Memoria técnica descriptiva de sistema fotovoltaico De bombeo “Restauramex”, Santa Lucía del Camino, Oaxaca.

Mártires de Tacubaya 107, Agencia Municipal Sta María Ixcotel,
Santa Lucia del Camino, Oaxaca.
10.08.2023

OBJETIVO

Fundamentar normativa y técnicamente la selección y cálculo de componentes que conforman la instalación de un sistema fotovoltaico interconectado a la red con capacidad de generación de 9 kW, salvaguardando en todo momento la seguridad del inmueble, de los equipos y componentes y sobre todo de las personas que se encuentran operando en el inmueble.

Los cálculos ejecutados en esta memoria técnica tienen como característica principal el hecho de que están basados en la NOM-001-SEDE-2012 y su numeral **4.4.1.8.**

GENERALIDADES

Las especificaciones aquí descritas forman parte del diseño del proyecto general que, en conjunto con los planos eléctricos, diagramas unifilares, fichas técnicas y certificados de equipos, abarcan todas las características técnicas eléctricas involucradas con la ejecución del proyecto.

INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

La siguiente central de generación fotovoltaica interconectada a la red fue diseñada y calculada para el usuario con dirección en Mártires de Tacubaya 107, Agencia Municipal Sta María Ixcotel, Santa Lucia del Camino, Oaxaca y tiene las siguientes características:

- **Capacidad de generación:**9 kW (6 microinversores de 1.5 kW).
- **Potencia instalada:** 9.9 kWp (22 módulos fotovoltaicos).
- **Modelo y marca del inversor:** MI-1500, Hoymiles.
- **Modelo y marca de los módulos fotovoltaicos:**SE-166*83-450M-144, SOLAREVER.
- **Ubicación:** Mártires de Tacubaya 107, Agencia Municipal Sta María Ixcotel, Santa Lucia del Camino, Oaxaca.

DIMENSIONAMIENTO

1. CÁLCULO DE LOS VOLTAJES MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Características Eléctricas	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Tipo de módulo	SE-166*83-440M-144		SE-166*83-445M-144		SE-166*83-450M-144	
Voltaje de circuito abierto(V)	49.62	47.57	49.86	47.77	50.1	47.93
Corriente de corto circuito(A)	11.35	9.05	11.41	9.10	11.48	9.16
Voltaje de circuito optimo(V)	40.99	38.82	41.19	39.01	41.39	39.19
Corriente de circuito optimo(A)	10.74	8.52	10.81	8.57	10.88	8.63
Poder máximo de operación	440W	331W	445W	334W	450W	338W

Imagen 1 – Datos técnicos del módulo a utilizar

Coeficientes de Temperatura	
Temperatura nominal de operación en la celda	45 C ±2 C
Temperatura de potencia máxima	-(0.35±0.05)%/ C
Temperatura de Voltaje en Circuito abierto	-(0.27±0.02)%/ C
Temperatura de Corriente de corto circuito	+(0.05±0.005)%/ C
Máxima corriente de fusibles	20A

Imagen 2 – Coeficientes de temperatura del módulo a utilizar

Temperatura mínima del lugar: 0°C **Temperatura máxima del lugar:** 39°C

NOTA: Los datos de la temperatura mínima y máxima son obtenidos de la base de datos oficial de la **CONAGUA.**

00020329
FORTIN, OAXACA DE JUAREZ

TEMPERATURA M€XIMA

Mes	Inicio	Fin	A€os	Valor M€ximo	Fecha M€xima	Se ha Repetido	Valor M€nimo	Fecha M€nima	Se ha Repetido	Valor Medio	Desv. Est€ndar
Ene	1980	2017	22	34.0	1995-01-19	S€	19.0	1980-01-26	S€	26.9	2.7
Feb	1980	2017	20	38.0	1983-02-16	No	14.0	1983-02-12	No	28.6	3.1
Mar	1980	2017	22	39.0	1995-03-23	No	19.0	1998-03-11	No	30.7	2.8
Abr	1980	2017	20	39.0	1986-04-10	S€	23.0	1980-04-20	S€	31.4	3.2
May	1980	2017	20	39.0	1981-05-13	S€	20.0	1981-05-02	S€	31.4	3.1
Jun	1980	2017	22	38.0	1998-06-01	S€	18.0	1999-06-29	No	29.3	3.4
Jul	1980	2017	22	39.0	1980-07-24	No	19.0	1982-07-17	S€	28.7	2.8
Ago	1979	2017	22	39.0	1979-08-12	S€	20.0	1981-08-01	S€	28.6	3.1
Sep	1979	2017	24	38.0	1979-09-01	No	17.0	1983-09-24	No	27.7	2.8
Oct	1979	2017	24	35.0	1981-10-05	S€	18.0	1980-10-29	S€	27.8	2.7
Nov	1979	2017	22	34.0	1994-11-27	S€	17.0	1999-11-24	S€	27.4	2.6
Dic	1979	2017	23	33.0	1994-12-04	No	17.0	1999-12-08	S€	26.4	2.7

