

**MODELO DE REGRESIÓN MEDIA
CONDICIONAL PARA EVALUACIÓN DEL
TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA
ENERGÍA Y COSTO DE PRODUCCIÓN EN
PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**MODELO DE REGRESIÓN MEDIA
CONDICIONAL PARA EVALUACIÓN DEL
TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA
ENERGÍA Y COSTO DE PRODUCCIÓN EN
PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: CAROLINA DE LOS ÁNGELES CAÑIZARES SEGURA
TUTOR: CRISTIAN CRISTÓBAL CUJI CUJI

Quito -Ecuador
2023

Carolina de los Ángeles Cañizares Segura

MODELO DE REGRESIÓN MEDIA CONDICIONAL PARA EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA ENERGÍA Y COSTO DE PRODUCCIÓN EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2023

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



Carolina de los Ángeles Cañizares Segura (Y'1997). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Experimental “Provincia de Cotopaxi” de la ciudad de Pujilí. Estudiante de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en modelo de regresión media condicional para evaluación del tiempo de recuperación de la energía y costo de producción en proyectos de generación eléctrica.
ccanizaress@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Cristian Cristóbal Cuji Cuji (Y'1986 – M'03). Se graduó de Ingeniero Electrónico de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2014 y Master en Energía, Facultad de Ciencias Físicas en la Universidad Complutense de Madrid – España 2015. Actualmente es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana – Quito Ecuador.
ccuji@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
©2023 Universidad Politécnica
Salesiana QUITO - ECUADOR

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carolina de los Ángeles Cañizares Segura con documento de identificación N° 0550250401 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 23 de Octubre del año 2023

Atentamente,



Carolina de los Ángeles Cañizares
Segura

0550250401

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Carolina de los Ángeles Cañizares Segura con documento de identificación No. 0550250401, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Modelo de regresión media condicional para evaluación del tiempo de recuperación de la energía y costo de producción en proyectos de generación eléctrica”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 23 de Octubre del año 2023

Atentamente,



Carolina de los Ángeles Cañizares
Segura

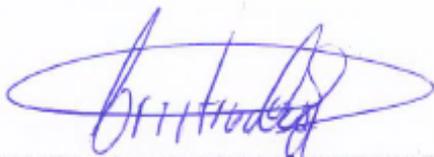
0550250401

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Cristian Cristóbal Cuji Cuji con documento de identificación N° 1718002221, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **MODELO DE REGRESIÓN MEDIA CONDICIONAL PARA EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA ENERGÍA Y COSTO DE PRODUCCIÓN EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**, realizado por Carolina de los Ángeles Cañizares Segura con documento de identificación N° 0550250401, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 23 de Octubre del año 2023

Atentamente,



Ing. Cristian Cristóbal Cuji Cuji, MSc
1718002221

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico.....	3
2.1	Energía solar fotovoltaica y evaluación del ciclo de vida	3
2.1.1	Energía solar	3
2.1.2	Evaluación del ciclo de vida (LCA)	4
2.2	Tiempo de recuperación de la energía (EPBT)	4
2.3	Economía del sistema fotovoltaico y costos de producción de energía	5
2.4	Modelo de media condicional	6
2.5	Modelo de regresión lineal	6
2.6	Tasa de amortización	7
2.6.1	Tasa de amortización del sistema francés	7
2.6.2	Tasa de amortización del sistema alemán	7
3	Desarrollo.....	7
3.1	Metodología	8
3.2	Descripciones	8
3.3	Algoritmos	8
4	Análisis de resultados	9
4.1	Consumo de energía en el ciclo de vida fotovoltaico.....	9
4.2	Recurso solar disponible	11
4.3	Simulaciones	12
4.4	Tablas de amortización	17
4.4.1	Tabla de amortización francesa	18
4.4.2	Tabla de amortización alemana	19
5	Conclusiones.....	19
6	Trabajos futuros	20
7	Referencias.....	20
7.1	Matriz de Estado del Arte	24
7.2	Resumen de Indicadores.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico conceptual del tiempo de recuperación de energía	3
Figura 2. Celda fotovoltaica.	4
Figura 3. Estructura del LCA	4
Figura 4. Consumo en los procesos de fabricación del panel fotovoltaico, desde la materia prima hasta la adquisición de las	10
Figura 5. Radiación directa vs altitud de la región sierra	11
Figura 6. Radiación directa vs altitud de la región costa.....	12
Figura 7. Gráfica de la energía consumida en la producción de cada panel	12
Figura 8. Gráfica de energía anual de cada panel en la región sierra del Ecuador. ..	13
Figura 9. Gráfica de energía anual de cada panel en la región costa del Ecuador. ..	13
Figura 10. Gráfica de EPBT de cada panel de la región sierra.	14
Figura 11. Gráfica de EPBT de cada panel de la región costa.....	14
Figura 12. Gráfica de costo de operación de la región sierra	14
Figura 13. Gráfica de costo de operación de la región costa.....	15
Figura 14. Ajuste lineal del EPBT del panel monocristalino y policristalino, región costa	15
Figura 15. Ajuste lineal del EPBT del panel monocristalino y policristalino, región sierra.....	16
Figura 16. Ajuste lineal del costo del panel monocristalino y policristalino, región costa	16
Figura 17. Ajuste lineal del costo del panel monocristalino y policristalino, región sierra.....	17
Figura 18. Costo de producción y EPBT del panel monocristalino de Cuenca.....	17
Figura 19. Costo de producción y EPBT del panel policristalino de Cuenca	18
Figura 20. Costo de producción y EPBT del panel monocristalino de Esmeraldas ...	18
Figura 21. Costo de producción y EPBT del panel policristalino de Esmeraldas	18
Figura 22. Tasa de amortización francesa de Cuenca.....	18
Figura 23. Tasa de amortización francesa de Esmeraldas	19
Figura 24. Tasa de amortización alemana de Cuenca.....	19
Figura 25. Tasa de amortización alemana de Esmeraldas	19
Figura 26. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	26
Figura 27. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.	26
Figura 28. Indicador de solución - Estado del arte	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Algoritmo de la metodología.....	8
Tabla 2. Programación de la metodología.....	9
Tabla 3. Resumen de irradiación de los sitios de la región sierra del Ecuador.	11
Tabla 4. Resumen de irradiación de los sitios de la región costa del Ecuador.	11
Tabla 5. Energía consumida en la producción de cada panel.	12
Tabla 6. Energía anual de cada panel en la región sierra del Ecuador.....	12
Tabla 7. Energía anual de cada panel en la región costa del Ecuador.	13
Tabla 8. EPBT de cada panel de la región sierra.	13
Tabla 9. EPBT de cada panel de la región costa.....	14
Tabla 10. Costo de operación de la región sierra.	14
Tabla 11. Costo de operación de la región costa.....	14
Tabla 12: Matriz de estado del arte.	24

MODELO DE REGRESIÓN MEDIA CONDICIONAL PARA EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA ENERGÍA Y COSTO DE PRODUCCIÓN EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

Resumen

El presente documento modela una central de generación eléctrica renovable con diferentes tecnologías de paneles solares, monocristalino y policristalino, y se estima el tiempo de recuperación de energía (EPBT) de cada uno de estos, además, se calcula los costos de producción y la amortización de estos costos mediante tablas de amortización francesa y alemana. La metodología empleada aplica un modelo de regresión media condicional y puede ser replicado para cualquier tipo de sistema, en este documento se ha tomado como ejemplo 20 sitios del Ecuador, 10 corresponden a la región de la sierra y 10 a la costa. Se comparará cada uno de los resultados para determinar las ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías, en función de EPBT y costos.

Palabras Clave: EPBT, costo de producción de energía, panel solar, regresión lineal, media condicional

Abstract

This paper models a renewable electricity generation plant with different technologies of solar panels, monocrystalline and polycrystalline, and estimates the energy recovery time (EPBT) of each of these, in addition, the production costs and the amortization of these costs are calculated using French and German amortization tables. The methodology used applies a conditional mean regression model and can be replicated for any type of system. In this document, 20 sites in Ecuador have been taken as an example, 10 correspond to the highland's region and 10 to the coast. Each of the results will be compared to determine the advantages and disadvantages of each of the technologies, in terms of EPBT and costs.

Keywords: EPBT, cost of energy production, solar panel, linear regression, conditional mean

1 Introducción

El presente documento, estima la inversión de energía renovable de menor costo para determinar caminos viables de reducción de emisiones [1]–[3]. Conforme incrementan los precios de los combustibles fósiles y aumentan las preocupaciones sobre las emisiones y el cambio climático, las fuentes de energía renovable para producir electricidad han recibido una mayor atención. Entre las tecnologías que pueden ayudar a abordar estas preocupaciones se encuentran las células solares fotovoltaicas (PV), que capturan la radiación proveniente del sol y la convierten directamente en energía eléctrica. Tales celdas generalmente están ubicadas en el sitio del usuario final y, por lo tanto, son una forma de generación distribuida. Esta tecnología representa una de las energías renovables más empleadas, se han producido nuevos desarrollos en lo que respecta al empleo de materiales, diseño y mejoras de dispositivos, con el objetivo de optimizar esta tecnología.

Si bien la tecnología de paneles solares representa una de las más prometedoras, en [4], aún se presenta un dilema sobre que la energía producida de un sistema fotovoltaico no amortiza la energía consumida en el proceso de creación del panel. Por otro lado, en [5] se expone que al considerar todo el período de vida de un sistema fotovoltaico, la energía consumida en la elaboración del panel representa una mínima parte de generada en total. Este tiempo de recuperación de la energía (EPBT) representa el período necesario para producir la energía que se consume durante la generación y la operación del sistema.

El EPBT contiene un factor que es sumamente relevante para su proceso, este radica en los materiales que van a utilizarse en el sistema se pueden determinar el tiempo de recuperación de energía de cualquier dispositivo. El realizar este análisis es sumamente importante para poder evaluar la rentabilidad y viabilidad de

cualquier proyecto que se planea realizar en un futuro [6].

Se calculará el EPBT para diferentes tecnologías de paneles solares (monocristalino y policristalino), ya que, la producción de estas tecnologías consumen perfiles de energía y emisiones diferentes, por ello, los costos y la eficiencia de cada uno también se ve afectada [7]. Se calculará el EPBT para 20 diferentes sitios del Ecuador, diez sitios de la región sierra y diez de la región costa, así, se determinará en qué lugar del Ecuador es más factible la implementación de sistemas fotovoltaicos para que el tiempo de recuperación de energía sea menor, además, se analizará los costos de producción y la liquidación de estos mediante la implementación de tablas de amortización francesa y alemana, así, se puede determinar que tecnología de panel solar es la más viable en cuestión de costo-beneficio [8].

La organización del documento es la siguiente: En la primera sección se aprecia la introducción del tema a tratar, la segunda sección muestra el marco teórico, donde se investiga los siguientes subtemas: energía solar fotovoltaica y evaluación del período de vida del panel fotovoltaico, tiempo de recuperación de la energía, economía del sistema fotovoltaico y costos de producción de la energía, el modelo de media condicional, el modelo de regresión lineal y las tasas de amortización francesa y alemana. En tercera sección, se aprecia el algoritmo de la metodología empleada, en la sección cuarta, se analiza los resultados donde se valida la metodología en veinte diferentes sitios del país Ecuador, por último, en la quinta sección se concluye el trabajo.

