

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC**

**Carrera de Ingeniería de la Energía**



**EVALUACIÓN DE ESCENARIOS TÉCNICOS Y ECONÓMICOS PARA LA  
IMPLEMENTACIÓN DE PLANTAS DESALADORAS DE AGUA DE MAR  
ABASTECIDA CON RECURSOS RENOVABLES EN LA COSTA PERUANA**

**EVALUATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC SCENARIOS FOR THE  
IMPLEMENTATION OF DESALINANT PLANTS OF SEA WATER SUPPLIED  
WITH RENEWABLE RESOURCES IN THE PERUVIAN COAST**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniera de la Energía

**Rosa Elena Zambrano De La Cruz**

**Código 201210221**

**Asesora**

Eunice Villicaña Ortiz

Lima – Perú

Diciembre 2019

La tesis

**EVALUACIÓN DE ESCENARIOS TÉCNICOS Y ECONÓMICOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PLANTAS DESALADORAS DE AGUA DE MAR ABASTECIDA CON RECURSOS RENOVABLES EN LA COSTA PERUANA**

Ha sido aprobada

-----  
[Nombres y apellidos del Presidente de Jurado]

-----  
Eunice Villicaña Ortiz

-----  
[Nombres y apellidos del Tercer jurado]

*Dedicatoria:*

*Dedico a mis padres, por su apoyo y amor incondicional, a mi asesora y profesores, por la contribución con sus conocimientos e impulsarme a ser mejor cada día.*

*Agradecimientos:*

*Agradezco principalmente a mis padres por la comprensión y el amor para seguir con mis sueños, el apoyo de mi asesora Eunice Villicaña Ortiz por el tiempo, la paciencia, esfuerzo y dedicación brindada, al director Julien Noel por la confianza depositada en mí a lo largo de mi carrera y a los profesores del departamento de Energía de la UTEC que contribuyeron a la realización del presente trabajo, en especial a la profesora Ximena Guardia Muguruza y al profesor Francisco Porles Ochoa.*

# TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>10</b>
1.1 Zonas Costeras Vulnerables a la Escasez Hídrica en Perú .....	10
1.2 Desalación de Agua de Mar .....	12
1.2.1 Procesos de Desalación .....	13
1.2.2 Funcionamiento de una planta desaladora de ósmosis inversa.....	24
1.3 Recursos Energéticos Disponibles en Perú.....	26
1.3.1 Recursos Renovables .....	29
1.4 Producción de Energía Renovable .....	31
1.4.1 Centrales solares .....	31
1.4.2 Centrales eólicas .....	32
1.4.3 Sistemas híbridos .....	33
<b>CAPÍTULO II METODOLOGÍA</b> .....	<b>35</b>
2.2 Identificación de zonas vulnerables por escasez hídrica.....	36
2.3 Identificación del potencial de los recursos renovables.....	38
2.3.1 Recurso solar .....	38
2.3.2 Recurso eólico .....	38
2.4 Accesibilidad a la red eléctrica .....	38
2.5 Selección del lugar de emplazamiento.....	38
2.6 Diseño de la planta de ósmosis inversa .....	39
2.6.1 Cuantificación de la demanda energética de la planta.....	40
2.7 Viabilidad del recurso renovable .....	46
2.7.1 Definición del recurso renovable para los lugares seleccionados .....	46
2.7.2 Cálculo de la potencia de las plantas de generación eléctrica abastecidas con energías renovables .....	48
2.8 Cálculo de los costes de todo el sistema por producción de agua .....	49
2.8.1 Cálculo de los costes del emplazamiento de las plantas desaladoras por producción de agua.....	49

2.8.2	Cálculo de los costes del consumo de la red eléctrica por producción de agua.....	49
2.8.3	Cálculo de los costes de las plantas solares fotovoltaica por producción de agua.....	50
2.8.4	Cálculo de los costes de las plantas eólicas por producción de agua .....	50
2.9	Comparación de los costos de escenarios de abastecimiento de las plantas desaladoras de agua de mar .....	50
<b>CAPÍTULO III RESULTADOS .....</b>		<b>52</b>
3.2	Identificación de zonas vulnerables por escasez hídrica.....	52
3.3	Identificación del potencial de los recursos renovables.....	52
3.3.1	Recurso solar .....	52
3.3.2	Recurso eólico .....	53
3.4	Accesibilidad a la red eléctrica .....	54
3.5	Selección del lugar de emplazamiento.....	55
3.5.1	Lugar de emplazamiento 1 .....	56
3.6	Diseño de la planta de ósmosis inversa .....	63
3.6.1	Cuantificación de la demanda energética de la planta.....	64
3.7	Viabilidad del recurso renovable .....	66
3.7.1	Recurso Solar.....	66
3.7.2	Recurso Eólico.....	68
3.8	Cálculo de la potencia de las plantas de generación eléctrica abastecidas con energías renovables.....	70
3.8.1	Plantas solares fotovoltaicas.....	70
3.8.2	Plantas eólicas .....	73
3.9	Cálculo de los costes por producción de agua .....	75
3.9.1	Cálculo de los costes del emplazamiento de las plantas desaladoras por producción de agua.....	75
3.9.2	Cálculo de los costes del consumo de energía de la red eléctrica por producción de agua.....	77
3.9.3	Cálculo de los costes de las plantas solares fotovoltaicas por producción de agua.....	80

3.9.4	Cálculo de los costes de las plantas eólicas por producción de agua .....	81
3.10	Comparación de los costos de escenarios de abastecimiento de las plantas desaladoras de agua de mar .....	81
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>85</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>86</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>92</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 2.1:</b> Población sin acceso a agua potable por cada departamento .....	37
<b>Tabla 2.2:</b> Crecimiento poblacional por departamento .....	37
<b>Tabla 2.3:</b> Población sin acceso a agua. ....	39
<b>Tabla 3.1:</b> Coordenadas de Islay, Arequipa. ....	56
<b>Tabla 3.2:</b> Demanda de agua para Islay, Pacasmayo y Paita.....	63
<b>Tabla 3.3:</b> Demanda de agua sobredimensionada para Islay, Pacasmayo y Paita.....	64
<b>Tabla 3.4:</b> Caudal de agua a captar para Islay, Pacasmayo y Paita. ....	64
<b>Tabla 3.5:</b> Resumen del consumo energético diario de las bombas que requiere la planta desaladora. ....	65
<b>Tabla 3.6:</b> Consumo energético diario de las bombas que requiere la planta desaladora para Pacasmayo y Paita. ....	65
<b>Tabla 3.7:</b> Recurso solar aprovechable en Islay .....	66
<b>Tabla 3.8:</b> Promedio anual de Radiación en Pacasmayo. ....	67
<b>Tabla 3.9:</b> Promedio anual de Radiación en Paita. ....	68
<b>Tabla 3.10:</b> Valores obtenidos para hallar los factores de forma y escala Islay.....	69
<b>Tabla 3.11:</b> Valores obtenidos para hallar los factores de forma y escala Pacasmayo. ....	69
<b>Tabla 3.12:</b> Valores obtenidos para hallar los factores de forma y escala Paita. ....	69
<b>Tabla 3.13:</b> Costos de inversión para la instalación de la planta de la planta desaladora por m <sup>3</sup> . ....	76
<b>Tabla 3.14:</b> Costos de la instalación de la planta y variables anual. ....	76
<b>Tabla 3.15:</b> Cuadro resumen del costo de la energía por metro cúbico de agua para cada provincia seleccionada.....	79
<b>Tabla 3.16:</b> Costos del Pre-diseño de un Sistema Fotovoltaico para cada provincia. ....	80
<b>Tabla 3.17:</b> Costos totales de inversión m <sup>3</sup> de agua con solar. ....	80
<b>Tabla 3.18:</b> Costos del Pre-diseño de un Sistema Eólico para cada provincia.....	81
<b>Tabla 3.19:</b> Costos totales de inversión m <sup>3</sup> de agua con eólico. ....	81
<b>Tabla 3.20:</b> Costos totales de inversión m <sup>3</sup> de agua con RER. ....	82
<b>Figura 3.21:</b> Comparación de los precios por m <sup>3</sup> producido para cada provincia.....	83
<b>Tabla 3.22:</b> Ganancia anual de acuerdo al tipo de fuente energética de abastecimiento.....	84



# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.1</b> Monitoreo de sequías en el Perú. ....	11
<b>Figura 1.2</b> Evolución de la capacidad de producción de agua desalinizada a nivel mundial. .....	13
<b>Figura 1.3:</b> Procesos de desalación a nivel global.....	15
<b>Figura 1.4:</b> Esquema del Proceso de Destilación Flash Multietapa (MSF). ....	16
<b>Figura 1.5:</b> Esquema del Proceso de Destilación Multiefecto (MED).....	17
<b>Figura 1.6:</b> Esquema del Proceso de Destilación Compresión Mecánica de Vapor (MVC). .....	17
<b>Figura 1.7:</b> Esquema del fenómeno del Proceso de Ósmosis y Ósmosis inversa. ....	20
<b>Figura 1.8:</b> Esquema del fenómeno de Electrodialisis. ....	21
<b>Figura 1.9:</b> Esquema del fenómeno de Intercambio de Iones. ....	22
<b>Figura 1.10:</b> Esquema de bloques de una Planta de Ósmosis Inversa.....	25
<b>Figura 1.11:</b> Distribución de bombas por etapas de una Planta Desaladora por Ósmosis Inversa .....	26
<b>Figura 1.12:</b> Matriz energética del Perú .....	27
<b>Figura 1.13:</b> Proyección de la Máxima Demanda 2014 – 2025.....	27
<b>Figura 1.14:</b> Producción de Electricidad por tipo de Fuente.....	28
<b>Figura 1.15:</b> Perú: Distribución de Energías Renovables: Solar y Eólica.....	30
<b>Figura 1.16.</b> Resultados de las subastas RER.....	32
<b>Figura 1.17:</b> Esquema de abastecimiento de una Planta desaladora por medio un Sistema Híbrido energético. ....	34
<b>Figura 2.1</b> Diseño de la planta de generación eléctrica abastecida con RER.....	35
<b>Figura 2.2:</b> Bombas de alto consumo de la Planta desaladora .....	40
<b>Figura 3.1:</b> Mapa de brechas de servicios básicos: Población sin abastecimiento a agua. .	56
<b>Figura 3.2:</b> Demanda de agua vs Crecimiento poblacional en Islay. ....	57
<b>Figura 3.3:</b> Mapa de líneas de transmisión eléctrica. ....	58
<b>Figura 3.4:</b> Infraestructura Eléctrica en Arequipa. ....	58
<b>Figura 3.5:</b> Acceso a Red de Media Tensión y Subestaciones de Distribución de MT/BT	59
<b>Figura 3.6:</b> Mapas brechas de servicios básicos: Población sin acceso a la red eléctrica. .	60
<b>Figura 3.7:</b> Mapa de Radiación Solar en Arequipa. ....	61
<b>Figura 3.8:</b> Mapa de Velocidad de Viento en Arequipa.....	61
<b>Figura 3.9:</b> Mapa de Áreas Naturales Protegidas por el Estado.....	62

<b>Figura 3.10:</b> Red Vial Nacional en Arequipa.....	63
<b>Figura 3.11:</b> Variación de la energía solar con respecto a la demanda energética del sistema de bombeo anual de la planta desaladora en Islay.....	70
<b>Figura 3.12:</b> Variación de la energía solar con respecto a la demanda energética del sistema de bombeo anual de la planta desaladora en Pacasmayo.....	71
<b>Figura 3.13:</b> Variación de la energía solar con respecto a la demanda energética del sistema de bombeo anual de la planta desaladora en Paita.....	72
<b>Figura 3.14:</b> Distribución del Factor de Weibull - Islay. ....	73
<b>Figura 3.15:</b> Distribución del Factor de Weibull – Pacasmayo.....	74
<b>Figura 3.16:</b> Distribución del Factor de Weibull – Paita.....	75
<b>Figura 3.17:</b> Consumo de energía anual por m <sup>3</sup> de agua - Islay.....	77
<b>Figura 3.18:</b> Consumo de energía anual por m <sup>3</sup> de agua - Pacasmayo.....	78
<b>Figura 3.19:</b> Consumo de energía anual por m <sup>3</sup> de agua - Paita.....	79

# ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1: Scrip en Matlab para el cálculo del factor de rozamiento “f” con el uso de la ecuación de Colebrook-White .....	93

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación evalúa los escenarios técnicos y económicos para la implementación de “plantas desaladoras de agua de mar” abastecidas con recursos renovables en la costa peruana.

Este trabajo inicia seleccionando tres zonas de alta vulnerabilidad de escasez hídrica indicados por el Sistema Nacional Georreferenciado – Sayhuite, identificando las áreas de Piura, La Libertad y Arequipa. A partir de los atlas, solar y eólico, del Ministerio de Energía y Minas (MINEM), se verificó que las regiones de Piura y La Libertad contaran con potencial en recursos renovables, presentando la energía eólica velocidades de viento de 8.65 m/s y 9.03 m/s respectivamente; mientras que Arequipa el mayor potencial está referenciado al recurso solar con 6 kWh/m<sup>2</sup>día. En paralelo, se evalúa el acceso a la red eléctrica de estas áreas, a través del mapa interactivo del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional, verificando que todas cuenten con líneas de transmisión existentes cercanas. Del mismo modo, se corroboró que las zonas seleccionadas cumplan con ciertos criterios, como la inexistencia de áreas naturales protegidas, reducido riesgo de fauna marina y presencia de vías de acceso.

Seguidamente se procede a calcular la demanda energética las plantas desaladoras, siendo éstas de 18.4 GWh/año para Paita provincia de Piura, 12.9 GWh/año para Pacasmayo provincia de La Libertad y 5.8 GWh/año para Arequipa. Con base a esta demanda, que representa el 80% del consumo energético total de las plantas desaladoras, se realiza el diseño de plantas renovables para el suministro de esta energía. Finalmente, se evalúan tres escenarios de abastecimiento de energía para cada lugar seleccionado, correspondientes a energía eólica, energía solar y red eléctrica. En el caso de Paita, el mejor escenario consiste en implementar una planta eólica de 6.1 MW; para Pacasmayo, una planta eólica de 4.1 MW; mientras que, para Islay, una planta solar fotovoltaica de 3.1 MW.