TEMPERATURA M€NIMA

Mes	Inicio	Fin	A€os	Valor M€ximo	Fecha M€xima	Se ha Repetido	Valor M€nimo	Fecha M€nima	Se ha Repetido	Valor Medio	Desv. Est€ndar
Ene	1980	2017	22	17.0	2001-01-18	S€	0.0	1996-01-14	S€	9.5	3.0
Feb	1980	2017	20	26.0	2000-02-01	No	3.0	1996-02-05	S€	12.1	4.0
Mar	1980	2017	22	19.0	1997-03-25	S€	3.0	1986-03-22	No	12.9	2.7
Abr	1980	2017	20	19.0	1981-04-25	S€	9.0	1996-04-18	No	14.6	1.7
May	1980	2017	20	22.0	1983-05-26	No	9.0	1985-05-03	No	15.2	1.8
Jun	1980	2017	22	22.0	1983-06-17	S€	9.0	1998-06-12	No	15.4	1.9
Jul	1980	2017	22	24.0	1983-07-30	No	7.0	1986-07-08	No	14.9	2.0
Ago	1979	2017	22	24.0	1983-08-07	No	10.0	1979-08-04	S€	15.0	1.8
Sep	1979	2017	24	24.0	1994-09-09	No	10.0	1984-09-27	S€	15.0	1.7
Oct	1979	2017	24	25.0	1983-10-01	No	7.0	1982-10-27	No	14.3	2.4
Nov	1979	2017	22	17.0	1980-11-02	S€	5.0	1982-11-07	S€	11.9	2.6
Dic	1979	2017	23	24.0	1983-12-03	S€	2.0	1997-12-15	S€	10.6	3.4

Imagen 3. Temperaturas máximas y mínimas de la base de datos de CONAGUA.

DATOS:
Voc = 50.1 V **Vmp** = 41.39 V
Coeficientes de temperatura Voc: -0.27%/°C
Coeficiente de temperatura Vmp: -0.35%/°C

Cálculo de la tensión máxima 690-7 a) 1)

$$V_{oc\,max} = V_{OC} + [(T_{min} - 25°C)x(C_T\ x\ V_{OC})]$$
$$V_{OC\,max} = 50.1\ V + \left[(\ 0°C - 25\ °C)\ x\ (\ -0.27\ \frac{\%}{°C} x\ 50.1\ V)\right]$$
$$V_{OC\,max} = 53.48\ V$$

Cálculo de la tensión mínima

$$V_{MP\,min} = V_{MP} + [(T_{max} + A_{temp} - 25°C)x\ C_T\ x\ V_{MP}]$$
$$V_{MP\,min} = 41.39\ V + [(\ 39°C + 30\ °C - 25°C)x\ (-0.35\frac{\%}{°C}\ x\ 41.39\ V)]$$
$$V_{MP\,mín} = 35.02\ V$$

2. CÁLCULO DE LA CORRIENTE MÁXIMA DEL CIRCUITO DE FUENTE FOTOVOLTAICA

Con base en **690-8 a) 1)**, la corriente máxima de un circuito de fuente fotovoltaica, es determinada de la siguiente manera:

$$I_{max} = 1.25\ x\ I_{SC}$$

Sustituyendo la corriente de cortocircuito con la indicada en placa de datos:

$$I_{max} = 1.25\ x\ 11.48\ \ A$$

$$I_{max} = 14.35\ A$$

3. SELECCIÓN DE LA BOMBA

Como recomendación general, se sugiere tener una potencia de CD entre 110% y 130% respecto a la potencia de los microinversores en CA.

