716 | 3X4+4     | 2,01E-03 | 0,81510    | 0,81510   | 140,42234 | 0,36733  | 2,93865  |

## P. CÁLCULOS DE REGULACIÓN

La caída de tensión es la disminución de la tensión que se produce en el cableado. Es importante que esta disminución sea mínima y no superen las siguientes recomendaciones: Contrario a la creencia común, la NEC/NFPA70 y NTC2050 por lo general no requieren u obligan que los conductores tengan un porcentaje determinado de caída de tensión. El NEC (National Electrical Code) recomienda que la caída de voltaje máxima combinada para el alimentador más el circuito ramal no debe superar el 5% y el máximo en el circuito alimentador o ramal no debe superar el 3%. Simplemente se sugiere en las notas: 210.19, 215.2, 230.31 y 310.15, que es bueno ajustar la caída de tensión al dimensionar los conductores. Teniendo en cuenta lo referido en la norma y como no existe un requerimiento obligatorio, se asume lo siguiente:

Caída máxima recomendada entre generador fotovoltaico e inversor = 2 %.

Caída máxima recomendada entre el inversor y las cargas= 3%

Para el cálculo y la selección de los conductores de acometida, alimentadores y circuitos ramales, se tuvieron en cuenta las secciones 230, 215 y 220 respectivamente.

Es importante resaltar que la capacidad de corriente del conductor de cobre No. 4 AWG es de 60 A.

| CÁLCULO DE REGULACIÓN POR BAJA TENSIÓN |          |          |            |         |         |         |           |          |            |           |           |          |          |
|--|----------|----------|------------|---------|---------|---------|-----------|----------|------------|-----------|-----------|----------|----------|
| Inversor -<br>Tablero de<br>medida     | LONGITUD | USUARIOS | USUARIOS   | F.D     | DEMANDA | MOMENTO | CONDUCTOR | CTE REG  | REGULACIÓN |           | CORRIENTE | PERDIDAS | PERDIDAS |
|  | m        | PROPIOS  | DE CALCULO | kVA/USU | kVA     | kVA m   | THW COBRE | %/kVA-m  | PROPIA     | ACUMULADA | Amp       | KVA      | kW-h     |
|  | 8        | 1        | 1          | 50,59   | 50,59   | 404,716 | 3X4+4     | 2,01E-03 | 0,81510    | 0,81510   | 140,42234 | 0,36733  | 2,93865  |

Por lo anterior selecciona: cable No. 4 THWN para la conexión desde el inversor hasta tablero principal.

### ***Q. DISTANCIAS DE SEGURIDAD***

Se deben cumplir las distancias mínimas de seguridad en zonas de construcción permitidas y establecidas en el artículo 13 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE.

### ***R. ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN COMPLEMENTARIAS***

La construcción deberá seguir todas las recomendaciones de la NTC 2050, normas del operador de red y RETIE para instalaciones de uso final y/o viviendas unifamiliares, más específicamente, los artículos del 6 al 20.29 del Reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE.