

**VIABILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE  
PANELES SOLARES COMO FUENTE DE ENERGÍA SUSTITUTA PARA LA  
OPERACIÓN DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE POLIETILENO**

Andrés Camilo Santos Morales

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Industrial

Ibagué – Tolima

2020

**VIABILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE  
PANELES SOLARES COMO FUENTE DE ENERGÍA SUSTITUTA PARA LA  
OPERACIÓN DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE POLIETILENO**

Andrés Camilo Santos Morales

Tutor: Ing. Mecánico Jorge Enrique Núñez Díaz

Facultad de ingeniería

Programa de Ingeniería Industrial

Ibagué – Tolima

2020

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que nada, agradezco a Dios por acompañarme siempre, por darme la sabiduría y fortaleza necesaria para poder superar cada una de las pruebas que se me presentaron en toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida, por la familia que tengo la cual siempre me ha brindado su apoyo incondicional.

Agradezco a mi padre Wenseslao Santos y mi madre Maria del Pilar Morales por darme la vida y el privilegio de ser su hijo, cuidar de mí y motivarme a continuar incluso cuando quería rendirme, por ayudarme a entender que entre más grande sea el obstáculo más grande y gratificante es el logro, a mi esposa Laura Campos por sus consejos y confidencialidad sin condiciones.

A todos los profesores que me brindaron todo su valioso conocimiento y asesoría para ayudarme a crecer como profesional y persona durante mi estancia en la universidad, a todos los amigos que conocí, a quienes llevare siempre en mis recuerdos porque aprendí y forje mi personalidad al lado de ellos, aprendiendo y aportando todo lo bueno de mí.

Al ingeniero Jorge Enrique Núñez Díaz por asesorarme en mi trabajo de grado, porque en un corto tiempo aprendí mucho de la vida profesional y la aplicación de la ingeniería en la industria, por permitirme ingresar a las instalaciones de su empresa y emprender en el objetivo de este Trabajo de grado.

**¡A todos... MUCHAS GRACIAS!**

## Contenido

Lista de figuras .....	6
Lista de tablas .....	7
Glosario .....	8
Resumen .....	10
1. INTRODUCCIÓN .....	11
2. OBJETIVOS .....	13
2.1 Objetivo general .....	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3. JUSTIFICACIÓN .....	14
4.MARCO TEÓRICO .....	15
4.1 Marco legal.....	15
4.2 Componentes que sustituyen un sistema fotovoltaico.....	16
4.3 El efecto fotoeléctrico .....	18
4.4 conversión de una onda cuadrada en una senoidal.....	18
4.5 Clasificación de los paneles solares .....	19
4.6 Eficiencia de los paneles solares .....	20
4.7 Proceso de extrusión.....	22
4.8 Variables independientes asociadas al proceso de extrusión .....	23
4.9 Aspectos de viabilidad de un proyecto.....	24
5. MÉTODOS .....	25
5.1 Lugar de obtención de los datos .....	25
5.2 Metodología para la obtención de los datos de los requerimientos energéticos .....	25
5.3 Materiales para la obtención de datos .....	26
5.4 metodología para el análisis de los datos de los requerimientos energéticos.....	27
5.5 metodología para la determinación de los requerimientos energéticos.....	28
5.6 metodología para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico .....	29
5.7 Actividades para alcanzar los objetivos específicos .....	29
6. RESULTADOS.....	34
6.1 Recolección de los datos de campo.....	34

6.2 análisis del comportamiento de las variables .....	36
6.3 Determinación de los requerimientos energéticos de la máquina .....	43
6.4 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico .....	44
6.4.1 Cálculo del ángulo óptimo “ $\beta$ ” de inclinación de los paneles.....	49
6.4.2 Dimensionado del generador fotovoltaico.....	54
6.4.3 Dimensionado del sistema de acumulación (baterías).....	59
6.4.4 Dimensionado del regulador.....	60
6.4.5 Dimensionado del inversor .....	63
6.4.6 Dimensionado del cableado DC .....	64
6.4.7 Dimensionado del cableado AC .....	66
6.5 Determinación de los índices generales del proyecto .....	68
6.6 Estudio financiero .....	70
6.6.1 Ingresos.....	70
6.6.2 Inversión inicial en equipos, instalación y puesta en marcha .....	71
6.6.3 Costos operativos.....	72
7. DISCUSIÓN .....	76
8. CONCLUSIONES .....	81
9. RECOMENDACIONES .....	83
Referencias .....	85

## Lista de figuras

Figura 1 Tarifas de energía más altas del primer semestre del 2017 [4] .....	14
Figura 2 Componentes de un sistema solar fotovoltaico [11].....	17
Figura 3 Onda suavizada de salida de voltaje de un inversor [2] .....	19
Figura 4 Paneles solares de concentración óptica. [14] .....	20
Figura 5 Tipos de paneles y su eficiencia. [33] .....	21
Figura 6 Partes de la maquina extrusora. [15] .....	23
Figura 7 Interdependencia de las actividades .....	30
Figura 8 Voltaje en función del tiempo .....	37
Figura 9 Corriente en función del tiempo .....	37
Figura 10 Potencia en función del tiempo .....	38
Figura 11 Potencia en función del tiempo mensual .....	39
Figura 12 Dispersión de la producción en función del tiempo .....	40
Figura 13 Producción en función del tiempo mensual.....	40
Figura 14 Dispersión de Producción en función del tiempo mensual .....	41
Figura 15 Dispersión del Índice de consumo $I_c$ en función de la producción $P$ .....	42
Figura 16 Dispersión de Índice de consumo en función de la producción mensual.....	43
Figura 17 Radiación solar en función de la hora en el día. [23] .....	47
Figura 18 Esquema de los componentes de un sistema autónomo. [19] .....	48
Figura 19 Distancia entre filas de paneles [24].....	57
Figura 20 Conexión en paralelo de 6 paneles solares emitiendo corriente a solo 1 regulador .....	62
Figura 21 Esquema general de la instalación eléctrica DC: 6 paneles-1 Regulador-baterías .....	62
Figura 22 Distancia más larga para el cableado del circuito DC .....	64

## Lista de tablas

Tabla 1 Valores promedio de datos recolectados en campo para un estudio de la producción de 30 días .....	35
Tabla 2 Ficha técnica panel solar referencia CS6P-280P .....	46
Tabla 3 Radiación mensual promedio en Ibagué 2010 – 2015. [23] .....	48
Tabla 4 Aplicación de las ecuaciones 3 al 10 para el cálculo de la radiación directa sobre un panel solar a 0° sobre el suelo durante los 12 meses del año.....	51
Tabla 5 Cálculo del factor de corrección “ $R_b, \beta$ ” para $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ .....	52
Tabla 6 Cálculo de la radiación directa “ $I_d, \beta$ ” para $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ .....	52
Tabla 7 Cálculo de la radiación difusa “ $D_d, \beta$ ” para $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ .....	53
Tabla 8 Cálculo de la radiación global “ $G_d, \beta$ ” para $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ .....	53
Tabla 9 Cálculo de la razón: $E_{ac}/G_d, \beta$ para $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ en cada mes del año con $E_{ac} = 1740kWh/día$ .....	54
Tabla 10 Equipos necesarios para la instalación.....	71
Tabla 11 Nomina y mantenimiento preventivo para 2020.....	73
Tabla 12 Mantenimiento correctivo - reposición de baterías.....	73
Tabla 13 Presupuesto Revisión técnica externa.....	74
Tabla 14 Presupuesto por arriendo de terreno en zona rural de Ibagué.....	74
Tabla 15 Total costos operativos anuales .....	75
Tabla 16 características de los escenarios evaluados.....	75
Tabla 17 Índices financieros para 3 escenarios técnico-financieros .....	76

## Glosario

Símbolo	Significado
$E_o$	Es el factor adimensional que corrige la radiación percibida por causa de la excentricidad de la tierra durante el transcurso del año.
$d_n$	Número del día del año donde se desea evaluar la excentricidad. Para este proyecto se tomarán los días 15 de cada mes y, por tanto, la formula fue reemplazada en los días: 15, 45, 60, 75, 90, ..., 345.
$\Gamma$	Angulo en radianes de la posición de la tierra.
$\delta$	Declinación solar en radianes.
$\omega_s$	Angulo de salida del sol en ese día en radianes.
$\phi$	Posición geográfica vertical del lugar donde se instalará el panel solar. Angulo en radianes. Para este caso se utiliza el valor de 4.43° grados latitud Norte para Ibagué.
$G_{0d}$	Energía por radiación solar esperada para esa época sobre una superficie horizontal, este valor se obtiene en $\frac{kWh}{m^2}$
$I_{sc}$	Constante solar, es el valor de radiación externa a la tierra generada por el sol $\left(1.370 \frac{W}{m^2} = 1,37 \frac{kW}{m^2}\right)$ .
$K_a$	Factor adimensional de transparencia atmosférica. Hace referencia a la cantidad de energía que puede atravesar la atmósfera hasta el panel sobre tierra.
$G_d$	Energía media por metro cuadrado que se puede obtener por la radiación solar en $\frac{kWh}{m^2 \text{ día}}$ . Este valor se expone en la tabla 3 y son los resultados energéticos medidos en el lugar donde va a estar instalado el panel. Esto significa que las ecuaciones 3 al 14 deben aplicarse para cada valor de “ $G_d$ ” de la tabla 3.
$D_d$	Magnitud de la radiación difusa sobre el panel solar en $\frac{kWh}{m^2}$ .
$I_d$	Radiación real y directa sobre la superficie horizontal del panel a cero grados sobre el suelo (0°) en $kWh/m^2$ .
$\beta$	Angulo de inclinación del panel solar con respecto al suelo convertido de grados a radianes.

$R_{b,\beta}$	Factor de corrección para “ $I_d$ ” por causa de generar una inclinación a un ángulo “ $\beta$ ” al panel respecto al suelo, medido en radianes. Este valor se debe calcular para cada ángulo “ $\beta$ ” entre $10^\circ$ a $60^\circ$ convertido en radianes antes de reemplazar en la ecuación.
$I_{d,\beta}$	Radiación real sobre la superficie del panel que se ha inclinado a “ $\beta$ ” grados sobre el suelo (convertido a radianes antes de reemplazar en la formula), en $kWh/m^2$
$D_{d,\beta}$	Magnitud de la radiación difusa sobre el panel solar que se ha inclinado a “ $\beta$ ” grados sobre el suelo, en $\frac{kWh}{m^2}$ .
$G_{d,\beta}$	Energía que se puede obtener por la radiación solar por metro cuadrado sobre el panel que se ha inclinado a “ $\beta$ ” grados sobre el suelo, en $kWh/m^2$ . También es conocida como la radiación global.

## Resumen

En el presente documento se estudiará los requerimientos energéticos de una maquina extrusora de polietileno de baja densidad, esto con el objetivo de determinar el número de paneles solares y accesorios necesarios para un sistema de alimentación eléctrica producida con la captación de energía solar. La investigación se llevará a cabo con base a todos reales obtenidos a partir de la medición de variables eléctricas como el voltaje y la corriente consumidas por la maquina durante su funcionamiento

Se determinará la inversión en pesos que se deberá realizar y a partir de ella obtener tres índices financieros del proyecto, con estos se podrá indicar la viabilidad del proyecto desde la percepción del ahorro energético que se generaría usando paneles solares, y saber si es suficiente para recuperar la inversión que se destinaria al momento de llevar el proyecto a la práctica, cambiando la fuente de alimentación eléctrica convencional a una fuente de alimentación renovable.

Todo lo anterior permitirá dirigirnos hacia un estudio de viabilidad técnica y financiera teniendo en cuenta parámetros de decisión como: valor actual neto: (VPN), el periodo de recuperación de la inversión (PRI) y la tasa interna de retorno (TIR).

Palabras claves: Extrusora, TIR, VPN, PRI, CREG, polietileno de baja densidad, corriente continua, corriente alterna, inversor, acumulador, voltaje, potencia. Pellet, material peletizado, efecto fotoeléctrico.

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria del plástico es un sector de gran potencial de desarrollo a nivel nacional e internacional, por lo tanto, es importante tener en cuenta el impacto en el consumo energético requerido para procesar dichos materiales. En su mayoría, los equipos de procesamiento requieren energía eléctrica para transformar los plásticos, por otro lado, estos representan más de la mitad del consumo de energía global para generar un producto que este fabricado en ese material.

En la actualidad, las empresas de transformación de estos materiales se encuentran bajo fuerte presión por el incremento de los precios de la energía y de las materias primas originales derivadas del petróleo, a consecuencia, las empresas que procesan los residuos plásticos de reciclaje también se ven afectadas. El consumo energético es determinante en los costes de producción y, por lo tanto, la competitividad en el mercado se ve afectada.

Las empresas de transformación de plástico localizadas en la ciudad de Ibagué Tolima actualmente se proveen de la energía que le suministra la empresa de energía eléctrica de la zona: ENERTOLIMA, la cual realiza la facturación mediante la unidad: KW\*h. Para las cuentas de cobro, la CREG es el ente oficial quien regula el precio de esta medida en las unidades de: \$/KW\*h, pero estos valores cambian de una ciudad a otra en Colombia y dependen del régimen del establecimiento si es subsidiado, es comercial, residencial o industrial.

Con el fin de buscar estrategias que mitiguen el impacto financiero negativo que generan los altos costes energéticos en este tipo de industria, este proyecto realizó una investigación que evaluó la viabilidad de cambiar la fuente energética para las máquinas de alta potencia utilizadas en el sector, contemplando la hipótesis que la energía eléctrica tradicional podría ser reemplazada por energía proveniente de paneles solares que suplieren los requerimientos energéticos de sus máquinas, en especial, las máquinas extrusoras, que son las de mayor consumo, cambio que garantizara la reducción en los costes de producción.

En la práctica, el proceso de extrusión está implementado en todas las empresas de fabricación de productos plásticos y por esta razón valió la pena tomar un caso de estudio particular del cual se pudiere obtener conclusiones generales.

Este proyecto tomó como caso de estudio a una máquina extrusora en particular modelo 2.000 de 33,56 kW (45 HP) de potencia, marca: PLEXCO, que actualmente se encuentra en operación con corriente eléctrica alterna trifásica proveniente de la línea de CELSIA y con capacidad de producción de 50 Kg/h de material plástico peletizado. La razón por la cual se seleccionó esta máquina es por la disponibilidad de tiempo para realizar el estudio, fácil acceso a la toma de datos y la buena disposición de los accionistas a ofrecer la información práctica necesaria con el fin de dar respuesta al problema.

La consecuencia de no reducir los costos actuales de producción para esta industria en general podría implicar que las empresas de transformación del plástico deban tomar la decisión de cerrar o trasladarse a otra región, o bien, apagar sus máquinas para cambiar la labor de producción por la de distribuir productos de procedencia china o venezolana exponiendo el equilibrio de economía local reduciendo las fuentes de empleo.

Este estudio se realizó con el fin de proveer una fuente de información y un método de estimación del costo técnico y financiero del proyecto de convertir una máquina extrusora de energía convencional a energía solar, para que las empresas transformadoras de plástico estén mejor informadas al respecto y tengan mejores argumentos al momento de tomar o no la decisión de conversión de una energía a la otra.

Si se pudiera implementar paneles solares para impulsar motores de alimentación trifásica de alta potencia pertenecientes a una máquina extrusora, este proyecto daría respuesta a una pregunta que los empresarios del sector siempre se han realizado, pero hasta ahora, éste trabajo como el primero, no había estudios locales que argumenten su viabilidad.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Determinar la viabilidad técnica y financiera de implementar paneles solares como fuente de energía para el funcionamiento de una máquina extrusora de polietileno.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Medir los requerimientos energéticos de una máquina extrusora.
- Analizar la información recopilada, organizándola detalladamente, para determinar los requerimientos energéticos.
- Determinar el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico con base en los requerimientos energéticos.
- Calcular índices financieros que determinen la viabilidad financiera del proyecto.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Para el sector industrial, el consumo energético tiene una relevante influencia sobre la competitividad de las empresas de plásticos y contribuye a la mitigación del impacto ambiental de este sector manufacturero [1]. Las instalaciones de estas empresas son, a menudo, energéticamente ineficientes, del gasto total asociado al costo operativo del equipo, más del 90% corresponde a la energía que consumen [2]. Según una publicación de la organización: Acoplásticos, durante el año 2013 la actividad transformadora de materias plásticas (agrupación CIU 222) fabricó en 662 establecimientos un valor de producción bruta de 7.541,2 millardos de pesos corrientes (equivalentes a 4.035,1 millones de dólares), para lograrlo, la energía eléctrica utilizada medida en millones de kilovatios-hora fue de: 1.110,3 con participaciones del 7,3% en el consumo total de energía de la actividad manufacturera [3]. La CREG es el ente oficial que regula el precio de la energía y las unidades de medida son:  $\$/kWh$ . Estos valores son diferentes en cada ciudad de Colombia y dependen del régimen del establecimiento si es subsidiado, es comercial, residencial o industrial, además, también dependen del horario de uso. Según las fuentes investigadas, a Ibagué en general no le favorece el precio, pues proveedor actual tiene una de las diez tarifas más altas del país (ver figura 1) por cada  $kWh$  tomando el octavo puesto nacional [4].



Figura 1 Tarifas de energía más altas del primer semestre del 2017. [4]

De esta manera, es imperativo buscar fuentes alternativas de energía para esta industria que se encuentra en peligro de quiebra financiera, reemplazar la energía convencional por energía solar permitiría a las empresas hablar en términos de *ecoeficiencia*, puesto que el sector de transformación de plásticos es un consumidor intensivo de energía eléctrica, pues todos los procesos sobre materiales plásticos se realizan primero por medio de extrusión con tornillo sin fin en caliente y luego por expulsión a través de una boquilla para su moldeo. [5].

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 Marco legal

El ahorro en el consumo de energía es sin dudas un incentivo indiscutible adicional para emprender acciones al interior de las empresas transformadoras de productos plásticos, que siempre tienen impacto positivo inmediato en sus costos y, por lo tanto, en su productividad. Este factor cada vez se vuelve más importante en la medida en que se incrementa el costo de la energía en todo el mundo, sin embargo, no se puede dejar de lado un referente legal, esto con el fin de detectar si existen normas obligatorias a cumplir o beneficios por la implementación de este tipo de tecnologías [6].

En Colombia existe una creciente demanda en el consumo de energías no convencionales y especialmente de energías renovables o energías limpias, la cual ha tenido su auge en los últimos años; esto se sustenta en la Ley 1715 promulgada en mayo del 2014 en Colombia que tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable en el sistema energético nacional como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético [7].

La ley 1715 da paso a la posibilidad que las empresas colombianas generen su propia energía y la consuman con el fin de reducir las emisiones al medio ambiente, garantizar su abastecimiento y sean sostenibles económicamente, al mismo tiempo, tiene propósitos de promover la gestión eficiente de recursos que comprende tanto la eficiencia energética como

la respuesta a la demanda [7]. Es importante destacar que las empresas que decidan usar fuentes renovables deberán garantizar la calidad de la electricidad que producen para sí mismas con el fin de no estropear a otros usuarios conectados a la red convencional.

Por lo anterior, la norma técnica colombiana: NTC 5001, conocida como: “Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en punto de conexión común”, debe tenerse en cuenta en esta investigación para establecer las metodologías de evaluación y los valores de referencia de los parámetros asociados a la calidad de la potencia eléctrica en el punto de conexión común entre el operador de red y el usuario para todos los niveles de tensión. Esto es: Bajo condiciones normales de operación, se debe garantizar que la conexión cumple las condiciones de operación exigidas legalmente [8].

Debido a que este proyecto tiene por objetivo evaluar la posibilidad de conversión de una máquina extrusora de plásticos con consumo de energía convencional de la línea a abastecerse desde energía solar, que es una energía renovable acorde a la ley 1715 de 2014 [9], es necesario que dicha energía deba ser captada mediante algún dispositivo, tal dispositivo se le conoce como un sistema fotovoltaico. Un sistema fotovoltaico se le define como el conjunto de equipos eléctricos y electrónicos que producen energía eléctrica a partir de la radiación solar. [11]

#### **4.2 Componentes que sustituyen un sistema fotovoltaico**

El principal componente de estos sistemas es el módulo fotovoltaico que a su vez está compuesto por células capaces de transformar la energía luminosa incidente en energía eléctrica de corriente continua, y, en general, estos sistemas fotovoltaicos pueden clasificarse en tres grandes grupos: Conectados a red, autónomos y de bombeo [9].

En este proyecto se evalúa la implementación de un sistema autónomo con el fin de eliminar las barreras legales que pueda interponer la empresa proveedora de energía y los retrasos en la implementación que eso puede conllevar, pues, aunque es claro que se deben cumplir condiciones legales, [8] es posible realizar diseños autosustentables energéticamente

eliminando la implementación obligatoria de la conexión a la línea para retornar el exceso de producción por parte de los paneles [10].

Los componentes de un sistema solar fotovoltaico son: Los paneles, controlador, baterías e inversor [11]. Los paneles son los circuitos de celdas fotovoltaicas que generan la electricidad. Los controladores son los dispositivos encargados de regular la cantidad de energía suministrada por el panel fotovoltaico. A continuación, en la figura 2 se muestra un esquema de la configuración básica de un sistema solar fotovoltaico.