Con base en la anterior sentencia, se determina la potencia de los microinversores de interconexión:

$$Potencia\ de\ los\ inversores = \frac{Potencia\ fotovoltaica}{Relación\ CD/CA} = \frac{22\ módulos\ x\ 450\ Wp}{1.1} = 9\ kW$$

Tomando en cuenta esta relación CD/CA que optimiza la operación del inversor, se opta por el uso de 6 microinversores de la marca Hoymiles modelo MI-1500.

Adicionalmente, se revisó la potencia FV máxima que se puede conectar a la entrada de este microinversor.

Model	HME-1000-AU	HME-1200-AU	HME-1350-AU	HME-1500-AU
Commonly used module power (W)	Up to 310 (single panel)	Up to 380 (singe panel)	Up to 420 (singe panel)	Up to 470 (singe panel)
Peak power MPPT voltage range (V)	27~48	29~48	32~48	36~48
Start-up voltage (V)	22	22	22	22
Operating voltage range (V)	16~60	16~60	16~60	16~60
Maximum input voltage (V)	60	60	60	60
Maximum input current (A)	4*10.5	4*11.5	4*11.5	4*11.5
Maximum input short circuit current (A)	4*15	4*15	4*15	4*15

Imagen 4 – Datos de entrada del inversor de interconexión

Los cálculos realizados de los 6 equipos corresponden a la misma marca y modelo (Hoymiles, MI-1500) por los que los resultados serán iguales es todos los casos.

Como se puede observar, la potencia FV máxima que el microinversor Hoymiles MI-1500 de 1.5 kW puede soportar es de 1.88 kWp, por lo que la potencia de los módulos fotovoltaicos (1.8 kWp) se distribuirá en el equipo.

Con la finalidad de mantener el inversor operando de manera eficiente se buscará mantener una relación CD/CA superior al 100%.

$$Relación = 1.2$$

$$PFV\ por\ Inversor = 1.5\ kW\ \times\ 1.2 = 1.8\ kWp$$

$$Módulos\ por\ inversor = \frac{1.8\ kWp}{0.45\ kWp} = 4\ módulos$$

Por cuestiones de diseño, la distribución de los módulos fotovoltaicos con los microinversores se muestra en la siguiente tabla:

Microinversor	Número de módulos	Potencia (kWp)
1	4	1.8
2	4	1.8
3	4	1.8
4	4	1.8
5	4	1.8
6	2	0.9

4. DISTRIBUCIÓN Y FORMACIÓN DE CIRCUITOS DE FUENTE FOTOVOLTAICA

Los cálculos realizados de los 6 equipos corresponden a la misma marca y modelo (Hoymiles, MI-1500) por los que los resultados serán iguales es todos los casos.

Este modelo de microinversores cuenta con 4 seguidores del punto de máxima potencia (MPPT) cada uno de estos con 1 entrada, por lo que puede recibir una totalidad de 4 cadenas de módulos.

Para los microinversores del 1 al 5 con 4 módulos :

$$\#\ Módulos\ por\ MPPT = \frac{4\ módulos}{4\ MPPT} = 1\ módulo$$

Para los microinversor 6 con 2 módulos :

$$\#\ Módulos\ por\ MPPT = \frac{2\ módulos}{2\ MPPT} = 1\ módulo$$

Con este cálculo se define que los microinversores del 1 al 5 tendrán en el MPPT 1, 2, 3 y 4 conectados 1 módulo, es decir en total 4 módulos los microinversores. Mientras que el microinversor 6 tendrá en la entrada 1 y 2 un total de 1 módulo, es decir en el equipo tendrá conectados únicamente 2 módulos.

	MPPT 1	**MPPT 2**	**MPPT 3**	**MPPT 4**
Microinversor 1	1	1	1	1
Microinversor 2	1	1	1	1
Microinversor 3	1	1	1	1
Microinversor 4	1	1	1	1
Microinversor 5	1	1	1	1
Microinversor 6	1	1		

NOTA: Cada MPPT en el microinversor soporta una corriente de corto circuito de 15 A, por lo que al conectarle una corriente máxima de 14.35 A, se encuentra dentro del rango aceptable.

9.1 DC Input

Model	HME-1000-AU	HME-1200-AU	HME-1350-AU	HME-1500-AU
Commonly used module power (W)	Up to 310 (single panel)	Up to 380 (singe panel)	Up to 420 (singe panel)	Up to 470 (singe panel)
Peak power MPPT voltage range (V)	27~48	29~48	32~48	36~48
Start-up voltage (V)	22	22	22	22
Operating voltage range (V)	16~60	16~60	16~60	16~60
Maximum input voltage (V)	60	60	60	60
Maximum input current (A)	4*10.5	4*11.5	4*11.5	4*11.5
Maximum input short circuit current (A)	4*15	4*15	4*15	4*15

Imagen 5 – Características de entrada del inversor

Conociendo el Voc máximo a la mínima temperatura esperada y el Vmp mínimo con la mayor temperatura esperada, se puede calcular el voltaje máximo y mínimo de módulos por microinversor. El microinversor tiene como característica eléctrica la capacidad de aceptar hasta 60 V_{CD}. El número máximo de módulos en cada cadena será:

$$\#\ módulos = \frac{V\ máximo\ de\ entrada\ del\ microinversor}{Voc\ máximo\ del\ módulo}$$

$$\#\ módulos = \frac{60\ V}{53.48\ V}$$

$$\#\ módulos = 1.12\ módulos = 1\ módulo$$

Número mínimo de módulos conectados en serie:

$$\#\ módulos = \frac{V\ de\ arranque\ por\ MPPT\ del\ microinversor}{V_{MP\ mínimo\ del\ módulo}}$$

$$\#\ módulos = \frac{22\ V}{35.02\ V}$$

$$\#\ módulos = 0.62 = 1\ módulo$$

Esto quiere decir que cada MPPT acepta perfectamente el voltaje del módulo que se le conectará tanto en sus rangos mínimos y máximos.

A continuación, un resumen de los circuitos fotovoltaicos:

Inversor	MPPT/Entrada	Número de módulos	Voc máximo	I máx (690-8)	Potencia FV
1	MPPT 1	1	53.48 V	14.35 A	450 Wp
	MPPT 2	1	53.48 V	14.35 A	450 Wp
	MPPT 3	1	53.48 V	14.35 A	450 Wp
	MPPT 4	1	53.48 V	14.35 A	450 Wp

5. CÁLCULO DE CONDUCTORES EN CD

Los cálculos realizados de los 6 equipos corresponden a la misma marca y modelo (Hoymiles, MI-1500) por los que los resultados serán iguales es todos los casos.

Al conectar 1 módulo por MPPT el cálculo de conductores aplicará para todos los casos:

Inversor	Microinversor MPPT	Separación de la canalización con respecto al techo	Temperatura máxima	Factores de corrección 310-15 b) 2) a) Conductor FV 90°C	Factores de ajuste 310-15 b) 2) a)	Factor de distancia 310-15 b) 3) c)
1	MPPT 1	10 cm	39 °C	0.71 (56 ˚C)[1]	1	17 °C
	MPPT 2					
	MPPT 3					
	MPPT 4					

[1]La temperatura utilizada para seleccionar el factor de corrección por temperatura es la resultante de la temperatura ambiente máxima más los grados adicionales indicados en la tabla **310-15 b) 3) c)** para canalizaciones circulares expuestas a la luz solar en o por encima de azoteas.

El cálculo de conductores se hace tomando en cuenta dos métodos, el primero contempla solo la corriente máxima (Imax) multiplicada por un factor de 1.25 de acuerdo con **690-8 b) 1)** y el segundo toma en cuenta los factores de corrección y ajuste en conformidad con **690-8 b) 2).** La selección del conductor se basará en la mayor ampacidad calculada de los dos métodos anteriores.

DATOS:
Factor de corrección: 0.71 **310-15 b) 2) a)**
Factor de ajuste: 1 **310-15 b) 3) a)**
Corriente máxima (Imax): 14.35 A
Tipo de conductor: Cable fotovoltaico a 90°C.

a) 125% de la corriente máxima.

$$Ampacidad = 1.25\ x\ I_{max}$$
$$Ampacidad = 1.25\ x\ 14.35A$$
$$Ampacidad = 17.93\ \ A$$

b) Después de aplicar factores de corrección y ajuste.

$$Ampacidad = \frac{I_{max}}{F_{ajuste}\ x\ F_{corrección}}$$
$$Ampacidad = \frac{14.35\ A}{0.1\ x\ 0.71}$$
$$Ampacidad = 20.21\ A$$

La ampacidad mayor resultante es de 20.21 A y debido a que los conectores MC4 de los módulos e microinversor operan a una temperatura nominal de 75°C **110-14 c)**, se toma en cuenta esta columna de la tabla **310-15 b) 16)** para seleccionar el conductor, dando como resultado un conductor calibre 3.31 mm^2 (12 AWG) con una ampacidad de 25 A a 75°C.