**Palabras clave:** Planta desaladora, central eólica, central solar fotovoltaica, sistema híbrido y estrés hídrico.

# INTRODUCCIÓN

De acuerdo al World Resources Institute, el Perú está calificado como uno de los países con mayor probabilidad de escasez de agua dulce, ubicándose dentro de los 33 países que encarará un estrés hídrico severo en los próximos años [1], por lo que garantizar el suministro de agua a la población se convertirá en uno de los ejes rectores de la política del estado peruano. En este sentido, asumiendo una tasa de crecimiento demográfico baja para el año 2025, la disponibilidad de agua por habitante será de 1 200 m<sup>3</sup>/año para el 2040; sin embargo, si se proyecta una tasa de crecimiento demográfico alta, la disponibilidad hídrica será de 1 000 m<sup>3</sup>/año, o menos, por habitante para la misma década [2].

El principal problema del acceso al agua recae en la distribución espacial del recurso y la ubicación de la población, ya que en la sierra y la selva se alberga el 98% del agua dulce disponible, mientras que el 2% se encuentra en la costa, donde reside el 70% de la población total del Perú [3]. Debido a ello la mayor parte de la población en ocasiones presenta desabasto de agua potable, lo que reduce la calidad de vida de los habitantes

Algunos estudios, realizados por organizaciones científicas que monitorean el cambio climático, pronostican que para el año 2100 la costa peruana perderá hasta el 40% de sus fuentes de agua. Por otro lado, se estima que se perderá aproximadamente el 10.3% del agua de los glaciares, mientras que el nivel de las lluvias disminuirá un 11% [4].

Ante esta situación, es necesario buscar estrategias para la provisión de agua a la población de la costa peruana, siendo la *desalación de agua de mar* una solución adecuada en el mediano y largo plazo, ya que el Perú cuenta con una zona costera de 2 250 km [5], donde existe zonas viables para la instalación de plantas desaladoras.

La desalación de agua de mar ha sido exitosa en lugares que padecen de estrés hídrico, tal es el caso de Arabia Saudí cuyos sistemas tienen una capacidad de 10.7 millones de metros cúbicos de agua diarios (m<sup>3</sup>/día); en Emiratos Árabes Unidos se procesan 8.4 millones de m<sup>3</sup>/día y Estados Unidos tiene una capacidad de procesamiento de 8.1 millones de m<sup>3</sup>/día.

De este modo, la capacidad de producción de agua desalada a nivel mundial alcanza los 87 millones  $\text{m}^3/\text{día}$  [6] [7].

Pese al éxito de la desalación de agua de mar en zonas de estrés hídrico, uno de los principales problemas para su masificación a nivel mundial es el elevado consumo de energía de este tipo de plantas, el cual varía entre 15 y 20 kWh por cada  $\text{m}^3$  de agua desalada producida [8].

En ese sentido, la incorporación de energías renovables para desalación de agua de mar se perfila como una de las alternativas de mayor interés en los próximos años, pues existen factores que hacen posible este tipo de proyectos, tal es el caso de la disponibilidad del recurso renovable en zonas vulnerables a la escasez de agua. Así, por ejemplo, se puede apreciar que las zonas con un factor climatológico frecuente de viento y aquellas que poseen un buen nivel de insolación, son las que padecen de una apreciable escasez de agua potable. Además, existe simultaneidad estacional entre la demanda de agua potable y disponibilidad de dichas energías, pues en numerosas localidades costeras y zonas turísticas, la demanda de agua potable aumenta de manera significativa en verano, promovido por el aumento de la población, y es precisamente en verano cuando la disponibilidad de la radiación solar es máxima [9].

Por este motivo, la presente tesis busca evaluar los diferentes escenarios para la implementación de plantas desaladoras abastecidas con energías renovables en la costa peruana, que contribuya al aprovisionamiento de agua potable de las zonas con mayor escasez de recursos hídricos del Perú.

Para ello se realizará la identificación de las zonas costeras de mayor vulnerabilidad debido a la escasez de agua, así como de las regiones con mayor potencial para el uso de recursos renovables eólico y solar, identificando las zonas idóneas para la implementación de las plantas desaladoras que puedan abastecerse empleando energía eólica y/o solar a nivel regional. Posteriormente, se evaluarán los criterios de diseño de la planta desaladora de ósmosis inversa más adecuada en cada uno de los lugares identificados a nivel regional, realizando un análisis de alternativas para el suministro de energía renovables según los lugares seleccionados. Finalmente se verificará la viabilidad técnica y económica tanto de la

planta desaladora como del sistema renovable de energía para las regiones costeras elegidas y se compararan los escenarios de los tres sitios a fin de identificar aquel que requiera mayor atención en el medio plazo.

## **Alcance**

La presente tesis involucra la identificación de las zonas con mayor estrés hídrico en las regiones costeras del país y el análisis de factibilidad técnico y económico para la implementación de una planta desaladora que será abastecida por energías renovables.

Las zonas costeras de mayor estrés hídrico y demanda de agua se identificarán empleando información secundaria proveniente del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), Ministerio del Ambiente (Geocostas), Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (Sernanp), Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles (Senace) y el Sistema Nacional Georeferenciado (Sayhuite), por lo que no se realizarán visitas de campo.

El tipo de tecnología para la planta desaladora que se va a diseñar se basa en los sistemas de ósmosis inversa, ya que su capacidad de producción es alta y el consumo energético es bajo en comparación con otros sistemas de desalación, lo que ayudará a obtener un precio competitivo por cada metro cúbico obtenido. Además, es el sistema de mayor utilización a nivel mundial.

El estudio técnico se enfoca en el diseño del sistema de bombeo debido a que los costos de energía de desalación se deben principalmente a la energía utilizada por las diferentes bombas, siendo despreciable el resto de los componentes eléctricos de la planta desaladora [10]. En otras palabras, el cálculo de la provisión de energía de fuentes renovables será diseñado para abastecer una energía equivalente al consumo del sistema de bombeo que requiere la planta.

Por último, el análisis económico involucrará los costos de construcción, operación y mantenimiento, más no los costos de estudios ni obtención de licencias previas que se requieren para la instalación de una planta desaladora.

## **Antecedentes**

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el Perú se ubica en el puesto 17 a nivel mundial, en relación a la cantidad de agua disponible por persona, mientras que el Banco Mundial lo sitúa en el puesto 14 en cuanto al acceso de agua en América Latina [11].

En este sentido, Perú cuenta con 106 cuencas hidrográficas, 12,200 lagunas en la sierra y más de 1,007 ríos por las que escurren 2 046.3 millones de metros cúbicos de agua al año (MMC), lo que representa el 1.9% del agua superficial total del planeta [12]. Sin embargo, siendo un país privilegiado por su oferta hídrica, este recurso no abastece al 100% de la población peruana, debido la acción de la naturaleza, el crecimiento poblacional, la urbanización, la distribución espacial desigual del agua y su variación estacional [13], por lo que la demanda de agua es asimétrica e inconsistente respecto a la oferta hídrica disponible.

Actualmente, 260 millones de personas en el mundo beben agua procedente de una planta desaladora. Se estima que este número aumentará debido al previsible incremento de la población y a la reducción de la oferta de agua dulce, producto de condiciones climáticas adversas.

Actualmente existen 18,000 plantas de desalación a nivel mundial, de las cuales el 70% de agua desalada se usa para el consumo humano, 20% para el uso industrial y 10% para usos en el sector agrícola y energético, según la Asociación Internacional de Desalación (IDA) [7] [14]. Se estima que para el 2025 la producción global será de 150 millones de m<sup>3</sup>/día [15].

A nivel de América Latina, los países que más uso hacen de la desalación de agua de mar son Perú y Chile. En Chile la desalación es ampliamente utilizada en el sector minero y



en el suministro de agua potable a los municipios, principalmente en las regiones áridas del norte del país [16].

Por otro lado, el Perú cuenta con algunas plantas desaladoras de menor tamaño para el consumo doméstico, así como para proyectos agrícolas y para la actividad minera. Este es el caso de la Minera Milpo, implementada en el 2007 en la playa Jahuai, provincia de Chíncha, en la región Ica; la cual procesa 324 m<sup>3</sup>/h de agua de mar a un costo de US\$ 2.4/m<sup>3</sup>. No obstante, la planta más grande del país produce 204.3 m<sup>3</sup>/h de agua desalada y pertenece a la mina fosfato Bayóvar en Piura [15].

Hasta el momento existen 17 empresas interesadas en la construcción de plantas desaladoras en el Perú [15]. Además, existe la viabilidad de la instalación de 19 proyectos de plantas desaladoras para el 2021, lo que generaría 1,440 m<sup>3</sup>/h de agua, beneficiando a 2.2 millones de peruanos y aumentando la cobertura del servicio de agua potable en 2% a nivel nacional [17].

Las fuentes principales de energía para abastecer los sistemas desaladores de las plantas termoeléctricas Fénix Power y Chilca Uno, ubicadas en Perú son gas natural y energía eléctrica. Actualmente no existen plantas desalinizadoras en el país que utilicen fuentes renovables para su abastecimiento energético.

## **Justificación y motivación**

El Perú, cuenta con una población de 31.4 millones de personas [13], de las cuales, el 86.1% accede a agua por red pública y el resto tiene acceso al agua de ríos, manantiales, lluvias, camiones cisterna o pilón de uso público [18]. En promedio, las familias consumen 3.9 m<sup>3</sup> de agua al mes a un costo de \$ 27; siendo el precio promedio por metro cúbico de agua de \$ 7 [19]. Los poblados más alejados reciben agua en camiones cisterna a costos más elevados y están más expuestos a enfermedades como diarreas, hepatitis A, tifoidea, cólera, entre otras, debido al reducido control de calidad del sistema de transporte, lo que produce problemas de salud [20].

En zonas urbanas, la continuidad del servicio de suministro de agua es de 21.7 horas al día; no obstante, del total de población que accede a agua por red pública todos los días, el 34.0% tiene este servicio en promedio 5 horas [12]. Asimismo, existen zonas críticas cuyo suministro de agua es de tres días a la semana [13].

Se estima que en los próximos años la demanda de agua se incrementará debido al crecimiento poblacional, pues para el 2050 la población del Perú será de 40.1 millones de habitantes [13]. Con estos niveles de demanda, se prevé que garantizar el suministro de agua será uno de los retos más importantes a atender.

Ante este panorama, existen tecnologías que podrían ayudar a combatir la crisis de la escasez de agua, tal es el caso del trasvase de cuencas y la desalación de agua de mar, con el fin abastecer de agua potable a la población; sin embargo, existen algunos inconvenientes con respecto a los trasvases, ya que conllevan la construcción de grandes embalses, tanto en la cuenca donante como en la cuenca receptora. Es por ello que la desalación se perfila como una mejor solución ante la escasez de agua, ya que requiere menor ocupación de terreno, menor movimiento de tierra y menor coste energético que el coste que supone la construcción de infraestructura necesaria para un trasvase [21].

Dado que una de las principales barreras para la implementación de plantas desaladoras es su alto consumo energético, el empleo de energías renovables como la eólica o solar resultan de gran interés, pues además de tener un abundante potencial en la costa, se puede aprovechar la radiación solar durante el día y la eólica durante la noche cuando es más prominente, además se puede optimizar el potencial renovable de estas tecnologías en el consumo de la planta, en donde se pueden generar intermitencias.

Por ello como una medida para disminuir los costos en la demanda de energía que el proceso implica, se debe modelar los sistemas con base en las energías renovables e híbridos en caso requiera apoyo de la red eléctrica, que las zonas de mayor escasez de recursos hídricos posean, garantizando las necesidades energéticas en las plantas desaladoras de ósmosis inversa de acuerdo a la demanda de agua que se requiera desalar diariamente; a fin de obtener una combinación óptima.

Estas alternativas parecen ser una de las mejores soluciones para el uso de agua de mar como agua potable, y a pesar de sus elevados costos, hay que considerar que la desalación no es una solución de tipo provisoria para afrontar la escasez de agua, por el contrario, es una pieza clave para todas las comunidades, pues ante la falta de agua y la necesidad del suministro, es necesario desarrollar las fuentes locales de su potabilización. Aquellas que lucían inviables, fueron descartadas por costosas y se visualizan como la columna vertebral de nuestro abastecimiento futuro.

Por último, es importante precisar que el Perú cuenta con 7 de las 9 características de vulnerabilidad ante el cambio climático, por lo que el aseguramiento del acceso al agua es uno de los ejes centrales de adaptación del país. En ese sentido, la presente investigación se alinea con el objetivo de acción ***“Promover mecanismos de financiamiento innovadores para la gestión sostenible y nuevas fuentes de agua”*** propuesto como parte de Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional (iNDC, por sus siglas en inglés) [22].

Cada uno de estos factores ha motivado el desarrollo de este proyecto, donde se evaluará la incorporación de las energías renovables en un sistema de desalación de agua de mar.

## **Objetivo general**

Evaluar los escenarios técnicos y económicos para la implementación de plantas desaladoras de agua de mar abastecidas con recursos renovables en la costa peruana.

## **Objetivos específicos**

- Identificar tres departamentos costeros de mayor vulnerabilidad debido a la escasez hídrica a nivel nacional, estimar su potencial eólico y solar y verificar su acceso a la red eléctrica.
- Seleccionar los lugares idóneos para la implementación de plantas desaladoras en los tres departamentos costeros y verificar que no cuenten con áreas naturales protegidas y que tengan vías de acceso.
- Calcular la demanda energética y costos de plantas desaladoras de agua de mar para los tres lugares seleccionados.
- Evaluar escenarios de abastecimiento de las plantas desaladoras con plantas solares fotovoltaicas, plantas eólicas o conectadas a la red eléctrica.
- Dimensionar las plantas eólicas y solares fotovoltaicas, de acuerdo a su viabilidad para abastecer la demanda energética de las plantas desaladoras de agua de mar y calcular sus costos.
- Comparar los costos de los escenarios de implementación de una planta desaladora por ósmosis inversa en los lugares idóneos identificados.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se profundizarán los conceptos y alcances de la desalación de agua de mar, así como también el avance tecnológico y los diversos procesos que se han implementado a través de los años, con el fin de compararlos y seleccionar el método más eficiente para su uso en la presente investigación.

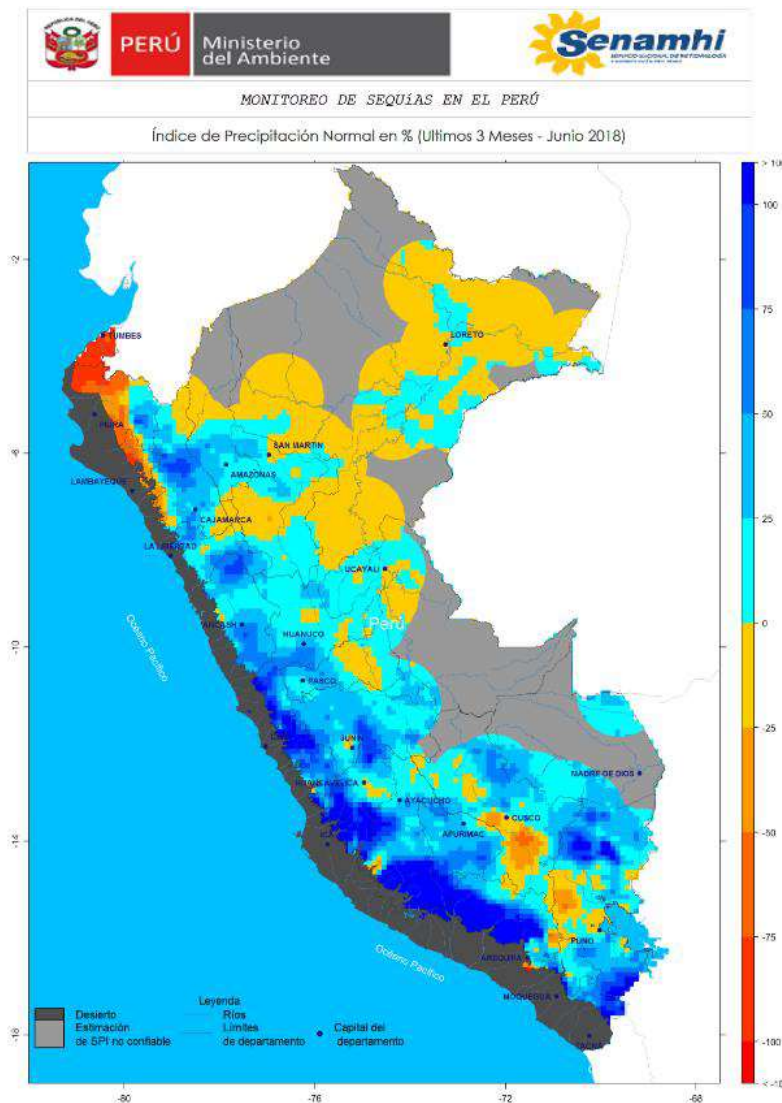
Además, se evaluará la matriz energética del Perú y los recursos energéticos renovables no convencionales disponibles para la generación eléctrica, buscando con ello puntos estratégicos de referencia, donde se pueda realizar el emplazamiento de la planta desaladora. Este reconocimiento de la matriz también nos proporcionará información de cómo se desarrollará y diversificarán las energías renovables en el mercado peruano en el futuro.

### **1.1 Zonas Costeras Vulnerables a la Escasez Hídrica en Perú**

En Perú existen distintas zonas que se visualizan como las que presentan mayor estrés hídrico, siendo Piura, La Libertad y Arequipa las de mayor vulnerabilidad. Estas zonas se localizan en la región de la costa sur y la región de la costa norte y su estrés hídrico se debe a los riesgos e incertidumbres naturales provocados por los efectos del cambio climático asociado a la existencia de las corrientes de Humboldt, El Niño y de la Cordillera de los Andes, que producen en forma cada vez más frecuentes eventos extremos de inundaciones y sequías.

Las inundaciones, asociadas a la presencia del Fenómeno El Niño, generalmente se focalizan en la Costa Norte del Perú. En el año 1997-1998 se presentó El Niño más intenso conocido hasta la fecha, cuya presencia solo en Piura ocasionó un daño estimado en más de US\$ 200 millones; los sectores más afectados fueron transporte y agricultura con el 57.8% y

20.2%, respectivamente. Del mismo modo las sequías han tenido graves impactos sociales, económicos y ambientales, principalmente en la Costa Sur (Arequipa, Moquegua y Tacna). Entre el 2000 y 2010 se reportaron a nivel nacional 163 eventos de sequías, siendo mayor en la vertiente del Pacífico (con 127 eventos), seguidos por la vertiente del Titicaca (25 eventos) y la vertiente del Atlántico (11 eventos) [9]. De acuerdo con la **Figura 1.1**, se puede observar que el porcentaje (%) de precipitación para la costa peruana no resulta tener un panorama favorable.



**Figura 1.1** Monitoreo de sequías en el Perú.  
Fuente: MINAM – SENAMHI (2018)

Además, los escenarios climáticos para la década del 2020 y 2030 se han construido añadiendo información regional de precipitación. Los escenarios proyectados presentan variaciones porcentuales de las precipitaciones para el año 2030, donde las deficiencias van del orden de 10 al 30% entre La Libertad, Tacna y Arequipa, e incrementos de hasta un 20% en los departamentos de Tumbes y Piura [49].

Para las precipitaciones, los cambios proyectados al 2030 aparecen en la **Tabla 1.1**.

Regiones	PP acumulada anual al año 2030 (mm anuales)	Cambios proyectados al 2030 (variación porcentual %)	Localidades principales
Costa norte	5 – 200	Entre +10 y +20% –10%	Gran parte de la zona Norte de Piura y La Libertad
Costa sur	5 – 50	Hasta –20%	Arequipa

**Tabla 1.1:** Precipitación acumulada anual proyectada a 2030 y variación porcentual al año 2030 en relación con el clima presente en la región costa norte y costa sur.

Fuente: Escenarios climáticos para el Perú 2030.

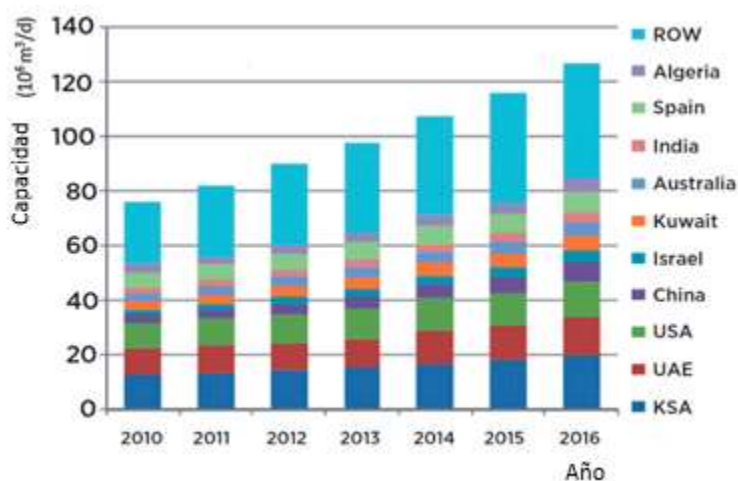
## 1.2 Desalación de Agua de Mar

La desalación es un procedimiento físico para separar el exceso de sales disueltas de las aguas, el agua salobre y salada o cualquier solución salina acuosa con el fin de recoger agua de bajo contenido en sal para cualquier uso adecuado, ya sea potable, industrial, farmacéutico, municipal o doméstico. Es un procedimiento industrial que requiere de un alto consumo de energía, lo que hace que el costo en la implementación de este proceso sea elevado [23].

Sin embargo, la desalación de agua de mar ofrece soluciones oportunas, proporcionando recursos hídricos en las zonas con escasez, o en donde se produzcan catástrofes naturales como terremotos, inundaciones, entre otros [24] [25].

El desarrollo de tecnologías para la desalación de agua de mar ha sido muy notable en los últimos años. España edificó la primera planta desaladora de Europa, la cual fue la puerta de entrada en la industria con la instalación de la planta Lanzarote, en las Islas Canarias, este proceso se extendió en regiones como India, Oriente Medio y Norteamérica. Sin embargo, la desaladora Ashkelon, es la planta más grande del mundo, inaugurada en el

2005, en la actualidad esta tecnología aporta casi el 45% del agua consumida en el país [26]. La **Figura 1.2** Evolución de la capacidad de producción de agua desalinizada a nivel mundial muestra la variación de la capacidad de las plantas desaladoras a través de los años.



**Figura 1.2** Evolución de la capacidad de producción de agua desalinizada a nivel mundial.  
Fuente: Enernew (2017)

Actualmente existen 18 000 plantas de desalación, de las cuales un 70 % de agua desalada se usa para el consumo humano, 20 % para el uso industrial y 10 % para usos en el sector agrícola y energético [7] [14].

### 1.2.1 Procesos de Desalación

Existen diversas tecnologías desarrolladas actualmente para desalar el agua de mar, las cuales poseen características distintas de acuerdo al tipo de energía, diseño y producción [24]. No obstante, todas tienen el mismo objetivo, reducir la concentración de sales disueltas del agua de mar, lo que permite separar las tecnologías en dos grupos generales, según el modo de separación de elementos, es decir, si el agua o la sal es el elemento que está separado [23]. En la **Tabla 1.2:** Clasificación de los métodos de desalación., se puede observar un enfoque panorámico.

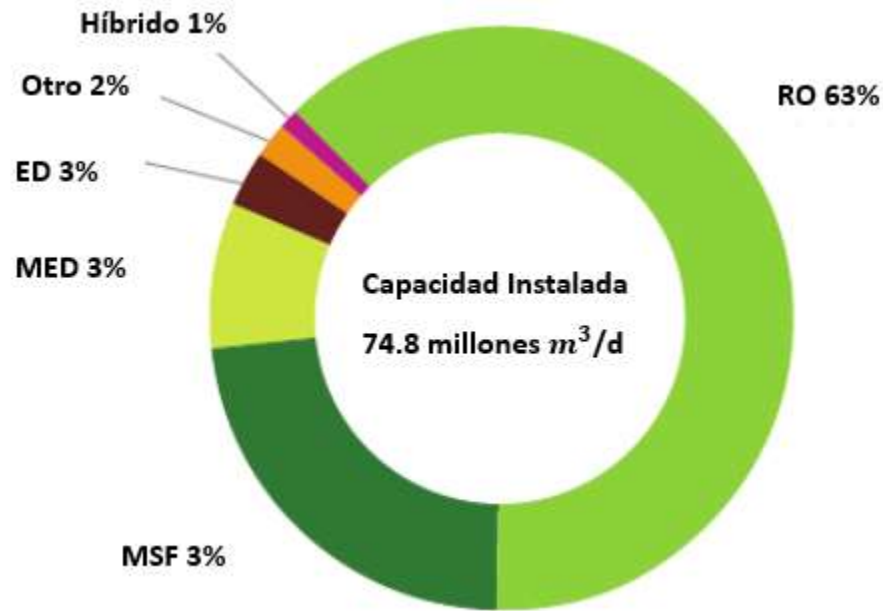


MÉTODOS DE DESALACIÓN				
Clase de Separación	Tratamiento	Proceso	Sistema	Energía Utilizada
Agua de Sales	Térmico	Destilación	Flash multietapa (MSF)	Calor (+)
			Multiefecto (MED)	
			Compresión mecánica de vapor (MVC)	
			Solar (SD)	
			Humidificación - Deshumidificación (H/D)	
	Cristalización	Congelación	Calor (-)	
		Formación de Hidratos		
Sales de Agua	No Térmico	Membranas	Ósmosis Inversa	Cinética
			Electrodiálisis	Eléctrica
		Resina	Intercambio de Iones	Atracción Química

**Tabla 1.2:** Clasificación de los métodos de desalación.

Fuente: Elaboración propia en base a Thermal Solar Desalination (2016), Instituto Tecnológico de Sonora (2012)

Las tecnologías de desalación más comunes, con mayor capacidad de producción instalada a nivel global, son: Ósmosis inversa (63 %), destilación flash multietapa (23 %), destilación multiefecto (8 %), electrodiálisis (3 %) y otros (2%) [27]. En la **Figura 1.3**, se puede observar los procesos de desalación más utilizados en la industria.



**Figura 1.3:** Procesos de desalación a nivel global  
Fuente: GWI DesalData, IDA

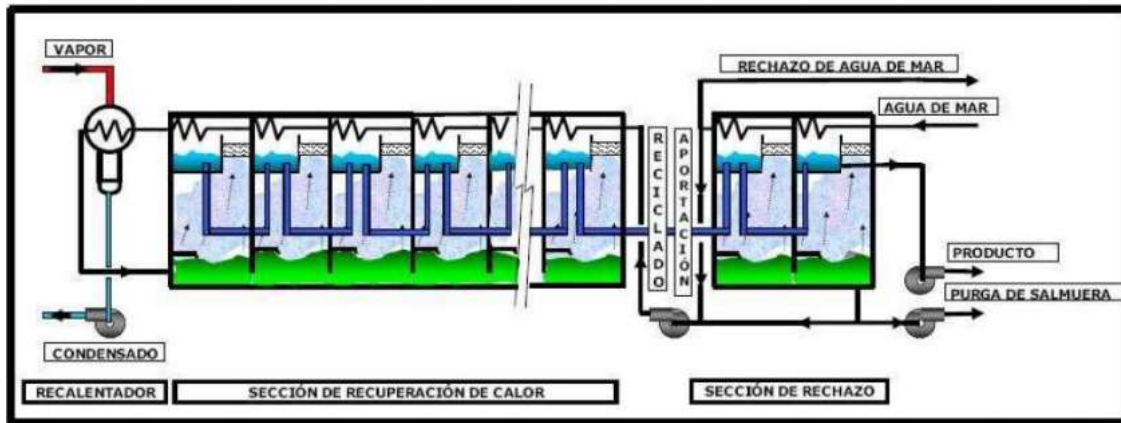
### 1.1.1.1 Procesos de Destilación

Los procesos de destilación necesitan calor para provocar el cambio de fase que separa las sales disueltas de aguas saladas de soluciones acuosas, cambiando la fase acuosa a vapor, el cual se condensa en agua pura, recuperándose parcialmente la cantidad de calor de los condensados en forma de calor sensible [24]. Para cada kilogramo de agua evaporada, se requiere una cantidad de energía aproximadamente de 2 300 kJ, el líquido restante es la salmuera concentrada [23]. Este consumo energético se da mediante un parámetro llamado Factor de Rendimiento [24].

#### *Destilación Flash Multietapa (MSF)*

El sistema MSF consiste en evaporar el agua de mar en cámaras o etapas (15 y 25 cámaras) [27]. En este proceso el agua de mar es calentada en un "Recalentador de salmuera", para luego pasar a otro recipiente llamado "Etapa", donde la presión reducida permite que el agua hierva inmediatamente de forma súbita (flash) [28]. El agua caliente se expande en cada cámara liberando vapor, el mismo que se condensa dando agua fresca y simultáneamente su

entalpía de condensación a la alimentación de agua de mar entrante [23]. Su capacidad de producción va de 30,000 hasta 75,000 m<sup>3</sup>/d [27]. La **Figura 1.4:** Esquema del Proceso de Destilación Flash Multietapa (MSF)., muestra el esquema del Proceso MSF.



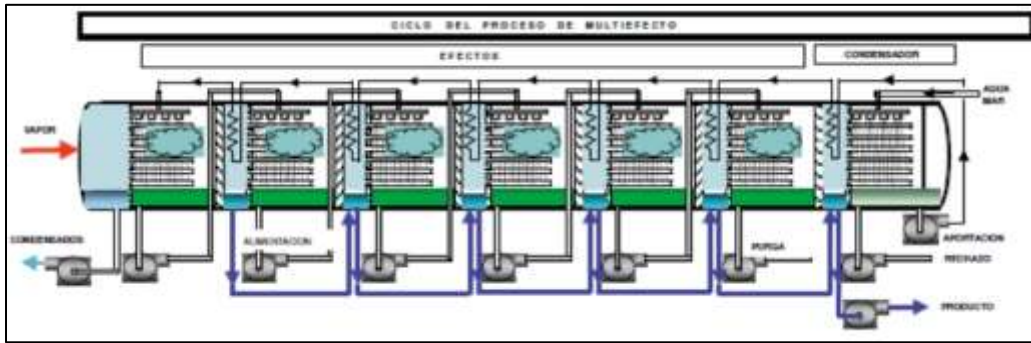
**Figura 1.4:** Esquema del Proceso de Destilación Flash Multietapa (MSF).

Fuente: Andrés Martínez (2014)

### *Destilación Multiefecto (MED)*

Se trata de un método de desalación de mediana a alta capacidad. El proceso guarda parecido con el sistema MSF, pero es más sencillo de operar y tiene menores costos de operación [23] [28]. La técnica del MED consiste en captar el agua de mar y calentarla mediante vapor presurizado en la primera etapa, luego se evapora el agua a través de etapas sucesivas. En el resto de las etapas se va utilizando el calor de condensación del vapor producido por la etapa anterior, cada una de las cuales tiene una presión menor [23].

Los vapores creados se condensan dando la entalpía de condensación al agua de mar entrante. Las plantas MED se construyen actualmente para capacidades entre 2 000 y 10 000 m<sup>3</sup>/d [28]. La **Figura 1.5** muestra el ciclo del proceso.

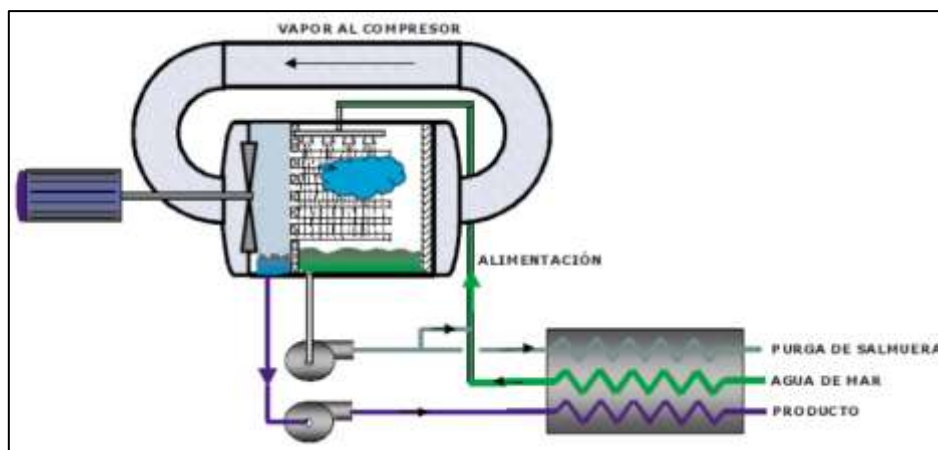


**Figura 1.5:** Esquema del Proceso de Destilación Multiefecto (MED)

Fuente: Andrés Martínez (2014)

### *Destilación Compresión Mecánica de Vapor (MVC)*

El sistema MVC consiste en evaporar el agua del mar mediante la aplicación del calor suministrado por la condensación de vapor comprimido [23]. El compresor es el que requiere mayor energía, este aumenta la presión en el vapor y baja la presión del lado del agua salada para bajar su temperatura de ebullición, logrando que el vapor aumente su temperatura varios grados centígrados. Luego, el vapor pasa al intercambiador de calor de placas, que constituye el condensador, donde se condensa y libera el calor que sirve para evaporar una parte del agua salada que circula por el otro lado del condensador, para obtener agua con una disminución considerable de sales [24] [9], como muestra la **Figura 1.6**.



**Figura 1.6:** Esquema del Proceso de Destilación Compresión Mecánica de Vapor (MVC).

Fuente: Andrés Martínez (2014)

### *Humidificación – Deshumidificación (H/D) y Destilación Solar (SD)*

El sistema H/D es un método que utiliza compartimentos separados, llamados torres o cámaras, para los procedimientos de evaporación (humidificación) y condensación (deshumidificación), la energía solar se recoge por separado principalmente por los colectores solares de placas planas, por ello es un método de baja a media capacidad [23].

Por otro lado, se tiene el sistema SD, el cual es un procedimiento que utiliza la radiación solar directamente. Los rayos solares incidentes son capturados en dispositivos llamados “alambiques solares”, donde la radiación solar es absorbida por el agua en la cuenca y se convierte en energía térmica. El vapor creado se condensa en el interior de la superficie transparente de la cubierta más fría de la cámara y recorre por canalones [23] [9].

Con respecto a los dos últimos procesos SD y H/D, estos no pertenecen todavía a los métodos convencionales de desalinización. Son procedimientos de pequeña capacidad y escasa investigación, no totalmente comercializados, debido a que ambos son procedimientos de muy baja calidad. [23].

#### **1.1.1.2 Proceso de Cristalización**

Los procesos de cristalización comprenden la congelación de la formación de agua de mar y la formación de hidratos. Ambos, a pesar de su simplicidad, no han encontrado grandes aplicaciones industriales [23].

#### *Congelación*

Este proceso consiste en congelar el agua y recoger los cristales de agua pura formados para fundirlos y obtener un agua dulce independientemente de la concentración del agua inicial, previo lavado y tamizado para eliminar las sales adheridas a los cristales [28].

A pesar de su simplicidad y de la investigación intensiva, la congelación no ha encontrado una amplia aplicación industrial, principalmente debido a los pequeños cristales formados durante el procedimiento de congelación, ya que no se separan fácilmente de la

suspensión de salmuera de hielo y casi la mitad del agua dulce producida se utiliza para lavar las sales de la superficie del hielo, reduciendo considerablemente la eficiencia del método y aumentando el costo del producto [23]. No se ofrecen datos del consumo específico de este proceso porque sólo existen experimentos de pequeña escala no extrapolables a la realidad.

### *Formación de Hidratos*

El agua se combina con otras sustancias para obtener hidratos sólidos. Para fines de desalinización, se han estudiado hidrocarburos como el propano o el butano [29]. Después de la formación del hidrato, el gas se libera proporcionando agua pura, este proceso no encontró aplicaciones comerciales a gran escala debido a muchos problemas surgidos durante la operación [23].

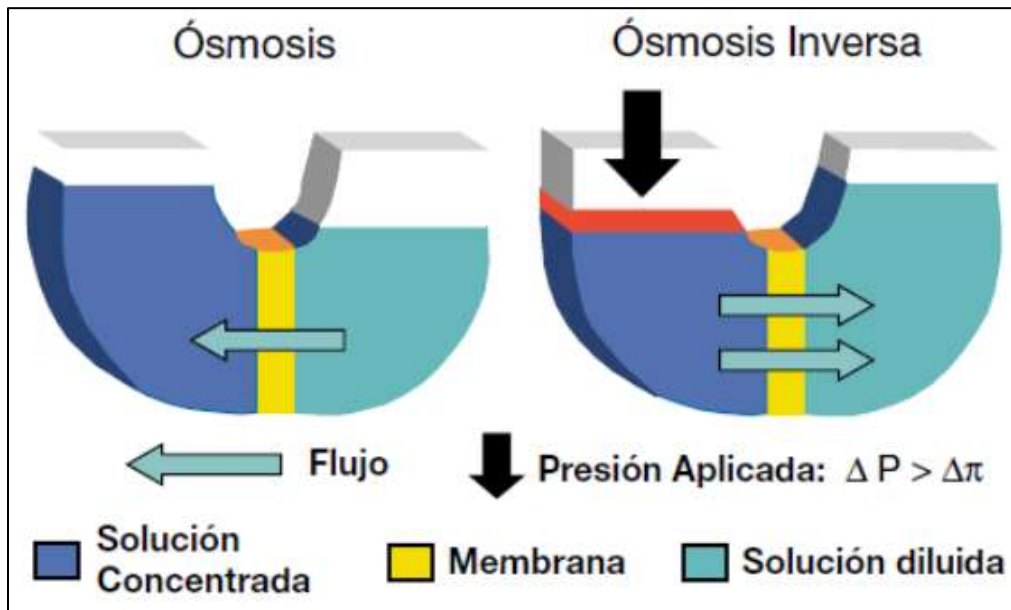
#### **1.1.1.3 Proceso por Membranas**

La desalinización de agua de mar por medio de membranas es un proceso para filtrar o remover partículas pequeñas como las sales e iones. El fluido pasa a través de una barrera que separa el agua salina en dos vertientes, una corriente de agua potable con baja concentración de sales disueltas y una corriente de salmuera concentrada. Los sistemas más utilizados son Osmosis Inversa y Electrodiálisis [24].

### *Ósmosis Inversa*

El sistema de ósmosis inversa (RO, por sus siglas en inglés), separa el agua de las sales mediante la aplicación de energía mecánica, en forma de presión, es decir las soluciones menos concentradas se desplazan, por diferencia de energía potencial, hacia las más concentradas a través de una membrana semipermeable sin necesidad de aplicar ninguna fuerza externa, por tanto, cuanto mayor sea la salinidad del agua, mayor será su presión osmótica a superar [9].

El proceso de RO consta de un sistema de pretratamiento mediante filtros de carbón activado y filtros de arena; para luego dar paso a los bastidores de membranas de osmosis inversa, lugar donde se aplican químicos para regular pH del agua de alimentación. Una vez desalinizada el agua, esta se conecta a un postratamiento para desinfectarla usando lámparas UV, cloración y ozonación, que permiten asegurar la calidad del agua en líneas de distribución y almacenamiento [24] [28]. La **Figura 1.7** explica la diferencia entre el esquema del Proceso Ósmosis y OR.



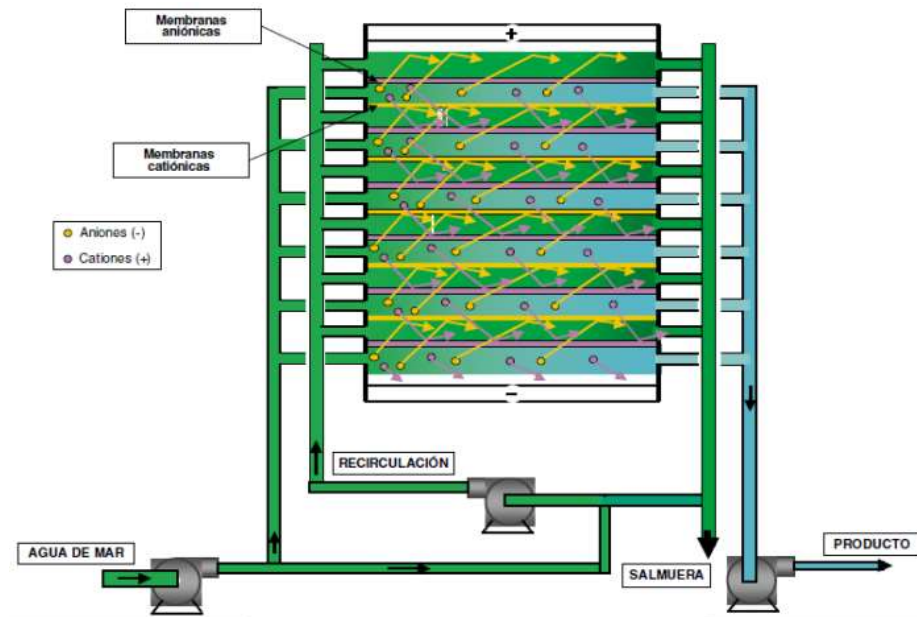
**Figura 1.7:** Esquema del fenómeno del Proceso de Ósmosis y Ósmosis inversa.  
 Fuente: Andrés Martínez (2014)

### *Electrodiálisis*

La Electrodiálisis (ED) al igual que la RO, desaliniza el agua del mar sin que se produzca un cambio de fase. El proceso de ED se basa en el hecho de que, si se hace circular por una solución iónica una corriente continua, los iones cargados positivamente (cationes) se desplazan en dirección al electrodo negativo o cátodo y del mismo modo, los iones cargados negativamente (aniones) se desplazan hacia el electrodo positivo o ánodo [9].

Por lo tanto, si entre el ánodo y el cátodo colocamos un par de membranas semipermeables, una de las cuales es permeable a los cationes y la otra lo es a los aniones,

paulatinamente se formará una zona de baja salinidad entre las dos membranas, este es el proceso conocido como “electrodiálisis”, el consumo de energía en ED es proporcional a la concentración de sal en la solución y por lo tanto se aplica principalmente a aguas salobres [23] [24]. En la **Figura 1.8** se muestra el esquema de funcionamiento de la electrodiálisis.

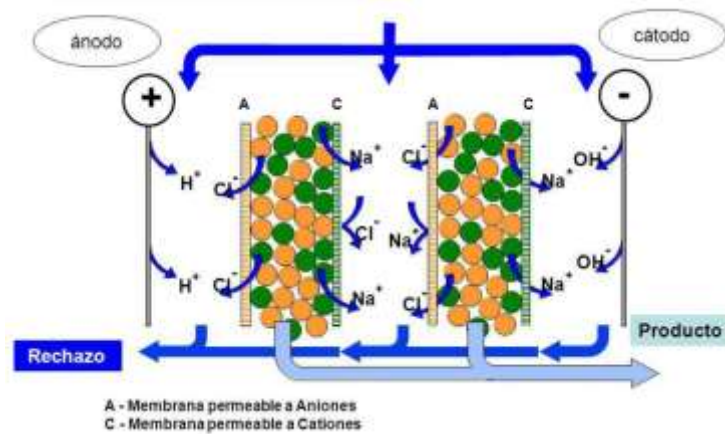


**Figura 1.8:** Esquema del fenómeno de Electrodiálisis.  
Fuente: Andrés Martínez (2014)

#### 1.1.1.4 Intercambio de Iones

El intercambio iónico es un método fisicoquímico que utiliza resinas de intercambio aniónico y catiónico para desalar las aguas, se aplica principalmente al agua dura natural o agua salobre de baja calidad. Se han realizado estudios para el agua de mar, pero el procedimiento no ha encontrado una amplia aplicación industrial, principalmente debido a la rápida saturación de resinas con iones, lo que hace el procedimiento costoso [23]. En la **Figura 1.9** se muestra el esquema de funcionamiento del intercambio de iones.





**Figura 1.9:** Esquema del fenómeno de Intercambio de Iones.  
Fuente: Lenntech (2014)

De todos los procesos de desalinización de agua de mar descritos, los más factibles para la aplicación a una planta desaladora son MSF, MED, MCV Y RO, como muestra la **Tabla 1.**

CARACTERÍSTICA	MSF	MED	CV	OI
Desalación de agua de mar	SI	SI	SI	SI
Tipo de energía	Térmica	Eléctrica	Eléctrica	Eléctrica
Consumo energético (kJ/kg)	Alto (>200)	Alto-Medio (150-200)	Medio (100-150)	Bajo (<80)
Coste de instalaciones	Alto	Alto/Medio	Alto	Medio
Capacidad de producción (m3/día)	Alta (>50.000)	Media (<20.000)	Baja (>5000)	Alta (>50.000)
Posibilidad de ampliación	Difícil	Difícil	Difícil	Fácil
Fiabilidad operación	Alta	Media	Baja	Alta
Calidad del agua desalada (ppm)	Alta (<50)	Alta (<50)	Alta (<50)	Media (300-500)
Superficie de terreno requerida	Mucha	Media	Poca	Poca
Atención requerida	Alta	Mínima	Mínima	Media
Mantenimiento requerido	Alto	Medio-Bajo	Bajo	Medio
Formación de incrustaciones	Alta	Media	Media	Media
Corrosión	Alta	Media	Media-Baja	Baja
Duración de membranas	-	-	-	5 años
Ventajas relativas	Alta calidad de producto.	Alta calidad de producto.	Alta calidad de producto.	Sencilla operación.
	Larga experiencia.	Fácil operación.	Opera casi sin atención.	Tamaños variados.
	Muchos fabricantes.	Puede acoplar turbina.	Fácil automatización.	Consumo de energía bajo.
	Puede acoplar turbina.	Menos energía eléctrica y menos costo que MSF	Fácil instalación.	Puede recuperar energía.
	Capacidad muy alta.	Puede operar con calor residual		Fácil instalación
Desventajas relativas	Sensibles a la corrosión e incrustaciones.	Poca experiencia operativa.	Tamaño unitario pequeño.	Requiere pretratamiento
	Requiere mucha atención.	Pocos fabricantes	Poco conocimiento	Opera a alta presión
			Compresor de alta velocidad requiere mantenimiento.	Poca economía de escala
Aplicaciones principales	Agua de proceso o de caldera	Agua de proceso o de caldera	Agua de proceso o de caldera	Agua potable
	Agua potable	Agua potable	Agua potable	Agua de proceso o de caldera
				Tratamiento de aguas residuales

**Tabla 1.3:** Comparación de los Procesos más viables para una Planta Desaladora.  
Fuente: Universidad Pública Navarra (2014).

Desde el punto de vista tecnológico, actualmente el proceso de ósmosis inversa es el más adecuado, debido a la flexibilidad en el dimensionamiento de la planta junto con un consumo energético reducido, permitiendo que la ósmosis inversa sea el sistema con mayores posibilidades para el futuro inmediato; asimismo, las mejoras en las membranas, en los recuperadores de energía y su sencilla operación permiten en la actualidad que la ósmosis inversa sea indispensable para una desalinización más competitiva [30]. Esto se debe a que proporcionan productos más valiosos y conllevan menos efectos secundarios que los otros procesos, ya que la membrana interpone una nueva fase entre la alimentación y el producto, controlando la transferencia de masa entre ellos y siendo más selectiva, porque permite el paso de algunos componentes mucho más rápido que otros, dejando pasar el agua prácticamente libre de sales disueltas [31].

Para el presente trabajo de investigación se optó por un sistema de osmosis inversa, ya que su capacidad de producción es alta y el consumo energético es bajo, lo que ayuda a obtener un precio competitivo por metro cúbico de agua producida.

### **1.2.2 Funcionamiento de una planta desaladora de ósmosis inversa**

El método de desalación de una planta de ósmosis inversa inicia con la captación del agua de mar por medio de tubos de aspiración, esta primera etapa cuenta con pantallas protectoras que evitan extracción de vida marina y escombros [32]. El agua debe tratarse antes de entrar en la unidad de desalación, por ello debe pasar por un pretratamiento para eliminar materias en suspensión gruesa, material orgánico y microorganismos, tales como arena y plancton; posteriormente, el agua debe ser pretratada por un método químico para eliminar o evitar que las sales de calcio y magnesio formen una pared dura sobre las superficies metálicas calientes del sistema térmico o sobre las superficies de la membrana [29]. Asimismo, el agua de mar es bombeada a través de un proceso llamado ósmosis inversa, donde se remueven más del 99% de la sal y los minerales, debido a que este proceso filtra por medio membranas la sal y otros contaminantes disueltos. Se obtiene dos productos finales: *Agua dulce* y *Salmuera*. La Salmuera residual es más salada que el agua de mar, por lo que se mezcla con agua residuales tratadas para que recupere su salinidad normal antes de que sea vertida de nuevo al mar. El agua dulce pasa un postratamiento, donde se le añade

cloro y algunos minerales para que el agua desalada sea aceptable [32]. La **Figura 1.10:** Esquema de bloques de una Planta de Ósmosis Inversa. muestra los pasos generales a seguir en una instalación de una planta desaladora de ósmosis inversa.



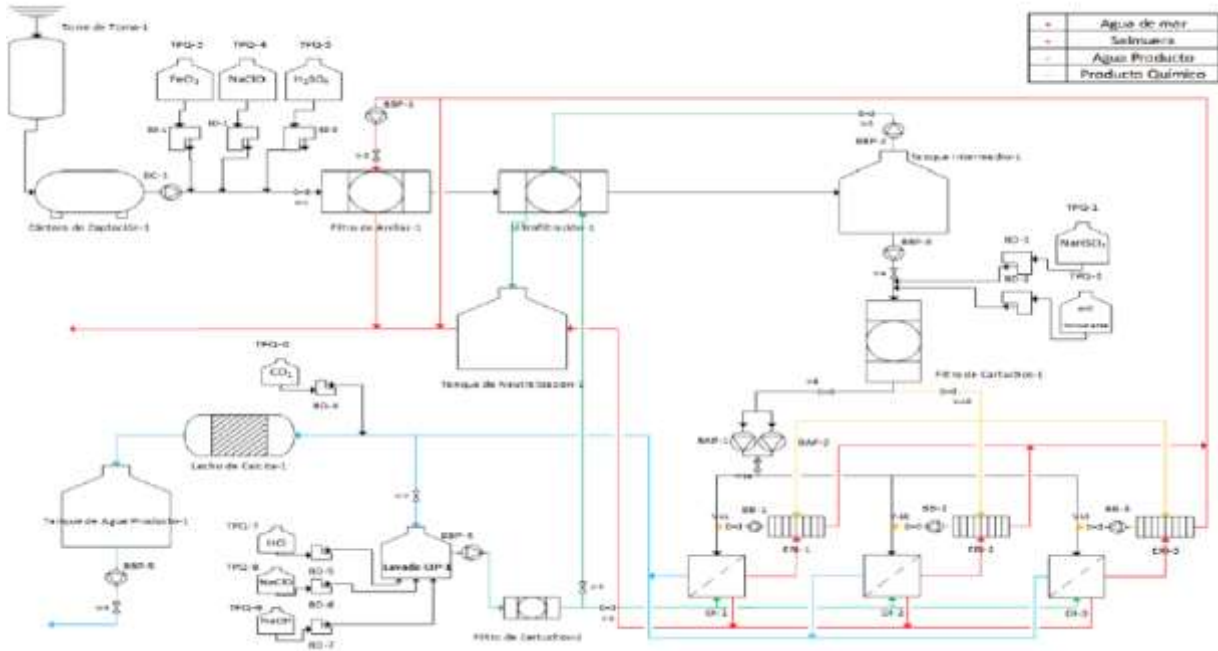
**Figura 1.10:** Esquema de bloques de una Planta de Ósmosis Inversa.  
Fuente: A.M Hidalgo Montesinos

El consumo de energía en una planta desaladora por osmosis inversa oscila entre 3 a 6 kWh/m<sup>3</sup> [8]. Donde, las bombas son los elementos de mayor demanda energética, ya que representan el 80% del consumo total de una Planta desaladora.

Un sistema de bombeo está compuesto por:

- Bomba de captación
- Bomba de baja presión
- Bombas de alta presión
- Bombas Booster
- Bombas de contralavado Filtros de Anillas
- Bombas de contralavado Ultrafiltración
- Bombas de contralavado CIP
- Bombas de agua producto

El sistema de bombeo se encuentra distribuido en las distintas etapas del proceso, tal y como se puede la **Figura 1.11**.

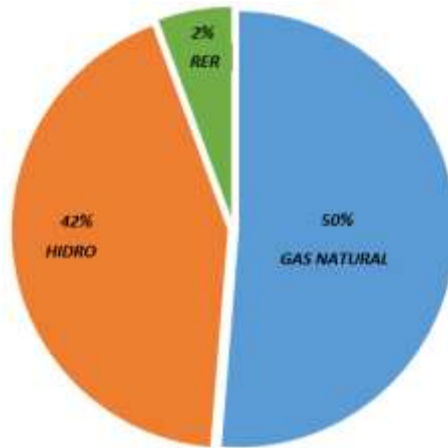


**Figura 1.11:** Distribución de bombas por etapas de una Planta Desaladora por Ósmosis Inversa  
Fuente: Jordi Colomina Montava

### 1.3 Recursos Energéticos Disponibles en Perú

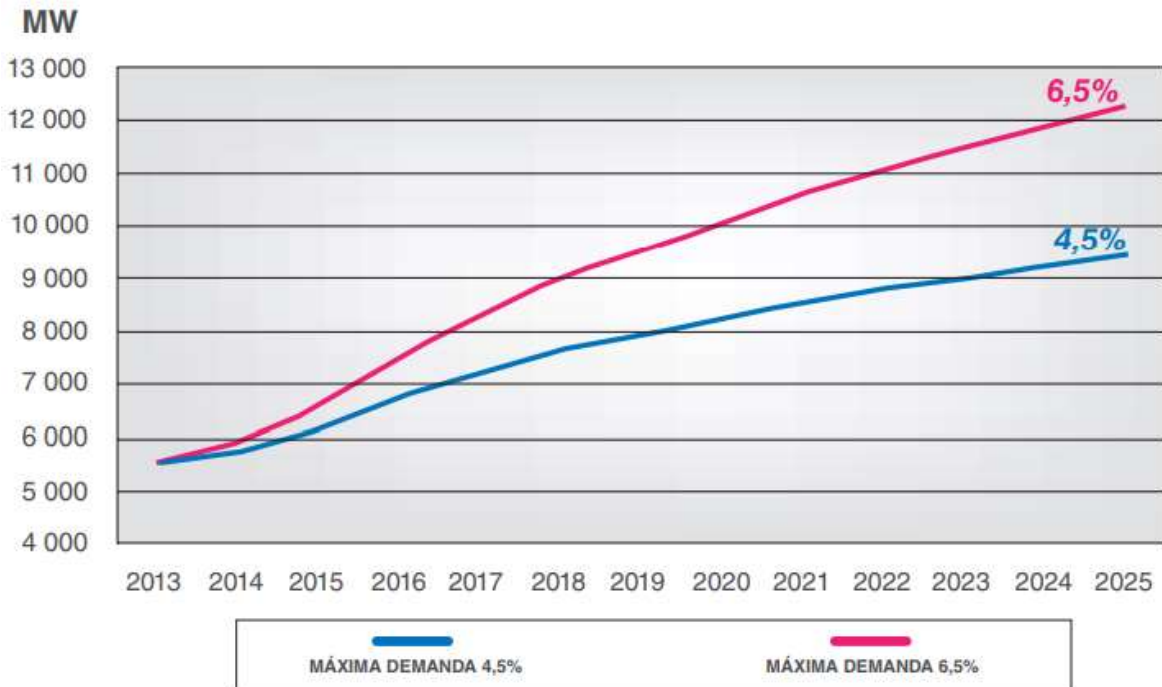
El Perú cuenta con una gran diversidad de recursos energéticos, sin embargo, el tipo de generación eléctrica no es diversificada ya que cuenta con 89 centrales termoeléctricas, 65 hidroeléctricas, 7 centrales solares y 5 centrales eólicas. De acuerdo a las últimas mediciones de 2018 del COES, se tiene una capacidad instalada de 13.4 GW [33].

Actualmente la matriz eléctrica en el Perú se encuentra distribuida según su participación en el mercado energético, donde la hidroenergía abastece un 50% del consumo, seguido del gas natural con un 48% y 2% proveniente de las RER, tal como muestra la **Figura 1.12**.



**Figura 1.12:** Matriz energética del Perú  
Fuente: COES (2017)

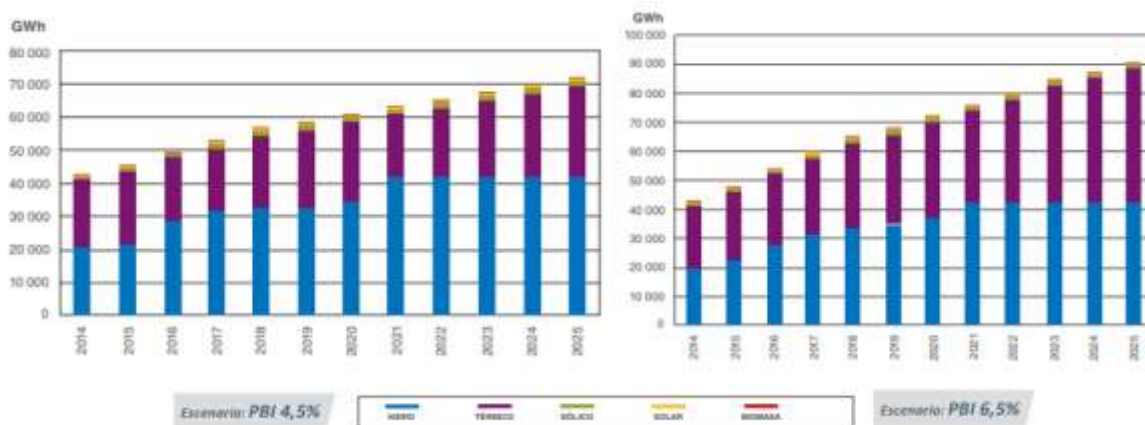
Según los escenarios de crecimiento del PBI, se estima una que para el 2025, la proyección máxima de demanda se incremente entre un 4.5% y 6.5%, alcanzando un valor entre 9,500 MW y 12,300 MW, tal y como se puede observar en la **Figura 1.13**.



**Figura 1.13:** Proyección de la Máxima Demanda 2014 – 2025.  
Fuente: MINEM (2014)

La capacidad total en potencia instalada en los últimos años se ha incrementado con rapidez en el norte y el sur, convirtiéndose en crecientes focos de desarrollo, logrando con ello una capacidad total de crecimiento de 6 GW aproximadamente [34] [35]. La producción de energía eléctrica estimada para el año 2025 provendrá, en mayor participación de la hidroelectricidad, incrementándose también la participación de fuentes renovables no convencionales a través de subastas y en función a los costos competitivos de las tecnologías que utilizan [36].

Con relación a los recursos renovables no convencionales, se estima que para los años 2020 y 2021 estos eleven su contribución a 5%, lo cual evidencia el compromiso por desarrollar este tipo de fuente de energía. Esto, permitiría un cambio regulatorio en el Estado y una mayor participación de los Recursos Energéticos Renovables (RER), siendo con ello más viable la instalación de estos sistemas. De acuerdo con la **Figura 1.14**, podemos observar dos posibles escenarios de producción de electricidad según el PBI, donde se muestra que para el 2020 se tendrá una producción de 70 GWh y el 2021 una producción de 90 GWh para un PBI DE 4.5% y 6.5%.



**Figura 1.14:** Producción de Electricidad por tipo de Fuente.  
Fuente: MINEM (2014)

### **1.3.1 Recursos Renovables**

El Perú cuenta con abundantes recursos energéticos de tipo renovable los cuales pueden desempeñar un papel importante para garantizar la energía necesaria para sistemas desalación. Actualmente se tiene un potencial aprovechable de 120,000 MW de energía renovables no convencionales de los cuales solo se está explotando el 3% [37]. El uso de fuentes alternativas para la desalinización del agua ha cobrado interés debido a que la energía necesaria para el proceso puede ser obtenida por sistemas solares y/o eólicos. El Perú posee potencial aprovechable para dichas energías, especialmente solar con 25,000 MW y eólica con 22,000 MW [37]. Además, actualmente cuenta con 657 MW instalados en energías renovables y para finales del 2020 se tendrá 374 MW instalados adicionales [34].

#### **1.3.1.1 Solar**

Según el Atlas de energía solar del Perú las zonas de mayor potencial de energía solar del país se encuentran en la costa sur, en las regiones de Arequipa, Moquegua y Tacna (entre los 16° y 18° de latitud sur), donde la radiación promedio horario anual es de alrededor de 875 vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ) [34].

Sin embargo, la costa norte también presenta valores altos de energía solar en las regiones de Tumbes, Piura y el norte de Lambayeque (entre los 3° y 6° de latitud sur), donde el promedio anual de energía solar incidente diaria está en un rango de 6.0 a 6.5 kWh/m<sup>2</sup>día [38].

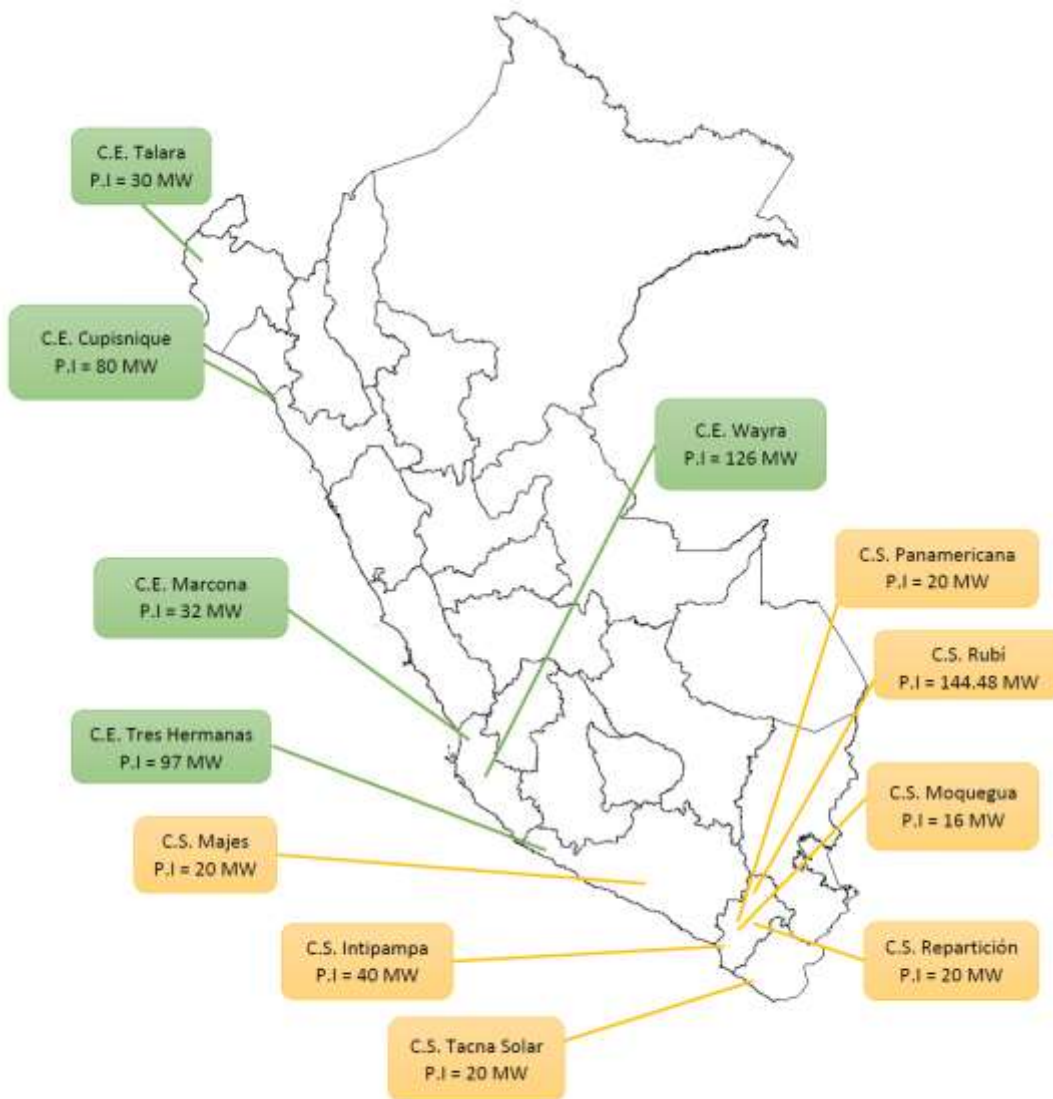
#### **1.3.1.2 Eólico**

El Perú tiene un potencial de energía eólica total de 77,000 MW [37]. En abril de 2016, el Ministerio de Energía y Minas (MEM) señaló que el potencial eólico aprovechable del Perú es 22,000 MW y a esta fecha se han aprovechado 372.3 MW en centrales de generación eléctrica, es decir 1% del potencial total [34].



Con respecto al recurso eólico, el mayor potencial en el Perú se encuentra ubicado entre Ica y Tacna por el Sur y entre Ancash y Tumbes por el Norte [39]. Las velocidades pueden llegar a alcanzar valores mayores a 5 m/s, siendo económicamente factibles para la generación de electricidad.

En la **Figura 1.16**, se tiene la distribución de las plantas de energías renovables solar y eólica con sus respectivas potencias instaladas (P.I) al 2017, según MINEM.



**Figura 1.15:** Perú: Distribución de Energías Renovables: Solar y Eólica.  
Elaboración Propia.

Fuente: OSINERGMIN Energías Renovables (2017)

## 1.4 Producción de Energía Renovable

Los resultados de la última subasta alcanzaron valores muy competitivos en cuanto a costos de generación, de modo que, en América Latina, el Perú presenta los precios más bajos, siendo el segundo en energía eólica y tercero en energía solar PV [40].

El Perú tiene importantes recursos energéticos y solo algunos han sido utilizados. En el sur existen abundantes recursos solares, así como recursos eólicos en el norte y parte de las costas centrales, que podrían utilizarse en el futuro para generar electricidad [34]. Es por ello que ha impulsado el desarrollo de las energías renovables (RER) por medio de las Subastas de Energías Renovables No Convencionales organizadas por el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía (OSINERGMIN) y el Ministerio de Energía y Minas (MINEM).

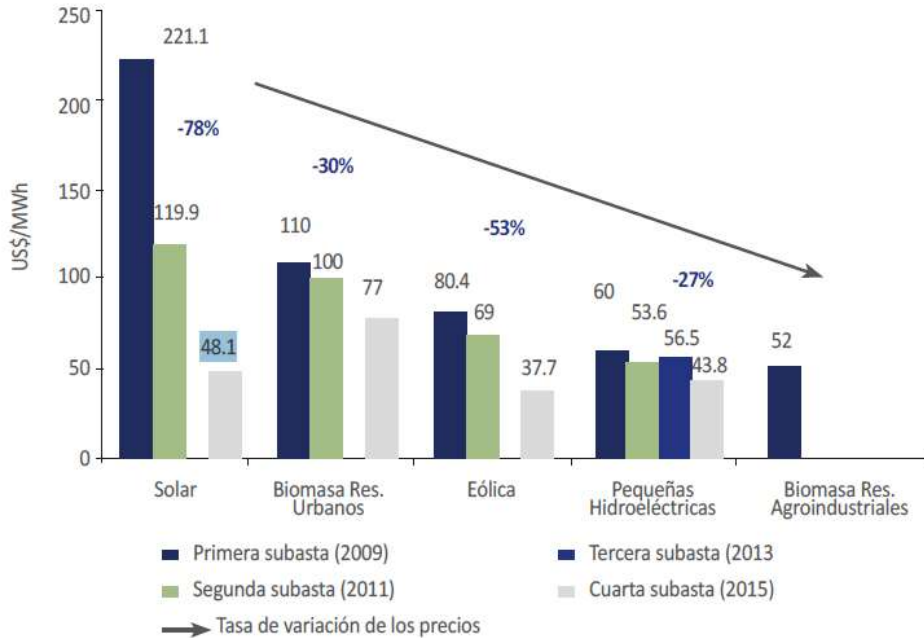
### 1.4.1 Centrales solares

El aprovechamiento del recurso solar se enfoca principalmente en la tecnología PV (fotovoltaica). Sin embargo; la participación de energías solar PV solo representa el 0.8% en la matriz energética [41]. Dentro de la generación mediante los RER con uso de energía solar, existen seis plantas solares fotovoltaicas, de las cuales cuatro poseen una capacidad instalada de 20 MW cada una, mientras que la quinta tiene una capacidad de 16 MW y la recientes inauguradas Rubí de 144.48 MW e Intipampa de 40 MW [42] [43]. Todas estas se encuentran ubicadas en el sur del país, según la **Tabla 1**.

CENTRAL	POTENCIA INSTALADA	INVERSIÓN (MMUSD\$)	TARIFA DE ADJUDICACIÓN (ctvs. USD\$/kWh)
<b>Central Majes Solar 20T</b>	20 MW	73.6	22.25
<b>Central Panamericana Solar</b>	20 MW	94.6	21.5
<b>Central Solar Moquegua</b>	16 MW	43	11.99
<b>Central Repartición 20T</b>	20 MW	73.5	22.3
<b>Central Tacna Solar</b>	20 MW	94.6	22.5
<b>Central Solar Rubí</b>	144.48 MW	264.1	4.79
<b>Central Solar Intipampa</b>	40 MW	52.3	4.85

**Tabla 1.4.** Centrales Fotovoltaicas en el Perú  
Fuente: Osinergmin, 2017 [44].

Como se muestra en la **Figura 1.16**, gracias a las Subastas RER se ha logrado alcanzar precios muy competitivos para los proyectos fotovoltaicos, los cuales en la última subasta llegaron a los 48 US\$/MWh, como resultado de la disminución del costo de la tecnología y de la competencia dada en el proceso de la oferta [45]. A pesar del crecimiento, actualmente solo se está aprovechando el 1.26% de todo el potencial solar [46].



**Figura 1.16.** Resultados de las subastas RER

Fuente: La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático, 2017 [44].

## 1.4.2 Centrales eólicas

El Perú tiene en operación comercial en el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), cuatro parques eólicos con una potencia instalada de 239 MW como resultado de las subastas de RER realizadas. En la cuarta subasta, llevada a cabo en 2016, se adjudicaron tres proyectos de generación eléctrica con tecnología eólica, con lo que para fines del año 2018 se tendría una potencia instalada de 162 MW [47].

En cuanto al costo por generación, los proyectos eólicos han reducido sus precios de 80 US\$/MWh registrados en la primera subasta hasta 38 US\$/MWh en la última subasta,

como resultado de la disminución de los costos de la tecnología y de la competencia del proceso.

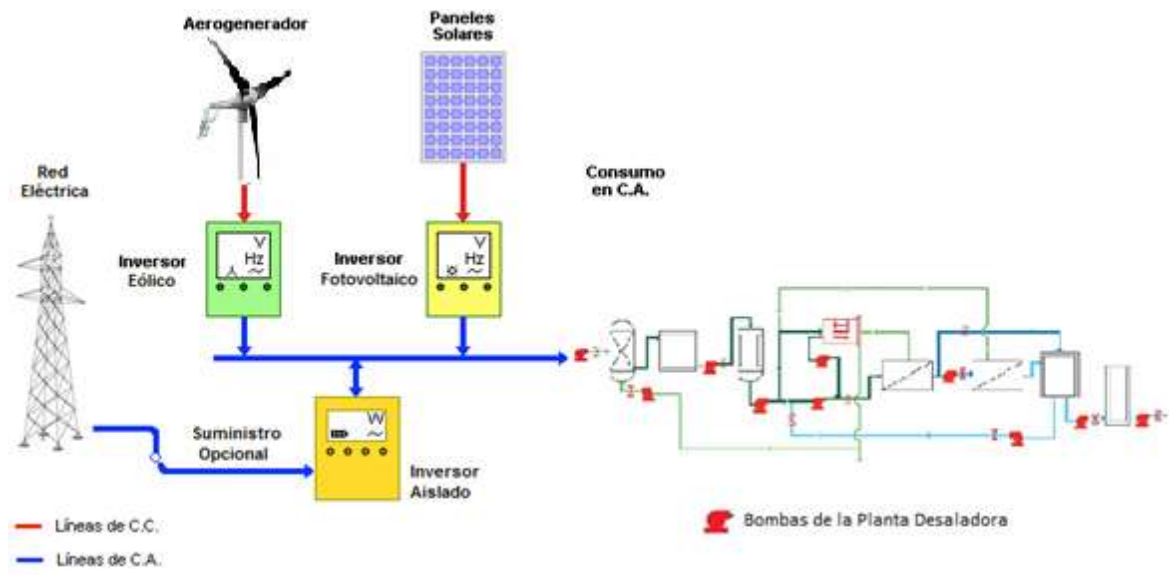
La caída de los costos continúa impulsando a la baja el precio normalizado de esta fuente de energía renovable. Según la International Energy Agency (IEA), se estima que alcanzó la paridad de red de forma general en todo el continente europeo en torno a 2010 y en Estados Unidos en 2016, debido a una reducción adicional de sus costos del 12%. De acuerdo con la International Renewable Energy Agency (IRENA), la instalación de energía eólica requiere de una considerable inversión inicial, pero posteriormente no presenta gastos de combustible. Es por eso por lo que su precio es mucho más estable que el de otras fuentes de energía fósil.

El costo marginal de la energía eólica, una vez que la planta ha sido construida y está en marcha, es generalmente inferior a US\$ 0.01 por kWh [37], e incluso se ha visto reducido con la mejora tecnológica de las turbinas más recientes.

En el 2014 entraron en operación las primeras tres grandes centrales eólicas en el país: Marcona (Ica) de 32 MW, Cupisnique (La Libertad) de 80 MW y Talara (Piura) de 30 MW. El 11 de marzo de 2016 se integró al SEIN la central eólica de generación eléctrica Tres Hermanas, ubicada en el distrito de Marcona (Ica), la cual cuenta con una potencia instalada de 97.15 MW y demandó una inversión de casi US\$ 197 millones [37].

### **1.4.3 Sistemas híbridos**

Cuando dos o más sistemas de generación de energía se combinan en una sola instalación para la generación de energía eléctrica, surge lo que se denomina un sistema híbrido, compuesto de diferentes tipos de fuentes energéticas (renovables y no renovables).



**Figura 1.17:** Esquema de abastecimiento de una Planta desaladora por medio un Sistema Híbrido energético.  
Fuente: KLIUX Energy

En estrategias de hibridación se puede lograr una gestión más eficaz de los recursos y una mayor variedad de los productos, estableciendo una cartera de recursos de producción intermitente con patrones complementarios de generación de electricidad [34] [48].

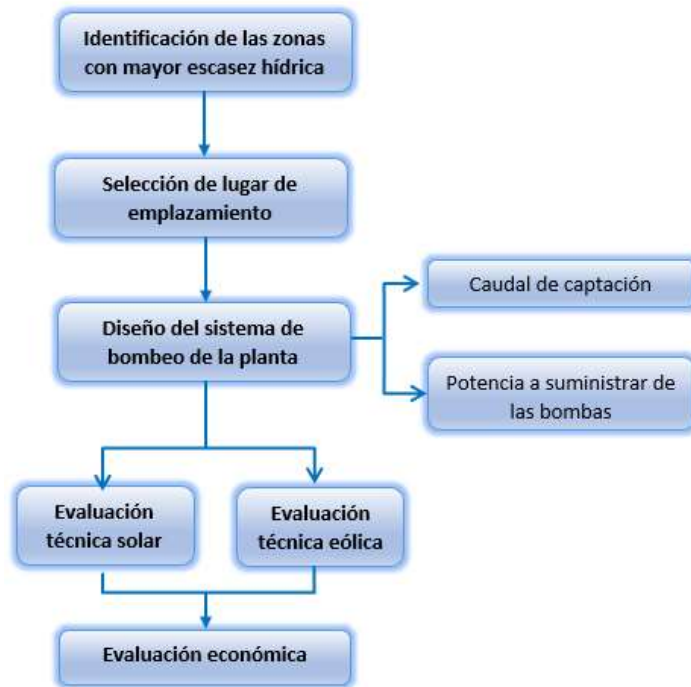
En la actualidad las desaladoras de ósmosis inversa requieren de un suministro constante de energía para evitar la degradación de sus membranas, los sistemas híbridos con base en las energías renovables y no renovables pudiesen ser la clave para el éxito de este tipo de plantas [48].

## CAPÍTULO II

### METODOLOGÍA

La presente tesis utilizó la metodología no experimental de la investigación, puesto que no existe una manipulación de las variables, la data se recopiló tal como se encuentra en las fuentes de información para posteriormente ser analizada.

El estudio pretende evaluar los escenarios técnicos y económicos para la implementación de plantas desaladoras abastecidas con Energías Renovables en la costa peruana. Para poder llevar a cabo esta evaluación, se siguió el proceso propuesto en la **Figura 2.1**.



**Figura 2.1** Diseño de la planta de generación eléctrica abastecida con RER.  
Fuente: Elaboración propia.

Este proceso consistió en un análisis previo de la información recopilada, donde se identificaron los departamentos con mayor cantidad de población sin acceso a agua en la costa peruana, sin embargo; estos lugares debieron contar con acceso a la red eléctrica y la zona debió poseer un buen potencial de recursos renovables (solar/eólico).

Seguidamente se localizó el lugar idóneo de emplazamiento para cada uno de los departamentos seleccionados, para ello las provincias a elegidas debieron contar con acceso a la carretera y no coincidir con las áreas protegidas. Posteriormente se realizó el diseño de la planta desaladora por ósmosis inversa para cada uno de los lugares de emplazamiento seleccionado, donde se tomó en cuenta la cuantificación de la energía y los costes por metro cúbico en dichos lugares.

Asimismo, se verificó que el recurso renovable que poseen las provincias seleccionadas sea viable para abastecer la demanda energética de la planta desaladora. Después se verificó la viabilidad del recurso renovable para cada uno de los lugares de emplazamiento seleccionados y se procedió a realizar el diseño de la planta desaladora abastecida con RER, donde se obtuvo el cálculo de los costes de todo el sistema para todos los escenarios evaluados.

Finalmente, se realizó una evaluación de los escenarios técnicos – económicos para la implementación de plantas desaladoras de agua de mar abastecidas con recursos renovables en la costa peruana. Cada uno de los pasos mostrados será detallado en los subtítulos siguientes.

## **2.2 Identificación de zonas vulnerables por escasez hídrica**

Se realizó un análisis previo a nivel nacional de los departamentos que cuentan con una mayor cantidad de personas sin acceso al recurso hídrico, tomando como información los estudios realizados por el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Del análisis realizado, se escogieron tres departamentos con mayor estrés hídrico y se realizó el cálculo de su demanda hídrica por medio de la **Ecuación 1**. Para ello se tomó en cuenta que el consumo promedio de agua en Perú es de 0.25 m<sup>3</sup> al día [50].

$$Q_b = Q_{per} * Num. Hab$$

**Ecuación 1:** Consumo de agua

Donde:

$Q_b$  = Consumo bruto (m<sup>3</sup>/día)

$Q_{per}$  = Consumo promedio en Perú (m<sup>3</sup>/día por habitante)

Además, para el cálculo fue necesario conocer la cantidad de personas sin acceso a agua potable, así como la población total de los departamentos, dicha información fue obtenida del Sistema Nacional Georeferenciado Sayhuite, lo que permite complementar la **Tabla 2.1**.

Departamento	Población total	Población sin acceso a Agua
<b>Piura</b>	1,873,024	139,196
<b>La Libertad</b>	1,905,301	92,715
<b>Arequipa</b>	1,315,528	69,363

**Tabla 2.1:** Población sin acceso a agua potable por cada departamento  
Fuente: Sistema Nacional Georeferenciado-Sayhuite

Después de la verificación de la demanda, se procedió a realizar una proyección para de crecimiento en 10 años, utilizando el porcentaje de crecimiento poblacional obtenido por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), así, se obtiene la **Tabla 2.2**

Departamento	Crecimiento poblacional
<b>Paita</b>	0.80%
<b>Pacasmayo</b>	1.20%
<b>Islay</b>	1.10%

**Tabla 2.2:** Crecimiento poblacional por departamento  
Fuente: INEI (2016)



## **2.3 Identificación del potencial de los recursos renovables**

### **2.3.1 Recurso solar**

Para realizar la identificación del potencial del recurso solar de los tres departamentos seleccionados, se utilizó la información del Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y se trabajó con la herramienta Web-GIS del Atlas de la Energía Solar del Perú y la NASA [51], donde se verificó que los lugares previamente seleccionados cuentan con un buen potencial solar aprovechable, para realizar el emplazamiento de la planta desaladora.

### **2.3.2 Recurso eólico**

Para este análisis se tomó información mediante el portal del MINEM, a través de la plataforma Web – GIS del Atlas eólico del Perú, donde se obtuvo las velocidades del viento promedio anual y la altura en la cual fueron tomados estos datos para los tres lugares seleccionados [52].

## **2.4 Accesibilidad a la red eléctrica**

Tomando como referencia el mapa del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) y del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) [53] [54], se verificó la existencia de líneas de transmisión eléctrica de mediana y baja tensión y subestaciones eléctricas cercanas a cada uno de los lugares seleccionados. Así como también la accesibilidad eléctrica pública de los habitantes.

## **2.5 Selección del lugar de emplazamiento**

De acuerdo a la información recopilada sobre los lugares con mayor escasez hídrica, el potencial de los recursos renovables y el acceso a la red eléctrica, se seleccionaron los lugares exactos de emplazamiento de las plantas desaladoras de agua de mar dentro de los tres departamentos, verificando que estos cumplan con los siguientes requisitos [55] [56]:

- Ausencia de Áreas Naturales Protegidas
- Inexistencia de restos arqueológicos o paisajes culturales
- Inexistencia de flora y fauna sensible
- Buena accesibilidad al lugar (caminos de acceso existentes)

La información para el análisis del territorio de las regiones se obtuvo a través de la página del Sistema Nacional Georeferenciado-Sayhuite.

## 2.6 Diseño de la planta de ósmosis inversa

Para realizar el diseño de las Plantas de ósmosis inversa, se extrajo información de la población sin acceso a agua de las provincias seleccionadas, por medio del Sayhuite, donde se obtuvo la **Tabla 2.3**.