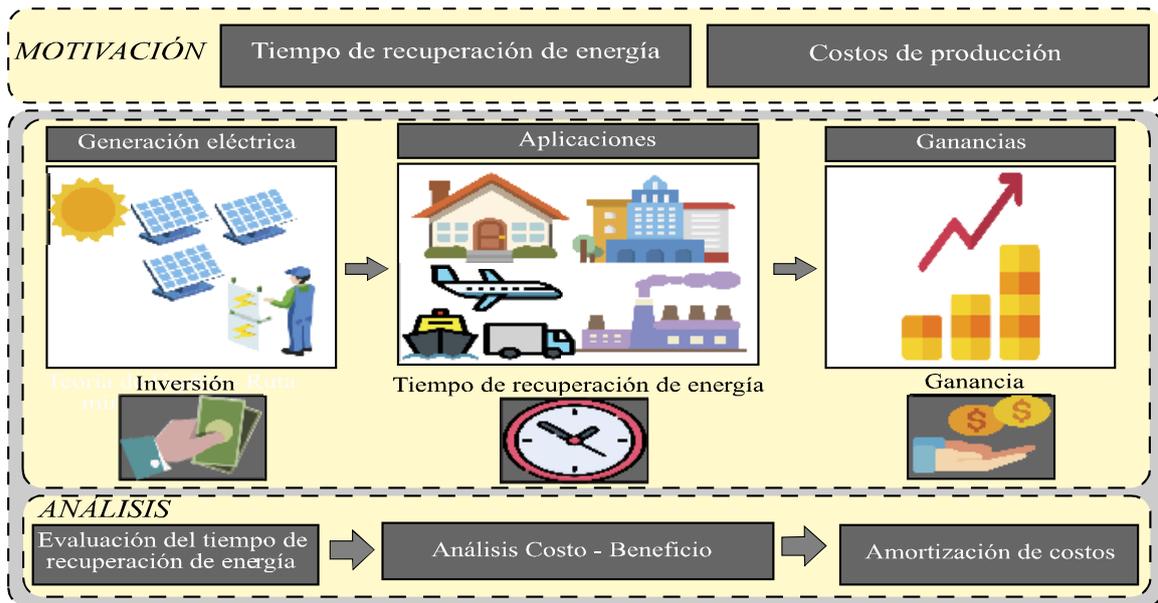


Figura 1. Gráfico conceptual del tiempo de recuperación de energía.

2 Marco teórico

El beneficio ecológico y la sostenibilidad de una nueva tecnología energética y su potencial para reducir las emisiones de CO₂ dependen sobremanera de la cantidad de energía incorporada en los materiales y procesos de producción. El EPBT es una medida de la cantidad de tiempo que un sistema de energía renovable tiene que operar hasta que se regenere la energía involucrada en su ciclo de vida completo [9].

2.1 Energía solar fotovoltaica y evaluación del ciclo de vida

2.1.1 Energía solar

El sol representa una manantial importante de energía gratuita e inagotable para el ser humano. Actualmente, se utilizan nuevas tecnologías para generar electricidad a partir de la energía solar recolectada. Estas tecnologías ya han sido validadas como una opción viable para sustituir a las fuentes de energías convencionales [10].

En teoría, el sol posee el potencial para cubrir la demanda eléctrica del mundo [11]. A pesar del potencial de la naturaleza para otorgar esta fuente inagotable, la contribución de electricidad al mundo por

esta tecnología resulta ser insignificante [12].

Por ello, se estima que la adopción de tecnologías solares reducirá los problemas asociados con la seguridad energética, el cambio climático, el desempleo, etc. [13].

La energía solar fotovoltaica (PV) representa una de las tecnologías renovables más empleadas, para mantener ese ritmo, se han producido nuevos desarrollos en el campo del diseño y mejoras de dispositivos, con el objetivo de optimizar esta tecnología [14], se puede definir esta energía como la conversión de energía solar a electricidad. Para lograr esta conversión es necesario la utilización de materiales semiconductores que contienen bandas energéticas (valencia y conducción) [15].

La función de la luz solar en el efecto fotovoltaico es otorgar energía a un electrón para realizar el traspaso de la banda de valencia a la de conducción, así se genera electricidad. En [16], se menciona que se requiere 1.12 eV para realizar este traspaso, este es el proceso de operación de todas las células solares. En la Figura 2, se muestra una celda solar típica.

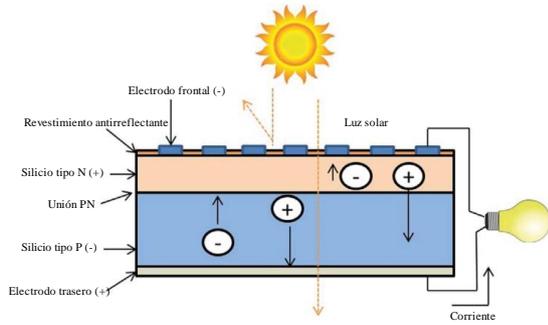


Figura 2. Celda fotovoltaica.

En comparación con las fuentes de generación convencional la tecnología fotovoltaica no trae consigo los graves problemas ambientales. Sin embargo, durante su ciclo de vida se estima un uso de energía considerable que pueden emitir emisiones en el proceso de construcción del panel [17].

2.1.2 Evaluación del ciclo de vida (LCA)

Con una mayor conciencia de la importancia del desarrollo sostenible, los procesos y productos han recibido atención en función de la posible influencia que podrían ejercer sobre los impactos ambientales existentes. Se han desarrollado herramientas de análisis y ciclo de vida para evaluar los impactos ambientales durante la vida útil de un producto [18]. Se entiende entonces que todo producto o servicio provoca, por su propia existencia, efectos y resultados en el medio ambiente que pueden vincularse al propio sistema productivo (medio o método por el cual se elabora el producto), los materiales que consume (insumos o materia prima utilizada para fabricar el producto), su uso real, su disposición o destino final elementos que describen el ciclo de vida [19].

A pesar de ser consideradas una fuente de energía limpia, la generación eólica y fotovoltaica tiene detalles en su ciclo de vida que deben ser cuidadosamente considerados, por ejemplo: los procesos de extracción de materia prima, el uso de los dispositivos, así como su disposición o reutilización [20]. Dicho cuidado está

directamente relacionado con el grado real de emisión de contaminantes que presentan estos procesos, lo que plantea interrogantes sobre el estado ambiental real de esta forma de generación de energía [21].

Con el objetivo de mejorar el desempeño ambiental de los productos durante las diversas etapas de su vida útil se aplica un sistema de gestión reconocido internacionalmente (ISO 14040: 2006 y 14044: 2006) que contribuye a las políticas públicas para reducir las emisiones y orientar las medidas de reutilización y reciclaje en varios países. Es una metodología aplicada desde la década de los sesenta [10] y permite modelar un sistema productivo con criterios y requisitos de sustentabilidad, sirviendo como sustento de datos para la formación de normas y reglamentos ambientales [7]. En [18] se presenta los principios, requisitos, directrices y estructura de la LCA que está conformado por cuatro fases, apreciar la Figura 3.



Figura 3. Estructura del LCA.

2.2 Tiempo de recuperación de la energía (EPBT)

El EPBT es el tiempo requerido para generar la energía que se consume en la creación de un dispositivo [22]. El EPBT estudia tres cuestiones relevantes en el proceso, la primera es la utilización de

materiales, la segunda las celdas de la fuente y la eficiencia de estas [23].

El parámetro EPBT puede ser empleado para diversas situaciones para conocer el tiempo de recuperación de la energía utilizada [24], en el presente documento se empleará este parámetro para perfeccionar la eficiencia de un sistema fotovoltaico. Para calcular el EPBT se emplea la siguiente ecuación:

$$EPBT_{\text{año}} = \frac{E_{in}}{E_{out}} \quad (1)$$

Donde:

E_{in} Demanda de energía de entrada

E_{out} Energía por año generada

2.3 Economía del sistema fotovoltaico y costos de producción de energía

La energía solar fotovoltaica (PV) constituye una industria solvente en todo el mundo y es ampliamente utilizada, por ello, los costos de esta tecnología han ido variando. La economía de los sistemas fotovoltaicos, que en última instancia se relaciona con el costo de la energía eléctrica producida, depende de varias variables clave:

- Costos de capital, que dependen principalmente de los costos de las fotocélulas, generalmente expresados en USUSD/Vatio-pico (USUSDD/Wp); Se define un vatio-pico como la potencia de una celda con una potencia eléctrica de 1 W sometida a una luz solar estándar de 1000 W/m².
- El tiempo anual equivalente de exposición a la luz solar (E_i), a veces llamado irradiancia del sistema, o la cantidad real de energía recibida en kWh/kWp [25]. Aunque los cálculos detallados de la insolación anual en términos de energía recibida por m² de superficie de la celda se pueden realizar y dan lugar a cálculos complejos, se ha vuelto habitual, en

los cálculos económicos de celdas fotovoltaicas, utilizar la duración anual de la insolación [25]. Esto es igual al número total de horas en un año (8760), multiplicado por un factor de carga, también llamado factor de capacidad. Si L es el factor de carga definido anteriormente, la duración anual equivalente de la insolación E_i puede expresarse como:

$$E_i = 8760 * L \quad (2)$$

Donde:

L Factor de carga

E_i Exposición a la luz solar

- Los costos de explotación de la célula, principalmente los costos de mantenimiento, ya que la célula no utiliza combustible comercializado alguno como fuente de energía primaria.
- La vida útil económica (T) del sistema, que debería ser aproximadamente igual a su vida útil técnica. En muchas evaluaciones económicas de los sistemas fotovoltaicos, se supone que la vida útil es de veinte años, pero, en los cálculos relacionados con las aplicaciones conectadas a la red y de servicios públicos, a menudo se asume una vida útil de treinta años, que corresponde a un horizonte de tiempo que también se suele suponer en cálculos de generación eléctrica convencional. Otros cálculos fotovoltaicos se realizan sobre la base de una utilidad de veinte y cinco años. Todavía no está completamente probado que la duración técnica de los sistemas fotovoltaicos pueda alcanzar los 30 años o más; aunque se han realizado algunas pruebas de duración acelerada, ninguna planta

fotovoltaica real a gran escala ha alcanzado todavía los 30 años. Muchos autores asumen una utilidad de 20 años, sin embargo, pronostican que las tecnologías futuras pueden durar 25 o 30 años [26].

Después de la instalación, el mayor costo que se espera que enfrente el propietario de un sistema solar fotovoltaico es el reemplazo del inversor [27]. Las estimaciones de tiempo medio de falla para los inversores son máximas de 10 años, por lo que asumo 8 años, lo que implica que el inversor deberá reemplazarse dos veces durante los 25 años de vida útil de los paneles, que se supone que ocurrirá en los años 8 y 16. El costo actual del inversor para un sistema de 10 kW está en el rango de USD8000 USD, pero es probable que disminuya con el tiempo. Se supone que los costos de los inversores disminuirán un 2 % por año en términos reales, de acuerdo con un estudio realizado por [28] para el Laboratorio Nacional de Energía Renovable.

2.4 Modelo de media condicional

Se puede definir este modelo como el promedio de un conjunto de datos que varía si se llegase a modificar el conjunto de datos en cuestión. También es posible considerarlo como el valor esperado de una distribución de probabilidad adjuntando el término de error [29]. La ecuación empleada para representar este modelo se muestra a continuación:

$$X_t = c + \varepsilon_t \quad (3)$$

Donde:

c Constante

ε_t Error en tiempo

X_t Predicción

La constante c ejemplifica el promedio y se alcanza por medio de la estimación de mínimos cuadrados ordinarios (MCO). En

este sentido, la predicción de X_t depende del valor medio (valor esperado) y un error de estimación.

De esta ecuación es posible obtener el error, quedando la ecuación como se muestra a continuación:

$$\varepsilon_t = X_t - \bar{x} \quad (4)$$

Donde:

\bar{x} Valor medio

ε_t Error en tiempo

X_t Predicción

2.5 Modelo de regresión lineal

El modelo general de regresión lineal de una ecuación es empleado para realizar una regresión simple (dos variables) y la regresión múltiple como subconjuntos complementarios, puede representarse de la siguiente manera [30]:

$$Y = a + \sum_{i=1}^k b_i X_i + u \quad (5)$$

Donde:

Y variable dependiente

X_i k variables independientes

a y b_i coeficientes de regresión que representan los parámetros del modelo para una población específica

u término de perturbación estocástica que puede interpretarse como resultado del efecto de variables independientes no especificadas y/o un elemento totalmente aleatorio en la relación especificada.

Por el momento, la explicación presentada se ha desarrollado como si solo hubiera un modelo de regresión general. Es importante distinguir dos modelos distintos, cada uno de los cuales se expresa en la forma de la ecuación anterior. La diferencia crítica entre estos dos modelos se refiere a la naturaleza de las variables independientes, X_i ; en uno, las X_i se mantienen constantes experimentalmente en ciertos valores fijos mientras que, en el otro, los valores de X se seleccionan al azar. Por lo tanto, dado que Y

es aleatorio en ambos modelos, el modelo 'X fijo' se caracteriza por un contraste entre X_i e Y , pues los primeros son fijos, mientras que los segundos son aleatorios; por otro lado, en el modelo 'aleatorio X', se seleccionan al azar conjuntos de valores X_i e Y de una población multivariada, o bien se extraen al azar pares de valores X e Y de una población bivariada.

La implicación de esta última diferencia es que, dado que el concepto de correlación es apropiado solo para poblaciones variadas se deduce que el análisis de correlación es válido solo en el caso del modelo 'aleatorio X'.

Hay varios objetivos de investigación para los que se puede usar el modelo de regresión, pero se pueden clasificar en tres grupos: (i) el cálculo de estimaciones puntuales, (ii) la derivación de estimaciones de intervalo y (iii) la prueba de hipótesis.

Los supuestos que deben cumplirse para la correcta aplicación del modelo varían según el objetivo de la investigación: en particular, el cálculo de las estimaciones puntuales requiere un conjunto de supuestos menos restrictivo que los demás y, por lo tanto, se propone comenzar considerando dichas estimaciones [30].

Es posible que se requieran cuatro estimaciones puntuales principales. En primer lugar, generalmente se buscan estimaciones para a y para b_i a fin de permitir la derivación de una ecuación de regresión que contenga constantes numéricas específicas. En segundo lugar, puede ser necesario predecir el valor esperado de Y correspondiente a valores específicos de X_i ; en tercer lugar, debe calcularse una estimación puntual de la varianza de Y como un paso intermedio en la obtención de estimaciones de intervalo y en la prueba de hipótesis; y en cuarto lugar, se puede obtener una estimación puntual del coeficiente de correlación, r . Puede demostrarse que las mejores estimaciones lineales no sesgadas (varianza mínima) de los parámetros de regresión se obtienen

aplicando el método de cálculo de mínimos cuadrados a los datos de muestra que se van a analizar. Además, el principio de mínimos cuadrados permite la derivación tanto del mejor predictor lineal insesgado del valor esperado de Y para valores específicos de X_i como de estimaciones insesgadas de la varianza de Y [30].

2.6 Tasa de amortización

Según [31], la amortización es un desarrollo financiero por el cual se paga una deuda en periodos, estos pueden ser iguales o diferentes. Para amortizar una deuda es posible utilizar diferentes métodos de pago, entre los más conocidos se tiene al método francés y alemán, estos serán empleados en el presente documento.

2.6.1 Tasa de amortización del sistema francés

Este método de amortizar una deuda se caracteriza por tener una cuota de pago única, es decir, durante todo el periodo de la deuda se pagará una misma cantidad, es el más utilizado dado a sus cuotas fijas asequibles [31].

2.6.2 Tasa de amortización del sistema alemán

Este método de amortizar una deuda se caracteriza por tener cuotas de pago diferentes durante todo el periodo de la deuda, se empezará pagando un valor inicial fuerte y posteriormente este irá reduciéndose hasta pagar el total de la deuda, no es el más utilizado debido al pago inicial con valores elevados, no obstante, con ello se logra una liquidación de la deuda más pronto, dado que se estará pagando capital e interés [31].

3 Desarrollo

Con el pasar del tiempo el mundo va modernizándose e incrementando su población, por ello, aumenta la necesidad de generar más energía eléctrica. Dado que los generadores convencionales contaminan

sobremano el medio ambiente se ha optado por emplear fuentes de energía renovable, siendo una de estas la energía solar que gracias a los sistemas fotovoltaicos se puede producir energía eléctrica.

La utilización de esta tecnología ha aumentado demasiado en los últimos tiempos y con ello el estudio de estos sistemas. Un punto relevante dentro de este sistema es el estudio de EPBT para conocer en cuanto tiempo se logra recuperar la energía empleada en la construcción de un panel solar, este estudio es sumamente importante para conocer desde que tiempo el sistema fotovoltaico ya compensa su gasto de energía en la realización de este.

3.1 Metodología

En este sentido, se ha empleado una metodología para conocer el EPBT de dos tipos de tecnologías de paneles fotovoltaicos, el monocristalino y el policristalino.

El tipo de metodología empleada es inductiva-deductiva, ya que, se analizarán el EPBT en diferentes lugares de estudio, también, será de tipo analítica, ya que, se pretende analizar los resultados de EPBT y se recopilará la información inicial para poder compararla posteriormente con los resultados de las simulaciones.

3.2 Descripciones

Para aplicar la metodología se ha utilizado dos softwares, MATLAB y Homer, en el primero se realiza la programación para estimar el tiempo de recuperación de energía de las tecnologías analizadas, además, de la amortización de costos que conlleva cada tecnología.

El segundo programa se emplea para encontrar los costos de producción del sistema fotovoltaico con las diferentes tecnologías de paneles solares.

3.3 Algoritmos

En la Tabla 1, se menciona el algoritmo que se siguió para obtener los resultados de

tiempo de recuperación de energía, costos de producción y la amortización de estos costos.

Tabla 1. Algoritmo de la metodología.

Algoritmo de adquisición de datos para calcular EPBT y costos	
Inicio	
Paso 1:	Determinar las zonas de Ecuador que serán analizadas según la altura y región. Sierra: 2200-3000 msnm Costa: 0-800 msnm
Paso 2:	Obtener los datos de radiación directa de las zonas elegidas, en la página Renewables Ninja [32] se puede obtener esos datos.
Paso 3:	Almacenar los datos de radiación directa
Paso 4:	Modelar dos tipos de plantas con diferentes tecnologías (monocristalina y policristalina) en el software HOMER.
Paso 5:	Ingresar los datos de las plantas en el software HOMER Monocristalino: - Eficiencia: 20% - Demanda anual: 1kWh/d Policristalino: - Eficiencia: 15% - Demanda anual: 1kWh/d
Paso 6:	Extraer los datos de costo de producción anual y el costo de operación y mantenimiento.
Paso 7:	Obtener el EPBT y guardar los datos de costos
Paso 8:	Tabular los datos de costos de producción y costos de operación y mantenimiento
Paso 9:	Obtener el costo de producción total $Ct = Cp + Com$ Donde: Ct costo total Cp costo de producción Com costo de operación y mantenimiento
Paso 10:	Obtener los resultados con la tabla francesa y alemana
Fin	

En la Tabla 2, se indica la programación que se empleó para obtener los resultados del tiempo de recuperación de energía, costos de producción y la amortización de estos costos.

Tabla 2. Programación de la metodología.

Algoritmo de adquisición de resultados de EPBT y costos de producción

Inicio

Paso 1: Entradas / Salidas
Entradas →
e_ini: . Energía consumida en la producción de cada panel
pro_sie: Producción anual de la sierra
pro_cos: Producción anual de la costa
cos_sie: Costo de producción de la sierra
cos_cos: Costo de producción de la costa
n: Variable para cálculo del EPBT
r: Variable para cálculo de regresión lineal
epbt_siemo: EPBT del panel monocristalino de la sierra
mono: panel monocristalino
poli: panel policristalino
Salidas →
epbt_siemo1: EPBT del panel monocristalino de la sierra
epbt_siepo1: EPBT del panel policristalino de la sierra
mc_epbt: EPBT del panel monocristalino
pc_epbt: EPBT del panel policristalino
mc_costo: Costo del panel monocristalino
pc_costo: Costo del panel policristalino

Paso 2: Operación del sistema
if n==1
 epbt_siemo=mono./pro_sie
 epbt_siemo1=(epbt_siemo(:,2))'
 epbt_siepo=poli./pro_sie
 epbt_siepo1=(epbt_siepo(:,3))'
 epbt_cosmo=mono./pro_cos
 epbt_cosmo1=(epbt_cosmo(:,2))'
 epbt_cospo=poli./pro_cos
 epbt_cospo1=(epbt_cospo(:,3))'
if r==1
 pop= [epbt_cosmo1 epbt_siemo1]
else if r==2
 pop= [epbt_cospo1 epbt_siepo1]
else if r==3
 pop= [epbt_cosmo1 epbt_siemo1
epbt_cospo1 epbt_siepo1]
End if
End if
End if

if c==1
pop = [cos_cosmono cos_siemono
]
else if c==2
pop = [cos_cospoli cos_siepoli]

```

else if c==3
pop = [cos_cosmono cos_siemono
]
pop = [cos_cospoli cos_siepoli]

End if
End if
End if
Else
“Gracias por su confirmación”
End if

```

Fin

4 Análisis de resultados

En el presente apartado se detalla el consumo de energía en el ciclo de vida de dos tecnologías fotovoltaicas, la primera es monocristalina y la segunda policristalina. Se calculará el EPBT para 20 diferentes sitios del Ecuador, diez sitios de la región Sierra y diez de la región Costa. Así, se determinará en qué lugar del Ecuador es más factible la implementación de sistemas fotovoltaicos para que el tiempo de recuperación de energía sea menor. Además, se analizarán los costos de producción y la liquidación de estos mediante la implementación de tablas de amortización francesa y alemana, así, se conocerá que tecnología de panel solar es la más viable en cuestión de costo-beneficio.

4.1 Consumo de energía en el ciclo de vida fotovoltaico

Al analizar el ciclo de vida de un sistema fotovoltaico es posible determinar la cuantía de energía total que es consumida en los diferentes procesos realizados para poder producir energía.

Es necesario aclarar que, si la energía empleada para la producción del material es mayor a la otorgada por este, el producto no sería viable, y, por lo tanto, su uso dentro de la industria sería limitado. Seguidamente, se menciona las etapas de utilidad de un panel fotovoltaico monocristalino y policristalino y se cuantifica la energía consumida.

En [33], se menciona que en la etapa de excavación se encuentra la arena o cuarzo, este se purifica, y se obtiene el silicio metalúrgico (Mg-Si) con una pulcritud entre 98.5% y 99.5%.

Este porcentaje es bueno para hacer procesos de aleaciones, no obstante, no es suficiente para generar energía fotovoltaica. La energía consumida para generar el mg-Si es de 11 a 13 kWh/kg del material al finalizar este proceso. A continuación, se trata al Mg-Si para adquirir el silicio de grado solar SoG-Si, en [34] se menciona que la tolerancia es por debajo de 0.01 mg/kg (ppm). El SoG-Si es transformado a

lingotes, luego a obleas que se emplean en las celdas y paneles, estas tienen un grosor estimado de $200 \mu\text{m}$ con una densidad de 2329 kg/m^3 [35]. En la Figura 4 se aprecia el consumo en el proceso de fabricación del panel fotovoltaico monocristalino y policristalino desde la materia prima hasta la adquisición de las obleas (kWhc es la energía calórica y kWh e es energía eléctrica).

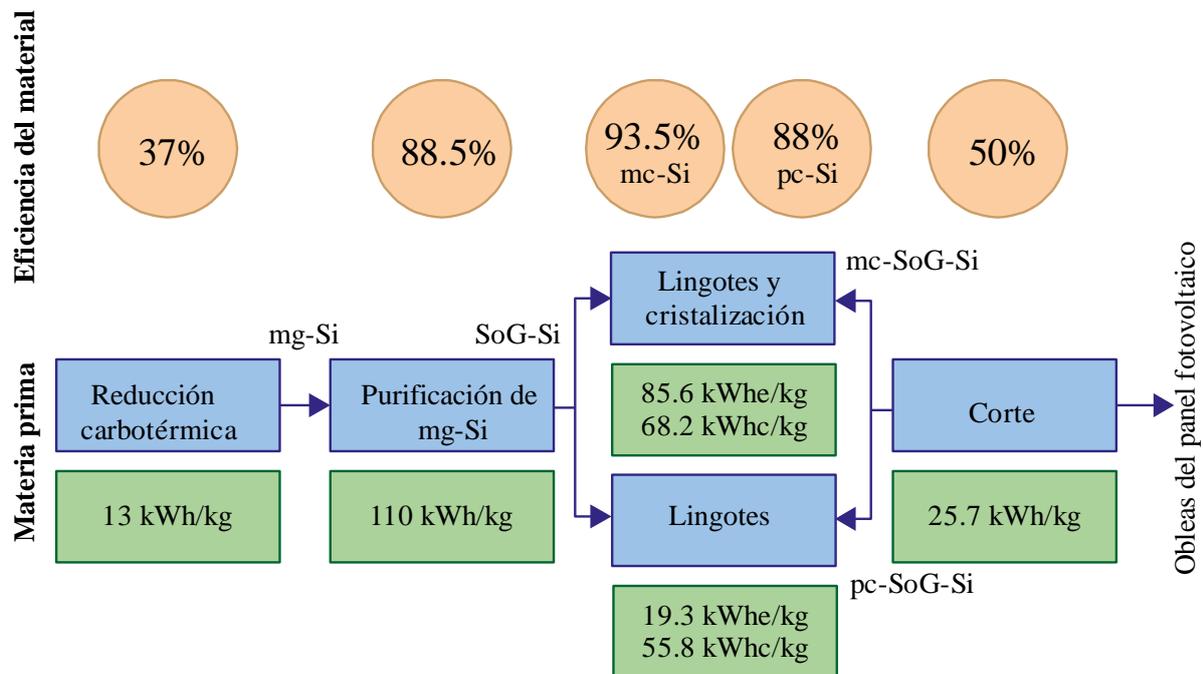


Figura 4. Consumo en los procesos de fabricación del panel fotovoltaico, desde la materia prima hasta la adquisición de las Obleas.

Cuando ya se tienen las obleas, estas deben transformarse a celdas solares fotovoltaicas, para alcanzarlo es necesario tratarlas con ácidos para eliminar los posibles daños que ocasionen los cortes, seguidamente se dopan para alcanzar la juntura p-n, se los hornea y recubre con una fina capa antirreflejo [33]. Durante este proceso se requiere una cantidad considerable de químicos y la fabricación de esta demanda mucha energía, no obstante, no se los toma en consideración por ser elementos

complementarios. En [36] se menciona que la energía consumida durante este desarrollo es de 97.5 kWh/m^2 en electricidad y 1.67 kWh/m^2 en calor. Por otro lado, la energía para la elaboración del aluminio de los bordes de los paneles corresponde a 138 kWh/m^2 y el vidrio cobertor de los paneles a 33.67 kWh/m^2 . El ensamble de todo el panel posee un valor estimado de 16.67 kWh/m^2 . Se toma en consideración en el EPBT del carburo de silicio con estimaciones de 68.61 kWh/m^2 .

En [36] también se menciona que es necesario incluir los elementos complementarios, estos son los inversores con un consumo de 134.7 kWh/kWp y en el techo de 1097.2 kWh/kWp en su fabricación. Además, es necesario tomar en consideración el consumo energético en transporte, en [37] se calcula este consumo con un total de 184.3 kWh/kWp.

Con respecto a la instalación, se considera solamente la producción de los cimientos, en [36] se indica que un sistema referencial emplea consume 0.278 kWh/kg.

El tiempo de vida útil de un panel fotovoltaico se estima de 25 años, con la finalidad de obtener un ahorro de energía se propone realizar una disposición final de los desechos. En [38], se menciona que durante este proceso se emplea 451 kWh/kWp.

4.2 Recurso solar disponible

Para la presente indagación se ha tomado como referencia veinte sitios de Ecuador, diez correspondientes a la región sierra con altitudes de entre 2200 y 3000 msnm y en diez en la región costa con altitudes de entre 0 y 800 msnm, esto con el objetivo de obtener un valor aproximado de costo de recuperación de energía en toda la región sierra y costa del Ecuador.

En la Tabla 3, se aprecia la información de latitud, longitud, altitud y radiación directa de los sitios de la región sierra del Ecuador.

Tabla 3. Resumen de irradiación de los sitios de la región sierra del Ecuador.

Sitio	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (msnm)	Radiación directa (kW/m ²)
Imbabura, Ibarra	0.347743	-78.116.991	2224	759.332
Pichincha, Sangolquí	-0.329621	-78.452.875	2497	839.052
Azuay, Cuenca	-28.974.072	790.041.726	2580	983.488
Otavalo, Imbabura	0.235261	-78.261.152	2610	729.553
Tungurahua, Ambato	-1.254.971	-78.623.888	2645	959.78
Carchi, Bolívar	0.501052	-77.905.469	2679	738.034
Tungurahua, Pelileo	-132.742	-78.542.394	2706	975.21
Chimborazo, Riobamba	-1.673.276	-78.648.248	2746	912.482
Cotopaxi, Latacunga	-0.934031	-78.614.576	2797	986.271

Pichincha, Quito	-0.282015	-78.549.491	2977	867.707
------------------	-----------	-------------	------	---------

En la Figura 5 se muestra la métrica de radiación directa versus altitud de los datos de la región de la sierra. Se aprecia que la mayor radiación se encuentra en la altitud de 2797 msnm con un valor de 986.271 kW/m², mientras que el valor más bajo en 2610 msnm con 729.553 kW/m².

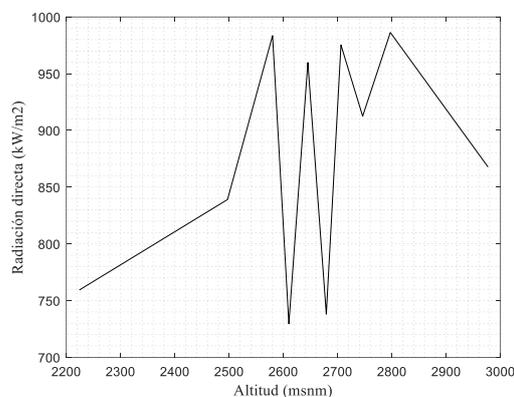


Figura 5. Radiación directa vs altitud de la región sierra.

En la Tabla 4, se aprecia la información de latitud, longitud, altitud y radiación directa de los sitios de la región costa del Ecuador.

Tabla 4. Resumen de irradiación de los sitios de la región costa del Ecuador.

Sitio	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (msnm)	Radiación directa (kW/m ²)
Guayas, Durán	-2.169.588	-79.840.644	2	1215.721
Esmeraldas, Esmeraldas	0.974065	-79.655.348	4	1065.893
Guayas, Guayaquil	-2.104.968	-79.897.122	7	1287.84
Machala, El Oro	-3.260.849	-79.957.509	8	1183.979
Chone, Manabí	-0.699564	-80.089.635	16	1203.403
Santa Elena, Santa Elena	-2.230.826	-80.866.293	39	1397.227
Manabí, Manta	-0.967564	-80.713.846	58	1258.752
Los Ríos, Quevedo	-1.014.937	-79.469.578	77	983.4
Sto. Dgo. De Tsáchilas, Concordia	0.016283	-79.379.352	209	947.099
Manabí, El Carmen	-0.270122	-79.447.755	249	1264.352

En la Figura 6, se muestra la métrica de radiación directa versus altitud de los datos de la región de la costa. Se aprecia que la mayor radiación se encuentra en la altitud de 39 msnm con un valor de 1397.23

kW/m², mientras que el valor más bajo en 209 msnm con 947.099 kW/m².

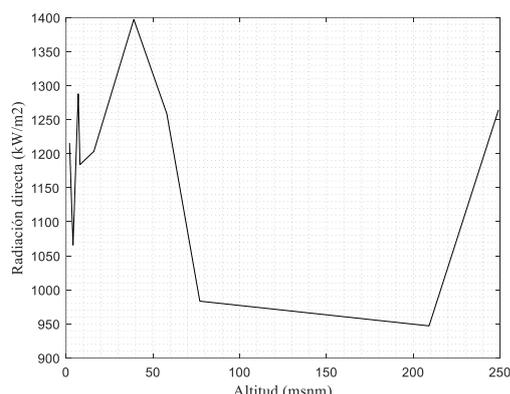


Figura 6. Radiación directa vs altitud de la región costa

4.3 Simulaciones

Se modelan y simulan dos tipos de plantas con diferentes tecnologías fotovoltaicas, la primera correspondiente a un panel monocristalino (mc-Si) y la segunda a uno policristalino (pc-Si), la principal diferencia de cada uno es la eficiencia que conllevan, el primero posee una eficiencia del 20%, mientras que el segundo de 15%. Además, la demanda promediada anual escalada para ambos casos es de 1 kWh/d. Para calcular el EPBT es necesario en primer lugar saber la energía consumida en la producción de cada panel, en la Tabla 5, se detalla esta energía consumida.

Tabla 5. Energía consumida en la producción de cada panel.

Proceso	mc-Si	Pc-Si
1 De cuarzo a mg Si	13	13
2 De mg Si a Oblea	289.5	210.8
3 De oblea a panel	644.45	644.45
4 Fabricación de inversores y soportes	2901.4	2901.4
5 Importación e instalación	184.57	184.57
6 Disposición final	451	451
Total (kWh)	4484.0	4405.3
	2	2

En la Figura 7 se evidencia un diagrama de barras donde se aprecia de mejor manera la diferencia de energía consumida en la producción de cada panel.

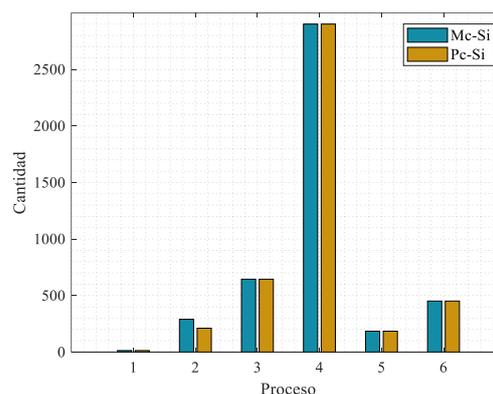


Figura 7. Gráfica de la energía consumida en la producción de cada panel

Es necesario conocer la energía anual otorgada por cada panel en los diferentes sitios de Ecuador antes mencionados, en la Tabla 6, se detalla de la región sierra.

Tabla 6. Energía anual de cada panel en la región sierra del Ecuador.

Tecnología	mc-Si	Pc-Si
Sitio	Producción anual (kWh)	Producción anual (kWh)
Imbabura, Ibarra	984	978
Pichincha, Sangolquí	972	978
Azuay, Cuenca	963	955
Otavallo, Imbabura	984	978
Tungurahua, Ambato	966	967
Carchi, Bolívar	983	978
Tungurahua, Pelileo	966	967
Chimborazo, Riobamba	966	961
Cotopaxi, Latacunga	975	966
Pichincha, Quito	972	978

En la Figura 8, se aprecia un diagrama de barras que representa la energía anual de cada panel en la región sierra del Ecuador.

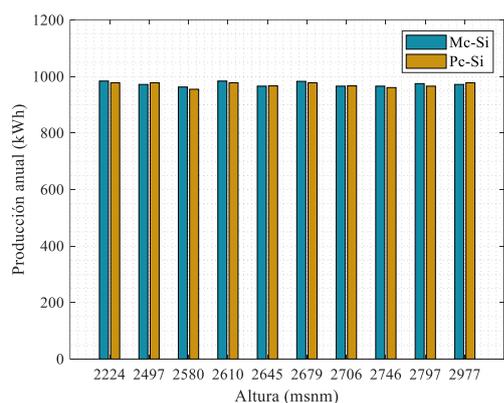


Figura 8. Gráfica de energía anual de cada panel en la región sierra del Ecuador.

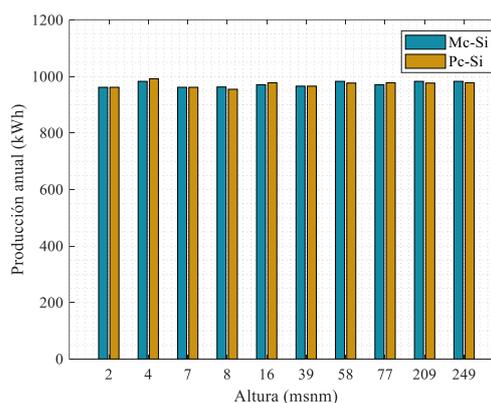


Figura 9. Gráfica de energía anual de cada panel en la región costa del Ecuador.

La Tabla 7 describe la energía anual de cada panel en la región costa del Ecuador.

Tabla 7. Energía anual de cada panel en la región costa del Ecuador.

Tecnología	mc-Si	Pc-Si
Sitio	Producción anual (kWh)	Producción anual (kWh)
Guayas, Durán	962	962
Esmeraldas, Esmeraldas	983	992
Guayas, Guayaquil	962	962
Machala, El Oro	963	955
Chone, Manabí	971	978
Santa Elena, Santa Elena	966	966
Manabí, Manta	983	977
Los Ríos, Quevedo	971	978
Sto. Dgo. De Tsáchilas, Concordia	983	977
Manabí, El Carmen	983	978

En la Figura 9, se aprecia un diagrama de barras que representa la energía anual de cada panel en la región sierra del Ecuador.

Una vez recopilada toda la información es posible calcular el EPBT de cada sitio de cada panel, en la Tabla 8, se aprecia el resultado de EPBT de la región sierra.

Tabla 8. EPBT de cada panel de la región sierra.

Tecnología	mc-Si	Pc-Si
Sitio	EPBT (años)	EPBT (años)
Imbabura, Ibarra	4.56	4.50
Pichincha, Sangolquí	4.61	4.50
Azuay, Cuenca	4.66	4.61
Otavallo, Imbabura	4.56	4.50
Tungurahua, Ambato	4.64	4.56
Carchi, Bolívar	4.56	4.50
Tungurahua, Pelileo	4.64	4.56
Chimborazo, Riobamba	4.64	4.58
Cotopaxi, Latacunga	4.60	4.56
Pichincha, Quito	4.61	4.50

En la Figura 10, se aprecia un diagrama de barras que representa el resultado de EPBT de la región sierra.

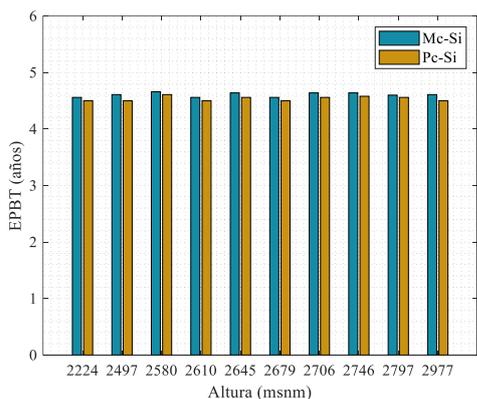


Figura 10. Gráfica de EPBT de cada panel de la región sierra.

En la Tabla 9, se aprecia el resultado de EPBT de la región costa.

Tabla 9. EPBT de cada panel de la región costa.

Tecnología	mc-Si	Pc-Si
Sitio	EPBT (años)	EPBT (años)
Guayas, Durán	4.66	4.58
Esmeraldas, Esmeraldas	4.56	4.44
Guayas, Guayaquil	4.66	4.58
Machala, El Oro	4.66	4.61
Chone, Manabí	4.62	4.50
Santa Elena, Santa Elena	4.64	4.56
Manabí, Manta	4.56	4.51
Los Ríos, Quevedo	4.62	4.50
Sto. Dgo. De Tsáchilas, Concordia	4.56	4.51
Manabí, El Carmen	4.56	4.50

Figura 11, se aprecia un diagrama de barras que representa el resultado de EPBT de la región costa.

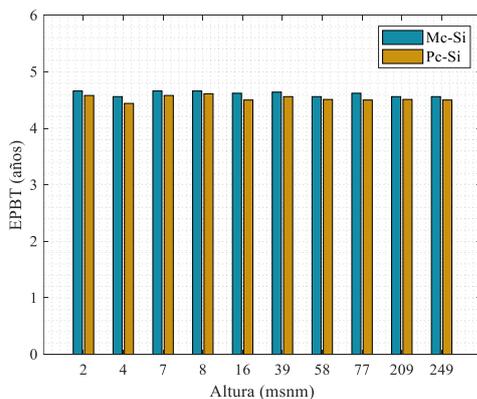


Figura 11. Gráfica de EPBT de cada panel de la región costa

Para cada análisis existe una inversión inicial, este es el costo de implementar la planta fotovoltaica, en la Tabla 10 se evidencia el costo de inversión en la región sierra.

Tabla 10. Costo de operación de la región sierra.

Tecnología	mc-Si	Pc-Si
Sitio	Costo (USD/año)	Costo (USD/año)
Imbabura, Ibarra	1661	1622
Pichincha, Sangolquí	1661	1620
Azuay, Cuenca	1660	1622
Otavallo, Imbabura	1661	1622
Tungurahua, Ambato	1660	1619
Carchi, Bolívar	1663	1622
Tungurahua, Pelileo	1660	1619
Chimborazo, Riobamba	1659	1619
Cotopaxi, Latacunga	1659	1619
Pichincha, Quito	1661	1620
Total	16605	16204

En la Figura 12, se aprecia un diagrama de barras que representa el costo de inversión en la región sierra.

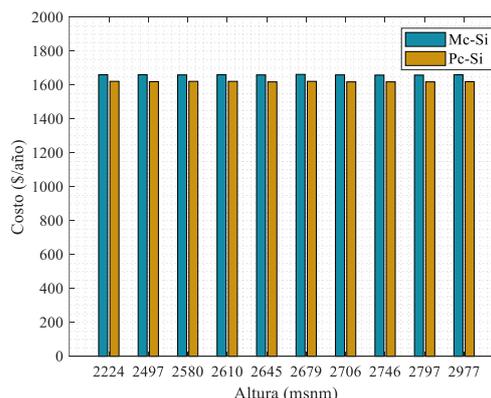


Figura 12. Gráfica de costo de operación de la región sierra

En la Tabla 11 se evidencia el costo de inversión en la región costa.

Tabla 11. Costo de operación de la región costa.

Tecnología	mc-Si	Pc-Si
Sitio	Costo USD(USD/año)	Costo USD(USD/año)
Guayas, Durán	1660	1619
Esmeraldas, Esmeraldas	1663	1623

Guayas, Guayaquil	1660	1619
Machala, El Oro	1660	1622
Chone, Manabí	1661	1620
Santa Elena, Santa Elena	1660	1619
Manabí, Manta	1661	1622
Los Ríos, Quevedo	1661	1620
Sto. Dgo. De Tsáchilas, Concordia	1663	1622
Manabí, El Carmen	1661	1620
Total	16610	16206

En la Figura 13, se aprecia un diagrama de barras que representa el costo de inversión en la región costa.

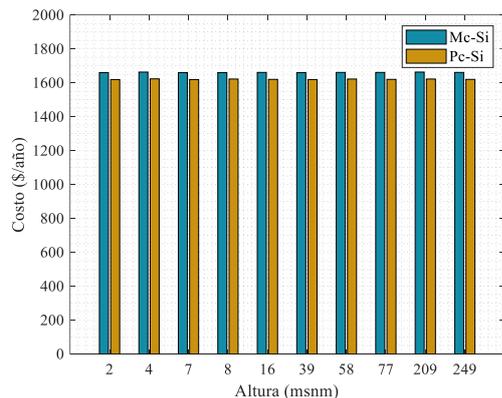


Figura 13. Gráfica de costo de operación de la región costa

A continuación, se aplica la metodología de regresión media condicional con el objetivo de realizar un ajuste lineal de los resultados encontrados de EPBT y de costos. Las gráficas para analizar contienen en el eje de las X las alturas de las ciudades. Se analizará el EPBT y el costo de inversión inicial del panel monocristalino y policristalino.

En la Figura 14, se evidencia el ajuste lineal del EPBT del panel monocristalino y policristalino de la región costa. Ambos tienen un comportamiento similar, donde se aprecia un ajuste lineal eficiente. En el panel monocristalino el punto máximo de EPBT corresponde al lugar con altitud de 2 msnm (Durán) con 4.66 años, mientras que el punto mínimo al lugar con 249 msnm (El Carmen) con 4.56 años. En el panel policristalino el punto máximo de EPBT corresponde al lugar con altitud de 8 msnm

(El Oro) con 4.61 años, mientras que el punto mínimo al lugar con 4 msnm (Esmeraldas) con 4.44 años.

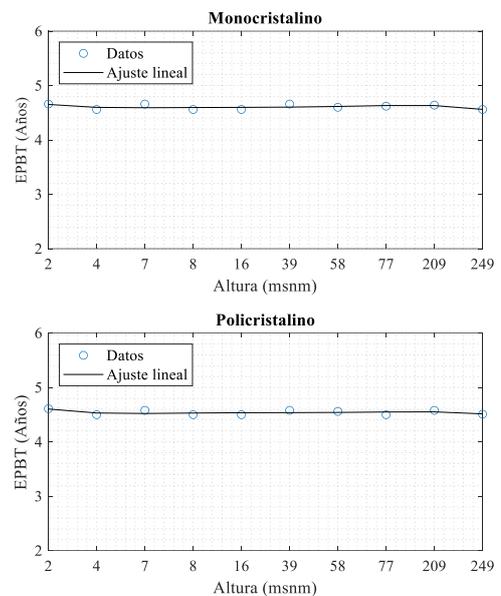


Figura 14. Ajuste lineal del EPBT del panel monocristalino y policristalino, región costa

En la Figura 15, se evidencia el ajuste lineal del EPBT del panel monocristalino y policristalino de la región sierra. Ambos tienen un comportamiento similar, donde se aprecia un ajuste lineal eficiente. En el panel monocristalino el punto máximo de EPBT corresponde al lugar con altitud de 2580 msnm (Cuenca) con 4.66 años, mientras que el punto mínimo al lugar con 2679 msnm (Bolívar) con 4.56 años. En el panel policristalino el punto máximo de EPBT corresponde al lugar con altitud de 2580 msnm (Cuenca) con 4.61 años, mientras que el punto mínimo al lugar con 2679 msnm (Bolívar) con 4.5 años.