Conductor de puesta a tierra de equipos

La selección del calibre del conductor de puesta a tierra de equipos se hace con base en la sección **690-45 y 250-122 a)** considerando el dispositivo de protección contra sobrecorriente del circuito, o alguno simulado:

$$DPSC \geq 1.25\ x\ I_{max}$$
$$DPSC \geq 1.25\ x\ 14.35\ A$$
$$DPSC \geq 17.93\ A$$

Por lo tanto, la protección sería de 25 A, por lo que se selecciona un cable de cobre THHW de calibre 3.31 mm^2 (12 AWG).

6. CÁLCULO DE CONDUCTORES DE CA

Los cálculos realizados de los 6 equipos corresponden a la misma marca y modelo (Hoymiles, MI-1500) por los que los resultados serán iguales es todos los casos.

Según **690-8 a) 3)**, la corriente máxima de circuito del microinversor es igual a la corriente permanente de salida del microinversor.

9.2 AC Output

Model	HME-1000-AU	HME-1200-AU	HME-1350-AU	HME-1500-AU
Rated output power (VA)	1000	1200	1350	1500
Rated output current (A)	4.55@220V 4.35@230V 4.17@240V	5.45@220V 5.22@230V 5.00@240V	5.87@230V 5.63@240V	6.82@220V 6.52@230V 6.25@240V
Nominal output voltage/range (V)	220/180-275 230/180-275 240/180-275	220/180-275 230/180-275 240/180-275	230/180-275 240/180-275	220/180-275 230/180-275 240/180-275
Nominal frequency/range (Hz)	45-55 (under 50Hz @ 220V & 230V) 55-65 (under 60Hz @ 220V & 230V)			
Power factor	>0.99 default 0.8 leading……0.8 lagging			
Output current harmonic distortion	<3%			
Maximum units per branch	5@220V 5@230V 5@240V	4@220V 4@230V 4@240V	3@220V 3@230V 3@240V	3@220V 3@230V 3@240V

Imagen 5 – Datos de salida del inversor de interconexión

La corriente de salida del microinversor a la tensión de la red (220V) es de 6.82 A, debido a que se harán arreglos en paralelo entre los microinversores y el máximo arreglo que se hará será de 2 microinversores la corriente real corresponde a 13.56 A este valor es considerado como la corriente máxima de salida.

$$I_{máx} = 13.64\ A$$

El procedimiento para la selección de los conductores de salida del microinversor es exactamente igual al procedimiento establecido para conductores en CD, el cual se basa en las secciones **690-8 b) 1) y 2).**

La temperatura de las terminales del inversor y de los interruptores termomagnéticos que se usarán es de 75°C y cada circuito de salida. Con esta información ya se tienen los datos suficientes para el cálculo de los conductores del circuito de salida del microinversor.

Para la selección, consideraremos conductores con aislamiento THHW a 90°C.

a) 125% de la corriente máxima

$$Ampacidad = 1.25\ x\ I_{inversores}$$

$$Ampacidad = 1.25\ x\ 13.64\ A = 17.05\ A$$

b) Después de aplicar factores de corrección y ajuste

DATOS:
Factor de ajuste: 310-15 b) 3) a). El conductor neutro no se toma en cuenta como un conductor portador de corriente por 310-15 b) 5) 1).
Factor de corrección: 0.91 **310-15 b) 2) a)**, referido a la columna de 90 °C.

$$Ampacidad = \frac{I_{del\ inversor}}{F_{ajuste}\ x\ F_{temperatura}}$$

$$Ampacidad = \frac{17.05\ A}{1\ x\ 0.91} = 18.73\ A$$

En este caso, la corriente mayor es la de 18.73 A. Como la temperatura de las terminales es de 75°C, se procede a seleccionar el conductor de esta columna. De acuerdo con la tabla **310-15 b) 16)** se selecciona un conductor calibre 3.31 mm^2 (12 AWG) con una ampacidad de 25 A a 75°C.