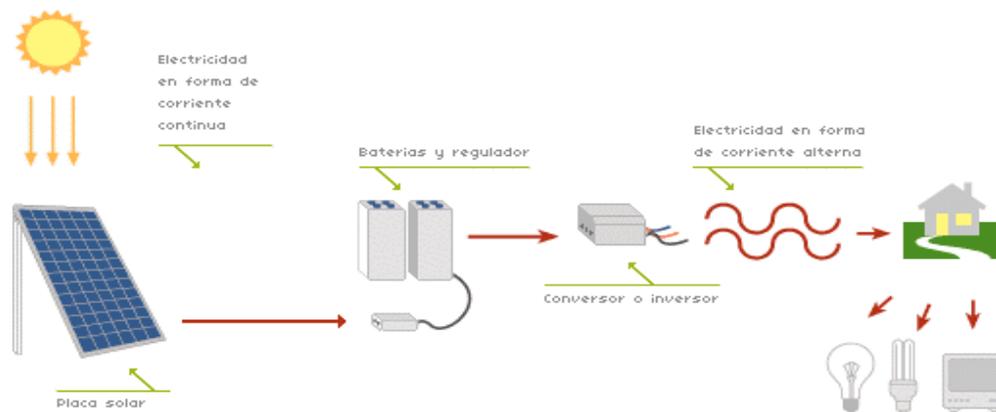


Figura 2 Componentes de un sistema solar fotovoltaico [11]

- Las baterías: Son las encargadas de acumular la energía para disponer de ella cuando el panel no genere energía eléctrica [12].
- El panel fotovoltaico: Es quien recibe la radiación solar y a través del efecto fotoeléctrico la transforma en corriente directa por excitación de electrones. Tanto las baterías como los paneles proveen corriente directa en su salida; sin embargo, es necesario explicar que la mayoría de los equipos eléctricos que existen en los hogares o en la industria, funcionan con corriente alterna de onda senoidal y por esta razón se hace necesario la implementación de un inversor [12].
- El inversor: Es un dispositivo electrónico que tiene la función de convertir la corriente directa generada por los paneles fotovoltaicos y/o las baterías en corriente alterna senoidal para ser aprovechado en equipos de hogar o industriales. En general, los

inversores se pueden clasificar en dos tipos: Inversores monofásicos e inversores trifásicos [12].

### **4.3 El efecto fotoeléctrico**

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno que se explica desde el punto de vista que el material en el que están fabricados los paneles solares es un material sensible para generar movimiento de sus electrones por causa del choque de los fotones de la luz solar contra las orbitas de valencia de los átomos de este. Existen diversos materiales sujetos a este fenómeno y entre ellos se destaca el silicio. El efecto se hace palpable cuando los fotones incidentes son absorbidos por los electrones del medio (en este caso, el material de panel) dotándoles de energía suficiente para escapar de él [13].

Una vez son excitados los electrones de las capas superiores de los átomos de silicio (del panel) se genera una corriente eléctrica que es direccionada a las baterías del montaje para su posterior acumulación, estas baterías se van descargando a medida que exista consumo de electricidad por parte del equipo conectado a ellas [12].

Debe entenderse que la corriente que proveen las baterías es del tipo “continua” y, por tanto, si el sistema que consume esta electricidad es del tipo “corriente alterna”, el flujo de electrones obtenido desde las baterías debe pasar a través de un inversor antes de alimentar los equipos que consumen, un inversor posee internamente un oscilador que controla a un transistor, el cual, se utiliza para interrumpir la corriente entrante y generar una onda rectangular. [14]

### **4.4 conversión de una onda cuadrada en una senoidal**

Una onda rectangular de corriente se puede expresar matemáticamente como una función en el tiempo con escalones de la misma magnitud. La onda rectangular generada por los paneles solares o bien, por las baterías, alimenta a un transformador que se encarga de suavizarla para que en la salida del inversor se presente una onda senoidal como se requiere en los

dispositivos de corriente alterna, hoy día, los inversores más eficientes utilizan como hardware a varios filtros electrónicos para convertir la onda cuadrada de salida en la onda senoidal requerida. Ver figura 3 [2]

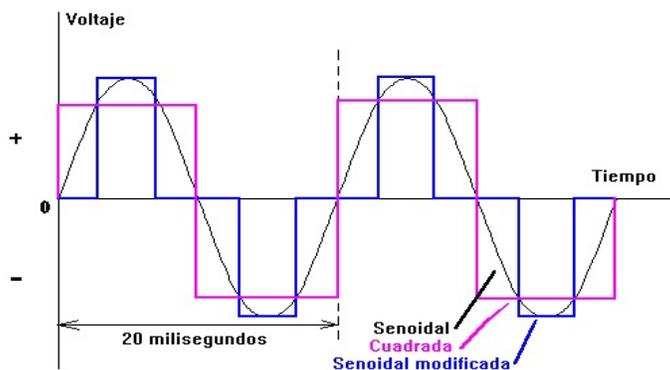


Figura 3 Onda suavizada de salida de voltaje de un inversor [2]

#### 4.5 Clasificación de los paneles solares

Las nuevas tecnologías e investigaciones ofrecen varios materiales para las celdas del panel con el fin de aumentar su eficiencia dentro de los cuales se destacan [13]:

- Paneles Solares de Celdas de Silicio: Las celdas fabricadas de bloques de silicio o “ingots” son las más comunes. La experiencia muestra una vida útil con frecuentemente más de 30 años sin ningún mantenimiento. Estos paneles pueden tener celdas de silicio monocristalino o policristalino donde las celdas solares monocristalinas tienen una mayor eficiencia, aunque los policristalinos son más económicos [14].
- Placas solares de capa fina: Se fabrican en silicio, pero en capas muy delgadas para reducir los costos de producción y evitar una futura escasez de silicio como recurso natural. También se han usado para paneles de capa fina materiales como el cobre, indio, galio, selenio y Telurio [14].
- Celdas flexibles: Nuevas formas de producción con el silicio permiten producir celdas flexibles que evitan la rigidez de los paneles tradicionales. Estas son las celdas que se

incorporan en la ropa, mochilas, sombrillas y sirven para cargar dispositivos de poco consumo [14].

- Paneles con capas transparentes: Son en silicio y ofrecen la oportunidad de incluirlas en edificios reemplazando los vidrios polarizados y usar la energía generada para apoyar la climatización de este [14].
- Celdas orgánicas: Se utilizan e implementan en la ropa y realizan un proceso similar a la fotosíntesis de la cual se obtiene la energía. Fue creada por el Profesor Grätzel quien ganó el Premio Tecnológico del Milenio en el 2.010. Estas celdas tienen la ventaja que la eficiencia aumenta con la temperatura. Su producción en masa aún no se realiza [14].
- Celdas de concentración: Se refiere a sistemas que concentran la luz con dispositivos ópticos. Tienen la necesidad de estar orientarlos exactamente hacia el sol y el control de la alta temperatura generada imponen sistemas sofisticados con un mantenimiento alto, pero ya se utilizan para incrementar a 2.000 grados Celsius la temperatura del agua y generar energía eléctrica por movimiento del vapor a alta presión. A continuación, se muestra un esquema de paneles solares de concentración óptica con el fin de obtener vapor sobrecalentado para el accionamiento de una turbina. Ver figura 4 [14].

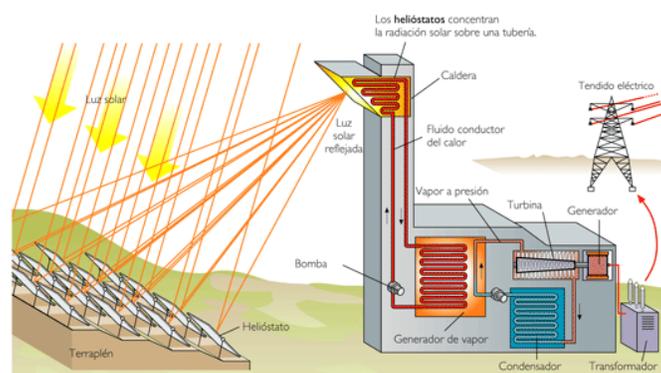


Figura 4 Paneles solares de concentración óptica. [14]

#### 4.6 Eficiencia de los paneles solares

La eficiencia de los paneles solares depende de varias variables como: la intensidad lumínica del sol, el sombreado, el material de fabricación de la celda solar o el tipo de silicio utilizado y el diseño de la celda. Con base en esto los paneles estándar de comercialización consiguen una eficiencia entre el 15% y el 20% en tamaños de 240 – 260 W y 300 – 330 W. [33]

Como se mencionó el material influye bastante en la eficiencia y estos se pueden clasificar en tipo P o N, donde las celdas IBC de mayor costo se construyen con material tipo N de alta pureza y pueden obtener una eficiencia entre el 20% y 22% y no sufren pérdidas por sombreado, ya que en las celdas más comunes el sombreado parcial o total afecta en gran medida la eficiencia del panel. [33]

La eficiencia en los paneles también se puede clasificar dependiendo de si son monocristalinos o policristalinos, donde los primeros son más eficientes, pero también representan un mayor costo, mientras los segundos son más económicos, pero también menos eficientes. Ver figura 5



Figura 5 Tipos de paneles y su eficiencia. [33]

Aunque las marcas fabricantes de estos equipos pueden variar en sus diseños, el principio de funcionamiento de todas es el mismo. Básicamente, una máquina extrusora de plástico es un dispositivo mecánico que utiliza un tornillo sin fin accionado por un motor eléctrico (y una caja reductora) lo suficientemente fuerte como para recibir el material plástico en hojuelas por medio de una tolva (a temperatura ambiente) y someterlo a alta presión y temperatura contra las paredes de un cilindro (barril) al mismo tiempo que lo transporta fuera de él.

#### **4.7 Proceso de extrusión**

El proceso de extrusión se puede llevar a cabo gracias a una maquina conocida como extrusora, como su nombre lo indica es la encargada de la extrusión de polímeros mediante el prensado, fusión, moldeado, presión y empuje de los materiales. [15] Para poder lograr esto la extrusora se alimenta del polímero a través de una tolva en donde se deposita, en el interior un tornillo sinfin se encarga de transportar el material por el barril cubierto con resistencias encargadas de llevar el material hasta el punto de fusión, el sinfin continúa transportando hasta la boquilla donde sale el material y deposita en el molde deseado.

Para garantizar la fluidez del material dentro del barril y poder darle la forma que se necesita al final del proceso sea en forma de película, en forma de pellet o en forma de pieza sólida al inyectarlo en un molde, las resistencias eléctricas para corriente alterna calientan el material durante su recorrido dentro del cilindro en un perfil de temperaturas que inicia desde la temperatura ambiente, y se incrementa (no necesariamente lineal) hasta los 180°C. A continuación, en la figura 6 se esquematiza el proceso. [15]

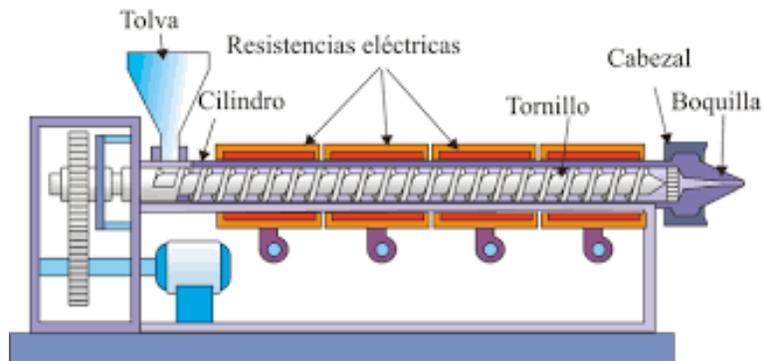


Figura 6 Partes de la maquina extrusora. [15]

La importancia de las máquinas extrusoras en los procesos de fabricación en masa de productos plásticos es que básicamente es la única tecnología actual que genera la oportunidad de fundir un material plástico sólido para moldearlo en la forma que se necesite en el mercado: En forma de pellets en el caso de producción de materias primas recicladas, película en el caso de las bolsas plásticas o piezas sólidas como, por ejemplo, sillas marca: “Rimax”.

El destino que el empresario le dé al material extruido en la boquilla de salida depende de en qué sector del mercado se encuentre; sin embargo, todas las máquinas de fabricación de plásticos especialmente en el polietileno de baja densidad requieren del proceso de extrusión para obtener un plástico moldeable a  $180^{\circ}\text{C}$  en la boquilla de salida. [15] En este proyecto se pretende estudiar la posibilidad de convertir una máquina extrusora de energía convencional a energía solar.

#### **4.8 Variables independientes asociadas al proceso de extrusión**

Las máquinas extrusoras funcionan con corriente alterna, por esta razón, será necesario incluir el costo de un inversor en la parte financiera del proyecto. Desde el punto de vista práctico, es bien conocido que durante la producción estas máquinas tienen requerimientos variables corriente y voltaje, de esta manera, para determinar si el proyecto de conversión de energía eléctrica convencional a energía solar es viable en el aspecto técnico, es necesario

definir las variables independientes a medir y sus correspondientes valores reales medidos en campo, estas variables son: Corriente, Voltaje y nivel de producción.

La potencia es una variable importante en este estudio, pero es dependiente de las 2 anteriores. La corriente eléctrica se mide en amperios, el voltaje en voltios y el nivel de producción en Kilogramos.

#### **4.9 Aspectos de viabilidad de un proyecto**

Debido a que la conversión a una energía alternativa requiere de una inversión financiera, el proyecto sería viable financieramente si el flujo de caja del proyecto es capaz de recuperar en el tiempo la inversión realizada en el día cero, entendiendo el flujo de caja como un estado financiero que mide los movimientos de efectivo, excluyendo aquellas operaciones que, como la depreciación y amortización, constituyen una salida de dinero [17].

Un proyecto puede evaluarse por completo realizando 8 estudios como lo son: El legal, de mercado, de entorno, técnico, Administrativo y organizacional, socio económico, ambiental y financiero; sin embargo, dentro de la metodología de este proyecto se establece que el alcance será exclusivamente el hasta el estudio técnico y el financiero con el fin de reducir costos y tiempo, además de determinar la posibilidad de si es necesario seguir con estudios futuros a partir de los resultados aquí obtenidos. [17]

La profundidad de la investigación para determinar la viabilidad de un proyecto puede hacerse por etapas y depende de los recursos disponibles y del alcance que se requiera en el ante proyecto, en la práctica laboral, muchas investigaciones para determinar la viabilidad de un proyecto solo realizan uno o dos estudios de los nombrados anteriormente por la fuente [17] y a partir de ello, se toma la decisión de seguir adelante con los demás estudios o no hacerlo, esto con el fin de reducir costos y especialmente tiempo para en la toma de decisión de invertir [18].

Para este proyecto, se decidió realizar 2 estudios de los que propone el autor Miguel David Rojas López en su libro “Evaluación de proyectos para ingenieros” [17]: El estudio técnico y el estudio financiero. Estos estudios se consideran los más importantes para este caso ya que en el estudio técnico se determinará si es posible convertir la máquina extrusora de energía convencional a energía solar, por otro lado, el estudio financiero dejará claro si el flujo de caja es suficiente para retornar la inversión en un tiempo prudente. La viabilidad financiera entonces se evaluará en términos de indicadores que expresen el beneficio de la inversión monetaria, cantidad de tiempo para el retorno del dinero y la tasa de retribución del proyecto, estos indicadores se les conoce como: VAN, PRI y TIR respectivamente [18].

## **5. MÉTODOS**

### **5.1 Lugar de obtención de los datos**

La obtención de los datos se realizó en la empresa PETRAPLAST DE COLOMBIA S.A.S. ubicada en el km 8 vía Ibagué – Rovira. Los datos se obtuvieron de la extrusora de plástico (polietileno de baja densidad) utilizada en su proceso de producción la cual funciona con corriente alterna todo el día, todos los días del año y es la que se plantío alimentarla con electricidad producida por paneles solares.

Las variables que se midieron fueron corriente, voltaje, producción (medida en kilogramos) y esto fue posible ya que su régimen de trabajo es continuo en el tiempo, lo que garantizo que las mediciones fueran confiables.

### **5.2 Metodología para la obtención de los datos de los requerimientos energéticos**

Se propuso como variables independientes: La corriente, la cual se midió en amperios, el voltaje, que se midió en voltios, y finalmente, el nivel de producción de la máquina, que se tomó en kilogramos. Después de lograr el régimen estacionario, la máquina no se detuvo y en general, fue de esperarse que las magnitudes de las variables medidas fuesen relativamente constantes durante el día. Los valores de estas variables se midieron en intervalos de 4 horas

con un ayuda de un multímetro, el valor diario de cada variable se tomó como el promedio de estos 6 valores. Estas observaciones se realizaron durante un mes que correspondió al esquema de trabajo típico de la máquina.

### **5.3 Materiales para la obtención de datos**

Para poder realizar la medición de las variables y obtener los datos se debió garantizar que la maquina se encontrara en estado estacionario, una vez se logró dicho estado, la máquina no se detuvo en ningún momento durante el mes en que se obtuvieron los datos, esto con ayuda de un multímetro el cual estaba calibrado para garantizar la veracidad de los datos. A continuación, se describen los instrumentos y materiales utilizados para la toma de datos:

Multímetro marca TECHMAN, referencia: TM 101, para medición del voltaje y corriente alterna instantánea en la máquina durante la operación.

Polietileno de baja densidad (PEBD) proveniente de post proceso de impresión y/o empaque de los productos de la empresa: Kimberly Clark, específicamente para los productos de la empresa de Pañales “Huggies” y toalla femenina: “Nosotras”. El material se encontraba impreso con tinta de color verde y fucsia del tipo serigrafía sobre plástico, seca.

Molino CHII YANG coreano con capacidad 80 Kg/h y 3.73 kW (5HP) instalados de 3 cuchillas rotativas y 4 cuchillas fijas. El molino provee material molido en hojuelas a la maquina peletizadora.

Máquina extrusora peletizadora de fabricación nacional marca: PLEXCO 2.005 de capacidad de 50 Kg/h (nominal), doble etapa de filtrado con malla metálica con desgasificación intermedia entre las etapas y tipo de corte en frío. Una fotografía de esta máquina puede verse en los anexos en las fotografías 4 y 5 mientras el corte en frio puede apreciarse en la fotografía 6. Como parte de la máquina y para generar el choque térmico (refrigeración) de los “espaguetis” plásticos extruidos antes del corte en frío, se encuentra una torre de enfriamiento de fabricación nacional.

A continuación, se describen los consumos energéticos de la máquina que fueron relevantes para este estudio:

- 1 motor principal AUSTRAL 18,64 kW (25 HP)
- 1 motor secundario SIEMENS 11,19 kW (15 HP)
- 1 motor para el picador del corte en frío SIEMENS 3,73 kW (5 HP)
- 8 resistencias eléctricas de alterna RHODER: 1 kW (1,34 HP) cada una
- 1 torre de enfriamiento con motor SIEMENS 0,75 kW (1 HP) para ventilador
- 1 bomba de recirculación de agua PEDROLLO 0,75 kW (1 HP)

Como puede verse, la potencia total instalada en la máquina es de 42,50 kW (57 HP). El video de la empresa montado en la plataforma YouTube [34] describe brevemente el proceso de extrusión de película plástica para dar un contexto al lector respecto al proceso, este video es institucional y describe la labor social que desempeñan para el municipio.

#### **5.4 metodología para el análisis de los datos de los requerimientos energéticos**

Los requerimientos energéticos se determinaron a partir de las herramientas graficas de análisis propuestas por Carolina Salazar y compañía [16], las cuales, se realizan a partir de los valores de voltaje, corriente y producción. [16] Deja claro que la corriente y el voltaje son la base para obtener la potencia (como producto matemático), este valor es clave para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

Recolectados los datos, se deben analizar tabulando y graficando [16] de la siguiente manera:

- Gráfico de control de voltaje en función del tiempo: Permite detectar comportamientos anómalos en la fuente actual de energía eléctrica.
- Gráfico de control de corriente en función del tiempo: Permite detectar comportamientos anómalos en la fuente actual de energía eléctrica.
- Gráfico de control de potencia en función del tiempo: Permite analizar el comportamiento de la potencia requerida por la máquina durante un mes típico de trabajo.

- Diagrama de Producción vs. Tiempo: Permite analizar el comportamiento de la cantidad de material producida por la máquina durante el periodo de tiempo observado, en este caso, 1 mes cotidiano.
- Diagramas de dispersión de consumo de energía en  $kWh$  y producción en  $kg$ : Permite determinar si existe una relación directa, inversa o a fin entre las 2 variables. De este VAN se obtendrá el índice de correlación y la función matemática que modele el VAN con el fin de determinar el nivel de dependencia entre las variables.
- Diagrama de índice de consumo vs. Producción. Este diagrama ayudará a establecer el costo actual de energía por unidad de producto.

Los cálculos de índices asociados al consumo de energía pueden llevar a obtener conclusiones generales a partir de estos datos particulares, [16] estos son:

- Cálculo del índice de consumo promedio " $I_c$ ": Este valor determina de forma general, el costo energético de producción de cada  $kg$  fabricado en una máquina extrusora. Al multiplicar este resultado por el precio de cada  $kWh$ , se podrá establecer el costo en dinero de cada kilogramo fabricado por esta máquina.
- Cálculo del índice de consumo promedio por unidad de potencia instalada de máquina " $I_{cp}$ ": Este valor determina de forma general, el costo energético de producción de cada Kilogramo fabricado en una máquina extrusora con cierta potencia instalada. Al multiplicar este resultado por el precio de cada  $kWh$ , se podrá establecer el costo en dinero de cada kilogramo fabricado por una máquina extrusora de cualquier potencia.
- Cálculo del índice del número de paneles solares por  $kW$  instalado en máquina " $I_{p/c}$ ": Este indicador será un valor importante para extrapolar los datos a otras empresas y casos generales, pues este número estimaría cuantos paneles solares son necesarios por cada  $kW$  de potencia que se encuentra instalado en la máquina extrusora.

## 5.5 metodología para la determinación de los requerimientos energéticos

A partir del gráfico de control: es posible obtener el promedio aritmético de todos los datos discretos de potencia medidos en campo ya que son representativos del consumo de esta variable en un mes típico de trabajo de la máquina; se selecciona el promedio aritmético y no la raíz media cuadrática ya que los datos recolectados en campo para la potencia son únicamente positivos. Al obtener el promedio aritmético de la potencia, se tiene el valor necesario para abastecer de energía por unidad de tiempo para la extrusora y a este valor se le aplicará un factor de seguridad de dos (2) con el fin de que el sistema fotovoltaico que se va a dimensionar sea capaz de abastecer al menos dos (2) veces los requerimientos típicos de potencia en la práctica.

El factor de seguridad de dos (2) se selecciona porque genera cálculos conservadores, evita exceder los costos de inversión y se tomará como carga necesaria siempre y cuando el valor mayor al pico instantáneo más alto durante todo el tiempo de observación de la máquina; en el caso que el pico más alto de potencia sea superior al doble del promedio, el pico se tomará como el valor de carga nominal y se le aplicará nuevamente un factor de seguridad de dos (2).

### **5.6 metodología para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico**

Calculado el requerimiento de potencia, se procederá a realizar el dimensionamiento del sistema fotovoltaico. Aunque existen varias metodologías para establecer las dimensiones del sistema generador de energía eléctrica a partir de energía solar, el modelo de cálculo propuesto por los autores Jorge Aguilera y Leocadio Hontoria ofrece una forma práctica y secuencial de obtener estas dimensiones y por tanto será aplicada en este proyecto, esta metodología establece el orden de actividades a realizar para determinar cuántos paneles son necesarios y al área requerida para instalarlos. [19] Los detalles de la metodología se exponen en la actividad 3. [19]

### **5.7 Actividades para alcanzar los objetivos específicos**

Actividad 1: Medición de las variables. Se tomaron las medidas de voltaje y corriente alterna consumidas en tiempo real por la máquina extrusora durante su funcionamiento con ayuda de un multímetro cada 4 horas durante 30 días que corresponde al tiempo típico de trabajo de la máquina, pues en este intervalo de tiempo se detectarán los requerimientos nominales de potencia. [18] Al cabo de un (1) mes de toma de datos, estos serán analizados mediante las herramientas graficas e índices estipulados por la fuente. [16]

Esta actividad es completamente necesaria ya que la demanda de energía de la máquina impone las características del dimensionamiento e instalación del sistema fotovoltaico. Se debe tomar nota de todo lo energéticamente relacionado con la máquina extrusora y entre ellos, el número de motores y resistencias eléctricas trifásicas que tiene incluyendo los tableros eléctricos y electrónicos, todo esto constituirá la potencia instalada actual lo que se traduce en la carga del sistema. La potencia se podrá calcular multiplicando el voltaje por la corriente de la extrusora durante su funcionamiento. [19] Hasta aquí se habrá cumplido el primer objetivo. En la figura 7 se puede apreciar la relación de las actividades.

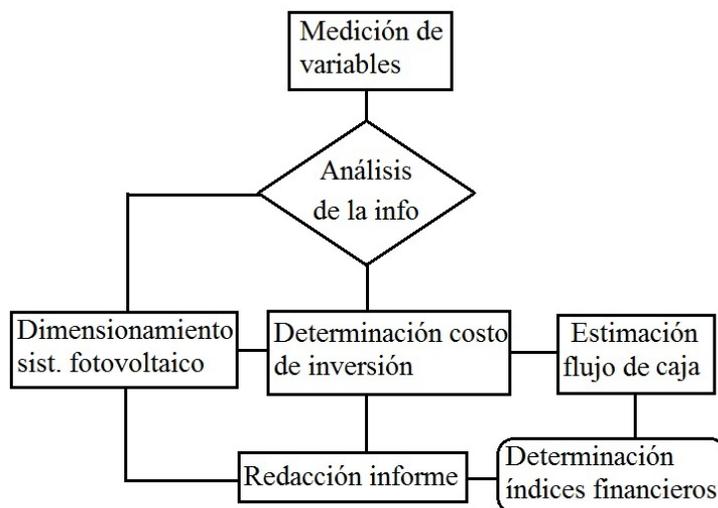


Figura 7 Interdependencia de las actividades

Actividad 2: Análisis de la información. En esta etapa, se organizarán los datos de corriente, voltaje y producción de material en Kilogramos en hojas de cálculo de Excel. A partir de estos datos ingresados al software, se pueden generar los gráficos de control. [16] Con estos

gráficos se podrán comprobar los puntos altos (picos) y bajos en magnitud para las variables y serán añadidos al informe final con sus respectivas interpretaciones a la luz de la ingeniería. Hasta aquí se habrá cumplido el segundo objetivo.

Actividad 3: Determinar el dimensionamiento del montaje eléctrico solar. En esta etapa se busca realizar el cálculo del número de paneles necesarios para abastecer la extrusora. Para esta etapa se empleará el método propuesto por Jorge Aguilera y Leocadio Hontoria, el cual consta del siguiente procedimiento [19]:

a. Cálculo del ángulo óptimo de inclinación de los paneles: Para el cálculo del ángulo óptimo de inclinación de los módulos fotovoltaicos es necesario conocer el dato de la radiación solar incidente en el lugar (valores medios mensuales). [19] Estos datos ya se conocen y pueden ser obtenidos a partir de la información que provee el ministerio de minas y energía del país a través del atlas de radiación solar en Colombia. [20] El ángulo de inclinación óptimo es aquel que da mayor radiación en el peor mes (en relación con el consumo para cada mes). [19]

b. Dimensionado del generador fotovoltaico: El dimensionado del generador fotovoltaico (FV) tiene como objetivo suministrar el consumo medio diario de la máquina. La corriente de diseño del generador FV se obtiene dividiendo el consumo corregido, entre el número de horas de sol pico. El número de módulos en paralelo se obtiene como el cociente entre la corriente de diseño y la corriente del módulo en el punto de máxima potencia. El número de módulos en serie se obtiene del cociente entre el voltaje nominal del sistema y el voltaje nominal del módulo. [19]

c. Dimensionado del sistema de acumulación (Batería): Para definir el tamaño del acumulador, se tendrán en cuenta los siguientes parámetros: Máxima profundidad de descarga y días de autonomía. [19] La fórmula básica para calcular el tamaño de la batería se obtendrá de la siguiente ecuación [21]:

$$\text{Capacidad batería} = \frac{N^{\circ} \text{ días autonomía} * \text{consumo diario}}{\text{Máxima profundidad de descarga}} \quad (1)$$

d. Dimensionado del regulador: el objetivo es obtener la corriente máxima que circulara por la instalación. Por lo tanto, se calculará la corriente que produce el generador, la corriente que consume la carga, y la que presente el valor máximo será el que se tendrá como referencia para el funcionamiento del regulador. [19] Es recomendable incluir un factor de seguridad de 1.25 respecto de la corriente de cortocircuito del generador para acomodar la corriente excesiva causada por el aumento de irradiación que a veces producen las nubes durante cortos periodos de tiempo. [21]

e. Dimensionado del inversor: Para dimensionar el inversor se tendrá en cuenta la potencia que demanda la carga AC, de forma que se elegirá un inversor cuya potencia nominal sea un poco superior a la máxima demandada por la carga, evitando el sobredimensionamiento del inversor para lograr que trabaje con mejores eficiencias. [21]

f. Dimensionado del cableado: El dimensionado del cableado constituye especial atención, ya que siempre que exista consumo habrá pérdidas debido a las caídas de tensión en los cables. Estas pérdidas óhmicas deben cumplir la más restrictiva de las dos condiciones siguientes [19]: Verificar las normas electrotécnicas de baja tensión, la pérdida de energía debe ser menor que una cantidad prefijada.

Con lo anterior se cumple con el estudio técnico de viabilidad del proyecto; sin embargo, aún se debe realizar el estudio financiero, con estos 2 estudios se determinará si los empresarios estarían dispuestos a invertir en la tecnología solar y lograr una competitividad mayor en el mercado. El estudio financiero se realizará a partir de la actividad 4.

Actividad 4: Determinar el costo de inversión: En esta etapa, se corroborará en los recibos de energía eléctrica de la empresa de estudio el valor del *kWh* que establece proveedor actual; también se investigará a qué precio vende esta empresa el producto fabricado por la máquina extrusora y, finalmente, se realizará la cotización de los equipos de energía solar necesarios junto con sus accesorios y el costo de su instalación.

Las actividades siguientes contemplarán el cálculo del flujo de caja y de los índices financieros más importantes para la viabilidad financiera.

Actividad 5: Estimar el flujo de caja. En esta etapa, se asumirá positivo el flujo de caja del proyecto en función del ahorro en dinero que generaría la operación de la misma máquina con paneles solares, es decir, que el máximo ahorro que se podría obtener es el del funcionamiento de la máquina con abastecimiento puramente solar y, por tanto, este sería el valor máximo de ingresos para la recuperación de la inversión para este proyecto. Para lograr esta actividad, se realizará un análisis comparativo entre el costo con energía eléctrica del proveedor actual durante el funcionamiento de la máquina extrusora en un mes de trabajo normal y, el costo con energía suministrada por el panel solar en las mismas condiciones de trabajo. Además, el flujo de caja se contemplará en 3 escenarios financieros diferentes con ayuda de la herramienta TIR, VAN y PRI del software: Excel, el escenario pesimista, escenario normal y escenario optimista. Estos escenarios estarán en función del nivel de ahorro que se pueda obtener al realizar la conversión de la máquina a energía solar, todo esto teniendo en cuenta el histórico y las tendencias a futuro de los precios de la energía eléctrica para el régimen energético del lugar donde está ubicada la máquina. [18] El valor de la inversión total en dinero para el proyecto lo que corresponde a la magnitud de “ $K_0$ ” en la fórmula matemática del VAN, se podrá obtener una vez se estimen las dimensiones requeridas para el sistema de energía alternativa obtenida en la actividad 3, pues a partir de estos datos y las cotizaciones realizadas en la actividad 4, se podrán saber los costos de los equipos y su instalación. [15]

Actividad 6: Calcular índices financieros: Es la etapa final del proyecto, con ella se busca cumplir con el cuarto objetivo específico y obtener las conclusiones de viabilidad. En esta etapa se evalúa financieramente la inversión del proyecto en los 3 escenarios nombrados, incluyendo los costos de: Inversión en dispositivos fotovoltaicos, mano de obra de montaje, puesta en marcha y a punto de los paneles más el valor de las conexiones y derechos legales para la conexión, impuestos y pérdidas de producción por causa del paro de producción de la máquina para realizar la conversión de energía convencional a energía solar. Los índices por evaluar en este proyecto serán el: VAN, TIR y PRI y se utilizará Excel para encontrar estos indicadores a partir de la alimentación de datos correspondientes al flujo de caja. [18] Las interpretaciones de los resultados se especifican como:

- El Valor Actual Neto (VAN) mide la rentabilidad del proyecto en valores monetarios que exceden a la rentabilidad deseada después de recuperar toda la inversión. [22]
- La Tasa Interna de Retorno, TIR: refleja la tasa de interés de rentabilidad que el proyecto arrojará período a período durante toda su vida útil. De manera operativa, se define como la tasa de descuento que hace que el VAN del proyecto sea igual a cero.
- Periodo de Recuperación de la Inversión, PRI: es el tiempo que le toma al proyecto en alcanzar el VAN igual a cero. [22]

## 6. RESULTADOS

VARIABLES MEDIDAS EN LA TOMA DE DATOS:

- Producción: Medida en Kilogramos (*kg*)
- Corriente eléctrica del tipo alterna: Medida en Amperios (*A AC*)
- Voltaje del tipo alterno: Medida en Voltios (*V AC*)

Si bien las mediciones realizadas sobre esta máquina constituyen un caso de estudio particular, los resultados obtenidos pueden ser extrapolados a conclusiones generales aplicables a máquinas con características similares. [16] La metodología para la obtención de los datos de los requerimientos energéticos requería que la máquina estuviese funcionando en régimen estacionario, por tanto, se calentó la máquina durante 3 horas antes de realizar la primera carga de PEBD a la tolva. Este calentamiento tuvo se realizó la noche del 31 de octubre de 2.019 desde las 11:00 p.m. hasta las 02:00 a.m. del 1 de noviembre de 2.019. Con el fin de que los datos fuesen tomados en un tiempo de régimen estacionario, las variables independientes solo se comenzaron a medir a las 07:00 a.m. el 1 de noviembre de 2.019 para terminar el día 1 de diciembre de 2.019 a las 07:00 a.m.

### 6.1 Recolección de los datos de campo

Debido a que las variables independientes para los cálculos y análisis subsecuentes son voltaje, corriente y producción, se escriben los datos promedio recolectados durante 30 días de trabajo continuo. Para cada día fueron tomados 4 datos que corresponden al valor de medida de las variables cada 4 horas y anotados en el anexo 1. Sin embargo, en la tabla 1 se muestra el resumen del valor promedio diario para cada variable independiente. El valor diario de cada variable fue calculado tomando el promedio aritmético de los 6 valores diarios tomados cada día. Los datos medidos en tiempo real se tomaron con 3 cifras significativas sin decimales con el fin de eliminar la fluctuación de los números decimales durante el momento de la toma del dato con el instrumento. El voltaje alterno fue medido en paralelo entre 2 de las 3 fases (cables vivos) que se dirigen hacia la máquina y la abastecen por completo de energía eléctrica desde la línea. La corriente eléctrica fue medida instalando en serie en una de las fases que se dirige hacia la máquina, este valor fue multiplicado por 3 en el momento de tomar nota del valor de la medición de la corriente. Los datos expuestos en las tablas, los cálculos de los valores promedio y los cálculos de los índices que en este documento se mencionan, están todos formulados y sustentados en el anexo 1. A continuación para la tabla 1 tener en cuenta que:

\*Hace referencia a la media aritmética calculada para los 6 datos recolectados cada día a intervalos de 4 horas.

\*\*Es el cociente entre la energía consumida por la máquina en *kWh* y la producción en *kg*.

Tabla 1 Valores promedio de datos recolectados en campo para un estudio de la producción de 30 días

Día	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Energía eléctrica consumida (kWh)	Producción del día (kg)	Índice de consumo Ic kWh/Kg
1	217,000	153,667	33.334,833	800,036	1.114	0,718
2	219,667	153,333	33.680,667	808,336	1.116	0,724
3	219,667	153,500	33.721,833	809,324	1.144	0,707
4	218,667	148,500	32.452,500	778,860	1.135	0,686
5	216,667	153,167	33.199,833	796,796	1.130	0,705
6	218,333	152,833	33.360,000	800,640	1.138	0,704
7	219,833	153,167	33.686,333	808,472	1.095	0,738
8	219,500	149,167	32.743,667	785,848	1.114	0,705
9	220,167	148,333	32.657,000	783,768	1.108	0,707
10	221,333	153,500	33.979,500	815,508	1.126	0,724

11	219,167	147,500	32.315,333	775,568	1.096	0,708
12	219,833	147,833	32.491,333	779,792	1.109	0,703
13	216,333	153,000	33.090,833	794,180	1.110	0,715
14	216,500	150,667	32.618,833	782,852	1.090	0,718
15	217,667	152,500	33.178,500	796,284	1.097	0,726
16	218,333	150,833	32.915,500	789,972	1.145	0,690
17	219,667	149,500	32.840,167	788,164	1.101	0,716
18	219,000	149,667	32.792,000	787,008	1.110	0,709
19	219,500	150,333	33.018,333	792,440	1.090	0,727
20	214,667	152,833	32.807,667	787,384	1.123	0,701
21	218,167	152,667	33.305,667	799,336	1.123	0,712
22	220,000	150,833	33.180,333	796,328	1.120	0,711
23	220,833	152,000	33.559,167	805,420	1.111	0,725
24	219,333	154,500	33.905,333	813,728	1.097	0,742
25	218,833	152,500	33.344,667	800,272	1.131	0,708
26	217,333	153,833	33.409,333	801,824	1.120	0,716
27	220,833	150,833	33.306,333	799,352	1.118	0,715
28	217,333	150,000	32.570,833	781,700	1.138	0,687
29	218,833	152,833	33.433,000	802,392	1.125	0,713
30	216,333	150,500	32.533,667	780,808	1.125	0,694

## 6.2 análisis del comportamiento de las variables

Los datos de la tabla 1 son la base para los diagramas que se muestran a continuación, estos se realizaron según la metodología de Carolina Salazar y compañía, y permiten un acertado y rápido análisis de los datos obtenidos. [16]

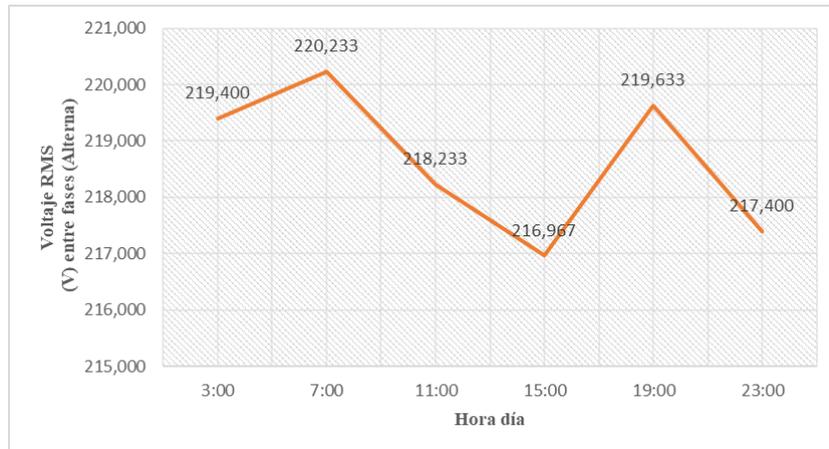


Figura 8 Voltaje en función del tiempo

El diagrama de la figura 8 muestra el comportamiento de la variable voltaje y se puede apreciar que en general el pico más alto de voltaje se da a las 07:00 a.m. con un valor de 220,233 V y el punto más bajo a las 15:00 p.m. con un valor de 216,967 V.

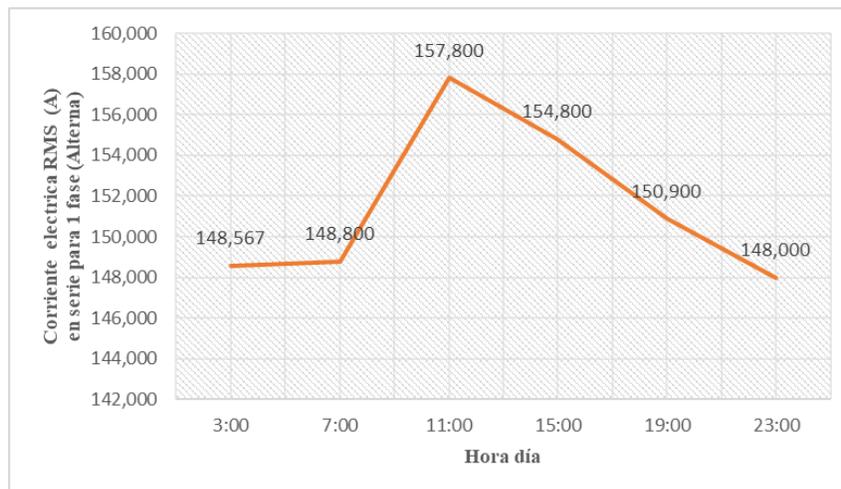


Figura 9 Corriente en función del tiempo

La figura 9 muestra el diagrama para la variable corriente durante el día, en general se concluye que el mayor consumo de corriente se da a las 11:00 a.m. con un promedio de 157,800 A y el menor consumo a las 23:00 p.m. con un valor de 148 A en promedio

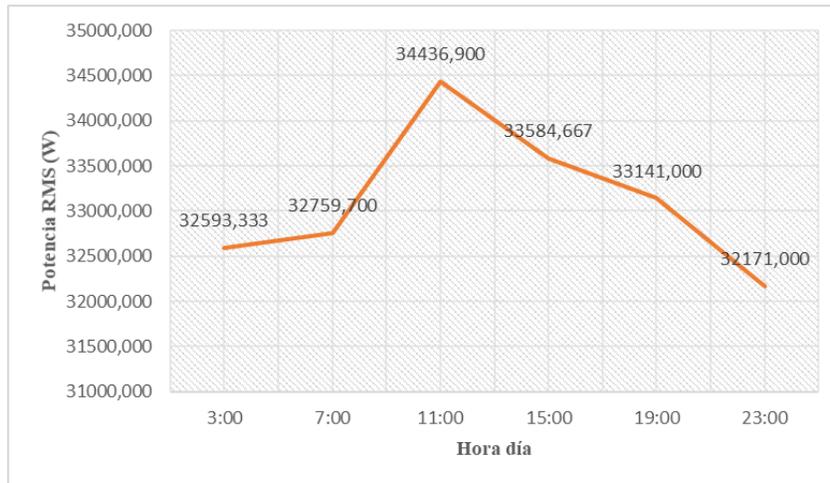


Figura 10 Potencia en función del tiempo

La figura 10 que nos permite apreciar el comportamiento de la potencia consumida por la maquina durante el día, lo cual es uno de los datos principales para poder identificar las horas de mayor demanda energética y dimensionar el sistema en base a esa demanda o crear estrategias para cumplir con la demanda. Se identifica que la hora de mayor consumo de la maquina en promedio es a las 11:00 a.m. con un valor de 3.4436,9 W lo cual no representa una dificultad mayor ya que a esa hora se presenta una gran irradiación y el sistema podrá abastecer dicha demanda

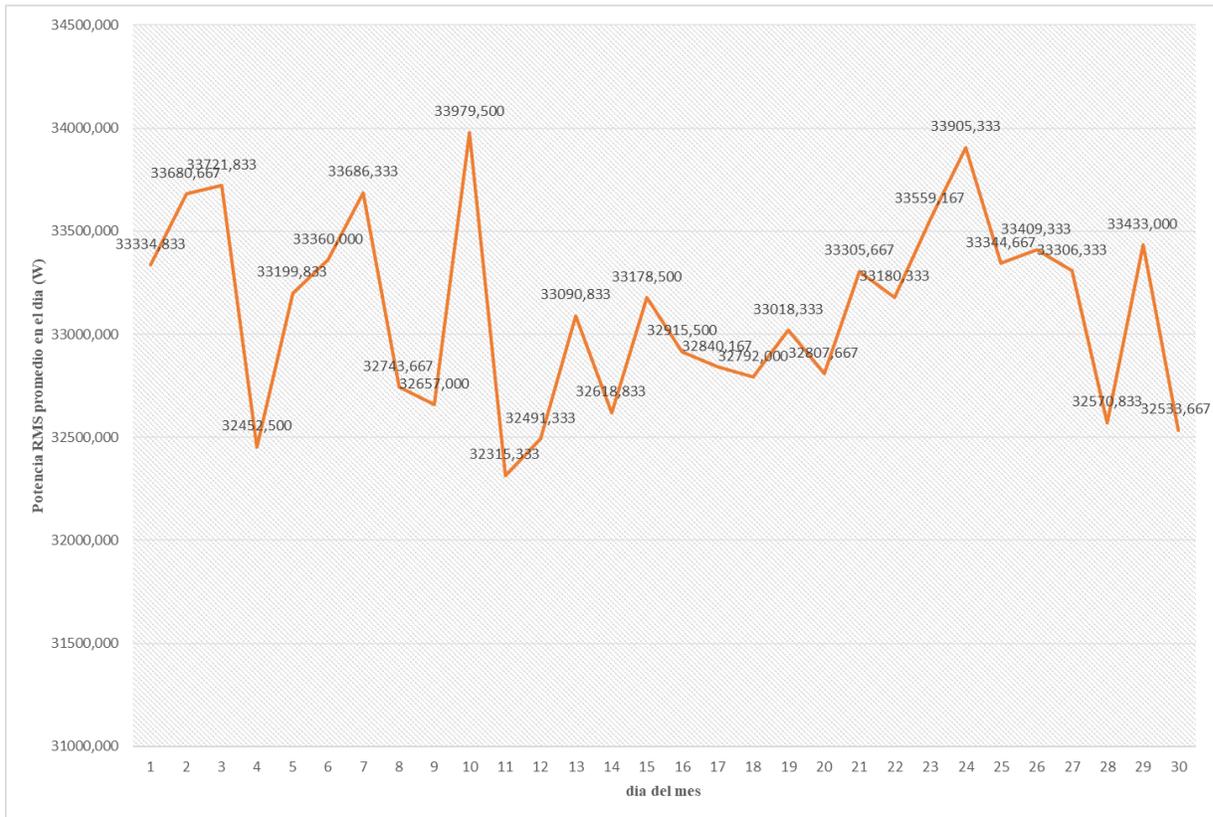


Figura 11 Potencia en función del tiempo mensual

La figura 11 muestra el comportamiento promedio por día de la potencia durante todo el mes, esto con el fin de identificar el mayor consumo que debería ser muy cercano al visto en la figura 10, lo cual es acertado ya que para la figura 10 el promedio de mayor consumo estuvo en 34.436,9 W mientras que para la figura 11 es de 33.979,5 W. Un diagrama importante para la discusión posterior será el de dispersión de la Producción vs. Tiempo, éste permite analizar el comportamiento de la cantidad de material producida por la máquina de forma acumulada como una función matemática durante el periodo de tiempo observado, en este caso, tanto a nivel diario como para un mes cotidiano de trabajo de la máquina, esto se aprecia a través de un diagrama de línea en la figura 12.

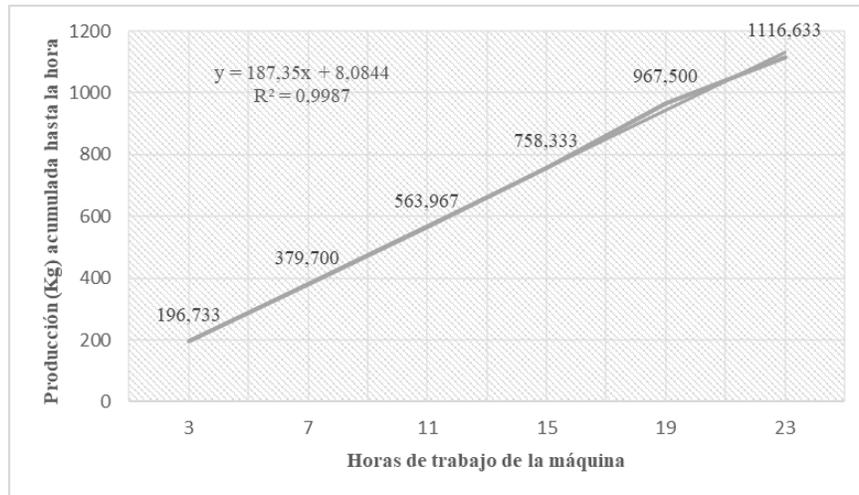


Figura 12 Dispersión de la producción en función del tiempo

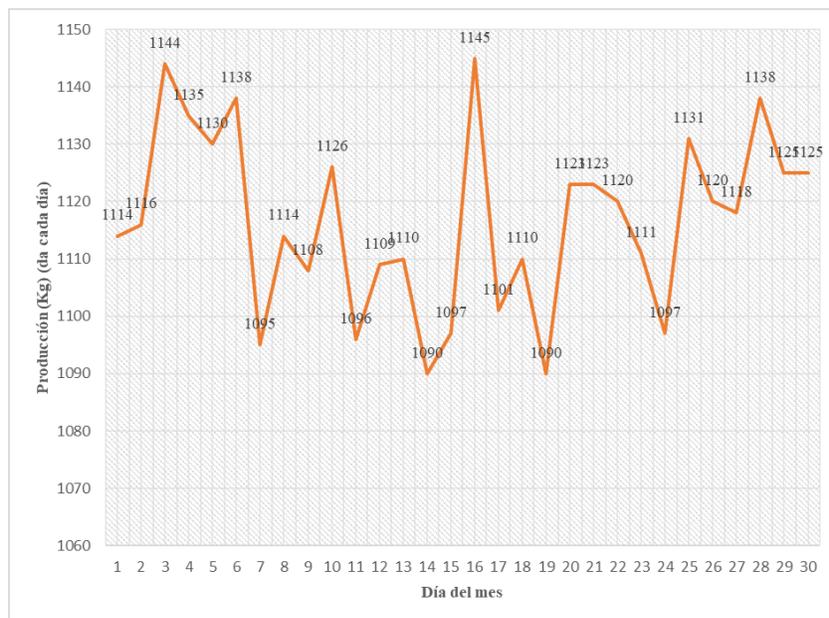


Figura 13 Producción en función del tiempo mensual

En la figura 12 se agrega una línea de tendencia para obtener la función matemática que lo modela como y el índice de correlación entre las variables, el cual, en la medida que sea más cercano a la unidad da a entender que existe una relación más directa entre las variables.

En la figura 14 se muestra un diagrama de dispersión de la producción en función del tiempo, pero esta vez de forma mensual, esto con el fin de analizar el comportamiento de la producción acumulada de la máquina en el intervalo de 30 días de trabajo.

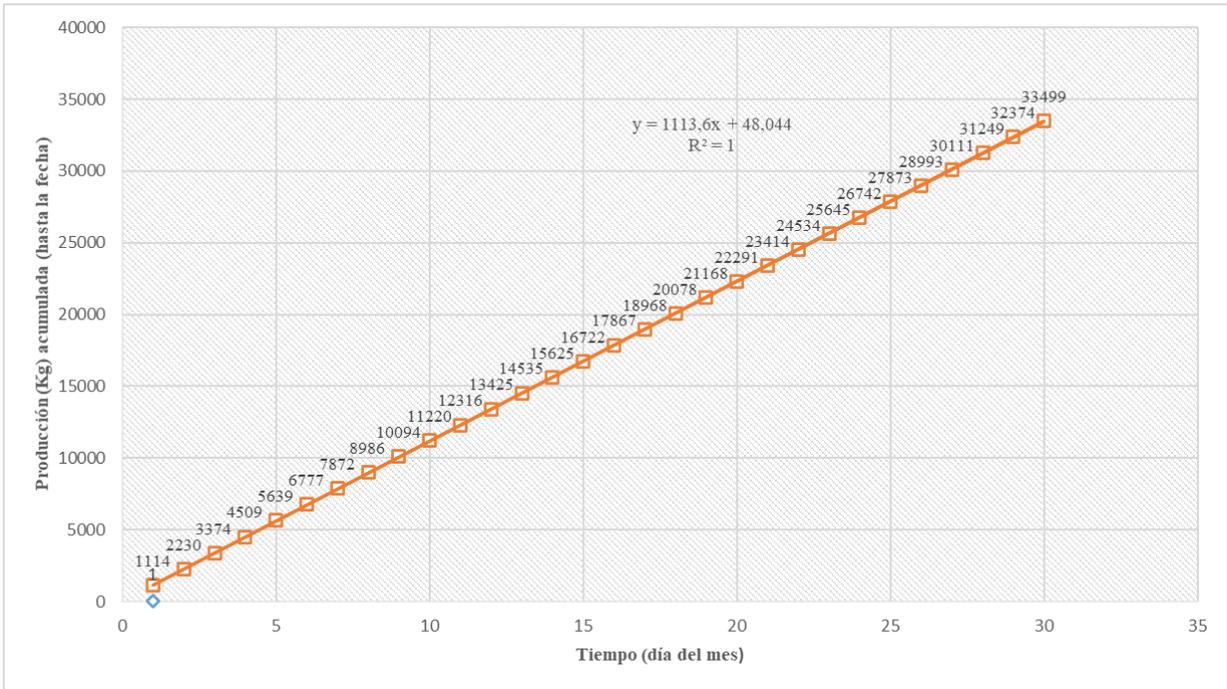


Figura 14 Dispersión de Producción en función del tiempo mensual

Como parte del análisis de las variables es importante definir el índice de consumo energético “ $I_c$ ”, pues este índice hace referencia a la cantidad de energía eléctrica consumida por la máquina por cada kilogramo de producto terminado. [16] Matemáticamente, este valor corresponde al cociente entre la energía consumida por máquina y los Kilogramos obtenidos como producto terminado con esa energía, así, el índice de consumo se define como:

$$I_c = \frac{E}{P} \tag{2}$$

Donde:

$$I_c = \text{Índice de consumo energético} \left( \frac{kWh}{kg} \right)$$

$E$  = Energía consumida por la máquina (kWh)

$P$  = Kilogramos fabricados por la máquina con esa energía (kg)

Por lo anterior, es posible usar los datos de la columna de la derecha de la tabla 1 en el eje de las ordenadas de un plano cartesiano y en las abscisas, asignar el nivel de producción en Kilogramos con el fin de obtener un diagrama de dispersión de índice de consumo vs. Producción ( $Ic$  vs  $P$ ). Este diagrama ayudará a establecer el costo actual de energía por unidad de producto, además, informa el índice de correlación de las variables y la función matemática lineal que modela el diagrama. La importancia de estos diagramas radica en que sus resultados proveen información acerca del nivel de dependencia entre las 2 variables.

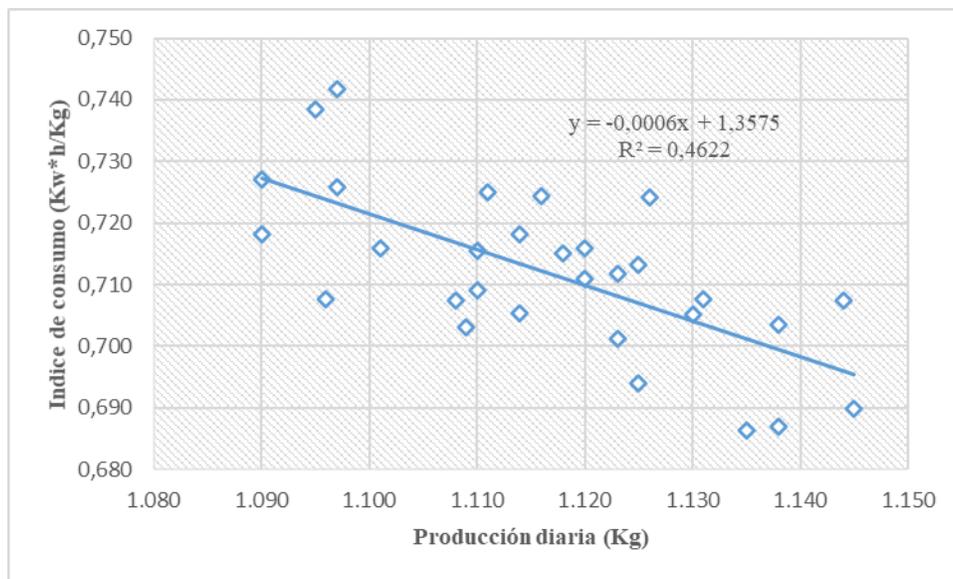


Figura 15 Dispersión del Índice de consumo  $Ic$  en función de la producción  $P$

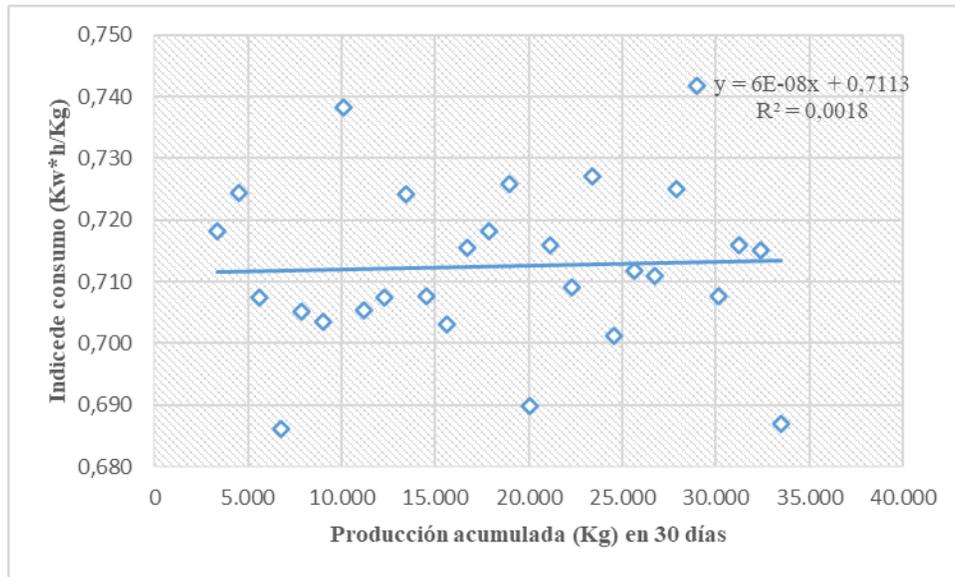


Figura 16 Dispersión de Índice de consumo en función de la producción mensual

### 6.3 Determinación de los requerimientos energéticos de la máquina

A partir de los comportamientos mostrados en las figuras 10 y 11, fue posible obtener el promedio aritmético de los todos datos discretos de potencia medidos en campo, estos datos son representativos del consumo de esta variable. Con base en lo anterior se establece que el promedio de consumo para 30 días observados en esta máquina es de:

$$33.114,43 \text{ Watt} = 33,114 \text{ kW} = 44,4 \text{ HP}$$

Con esto se deduce que la máquina en promedio opera al  $33,114 \text{ kW} / 42,50 \text{ kW} = 77,9\%$  de su potencia nominal, lo que sugiere un diseño adecuado. Por otro lado, analizando los datos Figura 10 de potencia en función de la hora del día y la Figura 11 de la potencia en función del día de trabajo, se puede deducir que los picos de potencia son a las 11:00 a.m. con un valor de  $34.436,9 \text{ W} = 34,437 \text{ kW} = 46,181 \text{ HP}$  y el día 10 del mes observado con un valor de  $33.979,5 \text{ W} = 33,979 \text{ kW} = 45,566 \text{ HP}$ , respectivamente. Por lo anterior, se deduce que el pico más alto de potencia instantánea de la máquina es de  $34,437 \text{ kW}$  ( $46,181 \text{ HP}$ ) y el diseño del sistema fotovoltaico debe proveer como mínimo este valor durante la operación. Al obtener el requerimiento de potencia de la máquina se

tiene el valor necesario de la energía que se debe abastecer por unidad de tiempo para la extrusora. A este valor se le aplicará un factor de seguridad de 1,25 para que el sistema fotovoltaico que se va a dimensionar sea capaz de abastecer más de los requerimientos máximos de potencia en la práctica en el momento pico. Se escoge este valor para el factor de seguridad porque permite realizar cálculos conservadores y evita exceder los costos de inversión. Se sabe que el valor pico es de:  $34,437 \text{ kW}$ , lo cual supera al valor promedio aritmético de la potencia que es de  $33,114 \text{ kW}$ , por lo tanto, aplicando el factor de seguridad a este valor se obtiene los requerimientos energéticos que los paneles solares deben cumplir:

$$34,44 \text{ kW} * 1,25 (\text{factor de seguridad}) = 43,046 \text{ kW}$$

Como se aprecia este valor supera a los  $42,5 \text{ kW}$  instalados en la máquina, pero se le concederá a la luz de la ingeniería un valor conservador con base en la experiencia. [18] Se concluye que el diseño del sistema fotovoltaico debe realizarse para un requerimiento energético de:  $43,046 \text{ kW}$  de potencia alterna.

#### **6.4 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico**

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, se debe tener en cuenta el número de motores, de resistencias eléctricas trifásicas y la potencia de consumo de los tableros eléctricos y electrónicos. [19] Se sabe que la potencia instalada en la máquina es de  $42,50 \text{ kW}$ , pero el diseño del sistema fotovoltaico se realizará para  $43,046 \text{ kW}$  que supera el consumo energético del tablero eléctrico que tiene unos dispositivos electrónicos de visualización de un consumo que no supera  $0,75 \text{ kW}$ . Para determinar el número de paneles necesarios para abastecer a la extrusora, [19] propone un procedimiento para diseño de sistemas de abastecimiento de energía de carácter autónomo, es decir, que la máquina sea abastecida de electricidad únicamente por medio de baterías que son recargadas por paneles solares, especialmente en los momentos de baja tensión o en las noches cuando la radiación solar es insignificante o nula. Para implementar el algoritmo propuesto es necesario tener como datos de entrada los siguientes parámetros [19]:

- Perfil de consumo (en potencia) de la máquina asumido constante en su régimen estacionario de operación.
- Ubicación: Km 8 Vía Ibagué Rovira latitud aproximada de  $4.433^\circ$  [20]
- No se usarán equipos de corriente continua asociadas al sistema fotovoltaico
- Abastecimiento único hacia una máquina peletizadora de:  $43,046 \text{ kW}$  de potencia para diseño,  $33,114 \text{ kW}$  de potencia promedio requerida,  $218,64 \text{ V}$  promedio y  $151,47 \text{ A}$  promedio de consumo.
- Las baterías se instalarán para las horas de baja generación de energía proveniente de los paneles, se ha seleccionado la marca: Willard, de referencia: Extrema, con un 95% de eficiencia. Ver anexo 2.
- El inversor seleccionado será marca GOODWE de referencia GW60KBF-MT con un 98.8% de eficiencia en la transformación DC/AC. Ver anexo 3.
- Máxima profundidad de descarga permitido para las baterías será de 60% para alargar la vida útil de las mismas. [19]
- Autonomía esperada de 72 horas. Se espera que las baterías puedan abastecer la máquina durante 3 días continuos estimando los días de poca o nula radiación solar.
- Voltaje de las baterías 12 V. Ver anexo 2.

Al tomar el valor de energía necesaria a obtener con los paneles, que es de  $43,046 \text{ kW}$  para el diseño, diariamente equivaldría a  $43,046 \text{ kW} * 24 \text{ h} = 1.033,107 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$ . Este valor es la cantidad que abastecer hacia las baterías, incluyendo la corrección por la eficiencia de estas que es de 95%, ahora a este se le debe restar el 3% por pérdidas en el cableado que es el máximo permitido por las normas RETIE, luego la energía necesaria para abastecer las baterías en el mes crítico del año (donde menos radiación se pueda percibir) es:

$$E_{ac} = \frac{1.033,107 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}}{0.92} = 1.122,942 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$$

Donde “*Eac*” se define como la energía necesaria para abastecer las baterías desde los paneles por el consumo energético permanente de la máquina. Todos los valores calculados en el algoritmo se deben redondear al valor superior. [19]

Para la selección de las baterías, el inversor y los paneles solares nombrados anteriormente, fue necesario investigar la disponibilidad de estos y otros dispositivos existentes en el mercado colombiano, teniendo en cuenta que la inversión debe ser la más baja posible, es decir, los criterios de selección de esos equipos son: el factor económico y sus características técnicas.[18] La experiencia práctica muestra que la radiación solar no tiene un valor constante en función de la hora del día, desde esta perspectiva es de esperarse que las horas en que los paneles solares no provean suficiente energía a la máquina, las baterías suplan la demanda energética, por tanto, las baterías deben cargarse en las horas que existe la máxima generación de energía en los paneles.

Tabla 2 Ficha técnica panel solar referencia CS6P-280P

Potencia nominal	280 W
Tensión nominal	31,3 V
Corriente nominal	8,95 A
Tensión en circuito abierto	38,2 V
Corriente de cortocircuito	9,52 A
Células por panel	60 unidades
Tipo de célula	Silicio policristalino
Dimensiones por panel	1,650 * 0,992 * 0,035 m

Fuente: ficha técnica de la empresa Canadian Solar

Teniendo en cuenta lo anterior, se ha investigado el comportamiento de la radiación solar en función de tiempo para el municipio de Ibagué, encontrando que los valores más altos se perciben entre la mitad de la mañana y el inicio de la tarde. [23] Para entender este comportamiento, es necesario definir el concepto de: “Hora Solar estándar” o bien, “HSS” por sus siglas en inglés. El valor de 1 HSS se define como la cantidad de tiempo en la que la

energía provista por el sol en forma de radiación es de  $1.000 \frac{Watt}{m^2}$ . [23] A partir de estos datos de la estación meteorológica ubicada en el batallón Rooke de Ibague se puede obtener un diagrama que permite visualizar mejor lo enunciado, tal como se aprecia en la figura 17.

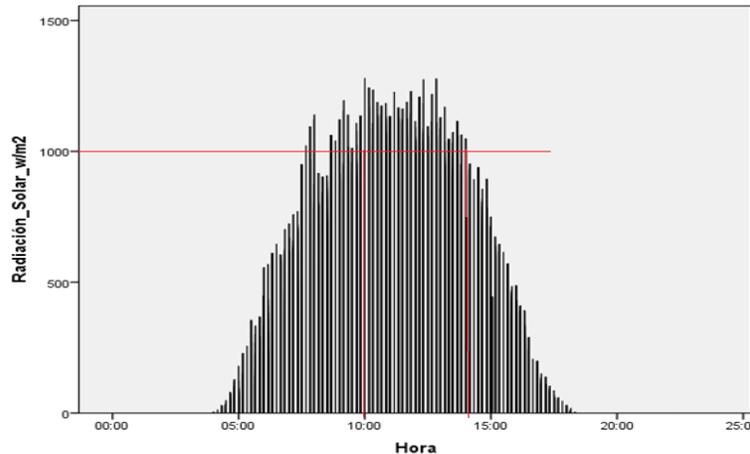


Figura 17 Radiación solar en función de la hora en el día. [23]

Según la figura anterior, para la ciudad de Ibagué se pueden lograr las HSS entre las 10:00 a.m. y las 05:00 p.m. un intervalo no superior a 5 horas. Con esta información se corrobora que el funcionamiento de la máquina debe ser garantizado por las baterías desde antes de las 10:00 a.m. y después de las 03:00 p.m. La máquina podría funcionar de forma directa con el abastecimiento de energía solar dentro de ese periodo de tiempo mientras se genera la carga de las baterías, sin embargo, existe un dispositivo que regula la carga de las baterías, este dispositivo es: “El regulador”. Un regulador de corriente es un dispositivo electrónico disponible a nivel comercial que está diseñado para realizar de manera automática lo mencionado anteriormente. En la figura 18 se muestra un ejemplo esquematizado de un montaje para un sistema autónomo. [19]

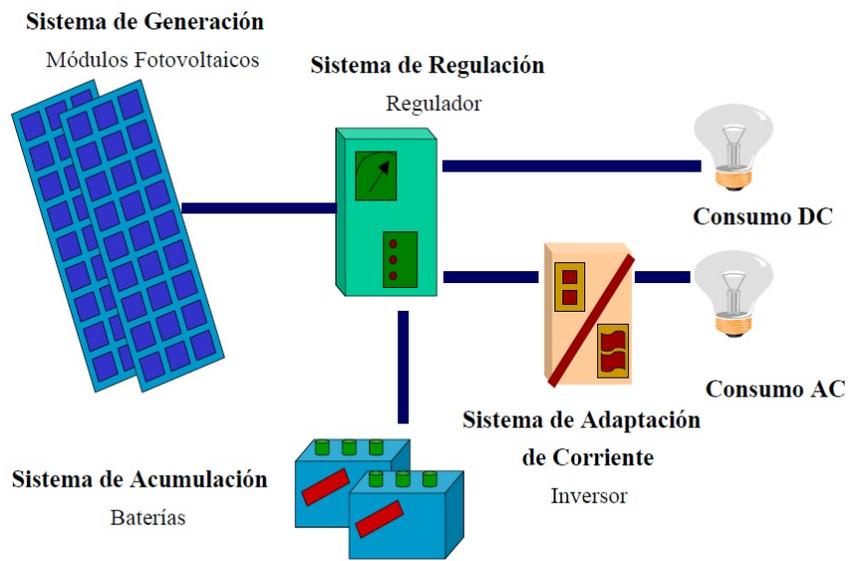


Figura 18 Esquema de los componentes de un sistema autónomo. [19]

Para el caso particular de la ciudad de Ibagué, puede estimarse que las HSS se encuentran entre las 4 y 5 horas según los reportes obtenidos por la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en el aeropuerto perales. [23] Los valores de radiación por metro cuadrado y la cantidad de HSS que se estima para Ibagué se resumen en la tabla 3.

La segunda columna de la tabla 3 informa la radiación por metro cuadrado que se puede obtener en los 12 meses del año en el municipio de Ibagué, la tercera columna informa la energía en *kWh* que se puede obtener por la radiación incidente teniendo en cuenta las HSS que apliquen para el municipio por cada día de ese mes. Estos valores son completamente necesarios en el algoritmo de cálculo para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, de hecho, la tercera columna se le conoce como la variable “Gd” en el algoritmo. [19]

Tabla 3 Radiación mensual promedio en Ibagué 2010 – 2015. [23]

Mes	Radiación solar media en el mes ( $W/m^2$ )	Energía media por metro cuadrado que se puede obtener por la radiación solar ( $\frac{kWh}{m^2 \cdot día}$ )
Enero	998	4,98
Febrero	1.012	5,12
Marzo	992	4,92

Abril	1.010	5,10
Mayo	996	4,96
Junio	956	4,57
Julio	972	4,72
Agosto	964	4,65
Setiembre	1.020	5,20
Octubre	978	4,78
Noviembre	980	4,80
Diciembre	950	4,51
Promedio	986	4,86

Datos medidos en el batallón Rooke de Ibagué

#### 6.4.1 Cálculo del ángulo óptimo “ $\beta$ ” de inclinación de los paneles

Una instalación de paneles solares fijos debe realizarse sobre una estructura metálica inclinada hacia al sur, sin embargo, el ángulo al cual deben quedar fijos los paneles todo el año sobre la estructura debe garantizar la percepción de energía necesaria para la máquina en el mes de menor disponibilidad de radiación en el año, a esta metodología de cálculo se le conoce como: “Cálculo del ángulo de inclinación óptimo para el mes crítico. [19]

El algoritmo de dimensionamiento entiende que las radiaciones mostradas en la tabla 3 son radiaciones percibidas sobre una superficie horizontal (sobre el suelo), es decir a cero grados respecto a la horizontal, sin embargo, tomando como punto de referencia esa radiación a cero grados  $0^\circ$ , es posible calcular las radiaciones a otros ángulos  $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ . Para lograr esto, es necesario aplicar las fórmulas siguientes en orden secuencial. Las siguientes ecuaciones tienen en cuenta desde la excentricidad de la tierra hasta la transparencia atmosférica para poder determinar la radiación global que puede percibir el panel solar a diferentes ángulos. [19]

Factor de corrección de la excentricidad de la órbita de la tierra.

$$E_0 = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) \quad (3)$$

$d_n$  = orden del día

Angulo diario (rad):

$$\Gamma = 2\pi \frac{d_n - 1}{365} \quad (4)$$

Declinacion solar (rad):

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos(\Gamma) + 0,070257 \sin(\Gamma) - 0,006758 \cos(2\Gamma) + 0,000907 \sin(2\Gamma) - 0,002697 \cos(3\Gamma) + 0,00148 \sin(3\Gamma) \quad (5)$$

Angulo de salida del sol (rad):

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\phi) \tan(\delta)) \quad (6)$$

Radicacion solar extraterrestre sobre superficie horizontal  $\left(\frac{kWh}{m^2}\right)$

$$G_{0d} = \frac{24}{\pi} I_{se} E_0 (\omega_s \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \sin(\omega_s)) \quad (7)$$

$I_{sc}$  = constante solar

Indice de tnsperencia atmosferica:

$$k_d = \frac{G_d}{G_{0d}} \quad (8)$$

Radiacion difusa en superficie horizontal  $\left(\frac{kWh}{m^2}\right)$

$$D_d = G_d (1,39 - 4,027 K_d + 5,531 K_d^2 - 3,108 K_d^3) \quad (9)$$

Radiacion directa en superficie horizontal  $\left(\frac{kWh}{m^2}\right)$

$$I_d = G_d - D_d \quad (10)$$

Factor de conversion geometrico:

$$R_{b,\beta} = \frac{\omega_s \sin(\delta) \sin(\phi - \beta) + \cos(\delta) \cos(\phi - \beta) \sin(\omega_s)}{\omega_s \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \sin(\omega_s)} \quad (11)$$

Radiación directa en superficie inclinada un ángulo  $\beta$   $\left(\frac{kWh}{m^2}\right)$ :

$$I_{d,\beta} = I_d R_b \quad (12)$$

Radiación difusa en superficie inclinada un ángulo  $\beta$   $\left(\frac{kWh}{m^2}\right)$

$$D_{d,\beta} = D_d \left[ (G_d - D_d) \frac{R_b}{G_{od}} + \frac{1}{2} (1 + \cos(\beta)) \frac{G_d - D_d}{G_{od}} \right] \quad (13)$$

Radiación global en superficie inclinada un ángulo  $\beta$   $\left(\frac{kWh}{m^2}\right)$

$$G_{d,\beta} = I_{d,\beta} + D_{d,\beta} \quad (14)$$

Las definiciones de todas las variables anteriores se encuentran en el glosario al inicio del documento, las ecuaciones 3 hasta 14 se pueden aplicar a cualquier ángulo “ $\beta$ ” al que se encuentre inclinado el panel. Para este caso los cálculos se realizaron para:  $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ , ángulos usados en la práctica y convertidos previamente a Radianes. [19] En la tabla 4 se aprecia el resumen de los cálculos realizados con las ecuaciones 3 al 10 para un panel solar inclinado  $0^\circ$  respecto al suelo. Una extensión de esta información y las memorias de cálculo, se encuentran en el anexo 5.

Tabla 4 Aplicación de las ecuaciones 3 al 10 para el cálculo de la radiación directa sobre un panel solar a  $0^\circ$  sobre el suelo durante los 12 meses del año

		Excentricidad	Angulo diario	Declinación	Angulo sol	radiación superficial	radiación	índice trans.	radiación difusa	radiación directa
Mes	Día	$E_o$	$\Gamma$	$\delta$	$\omega$	$G_{od}$	$G_d$	$K_d$	$D_d$	$I_d$
Ene	15	1,032	0,241	-0,371	1,541	9,563	4,980	0,521	1,763	3,217
Feb	45	1,024	0,757	-0,232	1,552	10,097	5,120	0,507	1,869	3,251
Mar	75	1,009	1,274	-0,036	1,568	10,477	4,920	0,470	1,952	2,968
Abr	105	0,992	1,790	0,165	1,584	10,421	5,100	0,489	1,936	3,164
May	135	0,977	2,307	0,326	1,597	10,063	4,960	0,493	1,868	3,092
Jun	165	0,968	2,823	0,406	1,604	9,777	4,570	0,467	1,822	2,748
Jul	195	0,968	3,340	0,381	1,602	9,837	4,720	0,480	1,830	2,890
Ago	225	0,975	3,856	0,260	1,591	10,157	4,650	0,458	1,894	2,756
Sep	255	0,990	4,372	0,078	1,577	10,392	5,200	0,500	1,926	3,274
Oct	285	1,006	4,889	-0,124	1,561	10,263	4,780	0,466	1,913	2,867
Nov	315	1,022	5,405	-0,301	1,547	9,800	4,800	0,490	1,821	2,979
Dic	345	1,031	5,922	-0,400	1,538	9,403	4,510	0,480	1,750	2,760

En la tabla 5, se presentan los resultados de los cálculos del factor de corrección “ $R_b$ ” para cada mes del año y para cada ángulo “ $\beta$ ” utilizando la ecuación 11 en cada caso. Se aplicaron los datos de la tabla 4 para aplicar la ecuación 11. [19]

Tabla 5 Cálculo del factor de corrección “ $R_{b,\beta}$ ” para  $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$

Mes	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Ene	1,108	1,183	1,221	1,223	1,187	1,115
Feb	1,064	1,096	1,095	1,060	0,993	0,896
Mar	1,008	0,986	0,933	0,852	0,745	0,616
Abr	0,953	0,877	0,774	0,648	0,502	0,341
May	0,908	0,788	0,644	0,481	0,303	0,116
Jun	0,884	0,741	0,576	0,393	0,198	-0,003
Jul	0,892	0,756	0,597	0,421	0,231	0,035
Ago	0,927	0,825	0,698	0,550	0,386	0,210
Sep	0,977	0,924	0,843	0,737	0,608	0,460
Oct	1,033	1,034	1,004	0,943	0,854	0,739
Nov	1,085	1,138	1,155	1,138	1,086	1,001
Dic	1,118	1,202	1,250	1,259	1,231	1,164

De forma similar, se puede realizar el cálculo para los 12 meses del año de los parámetros de dimensionamiento  $I_d$ ,  $D_d$  y  $G_d$  en función del ángulo de inclinación  $\beta$  con respecto a la horizontal, esto se hace usando las ecuaciones 12 a 14 para cada mes del año y para ángulo:  $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ . [19] Los resultados se escriben como  $I_{d,\beta}$ ,  $D_{d,\beta}$  y  $G_{d,\beta}$ .

Tabla 6 Cálculo de la radiación directa “ $I_d, \beta$ ” para  $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$

Mes	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Ene	3,566	3,805	3,930	3,935	3,820	3,589
Feb	3,460	3,564	3,559	3,447	3,229	2,914
Mar	2,992	2,925	2,769	2,529	2,212	1,828
Abr	3,015	2,775	2,450	2,051	1,590	1,080
May	2,806	2,436	1,991	1,486	0,936	0,358
Jun	2,429	2,037	1,582	1,080	0,544	-0,007
Jul	2,576	2,184	1,726	1,216	0,668	0,100
Ago	2,553	2,273	1,924	1,517	1,063	0,578
Sep	3,198	3,025	2,760	2,411	1,989	1,507
Oct	2,961	2,965	2,878	2,705	2,449	2,119
Nov	3,234	3,389	3,442	3,391	3,236	2,983

Dic	3,086	3,318	3,449	3,476	3,397	3,214
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tabla 7 Cálculo de la radiación difusa “ $D_{d,\beta}$ ” para  $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$

Mes	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Ene	1,246	1,232	1,210	1,181	1,144	1,102
Feb	1,237	1,224	1,202	1,172	1,135	1,092
Mar	1,106	1,094	1,073	1,046	1,012	0,972
Abr	1,144	1,130	1,109	1,079	1,043	1,001
May	1,091	1,078	1,057	1,028	0,993	0,952
Jun	0,961	0,949	0,931	0,905	0,873	0,837
Jul	1,013	1,001	0,981	0,954	0,921	0,883
Ago	0,986	0,975	0,956	0,930	0,898	0,862
Sep	1,195	1,181	1,159	1,129	1,091	1,048
Oct	1,082	1,070	1,050	1,024	0,991	0,953
Nov	1,150	1,138	1,117	1,089	1,055	1,016
Dic	1,084	1,072	1,053	1,028	0,996	0,959

Tabla 8 Cálculo de la radiación global “ $G_{d,\beta}$ ” para  $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$

Mes	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Ene	4,811	5,038	5,140	5,115	4,964	4,691
Feb	4,698	4,788	4,761	4,618	4,364	4,005
Mar	4,098	4,019	3,842	3,575	3,224	2,800
Abr	4,159	3,905	3,559	3,130	2,633	2,081
May	3,897	3,514	3,048	2,514	1,929	1,309
Jun	3,390	2,986	2,513	1,985	1,418	0,829
Jul	3,589	3,185	2,707	2,170	1,589	0,983
Ago	3,540	3,248	2,880	2,447	1,962	1,439
Sep	4,393	4,206	3,919	3,540	3,081	2,555
Oct	4,043	4,035	3,929	3,728	3,440	3,071
Nov	4,384	4,527	4,559	4,480	4,291	3,999
Dic	4,170	4,390	4,503	4,503	4,393	4,174

Como se había escrito al inicio de esta sección, los requerimientos energéticos para la máquina se habían calculado según la eficiencia de las baterías como:  $E_{ac} = \frac{1.033,107 \text{ kWh}}{0,92 \text{ día}} = 1.122,942 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$ , esto significa que, en el mes crítico del año se debe garantizar la generación de esta energía. Aplicando el concepto de que el valor de “ $E_{ac}$ ” se debe dividir entre cada una de las radiaciones globales obtenidas en la tabla 8 para cada ángulo de inclinación del

panel y cada mes de año, se podrá encontrar el área necesaria de paneles solares, a este cociente (razón) se le conoce como la variable “ $\frac{E_{ac}}{G_{d,\beta}}$ ”. [19] En la tabla 9, se muestran los resultados de dividir  $E_{ac} = 1.796,87 \frac{kWh}{día}$  entre cada valor de la tabla 8, concluyendo que el mes crítico es junio, el cual, genera los valores máximos de área necesaria para el sistema generador por causa de la más baja radiación disponible.

Tabla 9 Cálculo de  $E_{ac}/G_{d,\beta}$  para  $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$  en cada mes del año con  $E_{ac} = 1.122,942 \frac{kWh}{día}$

Mes	10	20	30	40	50	60
Ene	233,395	222,903	218,464	219,524	226,214	239,386
Feb	239,039	234,539	235,858	243,152	257,335	280,372
Mar	274,026	279,440	292,252	314,126	348,312	400,981
Abr	270,022	287,558	315,540	358,732	426,544	539,626
May	288,149	319,595	368,422	446,630	582,231	857,813
Jun	331,243	376,070	446,904	565,823	792,055	1.353,991
Jul	312,876	352,545	414,776	517,503	706,563	1.142,219
Ago	317,258	345,731	389,894	458,908	572,410	780,231
Sep	255,630	266,973	286,539	317,222	364,529	439,547
Oct	277,754	278,319	285,822	301,185	326,473	365,637
Nov	256,169	248,055	246,287	250,651	261,682	280,828
Dic	269,295	255,772	249,392	249,350	255,641	269,058

El resultado del cociente  $\frac{E_{ac}}{G_{d,\beta}}$  se mide en metros cuadrados por día ( $\frac{m^2}{día}$ ) lo que se interpreta como la cantidad de área que se necesitaría en ese momento para garantizar la energía de la máquina. Como puede verse en la tabla 9, el mes crítico corresponde a Junio ya que, de todos los ángulos evaluados, es el mes que requería mayor área disponible de paneles solares para abastecer la cantidad de energía “ $E_{ac}$ ”, sin embargo, debe tomarse el valor de “ $\beta$ ” que minimice la cantidad de área necesaria en los paneles dentro de la misma fila de Junio, éstas condiciones se presentan para una inclinación de los paneles  $\beta = 10^\circ$ . [19]

#### 6.4.2 Dimensionado del generador fotovoltaico

El número total de módulos fotovoltaicos que se deben instalar se puede calcular a partir

de la siguiente expresión: [19]

$$N_T = \frac{E_{AC}}{P \cdot G_{d,\beta} \cdot P_G} \quad (15)$$

Donde:

$E_{AC}$  = Energía real requerida en  $\left(\frac{kWh}{día}\right)$

$P$  = Potencia (nominal) del Módulo ( $kW$ )

$G_{d,\beta}$  = Radiación Global sobre una superficie inclinada al ángulo “ $\beta$ ”  $\left(\frac{kWh}{m^2}\right)$

$P_G$  = Factor Global de Pérdidas (suele variar entre  $0,65 - 0,9 \frac{m^2}{kW}$ )

Para este caso en particular se puede escribir que:

$$E_{AC} = \frac{1033.107 kWh}{0.92 día} = 1.122,942 \frac{kWh}{día}$$

$$P_p = 280 W = 0,28 kW$$

$G_{d,\beta} = 3,390 kWh/m^2$ . Radiación global en el mes de junio con inclinación de  $10^\circ$  en la tabla 8 que está asociado al resultado de área mínima para ese mes crítico con  $\frac{E_{ac}}{G_d} =$

$331.243 \frac{m^2}{día}$  tomado de la tabla 9 para el mismo mes y ángulo de  $10^\circ$ .

$$P_G = 0.775 \frac{m^2}{kW} \text{ (asumiendo un valor promedio del rango para cálculos conservadores)}$$

$$N_T = \frac{1.122,942}{0,28 * 3.390 * 0,775} = 1.526,466 = 1.526 \text{ paneles}$$

Este es el número total de paneles que conformarán el generador fotovoltaico. Por otro lado, la tensión nominal de la batería que es de  $12V$ , debe coincidir con la tensión nominal de la instalación completa. [19] según esto, la tensión del sistema fotovoltaico debe ser de  $12V$ . Para determinar si es necesario agrupar los módulos en serie y/o en paralelo, se realiza el siguiente cálculo:

$$N_s = \frac{V_{Bat}}{V_m} \quad (16)$$

Donde:

$N_s$  = número de paneles en serie (por cada rama)

$V_{Bat}$  = tensión nominal de la batería (V), en este caso 12V.

$V_m$  = tensión nominal de los paneles (V), en este caso 31,3 V, según la tabla 2.

Aplicando la ecuación 16 a este caso en particular se tiene:

$$N_s = \frac{12}{31.3} = 0,38 \cong 1 \text{ aproximando a 1 panel por cada rama en serie}$$

Luego todos los paneles deben quedar conectados en paralelo. Una vez calculada la cantidad de paneles que estarán en serie por cada rama, se puede determinar el número de ramas que se necesitarán conectadas en paralelo, esto con el fin de suministrar la potencia necesaria, [19] de esta manera:

$$N_p = \frac{N_T}{N_s} \quad (17)$$

Siendo “ $N_p$ ” el número de ramas a conectar en paralelo. Para este caso en particular, cada rama tendrá 1 solo panel y se conectará en paralelo con los demás, pues aplicando la ecuación 17 se tiene:

$$N_p = \frac{1.526}{1} = 1.526$$

Se concluye que deben instalarse 1526 paneles solares en paralelo para el abastecimiento de potencia desde los paneles solares hacia los reguladores y luego al banco de baterías basándose en el esquema de la figura 18.[19] para determinar el área necesaria para la

instalación de los paneles, se toman los datos de la tabla 2 con las dimensiones del panel solar de:  $1.650 \times 0,992 \times 0,035 \text{ m}$ , se puede estimar que cada panel ocupa un área sobre el suelo de no menos de:  $A_{panel} = 1.650 * 0,992 * \cos(10) = 1.612 \text{ m}^2$ , sin embargo, debe tenerse en cuenta un espaciamiento entre los paneles de tal manera que la sombra de uno de los paneles no disminuya la iluminación solar sobre otro panel cercano.[24] Por lo anterior, el área mínima que se ocupará será de:  $A_{total} = 1.526 \text{ paneles} * 1.612 \frac{\text{m}^2}{\text{panel}}$ , lo cual equivale a:  $2.460,561 \text{ m}^2$ . Este cálculo ayuda a definir las dimensiones del terreno necesario, por ejemplo, si fuese cuadrado el lado debería medir  $49.604 \text{ m}$  para la instalación de los paneles, pero se debe sumar el espacio entre uno y otro con el fin de no generar sombras, teniendo en cuenta también el espacio necesario para el mantenimiento del sistema.

Existe una metodología de cálculo para de evitar que un panel solar genere sombra sobre otro disminuyendo su eficacia, aplicándola se puede decir que los paneles solares deben quedar uno al lado del otro mientras sea posible sobre una sola línea, sin embargo, si se van a poner en filas, la distancia mínima que debe existir entre ellos es:[24]

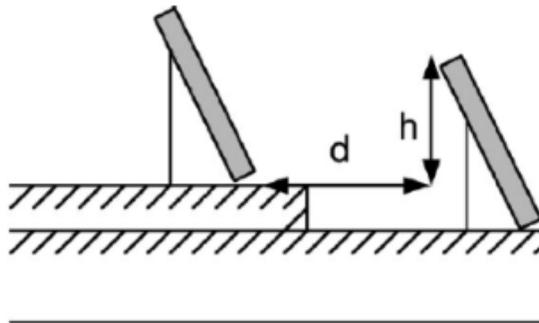


Figura 19 Distancia entre filas de paneles [24]

El valor de la distancia “d” para la separación de los paneles solares evitando la sombra entre ellos se puede calcular con la ecuación 18:

$$d = \frac{h}{\tan(61-\varphi)} \quad (18)$$

Donde:

$\varphi$  = Latitud en grados ( $^{\circ}$ ) de lugar de ubicación del panel solar

$h$  = Altura del cateto opuesto del panel de enfrente en metros ( $m$ ). Esta definición es válida siempre y cuando todas las filas de paneles se encuentren sobre una superficie horizontal plana, pues en el caso que estén escalonados, la distancia “ $h$ ” sería menor que el cateto opuesto. En este caso, según las características geométricas del panel solar mostradas en la tabla 2,  $h = 0,992 m * \sin(10) = 0,172 m$ . Aplicando la ecuación 18 se tiene:

$$d = \frac{0,172 \text{ cm}}{\tan(61-4,43)} = 0,114 \text{ m aproximable a } 11,4 \text{ cm}$$

Como puede verse, al estimar “ $h$ ” con la medida de  $0,992 m$  como hipotenusa, es porque se ha definido que el lado de  $1,650 m$  del panel se instalará tangente al suelo. Debido a que en el lugar de funcionamiento de la máquina hay un espacio rectangular de  $90 m \times 45 m$ , se puede estimar que se podrían instalar filas de:  $\frac{90 m}{1,65 \frac{m}{panel}} = 54 \text{ paneles}$  adyacentes por el lado de  $0,992 m$  uno seguido del otro sin tolerancia apreciable. Se estipulo que la hipotenusa será la distancia  $0,992 m$ , por tanto, la distancia ocupada sobre el suelo será de  $0,992 m * \cos(10) = 0,977 m = 97,7 \text{ cm}$ , si a esto se le suman  $11,4 \text{ cm}$  de distanciamiento entre filas de paneles y  $30 \text{ cm}$  como distancia para el mantenimiento de los paneles, se puede decir que cada panel ocupara sobre el suelo  $0,977 + 11,4 + 0,3 = 1,391 m$ . Para calcular cuantos paneles se necesitan por filas se toma el largo del terreno disponible y se divide en el lado del panel tangente al suelo  $\left(\frac{90 m}{1,650 m} = 54\right)$  lo que nos da un total de 54 paneles por fila, ahora se requiere saber cuántas filas serán necesarias por lo que se toma el total de paneles y se divide en el número que corresponde

a cada fila  $\left( \frac{1.526 \text{ paneles}}{54 \frac{\text{paneles}}{\text{fila}}} + 1 = 29 \right)$  lo cual corresponde a 28 filas de 54 paneles y una más con 14 restantes. Por tanto, para hallar el área total a usar incluyendo el distanciamiento entre filas de paneles se calcula como:

$$90 * (0,977 + 0,3 + 0,114) * 29 = 3.629,611 \text{ m}^2$$

### 6.4.3 Dimensionado del sistema de acumulación (baterías)

Para definir el tamaño de la batería se debe tener en cuenta la máxima profundidad de descarga y los días de autonomía.[19] En este caso, como se dijo inicialmente, la profundidad de descarga permitida sería del 60% = 0,6 y la autonomía del equipo sería de 72 horas, que es 3 días de trabajo, por tanto, usando la siguiente ecuación para determinar la capacidad de la batería se tiene:

$$\text{Capacidad bateria} = \frac{N. \text{ días autonomía} \times \text{consumo diario}}{\text{Máxima profundidad de descarga}}$$

Para este caso:

$$C = \frac{3 * 1.122,942 \frac{kWh}{\text{día}}}{0,6} = 5.614,712 \text{ kWh}$$

Este valor de “C” representa la energía que debe acumular en las baterías, por tanto, debe convertirse en Amperios por hora (Ah) para poder determinar, cuántas son necesarias para el sistema. La ecuación para convertir este valor en Amperios por hora se logra dividiendo entre el voltaje de estas, esto es: 12 V. Así:

$$5.614,712 \text{ kWh} = 5.614.712 \text{ Wh}$$
$$C = \frac{5.614.712 \text{ Wh}}{12 \text{ V}} = 467.892,663 \text{ Ah}$$

Seleccionando baterías para automóvil de 12 V que son comunes en el mercado y al más bajo precio, por ejemplo, una “Willard Extrema 850” (ver anexo 2), se pueden acumular a temperatura ambiente 850 A en 100 min, esto significa  $1.416,667 \frac{Ah}{bateria}$ , por tanto, el número de baterías necesarias para el sistema de acumulación es:

$$n = \frac{467.892,663 Ah}{1.416,667 \frac{Ah}{bateria}} = 330 \text{ baterias}$$

Se necesitan 330 baterías para el sistema. En el anexo 2 se adjunta una cotización y características de este tipo de baterías con su respectivo precio comercial.

#### 6.4.4 Dimensionado del regulador

El regulador de corriente es un equipo que se encarga de forma electrónica de controlar la corriente y voltaje DC que se dirige hacia las baterías, esto con el fin de protegerlas de sobrecargas nocivas para las mismas. Para dimensionar el regulador, se debe calcular la corriente máxima que va a circular por la instalación, por lo tanto, se habrá de calcular la corriente que produce el sistema fotovoltaico total y la corriente que consume la carga de la máquina. La máxima entre estas dos corrientes será la que deba soportar el regulador en funcionamiento.[19]

1. La corriente que produce el sistema fotovoltaico en general es la suma de las corrientes máximas que puede producir cada panel por separado (pues todos están en paralelo), especialmente en corto circuito, a partir de los datos de la tabla 2 sería:  
 $9,52 A * 1.526 Paneles = 14.531,954 A$  de corriente continua.
2. La carga máxima que puede consumir peletizadora es de 34,437 kW, pero ya se había estimado con un factor de seguridad de 1,25 que el sistema fotovoltaico debería ser capaz de producir 43,046 kW de potencia para el diseño con 220 V y 151,47 A. Esto significa que la corriente máxima de la carga que genera la maquina aun con un factor

de seguridad de 1,25 se podría estimar con la ley de Ohm.  $43.046 kW = 430460 W$ ,  
por lo que la corriente alterna sería de:  $\frac{43.046 W}{220 V} = 203,491 A$ .

Naturalmente, el regulador deberá soportar el corto circuito en la opción 1 que es el más alto con una magnitud de  $14.531,954 A$  en DC. Se recomienda incluir un factor de seguridad de 1,25 respecto de la corriente de cortocircuito del generador para acomodar la corriente excesiva causada por el aumento de irradiación que a veces producen las nubes durante cortos periodos de tiempo[21]. Entonces:  $14.531,954 A * 1,25 = 18.164,942 A$ . Debido a que comercialmente solo se pueden obtener reguladores de hasta  $60A$  DC en la entrada, será necesario estimar que se necesitan:  $\frac{18.164,942 A}{60 A} = 302,749 \approx 303$  Reguladores para poder llevar todos los Amperios de corriente hasta las baterías. Para lograr que 303 reguladores recolecten la corriente de 1.526 paneles solares, se deberá realizar la conexión en paralelo de una cantidad definida de paneles entre sí de tal manera que la corriente producida por ellos (la suma) no supere el valor de los  $60A$  DC del regulador. Esto se traduce en que para cada regulador se puede asociar máximo:  $\frac{60 A}{9,52 A} = 6$ , es decir se debe conectar máximo 6 paneles solares en paralelo por cada regulador. Como las conexiones deben realizarse en paralelo para los paneles solares esto quiere decir que cada uno de los 6 paneles solares debe ir hacia un cable común positivo y un cable común negativo que servirán de entrada al regulador. Esta configuración se muestra en la figura en la figura 20.

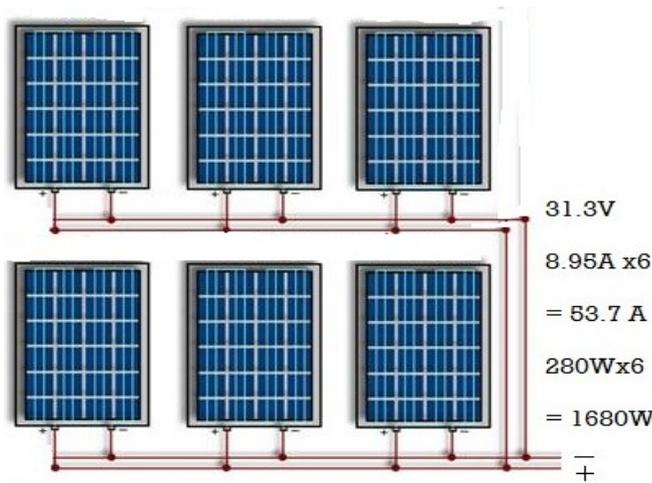


Figura 20 Conexión en paralelo de 6 paneles solares emitiendo corriente a solo 1 regulador

Estos cables comunes +/- entran al regulador y luego salen de él con una corriente de aproximadamente 53,7 A DC regulada, la cual se dirige a las baterías. A continuación, en la figura 21, se especifica un esquema de la conexión antes y después del banco de baterías.

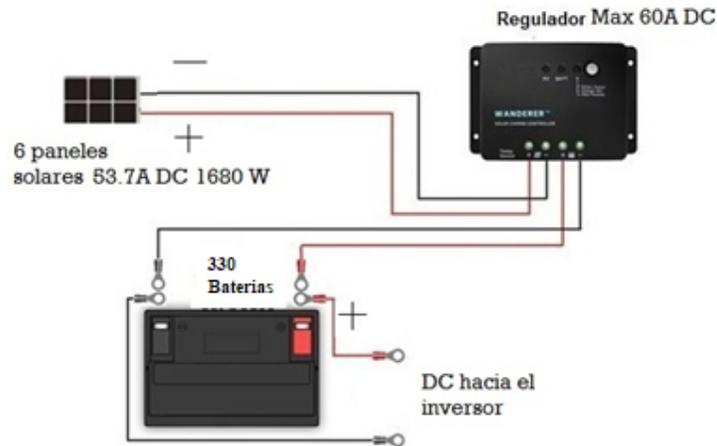


Figura 21 Esquema general de la instalación eléctrica DC: 6 paneles-1 Regulador-baterías

Esta conexión debe repetirse para cada uno de los 303 reguladores, cada uno de ellos recibiendo corriente DC de cada 6 paneles solares. Las 330 baterías estarán conectadas en paralelo entre sí con el fin de no generar diferencias de voltaje futuras entre ellas cuando se presente envejecimiento de las mismas.[19] Como se observa en la figura 21, el inversor deberá instalarse a la salida de las baterías tomando la corriente y el voltaje necesarios a

través de un cable común positivo y un cable común negativo, convirtiendo la corriente DC del banco en 3 fases de AC con 220 V que se dirigirá hacia la máquina.

#### 6.4.5 Dimensionado del inversor

El inversor es el equipo electrónico que convierte la corriente y el voltaje continuo proveniente de las baterías en corriente y voltaje AC. La metodología utilizada aconseja que se puede seleccionar un inversor cuya potencia nominal sea un poco superior a este valor para que no funcione todo el tiempo a máxima capacidad y evitar fatiga en el mismo [21], sin embargo, siguiendo la recomendación de que toda máquina debe trabajar máximo al 85% de su capacidad se decide tomar el valor de la potencia requerida y dividirla en dio porcentaje para encontrar la capacidad nominal requerida en el inversor.

$$\text{capacidad inversor} = \frac{44,768 \text{ kW}}{0,85} = 52,668 \text{ kW}$$

En el mercado se encuentran distintas opciones de inversores de 50 kW sin embargo las fichas técnicas indican que se debe garantizar una corriente de entrada por cada MPPT, en el mercado el inversor con mayor capacidad en estos MPPT puede recibir hasta 44 A y cuenta con cuatro de estos. La máquina requiere una entrada de 315 A pero solo 4 MPPT solo proporcionarían 176 A por lo que se debe calcular el numero necesarios de estos:

$$\text{MPPT necesarios} = \frac{315 \text{ A}}{44 \text{ A}} = 7,159 \approx 8 \text{ MPPT}$$

Esto quiere decir que necesitamos 2 inversores con 4 MPPT de 44 A cada uno, para este caso se ajusta el inversor de marca GOODWE referencia GW60KBF-MT con una potencia nominal de 60 kW y 620 V nominales de entrada. Por lo anterior se debe definir la configuración de los grupos de baterías que se deben conectar en serie para garantizar este voltaje,  $\frac{620 \text{ V}}{12 \text{ V/bateria}} = 51,667 \approx 52 \text{ baterias}$ , como en total se tienen 330 baterías se

tendrán  $\frac{330 \text{ baterías}}{52 \text{ baterías}} = 6,346$  grupos 6 grupos de 52 baterías y un séptimo grupo de 18 baterías, esto indican que serán 3 grupos por inversor y el séptimo que se conecta como reserva. Además, estos grupos se conectarán en paralelo para garantizar el voltaje constante

#### 6.4.6 Dimensionado del cableado DC

Según los cálculos mostrados en el anexo 6, se ha estimado necesaria un área de  $3.629,611 \text{ m}^2$  cercano a una cancha de futbol para poder organizar los paneles y obtener la potencia necesaria para la máquina, siendo así, puede preverse que la línea más larga portadora de corriente sería entre el regulador de corriente más lejano a las baterías como se muestra en la figura 22 mediante la distancia “d” sobre el grafico. Si se diseñan las instalaciones eléctricas de manera que las baterías se encuentren en la mitad del “campo de futbol”, se puede deducir que el cable más largo que puede generar la mayor caída de voltaje por su gran longitud sería la hipotenusa de la mitad de las dimensiones rectangulares del “campo”. Esto se plantea en la ecuación 19.

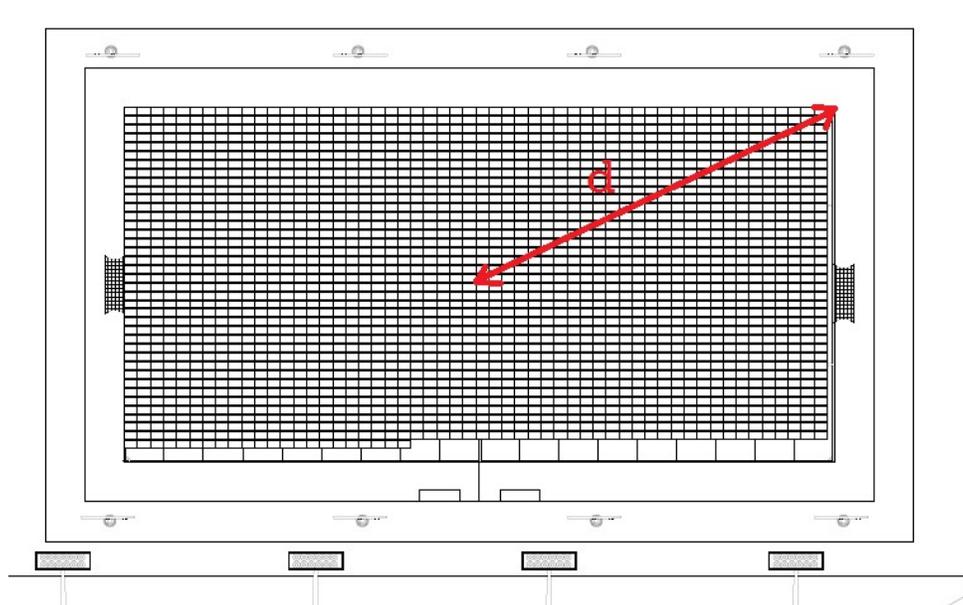


Figura 22 Distancia más larga para el cableado del circuito DC

$$H = d = \sqrt{\left(\frac{45}{2}\right)^2 + \left(\frac{90}{2}\right)^2} = 50.312 \text{ m} \quad (19)$$

La ubicación de las baterías en la zona central del campo minimizaría la longitud de cable a utilizar en el circuito eléctrico y con ello, las caídas de tensión en el circuito.[25]. Se estima que la corriente que debe transmitir este cable es la recolectada por 1 regulador por cada 6 paneles solares. Asumiendo un cableado AWG calibre 500 con área de  $253 \text{ mm}^2$ . [26], material de cobre con resistividad de:  $\rho = 2,28 \times 10^{-8} \text{ Ohm.m}$ , con revestimiento aislante termoplástico, a una temperatura de trabajo de  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  máximo, no enterrado, en Conduit de PVC, se puede usar la fórmula de la ley de Ohm para calcular cual sería la caída de tensión. Con la ecuación 20 se calcula la caída de tensión como criterio clave para la evaluación del cable seleccionado.[27]

$$\Delta V = \rho * 2L * \frac{I}{A} \quad (20)$$

Donde el valor de “ $2L$ ” se utiliza por el doble de la longitud del cable al devolverse la corriente DC por el neutro. Luego, usando los valores de este proyecto:

$$\Delta V = (2,28 * 10^{-8} \text{ Ohm.m})(2 * 50,312 \text{ m}) \left( \frac{57,120 \text{ A}}{253 * 10^{-6} \text{ m}^2} \right) = 0,518 \text{ V}$$

Comparando el anterior valor  $\Delta V$  con  $31.3 \text{ V}$  que proveen el grupo de 6 paneles solares, esto corresponde al:  $\frac{0,518}{31,3} * 100 = 1,655 \%$  de caída de voltaje cumpliendo con la norma del RETIE que debe ser menor a 3% para instalaciones industriales.[25] Además del cable de longitud crítica, existe un cableado de intensidad de corriente crítica DC que se instalará entre las baterías y el inversor. Según la figura 22, se puede verificar que dicha distancia sería de:  $\frac{45}{2} = 22,5 \text{ m}$ . Naturalmente, el cable AWG 500 podría soportar esa longitud, pero no necesariamente la cantidad de corriente, incluso, podría estar sobredimensionado para tan corta distancia. Como la máquina consume en promedio:  $33,11 \text{ kW}$  AC de potencia,  $218,64 \text{ V}$  promedio AC y  $151,47 \text{ A}$  AC como requerimientos de consumo según los datos

recolectados, sin embargo, el generador fotovoltaico se diseñó para una potencia de  $43,046 \text{ kW}$  lo que se traduce con un voltaje de  $218,64 \text{ V}$  y en unos  $315 \text{ A AC}$  después del inversor como requerimientos máximos.

Entonces como el cableado entre baterías antes del inversor debe estar capacitado para conducir esta cantidad de corriente para cada MPPT ( $44 \text{ A}$ ). Usando la ecuación 20 para despejar el área necesaria del cableado de DC antes del inversor, con un 1,5% de caída de voltaje permitida,  $620 \text{ V}$  que se deben obtener de las baterías según la ficha técnica del inversor,  $40 \text{ A DC}$  de circulación por cada MPPT, temperatura máxima de trabajo  $70^\circ\text{C}$  y longitud de cable  $22.5 \text{ m}$ , se tiene:

$$A = \rho * 2L * \frac{I}{\Delta V} \text{ Ecuación 20 despejada}$$
$$A = (2,28 * 10^{-8} \text{ Ohm.m})(2 * 22,5 \text{ m}) \left( \frac{44 \text{ A}}{0,015 * 620 \text{ V}} \right)$$
$$A = 4,854 * 10^{-6} \text{ m}^2 = 4,854 \text{ mm}^2$$

La necesidad la cubre un cable 10 AWG que se ubicara entre las baterías y el inversor, que cuenta con  $5,26 \text{ mm}^2$  de área disponible para transmisión de corriente.[26]

#### 6.4.7 Dimensionado del cableado AC

Según el esquema que se propone en la figura 22, el cableado que hay entre las baterías y el inversor, y el cable que conecta el inversor y la máquina peletizadora, NO son críticos por longitud, porque el inversor y la máquina estarán a 5 metros de distancia, sin embargo, el cableado entre el inversor y la máquina debe soportar gran cantidad de corriente alterna lo que lo hace crítico en este concepto.

Según los datos tomados como máximo la corriente es de  $315 \text{ A AC}$ . El área necesaria para que el cableado soporte tal cantidad de corriente se puede calcular haciendo uso del concepto de la impedancia “Z” la cual tiene en cuenta la resistencia inductiva y la resistencia capacitiva

que surgen en la transmisión de la corriente alterna y que es relevante en el momento de la selección del cable.[25] La resistencia inductiva y capacitiva surgen debido a los campos generados alrededor del cableado por causa de la conducción de la corriente alterna. La impedancia “Z” se puede calcular como:

$$Z = \rho * \frac{L}{A} + X * \tan(\varphi) \quad (21)$$

Donde:

Z = Impedancia (*Ohmios*)

$\rho$  = Resistividad del material de cobre a 70 °C (*Ohm. m*)

L = Longitud del cable (*m*)

A = Área del cableado (*m<sup>2</sup>*)

X = Reactancia total (suma de la resistencia capacitiva e inductiva en *Ohmios*)

$\varphi$  = Angulo del factor de potencia. Asociado a un factor de potencia de 0.95.

La caída de voltaje por causa del área y la cantidad de corriente a transmitir se puede calcular con la ley de Ohm como:

$$\Delta V = I * V \quad (22)$$

Para seleccionar un cable que cumpla con la condición de que la caída de tensión no sea superior al 3% [25], se puede combinar las ecuaciones 21 y 22 que:

$$\Delta V = I \left( \frac{\rho L}{A} + X \cdot \tan(\varphi) \right) \quad (23)$$

Por tanto, seleccionando un cable AWG 2/0 con longitud de cableado de 5 m y material de cobre para una temperatura máxima de 70°C, se tienen los siguientes datos:

$$\rho = 2,28 * 10^{-8} \text{ Ohm.m}$$

$$L = 5 \text{ m}$$

$$A = 67,43 * 10^{-6} \text{ m}^2. \text{ Obtenido de la referencia para un cable 2/0 AWG. [26]}$$

$$X = 0,1 \frac{\text{Ohm}}{\text{m}}. \text{ Valor general asociado a la reactancia para circuitos AC. [27]}$$

$$\text{Tan}(\varphi) = \frac{\sin(\varphi)}{\cos(\varphi)} = \frac{0,31}{0,95} = 0,326. \text{ Valores de } \sin(\varphi) \text{ y } \cos(\varphi) \text{ obtenidos del proveedor Centelsa. [25]}$$

$$I = \frac{315A}{3} = 105 \text{ A para cada línea Trifásica}$$

Sustituyendo en la ecuación 23:

$$\Delta V = 105 * \left[ \frac{(2,28 * 10^{-8})(5)}{67,43 * 10^{-6}} + 0,1 * \tan\left(\frac{0,31}{0,95}\right) \right] = 3,731 \text{ V}$$

Esta caída de voltaje corresponde a un porcentaje de  $\left(\frac{\Delta V}{V}\right) * 100 = \left(\frac{3,731}{220}\right) * 100 = 1,696\%$ , lo cual cumple con las condiciones RETIE.[25]

## 6.5 Determinación de los índices generales del proyecto

Como se explicó en la sección de metodologías, los cálculos de los índices asociados al consumo de energía son el camino para obtener conclusiones generales para las máquinas con funcionamiento similar a la evaluada en este proyecto para el sector industrial, es decir, para obtener conclusiones generales a partir de los resultados particulares del análisis de los datos de este caso de estudio. [16]

Como está definido previamente, son importantes los cálculos de los siguientes índices:

*a. Cálculo del índice de consumo energético promedio "I<sub>c</sub>":* el índice de consumo promedio se obtiene con la media aritmética de los valores "I<sub>c</sub>" de la tabla 1 para los 30 días de observación, en este caso corresponde a  $I_c = 0,712 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ .

Según CELSIA [28], la empresa proveedora de energía a nivel local el valor de la energía es de  $590,31 \frac{\$}{kWh}$  (para septiembre de 2019) esto con conexión de tensión nivel 1 y tarifa industrial en las horas críticas (10:00 a.m. – 12:00 m y 07:00 p.m. – 09:00 p.m.) en Ibagué. A esto se debe sumar el 20% de impuesto a la contribución, el 14% por el impuesto al alumbrado público [29], esto se traduce en un valor de  $791 \frac{\$}{kWh}$ . A partir de ello, se puede estimar que el costo energético por Kilogramo extruido es de:

$$0,712 \frac{kWh}{kg} * 791 \frac{\$}{kWh} = 553,192 \frac{\$}{kg}$$

Al multiplicar este resultado por el valor de la producción diaria o mensual que se desea, se estiman los costos de producción asociados a la energía.

*b. Cálculo del índice de consumo promedio por unidad de potencia instalada de máquina “I<sub>cp</sub>”:* Desde el punto de vista de la ingeniería mecánica, si una máquina está bien diseñada, la potencia instalada en la misma NO es equivalente al consumo energético en funcionamiento, ya que en general, en los motores eléctricos, el consumo de potencia durante la operación se espera no sea superior al 85% de su capacidad total, aunque este parámetro puede ser menor a conveniencia del diseño.[18] El *I<sub>cp</sub>* busca comparar el nivel de consumo de energía por cada kilogramo de producto terminado por potencia instalada en la máquina. Para este caso, se sabe que la potencia instalada en máquina es de 42,505 kW (57 HP), por tanto, si se define el *I<sub>cp</sub>* se puede escribir que:

$$I_{cp} = \frac{I_c}{P_{ins}} \tag{24}$$

*I<sub>cp</sub>* = Índice de consumo promedio por unidad de potencia instalada en máquina  $\left(\frac{kWh}{kg.HP}\right)$

*P<sub>ins</sub>* = Potencia instalada en la máquina (HP)

Aplicando la ecuación 24 para una máquina extrusora peletizadora de 57 HP instalados y el “*I<sub>c</sub>*” calculado previamente se tiene:

$$I_{cp} = \frac{0,712 \frac{kWh}{kg}}{57HP} = 0,0125 \frac{kWh}{kg. HP}$$

c. Cálculo del índice del número de paneles solares por caballo instalado en máquina “ $I_{p/c}$ ”:

Este índice indica a otras empresas y estudios posteriores, de forma general, la cantidad de paneles solares (de 280 W en Ibagué Tolima) necesarios por cada caballo de potencia instalado en la máquina. El  $I_{p/c}$  se define aquí como:

$$I_{p/c} = \frac{n}{P} \tag{25}$$

$I_{p/c}$  = Índice de paneles por caballo de potencia instalada en la máquina  $\left(\frac{\text{paneles}}{HP}\right)$

$n$  = Número de paneles solares necesarios para abastecer una máquina en particular

$P$  = potencia de la máquina (HP)

De esta manera aplicando la ecuación 25 se tiene:

$$I_{p/c} = \frac{1526 \text{ paneles}}{57 HP} = 26,772 \approx 27 \frac{\text{paneles}}{HP}$$

Hasta aquí se argumenta que el proyecto de cambiar la fuente de energía tradicional por una de generación solar es técnicamente viable.

## 6.6 Estudio financiero

Como se especificó en la actividad 4, se debe determinar el costo de inversión total para este proyecto y calcular los índices financieros para de determinar la viabilidad financiera.

### 6.6.1 Ingresos

Según CELSIA, [28] desde la línea de tensión, el valor de la energía es de  $590,31 \frac{\$}{kWh}$  (para septiembre de 2019) con conexión al nivel de tensión 1 y tarifa industrial en las horas críticas (10:00 – 12:00 m y 07:00 – 09:00 p.m.) en Ibagué, se debe sumar el 20% de impuesto a la contribución y el 14% por el impuesto al alumbrado público, en total es un valor de:  $791 \frac{\$}{kWh}$ . Con este dato, se determina el costo por cada kilogramo fabricado en esta máquina  $553,192 \frac{\$}{kg}$ . Debido a que la energía eléctrica solar es gratuita, el ingreso mensual del proyecto se puede asumir como el ahorro que se genera al NO pagar al proveedor de energía convencional este dinero. Con una producción promedio de  $1.116 \frac{kg}{día}$  según el anexo 1, se puede estimar que los ingresos brutos anuales del proyecto son:  $553,192 \frac{\$}{kg} * 1.116 \frac{kg}{día} * 30 \frac{días}{mes} * 12 meses = 222.250.417 \frac{\$}{año}$ .

### 6.6.2 Inversión inicial en equipos, instalación y puesta en marcha

En la tabla 10 se pueden evidenciar los valores de las cotizaciones recolectadas a nivel comercial que fueron necesarias para realizar el estudio financiero, especialmente para la estimación de los costos de inversión inicial y operativos. Los valores contenidos en dicha tabla, son el resumen de la cantidad de cada equipo necesario para la implementación del proyecto teniendo en cuenta el dimensionamiento de la sección 4 de este documento. Las cotizaciones de los equipos con su respectivo precio son el soporte para los datos mostrados.

Tabla 10 Equipos necesarios para la instalación

Dispositivo	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Inversión parcial
Panel solar	Referencia CS6P-280P de 280 W marca: Canadian Solar. Ver anexo 9.	1526	\$ 680.000	\$ 1.037.680.000
Baterías de automóvil	12 V 850 A DC marca: Willard, referencia: Extrema. Ver anexo 2.	330	\$ 280.000	\$ 92.400.000
Reguladores de corriente	Marca: ROHS de 60 A DC. Ver anexo 10.	303	\$ 249.000	\$ 75.447.000
Soldadura	Electrodo soldadura 6013 en Kg. Ver anexo 11.	83	\$ 8.900	\$ 739.000
Anclajes al suelo	Anclaje tipo estaca. Ver anexo 12.	6.104	\$ 3.725	\$ 22.737.400

Consultoría externa	Horas de asesoría para el montaje, puesta en marcha y a punto [18].	180	\$ 35.000	\$ 6.300.000
Estructura de soporte	Perfiles acero 76x38xcal14 x6m. Ver anexo 7 y anexo 13.	1036	\$ 82.200	\$ 7.260.000
Protección eléctrica	Interruptor magneto térmico para el inversor. Ver anexo 14.	2	\$ 1.056.900	\$ 2.113.800
Inversores de alta potencia	Marca: GOODWE, 3F referencia: GW60KBF-MT. Ver anexo 3 y anexo 15.	2	\$ 273.000.000	\$ 546.000.000
Caja de control	Gabinete certificado para protecciones y barrajes. Ver anexo 16.	1	\$ 348.000	\$ 348.000
Cableado eléctrico DC	Metros de 500 AWG Ver anexo 17.	8642	\$ 97.004	\$ 838.308.568
Cableado eléctrico AC	Metros de 10 AWG Ver anexo 17.	45	\$ 2.211	\$ 99.495
Cableado eléctrico AC	Metros de 2/0 AWG Ver anexo 17.	15	\$ 24.736	\$ 371.040
Pérdidas de ingresos	Kg que se dejan de producir en máquina o se pierden en pruebas [18]	33.480	\$ 3600	\$ 120.528.000
<b>Total</b>				<b>\$ 2.762.332.303</b>

Fuente: cotizaciones comerciales obtenidas

### 6.6.3 Costos operativos

Los costos del funcionamiento de un sistema fotovoltaico están asociados especialmente a lo referente a nómina (control operativo de las instalaciones), mantenimiento preventivo (limpieza y revisión de conexiones), mantenimiento correctivo (reposición de los equipos que se dañen durante el uso), revisiones técnicas externas (consultoría por daños no asociados a la garantía) y arrendamiento del terreno donde están ubicados los paneles (en caso de no ser propio).[18]

#### 6.6.3.1 Nómina y mantenimiento preventivo

Asumiendo que es necesario un técnico en mecánica permanente para que realice el mantenimiento preventivo de limpieza y revisión de conexiones, de la operación del sistema completo con un salario integral presupuestado en 3 SMMLV por mes para 2.020. En la tabla 11 se tiene que al año el presupuesto de nómina es:[30] [31]

Tabla 11 Nomina y mantenimiento preventivo para 2020

SMMLV (2020)	\$ 877.803
Técnicos	1
Salario Base (3SMMLV)	\$ 2.633.409
Subsidio de transporte	\$ -
Prima	\$ 219.451
cesantías	\$ 219.451
interés sobre cesantías 12%	\$ 26.334
Seguridad social - salud 8.5%	\$ 223.840
Seguridad social - pensión 12%	\$ 316.009
Seguridad social - Riesgo V ARL 6.96%	\$ 183.285
Parafiscales - caja de compensación 4%	\$ 105.336
Parafiscales - ICBF 3%	\$ 79.002
Parafiscales -Sena 2%	\$ 52.668
<b>Total, mes</b>	<b>\$ 4.058.786</b>
<b>Total, año</b>	<b>\$ 48.705.426</b>

### 6.6.3.2 Mantenimiento correctivo

La vida útil del sistema en general se estima en 25 años según la garantía del fabricante de los paneles, por tanto, en el transcurso de 25 años se asume que NO se han de reponer los módulos fotovoltaicos, pero probablemente sí las ya que la vida útil de una batería es de 4 años. El costo operativo por reposición de baterías se puede apreciar en la tabla 12

Tabla 12 Mantenimiento correctivo - reposición de baterías

Numero baterías	330
Costo batería	\$ 280.000
Costo total baterías	\$ 92.400.000
Vida útil batería (años)	4
Vida útil sistema (años)	25
Veces de cambio de baterías	6

Costo por reposición de baterías (\$/año)	\$ 23.100.000
--	---------------

### 6.6.3.3 Revisiones técnicas externas

Esto hace referencia a que se espera que la empresa que realizó la consultoría de puesta en marcha y a punto, puede realizar intervenciones al menos una vez por año para solucionar problemas que se generen con el funcionamiento del sistema durante este tiempo, esto debido a que quienes realicen el montaje son quienes más conocen el sistema de generación fotovoltaica. En la tabla 13 se aprecia que la consultoría externa podría tener un presupuesto de:  $6.300.000 \frac{\$}{\text{año}}$ . [18]

Tabla 13 Presupuesto Revisión técnica externa

Revisión técnica por año	1
Vida útil sistema (año)	25
Costo revisión técnica (\$/año)	\$ 6.300.000
Total, revisión técnica (25 años)	\$ 157.500.000

### 6.6.3.4 Arrendamiento del terreno

Se estima la necesidad de una superficie equivalente a la de un campo de fútbol para realizar el montaje de los paneles solares. El valor del arrendamiento del terreno es un rubro negociable que depende del estrato y la ubicación de la planta. Para este caso particularmente la ubicación es la zona rural de Ibagué donde el valor por metro cuadrado es económico, de  $987 \frac{\$}{m^2}$ , [18] en la tabla 14 se puede apreciar los costos por año de este rubro. Para el caso de PETRAPLAST DE COLOMBIA S.A.S, el terreno es propio, por tanto, no aplicaría.

Tabla 14 Presupuesto por arriendo de terreno en zona rural de Ibagué

Terreno	1
Zona	rural
Costo $m^2$	\$ 987

Área	4.053
Costo mensual	\$ 4.000.000
Costo año	\$ 48.000.000
Costo 25 años	\$ 1.199.999.999

En la tabla 15 se puede apreciar el total de los costos anuales mencionados anteriormente teniendo en cuenta el arriendo del terreno y sin el arriendo que corresponde al caso de estudio, ya que el terreno es propio.

Tabla 15 Total costos operativos anuales

	Sin arriendo de terreno	Con arriendo de terreno
Costo anual	\$ 78.105.426	\$ 126.105.426

#### 6.6.4 Cálculo de los índices financieros

A continuación, en la tabla 16 se definen las características de los escenarios evaluados [18] [31], seguidos de la tabla 17 que describe los resultados numéricos con la que se realizaron las estimaciones para complementar la determinación de los índices TIR, VAN y PRI en cada caso:

Tabla 16 características de los escenarios evaluados

Escenario\Variable	Eficiencia paneles	Conclusión
<b>Pesimista</b>	Disminuye 4% anual	No se puede ahorrar el 100% de los costos energéticos, y los ingresos en el tiempo son cada vez menores
<b>Normal</b>	Disminuye 3% anual	Se recupera el 100% de costos energéticos y como existe un crecimiento anual del kWh acorde al ICP (3,84%) se genera un aumento progresivo en el flujo de ingresos

<b>Optimista</b>	Disminuye 0,5% anual	Se presenta un incremento anual en el valor de la energía según el ICP generando un incremento gradual en los ahorros durante la vida útil de los paneles
------------------	----------------------	---

Tabla 17 Índices financieros para 3 escenarios técnico-financieros

Índice financiero	Pesimista**	Normal**	Optimista**
VAN	-\$ 3.219.159.877,40	-\$ 2.943.365.097,27	-\$ 1.619.223.748,87
TIR	N. A	N. A	N. A
PRI	N. A	N. A	N. A

Fuente: Anexo 18. \*N. A: No Aplica. \*\*Proyección a 25 años.

## 7. DISCUSIÓN

Las metodologías aplicadas se consideran adecuadas para la adquisición de los datos y manipulación de estos, pues, a partir de tomar los valores de las variables de la máquina en un mes típico de trabajo sin detener la producción, fue posible obtener los requerimientos energéticos para aplicar el algoritmo de cálculo y dimensionar el sistema fotovoltaico. [19]

Con los datos de la tabla 1, puede verse que aunque la potencia instalada en la maquina es de 42,505 kW (57 HP), a 220 V y 150 A AC nominales, NO significa que consuma de forma permanente esta cantidad de potencia, se aprecia en las figuras 10 y 11 que pueden existir variaciones de potencia consumida durante el proceso y que éstas variables resultan ser dependientes de las características del material que se va a procesar dentro de la máquina, características como: El punto de fusión, los contaminantes de otros materiales, la cantidad de tinta flexo gráfica en la impresión y la temperatura del medio ambiente. Es muy interesante ver que según los datos de las figuras 10 y 11 y de los datos de la tabla 1, el valor de la potencia consumida por la máquina en tiempo real siempre es inferior a los 42,505 kW instalados.

Para este caso, se puede decir desde la ingeniería que el diseño de la máquina es acorde a los requerimientos del material, ya que los motores (y dispositivos eléctricos anexos), no deberían operar de forma permanente a más del 85% de la capacidad instalada de estos.[18] Analizando la figura 8, puede destacarse que en general se presentan 2 máximos de voltaje a las 07:00 a.m. y 07:00 p.m., esto se asocia a los cambios de turno de operario. Esto puede explicarse desde la perspectiva que el operario que llega a tomar el control de la máquina, y quiere verificar que la producción tenga el ritmo de trabajo adecuado. Se debe tener en cuenta que los requerimientos energéticos se pueden analizar mejor a partir de la figura 10 (comportamiento de la potencia en el tiempo) que se origina del producto entre los datos de las figuras 8 y 9, pero esto no significa que no se deba tener en cuenta la información mostrada en la figura 9 ya que permite deducir los momentos de mayor esfuerzo de la máquina (mayor consumo de corriente), donde se evidencia que en promedio a las 11:00 a.m. se presenta dicho esfuerzo. Lo anterior para poder fundir y transportar el material dentro del tornillo sin fin simultáneamente, a su vez, está relacionado con las características del material y la velocidad con que el operario carga la máquina.

Durante la toma de datos se observa, que un operario al iniciar turno (descansado) es capaz de alimentar la máquina con mayor caudal de material por hora lo que coincide con el incremento del consumo de corriente, también se observa que, si la temperatura ambiente es mayor, la máquina requiere menos esfuerzo. Lo cual puede indicar que los meses de verano, son convenientes para la producción.