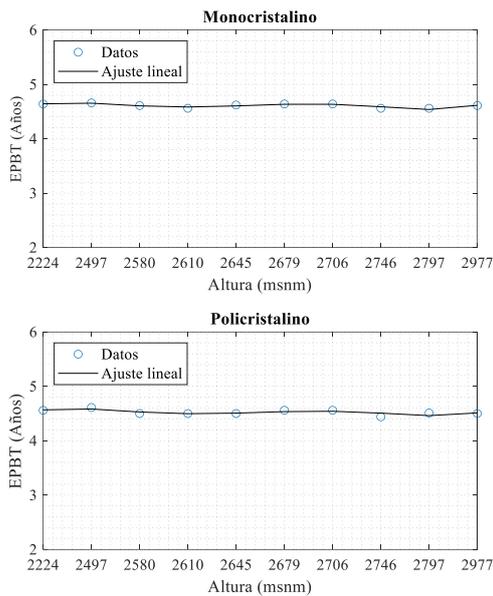


Figura 15. Ajuste lineal del EPBT del panel monocristalino y policristalino, región sierra.

En la Figura 16, se evidencia el ajuste lineal del costo del panel monocristalino y policristalino de la región costa. Ambos tienen un comportamiento similar, donde se aprecia un ajuste lineal eficiente. En el panel monocristalino el punto máximo de costos corresponde al lugar con altitud de 4 msnm (Esmeraldas) con 1663 USD/año, mientras que el punto mínimo al lugar con 39 msnm (Santa Elena) con 1660 USD/año. En el panel policristalino el punto máximo de costos corresponde al lugar con altitud de 4 msnm (Esmeraldas) con 1623 USD/año, mientras que el punto mínimo al lugar con 39 msnm (Santa Elena) con 1619 USD/año.

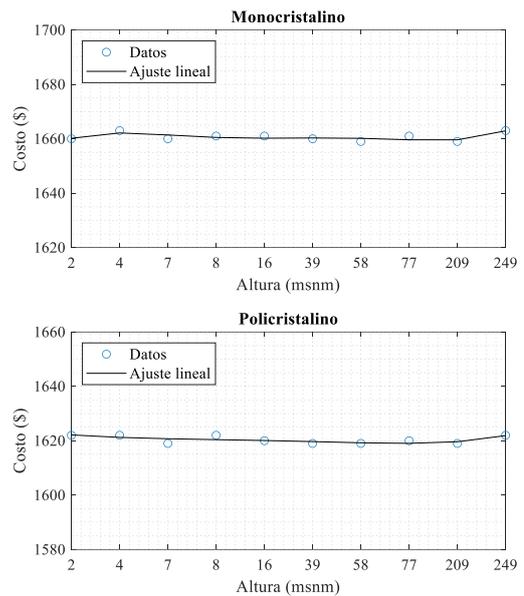


Figura 16. Ajuste lineal del costo del panel monocristalino y policristalino, región costa.

En la Figura 17, se evidencia el ajuste lineal del costo del panel monocristalino y policristalino de la región sierra. Ambos tienen un comportamiento similar, donde se aprecia un ajuste lineal eficiente. En el panel monocristalino el punto máximo de costos corresponde al lugar con altitud de 2679 msnm (Bolívar) con 1663 USD/año, mientras que el punto mínimo al lugar con 2797 msnm (Latacunga) con 1659 USD/año. En el panel policristalino el punto máximo de costos corresponde al lugar con altitud de 2679 msnm (Bolívar) con 1622 USD/año, mientras punto mínimo al lugar con 2797 msnm (Latacunga) con 1619 USD/año.

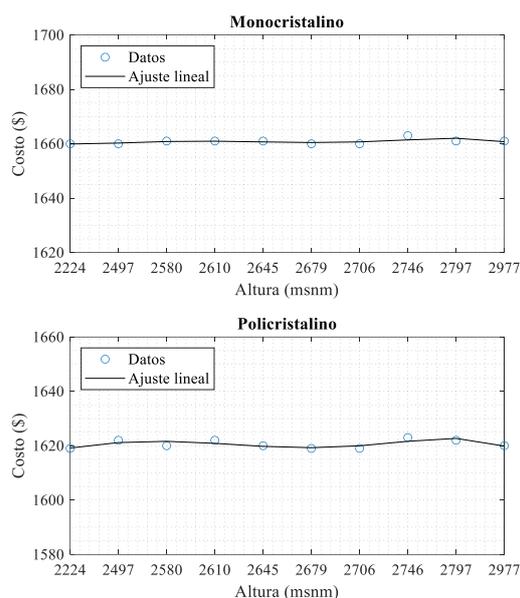


Figura 17. Ajuste lineal del costo del panel monocristalino y policristalino, región sierra.

4.4 Tablas de amortización

Como se mencionó anteriormente la amortización es el proceso mediante el cual se liquida una deuda mediante pago periódicos, para saldar esta deuda existe dos tipos de tasas de amortización, la primera es la francesa y la segunda es la alemana.

En este apartado, se analizará el costo de producción para dos sitios de Ecuador, Cuenca y Esmeraldas, la primera ciudad será mediante el método francés, mientras que, la segunda ciudad será mediante el método alemán. Para transformar el costo de capacidad a un costo por hora, en primer lugar, se debe amortizar el costo por pagos por año. Para ello, se emplea una fórmula que considera un período T (6 años) y una tasa de descuento (EPBT) de la siguiente manera [39], [40]:

$$Cp = \frac{r * Ci}{1 - \left(\frac{1}{(1+r)^T}\right)} \quad (6)$$

Dónde:

Cp Costo de producción

r Tiempo de recuperación de energía

T Anualidades

Ci Costo inicial

Además de calcular el costo de producción es necesario conocer el factor de planta que representa la energía generada en un lapso a plena carga, de acuerdo con los valores nominales de las placas de identificación de los equipos. Para ello, se aplica la siguiente ecuación:

$$CP_{fp} = \frac{Cp}{fp} \quad (7)$$

Así, ya se puede aplicar a los costos y EPBT de las ciudades antes mencionadas.

En la Figura 18, se evidencia el costo de producción y EPBT del panel monocristalino de la ciudad de Cuenca. Se aprecia que en el año 4.66 se recupera la energía consumida en el proceso de fabricación del panel, a partir de ese año, todo son ganancias, se ha simulado hasta el año 30 y aún se sigue teniendo un margen positivo, el costo de producción más elevado corresponde al año 1 con 1334.77 USD/kW.

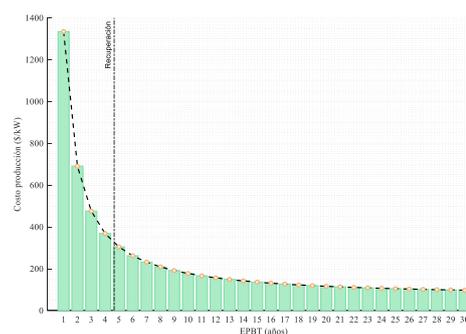


Figura 18. Costo de producción y EPBT del panel monocristalino de Cuenca.

En la Figura 19, se evidencia el costo de producción y EPBT del panel policristalino de la ciudad de Cuenca. Se aprecia que en el año 4.61 se recupera la energía consumida en el proceso de fabricación del panel, a partir de ese año, todo son ganancias, el costo de producción más elevado corresponde al año 1 con 1290.22 USD/kW.

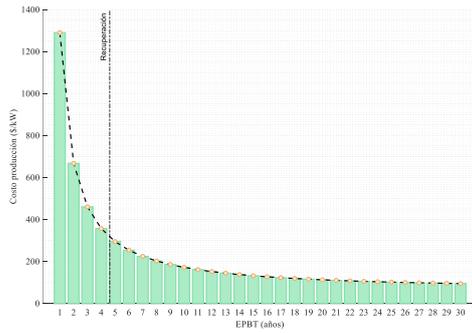


Figura 19. Costo de producción y EPBT del panel policristalino de Cuenca.

En la Figura 20, se evidencia el costo de producción y EPBT del panel monocristalino de la ciudad de Esmeraldas. Se aprecia que en el año 4.56 se recupera la energía consumida en el proceso de fabricación del panel, a partir de ese año, todo son ganancias, se ha simulado hasta el año 30 y aún se sigue teniendo un margen positivo, el costo de producción más elevado corresponde al año 1 con 1308.48 USD/kW.

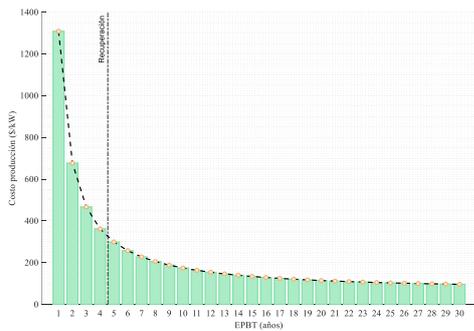


Figura 20. Costo de producción y EPBT del panel monocristalino de Esmeraldas.

En la Figura 21, se evidencia el costo de producción y EPBT del panel monocristalino de la ciudad de Cuenca. Se aprecia que en el año 4.44 se recupera la energía consumida en el proceso de fabricación del panel, a partir de ese año, todo son ganancias, se ha simulado hasta el año 30 y aún se sigue teniendo un margen positivo, el costo de producción más elevado corresponde al año 1 con 1243.4 USD/kW.

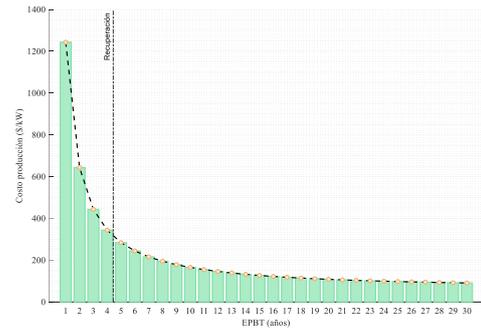


Figura 21. Costo de producción y EPBT del panel policristalino de Esmeraldas.

4.4.1 Tabla de amortización francesa

En la Figura 22, se aprecia la gráfica de la tabla de amortización francesa de la ciudad de Cuenca, el costo inicial corresponde a USD1660 y en los primeros 5 años existe una tasa de interés decreciente, posterior a estos cinco años ya se recuperado el costo de inversión inicial de energía. El interés más alto corresponde al año 1, mientras que el más bajo al año 4.

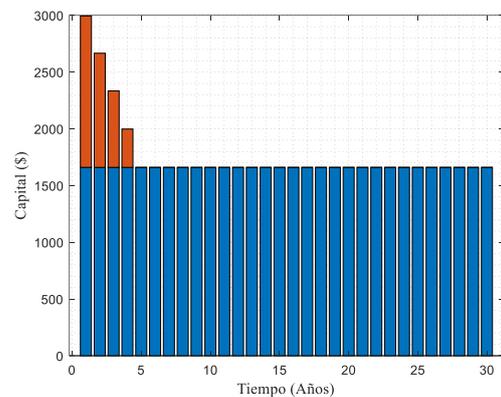


Figura 22. Tasa de amortización francesa de Cuenca.