7. CÁLCULO DE LA PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE EN C.A. PARA CADA INVERSOR

Los cálculos realizados de los 6 equipos corresponden a la misma marca y modelo (Hoymiles, MI-1500) por los que los resultados serán iguales es todos los casos.

Dado que la corriente de salida de cada microinversor es de 13.56 A el dispositivo de protección contra sobrecorriente se calcula conforme **690-9 b)**

$$DPSC\ \geq 1.25\ x\ I_{máx}$$

$$DPSC\ \geq 1.25\ x\ 13.56\ A$$

$$DPSC\ \geq\ 16.95\ A$$

De acuerdo con **240-6 a)** se selecciona un interruptor termomagnético de 20 A.

Conductor de puesta a tierra de equipos

La selección del conductor de puesta a tierra de equipos del circuito se realiza con base a la **Tabla 250-122** dando como resultado un calibre 3.31 mm^2 (12 AWG). El aislamiento del conductor de puesta a tierra de equipos es THHW, color verde.

Cálculo de la canalización

El circuito de salida del microinversor se canalizará por una sola tubería del tipo RMC o conduit pared gruesa **344-10** con un factor de relleno determinado mediante la **Tabla 1 del capítulo 10**, el cual será del 40%.

Área de los conductores de fase calibre 3.31 mm^2 (12 AWG): 23.16 mm^2
Área del conductor de puesta a tierra de los equipos calibre 3.31 mm^2 (12 AWG): 11.58 mm^2

Área total de los 3 conductores basados en la Tabla 5: 34.74 mm^2

De acuerdo con la **Tabla 4, en la sección del Artículo 344** la canalización ideal es de 16 mm (1/2"). Dicho diámetro es seleccionado, debido a que al ser poca la distancia de cableado no es necesario aumentar el tamaño de la canalización por temas de instalación del cable.

Ambos circuitos de salida de los microinversores se unirán en un tablero de concentración por lo que la capacidad en barras de dicho centro de carga debe ser mayor a:

$$Capacidad\ en\ barras\ \geq 20\ A\ \times\ 3 \geq 60\ A$$

El alimentador de dicho centro de carga se determina aplicando **690-8 b) 1)** y **690-8 b) 2).**

a) Potencia total entre voltaje de trabajo por 1.25 entre √3

$$Ampacidad = \frac{2000W\ x\ 6\ inversores}{220\ V} = 54.54\ A$$

$$Ampacidad = \frac{54.54\ A\ x\ 1.25}{\sqrt{3}} = 39.36\ A$$

En este caso, la corriente es de 39.36 A. Se selecciona el conductor con base en la tabla **310-15 b) 16)**. Siendo calibre 8.37 mm^2 (8 AWG) con una ampacidad de 50 A a 75°C.

8. CÁLCULO DE LA PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE DE CA DESCONECTADOR PRINCIPAL DEL SFV

Los cálculos realizados de los 6 equipos corresponden a la misma marca y modelo (Hoymiles, MI-1500) por los que los resultados serán iguales es todos los casos.

Para el cálculo de la protección de la salida de los microinversores, se aplica las mismas condiciones establecidas en la sección **690-9 b)**.

$$DPSC\ \geq 1.25\ x\ 54.54\ A/\sqrt{3}$$

$$DPSC = \frac{54.54\ A\ x\ 1.25}{\sqrt{3}} = 39.36\ A$$

$$DPSC\ \geq\ 40\ A$$

Por lo tanto, se decide colocar un interruptor automático trifásico con una capacidad nominal de 40 A. Al contar con un conductor con una ampacidad igualmente de 65 A este se considera protegido con este valor de interruptor.

Conductor neutro

Para la selección del conductor neutro o puesto a tierra se tomará en cuenta la **Excepción 2 de la sección 215-2** que nos permite dimensionarlo al 100%. Al ser la corriente circulante de 40.92 A se selecciona un conductor 8 AWG a 75°C con una ampacidad de 50 A.

Cálculo del conductor de puesta a tierra de equipos.

El cálculo del conductor de puesta a tierra de equipos del circuito se realiza con base a la **Tabla 250-122** dando como resultado un calibre 10 AWG.

Cálculo de canalización.