Al observar la figura 11 (comportamiento de la potencia en el mes) se aprecia un máximo el día 11, esto no debe ser periódico necesariamente, sin embargo, si es posible que durante el mes se presente un día con picos de consumo energético debido a: bajas temperaturas del medio ambiente, gran flujo de material en la máquina o por presencia de contaminantes al material, es decir polímeros diferentes al PEBD. En la figura 12 se observa un comportamiento lineal con un índice de correlación de 0,9987, similar a la figura 14 cuyo comportamiento es 100% lineal y un índice de correlación de 1 para la función que lo modela, de esto se puede interpretar que la producción de la máquina depende del tiempo de trabajo,

comportamiento muy útil en el sector productivo para modelar producciones y consumos energéticos.

Analizando la figura 13 se observan máximos en los días 3 y 16 del mes, de esto se puede deducir que, aunque la capacidad de producción nominal de la máquina es de  $50 \frac{kg}{h} = 1,200 \frac{kg}{turno}$  (de 24 horas), solo se pueden obtener como máximo entre 1,090 y  $1,145 \frac{kg}{turno}$ . Esto deja claro que los valores nominales de producción y consumo energético relacionados en la ficha técnica de una máquina cuando es comprada nueva (o de segunda mano), siempre están alejados de la realidad ya que la capacidad productiva y los consumos, se ajustan a las características de trabajo en cada lugar donde la máquina se instala.

La deducción anterior, tiene como consecuencia que el índice de consumo energético “ $I_c$ ” siempre será mayor con los valores nominales que con el calculado, afectando los costos de producción en caso de realizar cálculos con valores nominales. En consecuencia, el verdadero valor de “ $I_c$ ” dependerá de la destreza del operario, el ánimo de este, el material a fundir y la temperatura ambiente. Por otro lado, analizando la figura 15 (comportamiento del  $I_c$ ) muestra que el índice de correlación es de 0,4622 un valor muy bajo, esto muestra que el comportamiento no es lineal, aunque con tendencia a la baja en la medida que la producción por turno sea mayor. Por lo anterior se concluye que, aunque la relación entre el  $I_c$  y la producción no sigue un comportamiento lineal, los costos de producción pueden verse minimizados en la medida que la producción se acerque a la capacidad nominal de la máquina.

Se ha dicho que la capacidad instalada en la máquina es de 42,505 kW pero, según la figura 10 un pico de consumo promedio es de 34,437 kW y el promedio de los datos para 30 días según la figura 11 es 33,114 kW. A partir de estos valores de campo vale la pena destacar que:

- a) Aplicando un factor de seguridad de 1,25 al valor pico de 34,437 kW, se obtiene la potencia que deben entregar los paneles solares de (43,046 kW) que es suficiente

para abastecer los 42,505 kW instalados en la máquina, el excedente de 0,541 kW, para ayudar a cubrir las pérdidas por ineficiencia en los equipos a instalar y pérdidas por calor en el cableado.

- b) El valor de  $\frac{34,437 \text{ kW}}{42,505 \text{ kW}} = 0,810 = 81\%$  se traduce en un buen diseño y selección de los equipos debido a que la potencia consumida no se encuentra en el valor máximo permanentemente.
- c) Un factor de seguridad superior a 1,25 sobredimensionaría la cantidad de paneles solares generando un costo mayor de inversión inicial, mientras que un factor de seguridad menor a 1,25 no podría satisfacer las pérdidas por la longitud de los cables. Además, el calibre del cableado es bastante alto por la cantidad de corriente a conducir y parte de la potencia excedida se deberá utilizar para mover la corriente eléctrica a través de los cables.

Es necesario un factor de seguridad que permita superar los requerimientos superiores de la máquina en el punto pico, en especial, porque la metodología ofrece fórmulas para dimensionar y seleccionar el cableado asumiendo que la potencia generada por los paneles es suficiente para abastecer la máquina y satisfacer las pérdidas del cableado.[19] sin embargo al calcular el requerimiento diario se restó el 3% por pérdidas de cableado que es el máximo permitido según la norma. Pero básicamente la metodología asume que el exceso de potencia es capaz de mover la electricidad a través de cables que no superen el 3% de caída de potencial. De los cálculos obtenidos en el anexo 1, se puede verificar que es necesaria una captación de:  $1.122,942 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$  para abastecer 43,046 kW, y, aunque se pensaría que la cantidad de paneles solares fuese solamente dividir  $\frac{43,046 \text{ kW}}{0,28 \frac{\text{kW}}{\text{panel}}} = 153,736 \approx 154 \text{ paneles}$  (ya que cada uno genera 0,28 kW según la tabla 2), es necesario entender que la energía no se capta desde el sol con una eficiencia del 100%.

En la figura 17 queda claro que la generación energética es solo de 5 horas por día desde aproximadamente las 10:00 a.m. hasta las 03:00 p.m. donde se superan los  $1.000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Según la tabla 3, diciembre puede ser el mes más nublado y frío. Asumir 154 paneles según el

análisis directo, es un error ya que no tiene en cuenta que los paneles deben recibir más energía de la requerida por la máquina en tiempo real, porque las baterías deben recargarse para poder abastecer en las horas de baja generación y en la noche. principalmente en el mes de la más baja radiación, que según la tabla 3 corresponde a diciembre, pero corroborando con la tabla 9 es junio el mes crítico. En los resultados queda claro que, con 1.526 paneles solares y una superficie para instalación de  $4.050 m^2$  disponibles de  $3.629,611 m^2$  necesarios, este proyecto es técnicamente viable. Los cálculos demuestran que existen los equipos y es posible una configuración de ellos para abastecer la energía necesaria, pero al analizar la inversión de dinero necesario para implementarlo, el proyecto es inconcebible financieramente. Pues el capital de inversión inicial, los costos operativos y de mantenimiento, el arrendamiento del terreno (no aplica por ser propio el terreno) para instalación de los paneles, la cantidad de cable de cobre de alto calibre y nómina, superan la capacidad de generación de capital de la empresa para garantizar el flujo de caja que retorne el dinero. Si se observa la tabla 10 el problema de la alta inversión se centra en el cableado por la cantidad requerida de cable 500 AWG y los dos inversores que suman el 50% de la inversión inicial del proyecto, también se puede incluir el costo de los inversores y de las baterías que se deben cambiar cada 4 años.

En la determinación de los índices “ $I_c$ ”, “ $I_{cp}$ ” e “ $I_{c/p}$ ” puede verse que, para este proyecto, el  $I_c = 0,712 \frac{kWh}{kg}$  hace referencia a que se necesita  $0,712 kWh$  de energía para poder paletizar  $1 kg$  de material molido y que el costo unitario de producción de material reciclado de PEBD es de  $553,192 \frac{\$}{kg}$  de producto terminado. Este valor establece el precio en el mercado y la utilidad para las PYME de este sector productivo del país, pues los costos de producción más altos en este tipo de procesos están asociados a la materia prima y a la energía. El índice  $I_{cp} = 0,0125 \frac{kWh}{kg.HP}$  puede interpretarse como: para cada caballo instalado en la máquina, el costo energético es de  $0,0125 \frac{kWh}{kg}$  fabricado, lo que se traduce en que cada caballo de maquina consumirá,  $9,9 \frac{\$}{kg}$  reciclado al precio de la energía que tiene el proveedor actual, para este caso y fecha,  $791 \frac{\$}{kWh}$  incluidas las tasas impositivas. El  $I_{c/p}$  puede

determinar rápidamente la viabilidad financiera, éste es la cantidad de paneles solares por cada caballo instalado en la máquina. En este caso  $I_{c/p} = 27$ , lo que significa que cada caballo requerirá de 27 paneles solares de 280 W. Esto deja en claro que la máquina de este caso necesita demasiados paneles solares lo que implica una gran área y por ende una alta inversión financiera para poder alimentarlas con energía solar.

Finalmente, el análisis financiero muestra un ahorro de  $222.250.417 \frac{\$}{\text{año}}$ , sin embargo, este dinero no es suficiente para retornar la inversión y generar un periodo y tasa de retorno, pues el flujo de caja es negativo a causa de la alta depreciación que sufren los equipos, los costos de personal, además del mantenimiento preventivo y correctivo. La inversión inicial para este proyecto se estima en \$ 2.762.332.303 un valor muy alto para un empresario PYME, y, aunque podría pensarse que el retorno de la inversión podría darse en  $\frac{2.762.332.303 \$}{222.250.417 \frac{\$}{\text{año}}} = 12,429$  años que es menor a los 25 años de garantía que ofrece el proveedor de los paneles solares, los costos operativos y la necesidad de reposición de las baterías anulan el retorno de la inversión a través del tiempo.

Con solo estos 2 estudios realizados, el técnico y el financiero se pudo determinar a nivel ingenieril la viabilidad del proyecto, esto permitió ahorrar tiempo y dinero para un estudio económico.[17] En los resultados del estudio financiero, todos los “VAN” son negativos incluso en el escenario optimista, con lo que se concluye que la inversión nunca se recuperará.

## 8. CONCLUSIONES

Las variables que se midieron para poder determinar los requerimientos energéticos de la maquina extrusora fueron voltaje, corriente y producción en intervalos de 4 horas todos los días. Como resultado de estas mediciones se obtuvieron los promedios aritméticos correspondientes de cada variable para cada hora medida, para el día y para el mes, esto permitió identificar los picos de mayor y menor consumo de cada variable. Por ejemplo, para el caso del voltaje su pico más alto es de 220,233 V y su pico mas bajo es de 216,967 V esto

permitted to identify the work intervals of the machine for each variable, in the case of the current the interval was from 148,000 A to 157,800 A, when obtaining the product of these two it found the most valuable interval of study in this case which is the power, which varies from 32,171 kW to 34,437 kW these values are an average per day because if the scale of time is extended to the monthly level the interval is from 32,315 kW to 33,980 kW, after finishing the production it has the same variable behavior with values of  $1.090 \frac{kg}{day}$  to  $1.145 \frac{kg}{day}$ . It was also observed that normally the production has a linear behavior with respect to the amount of energy consumed by the machine. Based on the results of the data collected it was determined that the energy requirement of the pelletizer is 34,437 kW, when its design power is 42,505 kW, which is very positive because it is recommended that a machine does not work above 85% of its capacity, this value of 34,437 kW is what it consumes per hour which means that it can be assigned the units kWh.

For the dimensioning of the solar photovoltaic system a safety factor of 1.25, (by recommendations of the literature and methodology employed) [19] for the highest energy consumption (34.437 kW) in that order of ideas it was dimensioned for a value of 43,046 kW. As a result it is found that 1.526 panels of 280 W each are configured in parallel, at a distance of 41.4 cm between each row of panels with an inclination angle of 10° with respect to the ground and directed towards the south, it is estimated that the area required for the installation is 3.629,611 m<sup>2</sup>. The system is designed to give it a total of 72 hours of independence (that is, feeding only by batteries) estimating the winter days or of low solar radiation that leads to a low production of electricity, requiring a total of 330 batteries for vehicles that operate at 12 V. For the system they will need a total of 303 regulators so that 6 panels are grouped in parallel for each regulator. For the wiring of the system AWG gauge 500 is selected with a maximum working temperature of 70 °C of this cable 8642 meters will be required, in addition to this 45 m of AWG gauge 10 and 15 m of AWG gauge 2/0, these last ones also have a maximum working temperature of 70 °C. Taking into account that the system is going to generate 315 A of continuous current it is estimated that 2

inversores GW60KBF-MT de la marca GOODWE con 4 MPPT (del inglés: seguidor del punto de máxima potencia) cada uno, esto porque la ficha técnica del inversor indica que a cada MPPT le deben llegar 44 A DC; el contar con 2 inversores requiere dividir las baterías en 6 grupos de 52 baterías y un séptimo grupo de 18 baterías, es decir 3 grupos por inversor y el de 18 como reserva del sistema. Estos datos demuestran que según la metodología utilizada el sistema fotovoltaico es técnicamente viable, ya que si se puede generar suficiente energía con los paneles para los requerimientos energéticos. Al realizar el estudio financiero se encontró que no es viable ya que la inversión requerida es bastante alta, esto se puede apreciar en los valores mostrados en las tablas 10, 11, 12, 13, 14 y 15. Al hacer énfasis en la tabla 10 donde se muestra el total parcial (\$ 2.762.332.303) de la instalación para el primer mes sin tener en cuenta el valor por nómina del técnico necesario y el costo por mantenimiento preventivo y correctivo, se evidencia que en el escenario más optimista (−\$ 1,619,223,748.87) no se proyecta la recuperación de la inversión incluso a lo largo de la vida útil de los paneles (25 años), esto se aprecia en los datos de la tabla 17.

En definitiva, implementar un sistema de generación eléctrica fotovoltaica no es viable para la empresa, pues su capacidad de producción y flujo de capital no es capaz de recuperar el dinero que implica esta tecnología. En este caso los ingresos corresponden al valor de ahorro que se puede generar al no tener que pagar energía eléctrica al proveedor convencional, sin embargo, a medida que el tiempo pasa y se acerca a los 25 años de vida útil de los paneles solares, la eficiencia de conversión de energía solar va disminuyendo y, por tanto, sería necesario volver a invertir en paneles solares nuevos o recurrir de forma creciente al abastecimiento de energía convencional de la línea creando un flujo de caja que disminuye a través del tiempo, mientras los costos operacionales tendrían tendencia a incrementarse.

## **9. RECOMENDACIONES**

En el caso particular de Petraplast de Colombia S.A.S, el proyecto se considera técnicamente viable y es posible adaptar los equipos existentes para el abastecimiento de energía requerida por la máquina, además, el área necesaria para la instalación es propiedad de la empresa, la

operación de la máquina podría lograr (virtualmente) un ahorro del 100% del consumo energético en el mes. Sin embargo, para este proyecto no se recomienda la conversión desde un punto de vista financiero, al menos, con la eficiencia actual de los paneles solares.

Si alguien se plantea usar la metodología aplicada para dimensionar un sistema de generación fotovoltaica, se recomienda usar un valor de 1.25 en el factor de seguridad sobre el pico más alto de consumo de la máquina, observado previamente durante varios días de operación continua, pues la metodología asume que los excesos de potencia de diseño son suficientes para garantizar que la caída de voltaje en las líneas de tensión en el circuito DC y AC no superarán el 3% según la norma de RETIE.[19] Sin embargo, al estimar la potencia diaria este 3% de pérdidas máximas en el cableado se aconseja tenerlo en cuenta para tener cálculos más conservadores

Se recomienda al empresario extender el alcance de estudio de este proyecto, por ejemplo, evaluar que tanto influye en el ahorro las exenciones de impuestos que brinda el gobierno nacional y local por la implementación de energías verdes. Otra posibilidad es evaluar que tan viable es, desde el punto de vista energético, implementar paneles solares para el funcionamiento de la máquina durante las 5 horas de radiación estándar (10:00 a.m. a 03:00 p.m.), ya que disminuirá el número de paneles necesarios para garantizar la demanda energética de la máquina, evita los costos del sistema de acumulación de energía o de las baterías, al disminuir el número de paneles también lo hace la extensión de cableado necesario disminuyendo, todo esto llevaría que la inversión inicial sea notablemente más baja.

Se recomiendo para proyectos de investigación futuros que tengan similitud en el tema, tener en cuenta a la hora de calcular los índices financieros, las tarifas que nos impone la empresa de energía CELSIA al adaptar un sistema fotovoltaico que no sea 100% autosostenible y tenga la necesidad de seguir estando conectado a la red eléctrica.

## Referencias

- [1] L. S. V. Diaz, «Generación de energía eléctrica con fuentes renovables,» Universidad de Chile, Santiago, 2009.
- [2] A. C. Piña, «Cálculo y diseño de sistema solar fotovoltaico para uso doméstico,» Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 2014.
- [3] C. A. V. Isaza, J. C. P. Correa, L. Y. J. Zapata y L. A. García, «Consumos de energía en la industria del plástico: Revisión de estudios realizados,» *revista CEA*, vol. 1, n° 1, pp. 93 - 107, 09 09 2014.
- [4] IPSOM, «ipsom.com,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ipsom.com/soluciones/eficiencia-energetica-plastico/>. [Último acceso: 2019].
- [5] Acoplasticos.org, «Plásticos en colombia 2017-2018,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.acoplasticos.org/index.php/mnu-noti/143-ns-170907>. [Último acceso: 2019].
- [6] Dinero.com, «La Superservicios revela en qué regiones están las tarifas más altas de energía,» 17 05 2017. [En línea]. Available: <https://www.dinero.com/pais/articulo/tarifas-de-energia-mas-altas-en-colombia/245467>. [Último acceso: 2019].
- [7] www.axiomab2b.com, «Tecnología del plástico,» 06 2018. [En línea]. Available: <https://www.axiomab2b.com/wp-content/uploads/18-marzo-Mediakit-Tecnologia-del-Plastico-2019-ESP-Digital.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [8] M. G. Villavicencio, C. R. S. Castellon, I. Á. Bernal y J. M. T. Águila, «Procedimiento para instalación de un sistema fotovoltaico sobre techos en la corporación cuba ron S.A,» 03 2017. [En línea]. Available: [https://drive.google.com/file/d/16-bOPWMFHej488\\_ZW204-GZ2c-qIH3p/view](https://drive.google.com/file/d/16-bOPWMFHej488_ZW204-GZ2c-qIH3p/view). [Último acceso: 2019].

- [9] D. Oficial, “LEY 1715 DE 2014.” Accessed: Aug. 24, 2020. [Online]. Available: <http://www.comunidadcontable.com/BancoMedios/Imagenes/ley 1715 de 2014.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [10] INCONTEC, «NTC 5001:2008,» 28 05 2008. [En línea]. Available: <https://tienda.incontec.org/gp-calidad-de-la-potencia-electrica-limites-y-metodologia-de-evaluacion-en-punto-de-conexion-comun-ntc5001-2008.html>. [Último acceso: 2019].
- [11] O. P. Lamigueiro, «Energía solar fotovoltaica,» 01 2018. [En línea]. Available: <https://github.com/oscarperpinan/esf>. [Último acceso: 2019].
- [12] M. A. M. Villalobos, J. F. P. Suarez y G. O. Plata, «Control directo de potencia en sistemas fotovoltaicos conectados a la red,» *SCIELO*, n° 72, pp. 47 - 60, 2014.
- [13] J. A. G. Bolaños y J. F. F. Patiño, «Diseño de un sistema Fotoltaico de 20 kW conectado a la red,» Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2011.
- [14] O. N. Salas, R. A. P. García y J. E. V. Padilla, «La eficiencia de los nuevos materiales fotosensibles usados en la fabricacion de paneles solares,» ITECKNE, Bogotá D.C., 2018.
- [15] D. Volt, «Paneles Solares, Tipos y Eficiencias,» Delta Volt, [En línea]. Available: <https://deltavolt.pe/energia-renovable/energia-solar/paneles-solares>. [Último acceso: 2019].
- [16] E. A. Avallone y T. Baumeister, Manual del Ingeniero mecanico 9na edición, México D.F.: McGraw Hill, 2002.
- [17] C. S. Aragón, E. d. O. Pamplona y J. R. V. Medina, «La eficiencia energética como herramienta de gestión de costos: Una aplicación para la identificación de inversiones de en eficiencia energética, su evaluación económica y de riesgo,» *Revista del instituto internacional de costos*, vol. edicion especial, n° XII congreso, pp. 48 - 73, 2012.
- [18] M. D. Rojas, Evaluación de proyectos para ingenieros, Bogotá D.C.: Ecoe Ediciones, 2007.
- [19] I. M. J. E. N. Diaz, Interviewee, *Comunicación Privada*. [Entrevista]. 2019.
- [20] J. Aguilera y L. Hontoria, «Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos,» Universidad de Jaén, Andalucía, España, 2011.

- [21] R. d. C. -. M. d. m. y. energía, «Atlas de radiación solar de Colombia,» Min. Minas y energía; UPME; IDEAM, Bogotá D.C., 2005.
- [22] M. A. Abella, «Dimensionado de sistemas Fotovoltaicos,» CIEMAT, Madrid, 2011.
- [23] M. C. Padilla, Formulación y evaluación de proyectos - 2da edición, Bogotá D.C.: Ecoe Ediciones, 2011.
- [24] IDEAM, « Lista de estaciones automáticas satelitales de radiación global del ideam usadas en el atlas,» 2018. [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Anexo-Lista-de-estaciones-automaticas-de-radiacion-global-del-Ideam.pdf>. [Último acceso: 2020].
- [25] Tecnosolab, “Consejos para instalaciones fotovoltaicas.” <https://tecnosolab.com/noticias/distancia-entre-filas-de-paneles-solares/>. [Último acceso: 2019].
- [26] CENTELSA, «Regulacion de tensión en instalaciones eléctricas,» Centelsa, Yumbo, Colombia, 2005.
- [27] URUWIRE, «Dimensiones norteamericanas para cables conductores, Comparación con dimensiones europeas,» Uruwire, Montevideo, 2019.
- [28] R. d. C. -. M. d. c. y. tecnología, «Cálculo de caídas de tensión,» Ministerio de ciencia y tecnología, Bogotá D.C., 2003.
- [29] CELSIA, «Tarifas de consumo electrico para el Tolima,» CELSIA, Ibagué, 2019.
- [30] CELSIA, «Cómo entender la tarifa de energía,» CELSIA, Bogotá D.C., 2019.
- [31] Mi. de Trabajo, «Salario mínimo Colombia,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.mintrabajo.gov.co/>. [Último acceso: 2020].
- [32] DANE, «Índice de Precios al Consumidor (IPC),» DANE, Bogotá D.C., 2019.
- [33] T. -. R. Serrano, «Eficiencia del panel solar,» [En línea]. Available: <https://www.tritec-intervento.cl/productostritec/eficiencia-del-panel-solar/>.