En la Figura 23, se aprecia la gráfica de la tabla de amortización francesa de la ciudad de Esmeraldas, el costo inicial corresponde a USD1663 y en los primeros 5 años existe una tasa de interés decreciente, posterior a estos cinco años ya se recuperado el costo de inversión inicial de energía. El interés más alto corresponde al año 1, mientras que el más bajo al año 5.

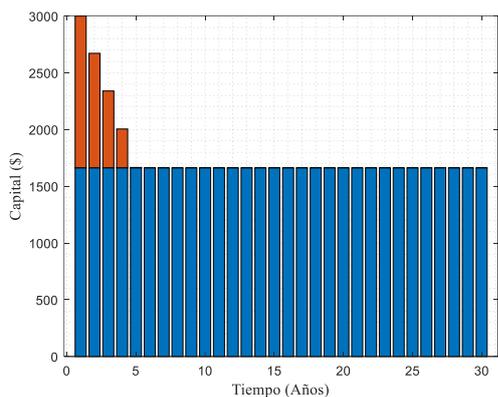


Figura 23. Tasa de amortización francesa de Esmeraldas.

Al comparar ambos estudios se aprecia que los dos recuperan el costo de energía en los primeros cinco años, además, la diferencia del costo inicial es mínima siendo la mayor la de la provincia de Esmeraldas con USD1663, en cuanto, a los intereses Esmeraldas posee el interés más alto y bajo.

4.4.2 Tabla de amortización alemana

En la Figura 24, se aprecia la gráfica de la tabla de amortización alemana de la ciudad de Cuenca, el costo inicial corresponde a USD1660 y en los primeros 5 años existe una tasa de interés decreciente, posterior a estos cinco años ya se recuperado el costo de inversión inicial de energía. El interés más alto corresponde al año 1, mientras que el más bajo al año 4.

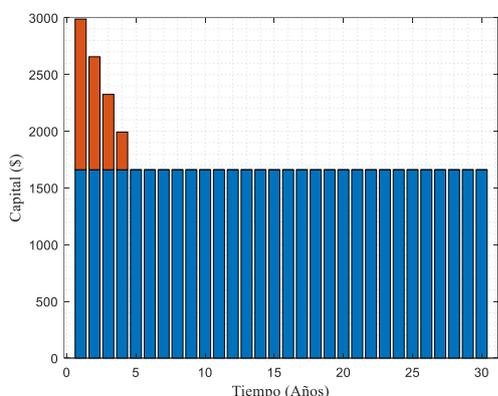


Figura 24. Tasa de amortización alemana de Cuenca.

En la Figura 25, se aprecia la gráfica de la tabla de amortización alemana de la ciudad de Cuenca, el costo inicial corresponde a USD1663 y en los primeros 5 años existe una tasa de interés decreciente, posterior a

estos cinco años ya se recuperado el costo de inversión inicial de energía. El interés más alto corresponde al año, mientras que el más bajo al año 5.

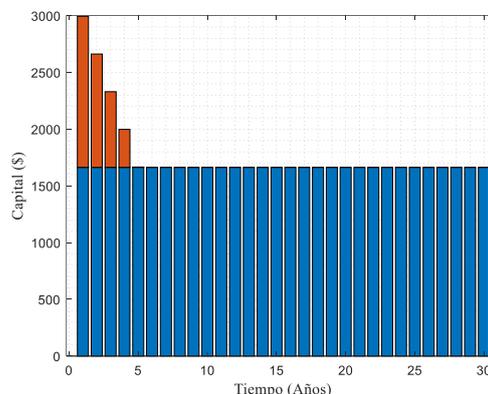


Figura 25. Tasa de amortización alemana de Esmeraldas.

Al comparar ambos estudios se aprecia que los dos recuperan el costo de energía en los primeros cinco años, además, la diferencia del costo inicial es mínima siendo la mayor la de la provincia de Esmeraldas con USD1663, en cuanto, a los intereses Esmeraldas posee el interés más alto y bajo.

5 Conclusiones

Se ha modelado una central de generación eléctrica renovable con paneles solares con dos tecnologías, monocristalino y policristalino. Estos paneles han sido ubicados en 20 sitios diferentes del Ecuador, 10 corresponden a la región costa y 10 a la región sierra, en estos, diferentes lugares se han estimado el EPBT. En la región de la sierra, existes tres sitios idóneos donde poner paneles solares, estos son: Imbabura, Otavalo y Carchi, dado que en estos lugares el tiempo de recuperación de la energía es menor. Por otro lado, en la costa, el lugar ideal para colocar paneles solares monocristalinos o policristalinos es en Esmeraldas, ya que, en esta ciudad se presenta el menor número de EPBT.

Los costos de implementación calculados de los paneles monocristalinos y policristalinos en los sitios de Ecuador si posee de hasta un 3%. En la región de la

sierra, dos sitios idóneos donde poner paneles solares debido a su costo inicial reducido, estos son: Chimborazo y Cotopaxi, ambos con 1659 USD/año en el panel monocristalino y 1619 USD/año en el panel policristalino. Por otro lado, en la costa, el lugar ideal para colocar paneles solares monocristalinos o policristalinos es en Santa Elena, ya que, en esta ciudad se presenta el menor costo de implementación para ambos paneles con 1660 USD/año para el monocristalino y 1619 USD/año para el policristalino.

Al aplicar la metodología de regresión media condicional con el objetivo de realizar un ajuste lineal de los resultados encontrados de EPBT y de costos. Se evidencia que todas las métricas de las ciudades estudiadas tienen un comportamiento similar, donde se visualiza una recta, esto indica que el modelo de regresión lineal aplicado está operando eficientemente.

Con los resultados se determina que ambas tecnologías de paneles (monocristalino y policristalino) operan eficientemente, no obstante, la principal diferencia es el costo de estos, siendo el más costoso el panel monocristalino. En la sierra y costa se tiene un costo total del panel monocristalino de 16605 USD/año y 16610 USD/año, respectivamente, mientras que, los costos totales del panel policristalino para la sierra y costa son de 16204 USD/año y 16206 USD/año, respectivamente.

6 Trabajos futuros

En base a los resultados del presente documento es posible principiar otras investigaciones, tales como, ampliar los sitios de estudio de algún país, utilizar otro modelo de para obtener resultados e inclusive sería viable utilizar alguna metaheurística, por ejemplo, enjambre de partículas, algoritmo de libélula, algoritmo de hormigas, etc.

7 Referencias

- [1] F. Ruiz-Tipán and A. Valenzuela, “Literary review of economic environmental dispatch considering bibliometric analysis,” *Iteckne*, 2021, doi: <https://doi.org/10.15332/iteckne.v19i1.2631>.
- [2] F. Ruiz-Tipán and A. Valenzuela, “Despacho económico en centrales de generación térmicas considerando restricciones económicas y ambientales para la operación en isla de una red eléctrica industrial,” *Brazilian Appl. Sci. Rev.*, pp. 851–871, 2022, doi: 10.34115/basrv6n3-002.
- [3] M. D. Rodgers, “Pathways to eliminate carbon emissions via renewable energy investments at higher education institutions,” *Electr. J.*, vol. 34, no. 5, p. 106952, 2021, doi: 10.1016/j.tej.2021.106952.
- [4] D. D. Hsu *et al.*, “Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation: Systematic Review and Harmonization,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 16, no. SUPPL.1, 2012, doi: 10.1111/j.1530-9290.2011.00439.x.
- [5] V. Baharwani, N. Meena, A. Dubey, U. Brighu, and J. Mathur, “Life Cycle Analysis of Solar PV System: A Review,” *Int. J. Environ. Res. Dev.*, vol. 4, no. 2, pp. 183–190, 2014, [Online]. Available: http://www.ripublication.com/ijerd_spl/ijerdv4n2spl_14.pdf.
- [6] C. Cuji and E. Mediavilla, “Controlador Difuso Para Gestión De La Energía En Un Proceso De Transición De Central De Generación Térmica A Renovables,” *Rev. Técnica “energía,”* vol. 18, no. 2, pp. 61–73, 2022, doi:

- 10.37116/revistaenergia.v18.n2.2022.491.
- [7] I. Simões, “Avaliação De Ciclo De Vida Das Rotas Tecnológicas De Disposição Dos Resíduos De Madeiras Gerados Pelas Indústrias Moveleiras De Petrópolis, Brasil,” *Rev. Eletrônica Gestão e Tecnol. Ambient.*, pp. 155–169, 2022, doi: 10.9771/gesta.v9i3.47298.
- [8] C. Cuji and R. O. Galarza Zambrano, “Gestión Óptima De La Energía En Un Proceso Paulatino Y Controlado Para Contribuir A La Descarbonización Del Sector Eléctrico,” *Rev. Técnica “energía,”* vol. 19, no. 1, pp. 71–84, 2022, doi: 10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.518.
- [9] A. Luque, G. Sala, and I. Luque, “Photovoltaic concentration at the onset of its commercial deployment,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 20, no. 1, pp. 6–11, 2015, doi: <https://doi.org/10.1002/pip.705>.
- [10] F. de M. Ribeiro, “Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil- Usina de Itaipu: primeira aproximação.” pp. 1–455, 2003, [Online]. Available: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-23082004-123349/pt-br.php>.
- [11] T. Blaschke, M. Biberacher, S. Gadocha, and I. Schardinger, “‘Energy landscapes’: Meeting energy demands and human aspirations,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 55, pp. 3–16, 2013, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.11.022.
- [12] M. Child, O. Koskinen, L. Linnanen, and C. Breyer, “Sustainability guardrails for energy scenarios of the global energy transition,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, no. April 2017, pp. 321–334, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.079.
- [13] M. S. Arif, “Residential solar panels and their impact on the reduction of carbon emissions,” *Spring*, pp. 1–18, 2013, [Online]. Available: https://nature.berkeley.edu/classes/es196/projects/2013final/ArifM_2013.pdf.
- [14] A. Jäger-Waldau, “European Photovoltaics in world wide comparison,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 352, no. 9-20 SPEC. ISS., pp. 1922–1927, 2006, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2005.10.074.
- [15] B. Parida, S. Iniyar, and R. Goic, “A review of solar photovoltaic technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1625–1636, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.032.
- [16] K. Q. Peng and S. T. Lee, “Silicon nanowires for photovoltaic solar energy conversion,” *Adv. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 198–215, 2011, doi: 10.1002/adma.201002410.
- [17] A. Nishimura *et al.*, “Life cycle assessment and evaluation of energy payback time on high-concentration photovoltaic power generation system,” *Appl. Energy*, vol. 87, no. 9, pp. 2797–2807, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.08.011.
- [18] B. B. de Assis, “Avaliação Do Ciclo De Vida Do Produto Como Ferramenta Para O Desenvolvimento Sustentável,” p. 66, 2009.
- [19] L. Coltro, *Avaliação do ciclo de vida como instrumento de Gestão*. 2007.
- [20] C. Barbosa, “A abordagem da contabilidade ambiental com enfoque na ecoeficiência: uma análise na redução do consumo de água em uma ies,” p. 634, 2014, [Online]. Available: <https://hsgm.saglik.gov.tr/depo/biri>