Área de los conductores de fase calibre 13.3 mm^2 (8 AWG): 84.57 mm^2
Área del conductor neutro calibre 8.37 mm^2 (8 AWG): 28.19 mm^2
Área del conductor de puesta a tierra de los equipos calibre 5.26 mm^2 (10 AWG): 15.69 mm^2
Área total de los conductores: 128.45 mm^2

Con un factor de relleno de 40% el diámetro ideal de la canalización basado en la **Tabla 4, sección del Artículo 344** para la tubería RMC es de 21 mm ($^{3/4}$").

9. CÁLCULO DE CAÍDA DE TENSIÓN

9.1 Caída de tensión en CD

Los cálculos realizados de los 6 equipos corresponden a la misma marca y modelo (Hoymiles, MI-1500) por los que los resultados serán iguales es todos los casos.

Para el cálculo de la caída de tensión de CD, se utilizará la fórmula siguiente:

$$e = 2\ x\ R\ x\ L\ x\ I$$

Como se puede observar, es necesario conocer la distancia en kilómetros de cada uno de los circuitos de fuente fotovoltaica, así como la resistencia del conductor seleccionado previamente. La resistencia en CD del conductor calibre 3.31 mm^2 (12 AWG) es de 6.73 Ω/km, con base en la **Tabla 8**. Por lo tanto, para este caso en particular, la fórmula se podría reescribir de la siguiente manera:

$$e = 2\ x\ 6.73\ \frac{\Omega}{km}\ x\ 10.88\ x\ L = 146.44\ x\ L$$

NOTA: Para el caso de la caída de tensión, se utiliza la corriente en el punto de máxima potencia del módulo, pues es la que va a estar circulando la mayor parte del tiempo cuando existan buenas condiciones de irradiancia.

Al ser todos los circuitos fotovoltaicos similares en cuanto a corriente y calibre del conductor se realizará el cálculo de caída de tensión solo para el circuito de mayor longitud de cada uno de los inversores, dando por entendido que la caída de tensión en circuitos de menor longitud será menor.

Circuito/ Inversor	Corriente	Longitud	Volts de caída de tensión	Porcentaje de caída (e%)
Microinversor 1 módulo	10.88 A	2 m	0.29 V	0.70%

Al no contar con porcentajes de caída de tensión superiores al 3% en los circuitos más largos de cada uno de los inversores podemos determinar que los circuitos trabajarán eficientemente.

Es importante destacar que las distancias indicadas son solamente la mitad de las distancias reales de cableado del circuito, razón por la cual al inicio la ecuación se multiplica por dos.

El cálculo de caída de tensión en conductores de CA se basa en el mismo principio, solo que ahora la impedancia del conductor se obtiene de la **Tabla 9**.

9.2 Caída de tensión en CA

La fórmula a aplicar para la caída de tensión de CA es la siguiente:

$$e = 2\ x\ Z\ x\ L\ x\ I$$

Al ser los conductores de calibre 3.31 mm^2 (12 AWG), y al trabajar los microinversores a factor de potencia unitario, se obtiene que la impedancia de dichos conductores, según la **Tabla 9** es de 6.6 Ω/km. Además, la corriente permanente de salida del inversor 1 posee un valor de 27.7 A. Por lo tanto, la ecuación anterior se reduce a:

$$e = 2\ x\ 6.6\ \frac{\Omega}{km} x\ 13.56\ A\ x\ L = 178.99\ x\ L$$

Circuito/ Inversor	Corriente	Longitud	Volts de caída de tensión	Porcentaje de caída (e%)
Inversor 1	13.56 A	35 m	6.26 V	2.84 %

Al igual que en los circuitos de corriente directa los circuitos de salida de cada uno de los microinversores presentan una caída de tensión menor a 3% asegurando que estos trabajarán adecuadamente.

9.3 Caída de tensión alimentador principal.

En los conductores calibre 8.37 mm^2 (8 AWG) se obtiene de la **Tabla 9** una impedancia de 2.56 Ω/km.

$$e = \sqrt{3}\ x\ 2.56\ \frac{\Omega}{km} x\ 40.68\ A\ x\ L = 180.16\ x\ L$$

Circuito calibre	Corriente	Longitud	Volts de caída de tensión	Porcentaje de caída
Alimentador	40.68 A	30 m	5.40 V	2.45 %

En este caso la caída de tensión no superó el 3% recomendado, por lo que el circuito operará de manera eficiente.