- mler/saglikli-beslenme-hareketli-hayat-db/Yayinlar/kitaplar/diger-kitaplar/TBSA-Beslenme-Yayini.pdf.
- [21] L. Zocche, “Identificação das limitações da acv sob a ótica de pesquisas acadêmicas,” *Diss. Mestr. - Grau mestre em Eng. da Produção, Univ. Tecnológica Fed. do Paraná.*, p. 108, 2014.
- [22] I. Celik *et al.*, “Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of perovskite tandem photovoltaic solar cells,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, no. 1, pp. 305–309, 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2768961.
- [23] J. Olvera and L. Montalvo, “Análisis y diseño de una planta de generación de energía eléctrica con paneles solares fotovoltaicos conectados a la red de distribución eléctrica de la subestación Santa Ana ubicada en Guayaquil,” pp. 1–127, 2009.
- [24] D. Polanco and C. Cuji, “Estimation of Energy Payback Time Applied In Hydrogen Production For Electricity Generation Purposes Estimación Del Tiempo De Recuperación De Energía Aplicado En Producción,” *Rev. técnica “energía,”* no. 18, pp. 74–84, 2022.
- [25] Y. Durand and P. Jacquin, “Solar Photovoltaic Electricity Applications in France National Survey Report 2008,” pp. 1–25, 2009.
- [26] Y. Hamakawa, “Recent advances of the photovoltaic activities in Japan,” *Phys. Status Solidi Basic Res.*, vol. 194, no. 1, pp. 15–29, 1996, doi: 10.1002/pssb.2221940104.
- [27] V. Cañavera, N. Ortiz, J. Velasquez, and X. Segura, “Obtencion de energia por medio de celdas solares,” *Inst. Cult. Copán*, vol. 01, no. documental, p. 20, 2015, [Online]. Available: <http://vinculacion.dgire.unam.mx/Congreso-Trabajos-pagina/Trabajos-2015/1-Ciencias Biológica y de la Salud/5.Química/4.CIN2015A10091.pdf>.
- [28] T. D. J. Guzmán-Hernández, F. Araya-Rodríguez, G. Castro-Badilla, and J. M. Obando-Ulloa, “Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética,” *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 29, no. 8, p. 46, 2016, doi: 10.18845/tm.v29i8.2984.
- [29] Economipedia, “Media condicionada - Qué es, definición y concepto,” 2022. <https://economipedia.com/definiciones/media-condicionada.html> (accessed Oct. 26, 2022).
- [30] O. O. Aalen, “A linear regression model for the analysis of life times,” *Stat. Med.*, vol. 8, no. 8, pp. 907–925, 1989, doi: 10.1002/sim.4780080803.
- [31] A. Pérez Sacristán, “Sistemas de amortización de préstamos con cuota constante,” *Fac. Ciencias Económicas y Empres.*, pp. 1–35, 2015.
- [32] Renewable, “Renewables.ninja,” 2022. <https://www.renewables.ninja/> (accessed Nov. 11, 2022).
- [33] B. S. Xakalashé and M. Tangstad, “Silicon processing: from quartz to crystalline silicon solar cells,” *South. African Pyrometallurgy Int. Conf.*, no. April, pp. 1–18, 2011.
- [34] J. Safarian, G. Tranell, and M. Tangstad, “Processes for upgrading metallurgical grade silicon to solar grade silicon,” vol. 20, no. 1876, pp. 88–97, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.03.011.
- [35] S. Lindig, A. Louwen, D. Moser, and M. Topic, “Outdoor PV system monitoring—Input data quality, data

- imputation and filtering approaches,” *Energies*, vol. 13, no. 19, pp. 1–18, 2020, doi: 10.3390/en13195099.
- [36] N. Jungbluth, “Life Cycle Assessment of Crystalline Photovoltaics in the Swissecoinvent Database,” no. April, pp. 429–446, 2005, doi: 10.1002/pip.614.
- [37] N. M. Odhiambo, “Energy consumption and economic growth nexus in Tanzania: An ARDL bounds testing approach,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 2, pp. 617–622, 2009, doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.077.
- [38] P. Lara, “Análisis y comparación de datos de un seguidor fotovoltaico de dos ejes con Back- Tracking,” 2015.
- [39] C. Cristóbal, C. Cuji, and H. David Sisa, “Evaluación del consumo de energía eléctrica de acuerdo a la arquitectura bioclimático mediante el Modelo ASHRAE y Gauss T-Student Evaluation of electricity consumption according to the bioclimatic architecture using the ASHRAE Model and Gauss T-Student,” *Rev. I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, p. 76, 2021, [Online]. Available: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.
- [40] S. Serrano-Vincenti, T. Condom, L. Campozano, J. Guamán, and M. Villacís, “An Empirical Model for Rainfall Maximums Conditioned to Tropospheric Water Vapor Over the Eastern Pacific Ocean,” *Front. Earth Sci.*, vol. 8, no. July, pp. 1–12, 2020, doi: 10.3389/feart.2020.00198.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 12: Matriz de estado del arte.

EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA ENERGÍA Y SU COSTO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA APLICANDO EL MODELO DE REGRESIÓN MEDIA CONDICIONAL																							
ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA						
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	EPBT	Sistemas fotovoltaicos	Regresión lineal	Modelo media condicional	Tablas de amortización	Emissiones de gases	Tiempo de recuperación de energía	Amortización de costos	Costo de producción de energía	Contaminación ambiental	Recuperación de energía	Costos elevados	Análisis de EPBT	Tecnologías renovables	Despacho económico ambiental	Reducción de emisiones	Estudio de EPBT	Optimización de tecnología renovables	Análisis de costos	Amortización del costo de producción
1	2022	Despacho económico en centrales de generación térmicas considerando restricciones económicas y ambientales para la operación en isla de una red eléctrica industrial.	1		☒	☒			☒	☒	☒		☒	☒		☒	☒	☒		☒	☒		
2	2021	Literary review of economic environmental dispatch considering bibliometric analysis	2				☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒
3	2021	Pathways to eliminate carbon emissions via renewable energy investments at higher education institutions	2	☒	☒	☒			☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒		
4	2021	Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation: Systematic Review and Harmonization	276	☒	☒	☒		☒	☒	☒			☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒		☒
5	2014	Life Cycle Analysis of Solar PV System: A Review	40	☒		☒		☒		☒		☒	☒	☒				☒		☒		☒	
6	2022	Avaliação De Ciclo De Vida Das Rotas Tecnológicas De Disposição Dos Resíduos De Madeiras Gerados Pelas Indústrias Moveleiras De Petrópolis, Brasil	3	☒		☒	☒		☒	☒	☒		☒			☒		☒		☒		☒	☒
7	2006	Photovoltaic concentration at the onset of its commercial deployment	141	☒			☒			☒			☒		☒		☒		☒	☒		☒	

8	2013	Energy landscapes': Meeting energy demands and human aspirations	190	✗				✗	✗		✗			✗		✗	✗		✗		✗			
9	2018	Sustainability guardrails for energy scenarios of the global energy transition	178	✗		✗	✗		✗		✗			✗	✗				✗	✗				
10	2013	Residential solar panels and their impact on the reduction of carbon emissions	12	✗		✗																		
11	2006	European Photovoltaics in world wide comparison	42	✗	✗			✗		✗	✗		✗	✗				✗	✗			✗		
12	2011	A review of solar photovoltaic technologies	2077	✗	✗		✗			✗	✗			✗		✗					✗			
13	2011	Silicon nanowires for photovoltaic solar energy conversion	677	✗	✗	✗		✗	✗	✗				✗		✗			✗	✗			✗	
14	2010	Life cycle assessment and evaluation of energy payback time on high-concentration photovoltaic power generation system	119	✗	✗		✗		✗	✗	✗		✗	✗		✗					✗			
15	2009	Avaliação Do Ciclo De Vida Do Produto Como Ferramenta Para O Desenvolvimento Sustentável	4	✗	✗			✗	✗	✗			✗	✗	✗					✗			✗	
16	2007	Avaliação do ciclo de vida como instrumento de Gestão	81	✗			✗						✗		✗		✗	✗	✗		✗	✗		
17	2003	Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil- Usina de Itaipu: primeira aproximação	30	✗		✗		✗		✗			✗	✗	✗					✗			✗	
18	2014	A abordagem da contabilidade ambiental com enfoque na ecoeficiência: uma análise na redução do consumo de água em uma ies	50	✗		✗		✗	✗		✗	✗		✗		✗		✗	✗	✗	✗		✗	
19	2014	Identificação das limitações da acv sob a ótica de pesquisas acadêmicas	11	✗		✗		✗					✗			✗					✗	✗		
20	2017	Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of perovskite tandem photovoltaic solar cells	66	✗			✗	✗		✗	✗	✗	✗		✗		✗	✗	✗	✗	✗		✗	
21	2022	Estimation of Energy Payback Time Applied in Hydrogen Production For Electricity Generation Purposes	1	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗		✗	
22	2017	An Exploration of Divergence in EPBT and EROI for Solar Photovoltaics	36	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗
23	2009	Solar Photovoltaic Electricity Applications in France National Survey Report 2008	2	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗		✗	✗
24	1996	Recent advances of the photovoltaic activities in Japan	5	✗	✗	✗		✗	✗	✗			✗	✗						✗	✗			
25	2016	Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética	18	✗	✗		✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗		✗		✗	✗	✗	✗		✗	✗
			CANTIDAD:	23	13	13	10	14	16	17	16	11	16	16	9	19	12	13	18	11	12	14		

7.2 Resumen de Indicadores

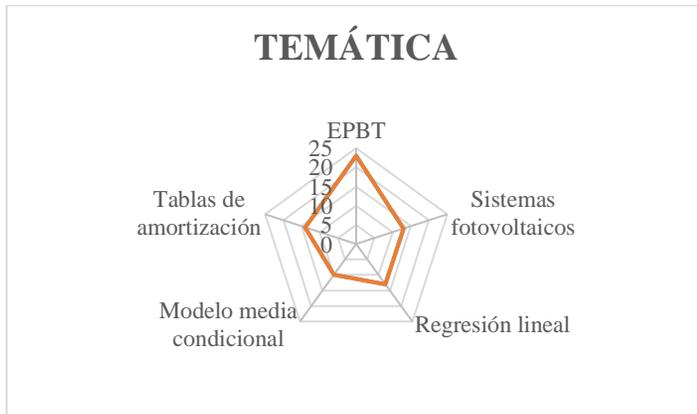


Figura 26. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.



Figura 27. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

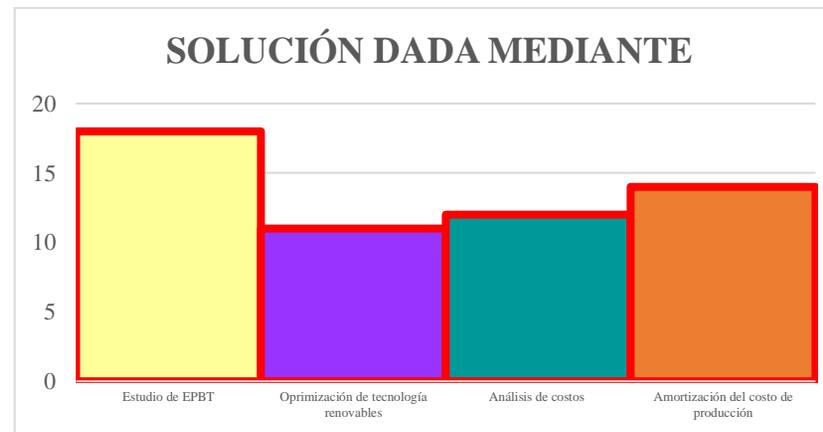


Figura 28. Indicador de solución - Estado del arte