Provincia	Población sin acceso a agua (habitantes)
Islay	3,062
Pacasmayo	4,064
Paíta	11,052

**Tabla 2.3:** Población sin acceso a agua.

Mediante este dato se procedió a realizar el cálculo de la demanda de agua que requieren las provincias seleccionadas para el emplazamiento de las desaladoras, a partir de la **Ecuación 1**. Este resultado se sobredimensionó en un 35% debido al crecimiento poblacional y el estrés hídrico que presenta el lugar seleccionado. A su vez, se procedió con el cálculo del caudal de captación, por medio de la **Ecuación 2**.

$$Q_{captación} = \frac{Q_s}{\eta_{proceso}}$$

**Ecuación 2:** Caudal de captación

Donde:

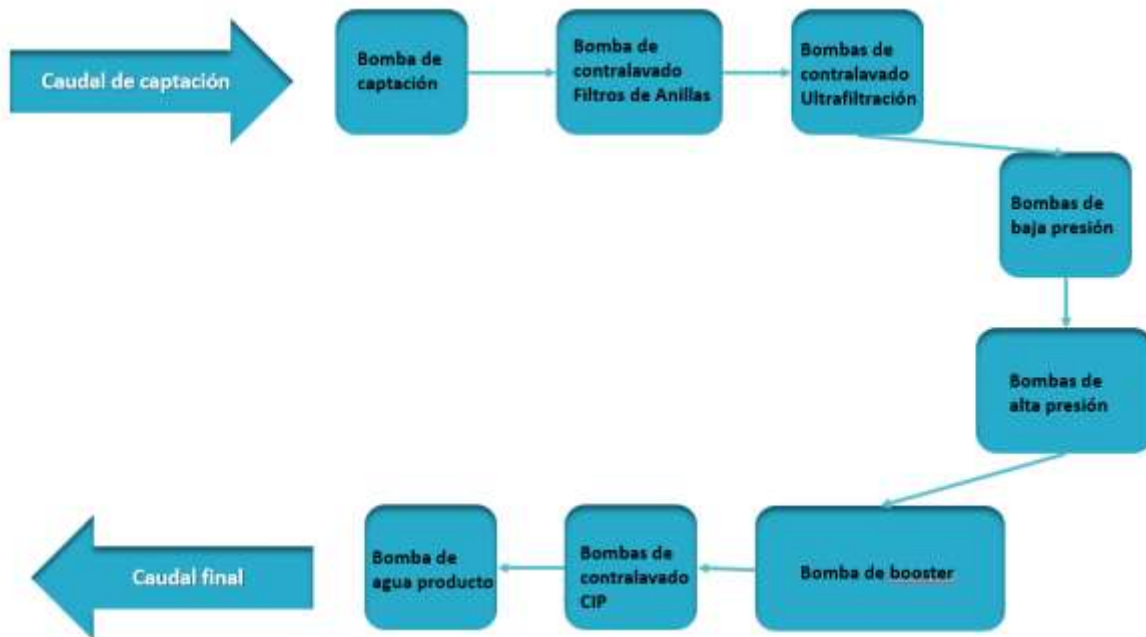
$Q_s$ : Caudal sobredimensionado ( $m^3/día$ )

$\eta$  proceso: Rendimiento del proceso

Finalmente, con este resultado se realiza la cuantificación de la demanda energética de la planta, a partir del cálculo de los equipos encargados de llevar el agua de mar a la planta de tratamiento.

### 2.6.1 Cuantificación de la demanda energética de la planta

De acuerdo al Capítulo I – Sección 1.1.2 el mayor consumo de energía proviene de las bombas de la planta desaladora. Debido a ello se procedió a realizar un enfoque a través del cálculo del consumo energético de las bombas, tal y como muestra la **Figura 2.2**.



**Figura 2.2:** Bombas de alto consumo de la Planta desaladora  
Fuente: Elaboración propia

Para la cuantificación de la demanda energética de la planta, en primer lugar, fue necesario determinar la sección y el diámetro de las tuberías por donde circulará el agua del mar hacia la planta, esto mediante de la **Ecuación 3** y la **Ecuación 4**.

$$Secc = \frac{Qc}{v}$$

**Ecuación 3:** Cálculo de la sección de la tubería

Donde:

Qc: Caudal de captación (m<sup>3</sup>/h)

v: Velocidad del agua (m/h)

$$D = \frac{\sqrt{4 * Secc}}{\pi}$$

**Ecuación 4:** Cálculo del diámetro de la tubería

Donde:

D: Diámetro (m)

Secc: Sección (m<sup>2</sup>)

Para el cálculo de la potencia de las bombas se empleó la **Ecuación 5** y **Ecuación 6**., en estos cálculos se consideró un rendimiento de los motores del 95% [10].

$$P = \frac{Q * H * \rho}{367 * n_b}$$

**Ecuación 5:** Cálculo de la potencia de la bomba

$$P_r = \frac{P}{n_m}$$

**Ecuación 6:** Cálculo de la potencia a suministrar a la bomba.

Donde:

P: Potencia de la bomba (kW)

Pr: Potencia a suministrar a la bomba (kW)

Q: Caudal de bombeo (m<sup>3</sup>/h)

$n_m$ : Rendimiento del motor

$n_b$ : Rendimiento de la bomba

$\rho$ : Densidad del agua de mar (kg/m<sup>3</sup>)

H: Altura manométrica (m)

Para la aplicación de estas fórmulas se desconoce la altura manométrica, ya que la densidad del agua de mar es conocida, y para las bombas se considera un rendimiento del 85% [10]. Por lo tanto, la altura manométrica se calculó con la **Ecuación 10**.

$$H = \Delta Z + \sum F + \Delta P$$

**Ecuación 7:** Cálculo de la altura manométrica

Donde:

H: Altura manométrica (m)

$\Delta Z$ : Diferencia de cotas (m)

$\sum F$ : Sumatoria de pérdida de cargas (m)

$\Delta P$ : Diferencia de presión (m)

Seguidamente para el cálculo de la sumatoria de pérdidas de carga, se tuvo en cuenta todas las pérdidas de carga debidas a equipos y conducciones. Para realizar esta suma, se

utilizó la ecuación de Fanning, la cual permite obtener un factor de fricción adimensional que es función directa a la caída de presión. Ver **Ecuación 8**.

$$\Sigma F = \frac{f * L * v^2}{2 * D * g}$$

**Ecuación 8:** Cálculo de la pérdida de carga por conducción con la ecuación de Fanning.

Donde:

f: Coeficiente de fricción

g: Gravedad (m/s<sup>2</sup>)

L: Longitud (m)

D: Diámetro (m)

v: Velocidad (m/s)

Para el coeficiente de rozamiento, se calculó con la ecuación de Colebrook-White conforme a la

**Ecuación 9.**

$$\frac{1}{f} = -2 \log * \left( \frac{K}{3.71 D} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right)$$

**Ecuación 9:** Cálculo del factor de rozamiento con la ecuación de Colebrook-White

Donde:

f: Coeficiente de fricción

K: Rugosidad del material (m)

D: Diámetro (m)

Re: Número de Reynolds

Esta ecuación tiene la peculiaridad de que el coeficiente de rozamiento (incógnita), se encuentra a ambos lados de la ecuación. Para resolver la ecuación se usó el software Matlab, utilizando el script que se presenta al documento en el Anexo 1.

Además, para resolver esta ecuación, se calculó el número de Reynolds, mediante la **Ecuación 10**.

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

**Ecuación 10:** Cálculo del número de Reynolds

Donde:

Re: Número de Reynolds

$\rho$ : Densidad del agua de mar (kg/m<sup>3</sup>)

v: Velocidad máxima (m/s)

$\mu$ : Viscosidad (kg/m\*s)

D: Diámetro (m)

Para hallar el consumo de cada uno de los ocho tipos de bombas que posee el Sistema de la Planta Desaladora, se repite el mismo proceso, con excepción de la bomba de contralavado de ultrafiltración, ya que para calcular el caudal que ingresa, primero se calculó el área a lavar del bastidor por medio de la **Ecuación 11**.

$$AL = N^{\circ} Mod \cdot AFu$$

**Ecuación 11:** Área a Lavar del bastidor

Seguidamente, se procedió al cálculo del caudal de ingreso a la bomba de contralavado de ultrafiltración por medio de la **Ecuación 12**.

$$Q_{su} = FL \cdot AFu$$

**Ecuación 12:** Caudal de ingreso para la bomba de contralavado de ultrafiltración.

Donde:

$Q_{su}$ : Caudal de lavado ( $m^3/h$ )

$FL$ : Flujo del lavado ( $m^2/h$ )

$AFu$ : Área de filtrado ( $m^2$ )

Posteriormente se repite el mismo proceso a partir de la **Ecuación 1** hasta la **Ecuación 10**. Finalmente, el cálculo del consumo diario del sistema de bombeo de las plantas, se realizó por medio de la **Ecuación 13**.

$$\sum P_{bombas} = Bc + Bbp + Bap + Bb + Bcfa + Bcu + Bcc + Bap$$

**Ecuación 13:** Sumatoria de las bombas

Donde:

$Bc$ : Bombas de captación (kW)

$Bbp$ : Bombas de baja presión (kW)

$Bap$ : Bombas de alta presión (kW)

$Bb$ : Bombas boosters (kW)

$Bcfa$ : Bombas de contralavado filtros de anillas (kW)

$Bcu$ : Bombas de contralavado de ultrafiltración (kW)

$Bcc$ : Bombas de contralavado CIP (kW)

$Bap$ : Bombas de agua producto (kW)



## 2.7 Viabilidad del recurso renovable

Para la evaluación de la viabilidad del recurso renovable, se realizó un estudio de emplazamiento de un Sistema Fotovoltaico o Eólico como fuente de abastecimiento energético para las plantas desaladoras en los tres lugares seleccionados, tomando como elementos de partida la demanda eléctrica de la planta desaladora, la demanda de agua, así como potenciales de radiación solar y velocidades de viento.

### 2.7.1 Definición del recurso renovable para los lugares seleccionados

De acuerdo a los estudios realizados por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y los datos obtenidos de la NASA, se evaluó el aprovechamiento del recurso solar y eólico para los tres lugares seleccionados.

#### *Recurso eólico*

Para evaluar el recurso eólico de los tres lugares, se utilizó la información del MINEM, mediante el Web – GIS del Atlas eólico del Perú, tomando los valores de velocidad media y la altura. Con estos valores se empleó la **Ecuación 14** y **Ecuación 15** para hallar el Factor de escala y Factor de forma

$$k = \left(\frac{\sigma}{v}\right)^{-1.086}$$

**Ecuación 14:** Factor de Forma

Donde:

$v$  = Velocidad media (m/s)

$\sigma$  = Desviación

$$c = v * \left[ \frac{1}{\Gamma * \left(1 + \frac{1}{k}\right)} \right]$$

**Ecuación 15:** Factor de Escala.

Donde:

$\Gamma$  = Constante de la función gamma de Euler.

### *Recurso solar*

Para la determinación inicial del potencial solar, se tomaron datos de la NASA y del MINEM para las coordenadas de los tres lugares seleccionados. Donde se obtuvo las radiaciones mensuales, esta información se promedió para obtener la radiación promedio anual y calcular las horas solares pico, por medio de la siguiente **Ecuación 16**.

$$HSP = \frac{\Sigma Rd \text{ mensual}}{12 * 1000}$$

**Ecuación 16:** Horas Solares Pico

Donde:

HSP: Horas solares pico (Hrs)

$\Sigma Rd \text{ mensual}$ : Sumatoria de la radiación mensual (kWh/mes)

## 2.7.2 Cálculo de la potencia de las plantas de generación eléctrica abastecidas con energías renovables

### *Plantas solares fotovoltaicas*

Para determinar la Potencia Solar del Sistema Solar Fotovoltaico (FV), se requiere conocer la demanda de energía de la planta desaladora, las Horas Solares Pico y se estima un rendimiento del 85% debido a las pérdidas que experimenta un sistema solar conectado a la red [57]. Por consiguiente, se aplicó la **Ecuación 17**.

$$P = \frac{E_d}{HSP * \eta}$$

**Ecuación 17:** Potencia Solar

Donde:

$\eta$ : Rendimiento del Sistema Fotovoltaico

$E_d$ : Demanda de energía (kWh)

HSP: Horas Solares Pico (H)

### *Plantas eólicas*

Se realizó un análisis de vientos mediante la distribución de Weibull, donde se utilizó la **Ecuación 14** y **Ecuación 15**, para calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * e^{-\frac{v^k}{c}}$$

**Ecuación 18:** Distribución de Weibull

Donde:

$v$  = Velocidad (m/s)

$c$  = Factor de escala

$k$  = Factor de forma

## 2.8 Cálculo de los costes de todo el sistema por producción de agua

### 2.8.1 Cálculo de los costes del emplazamiento de las plantas desaladoras por producción de agua

Los costos totales por producción de agua de las plantas se estimaron utilizando la **Ecuación 19** [10]:

$$\sum \$Total = \$Planta + \$Variable$$

**Ecuación 19:** Cálculo de costos totales

Donde:

$\$Planta$ : Costo promedio de construcción de una planta

$\$Variable$ : Costos variables

Finalmente, el costo por metro cúbico de agua se realizó mediante la **Ecuación 20** [10].

$$P_{agua} = \frac{\sum \$Total}{C_{agua}}$$

**Ecuación 20:** Costos por m<sup>3</sup> de agua

Donde:

$P_{agua}$ : Costos para producir un m<sup>3</sup> de Agua

$C_{agua}$ : Consumo de Agua (m<sup>3</sup>/año)

### 2.8.2 Cálculo de los costes del consumo de la red eléctrica por producción de agua

El cálculo de los costes del consumo de la red eléctrica para cada uno de los lugares de emplazamiento seleccionado se halló a través de la demanda energética del sistema de bombeo, por medio de la **Tabla 3.5** y **Tabla 3.6**. Finalmente se utilizó la **Ecuación 20**, para obtener el precio por m<sup>3</sup> con respecto al consumo de energía por la red eléctrica.

### 2.8.3 Cálculo de los costes de las plantas solares fotovoltaica por producción de agua

El cálculo de los costes de todo el sistema abastecido por medio de una planta solar fotovoltaica para cada uno de los lugares se midió en términos técnicos, con el prediseño de las plantas y económicos, con el cálculo de los costos de construcción. Para hallar el costo de inversión de la planta solar fotovoltaica, se utilizó el valor de la última subasta el cual es de \$1 200 por kWp instalado [63]. Finalmente se utilizó la **Ecuación 20**, para obtener el precio por m<sup>3</sup> con respecto al abastecimiento de la planta por medio de la energía solar.

### 2.8.4 Cálculo de los costes de las plantas eólicas por producción de agua

Para el cálculo de los costes de todo el sistema abastecido por medio de una planta eólica para cada uno de los lugares, se midió de igual manera que la sección 2.7.3 con el cálculo de los costos de construcción. Los costos de inversión de la planta eólica se calcularon a través del precio de la última subasta el cual se encuentra en \$2 600 por kWp instalado [63]. Finalmente se utilizó la **Ecuación 20**, para obtener el precio por m<sup>3</sup> con respecto al abastecimiento de la planta por medio de la energía eólica.

## 2.9 Comparación de los costos de escenarios de abastecimiento de las plantas desaladoras de agua de mar

Para los tres escenarios propuestos se calculó el Costo Nivelado de Energía (LCOE), empleando la **Ecuación 21**.

$$LCOE = \frac{\sum_t^n \frac{I_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_t^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

**Ecuación 21:** Costo Nivelado de Energía.

Donde:

$I_t$ : Inversión en el año inicial

$M_t$ : Costos de operación y mantenimiento (O&M)

$E_t$ : Energía generada en el año t

r: Depreciación

n: Años de vida del proyecto

Se estimó una duración de vida del proyecto de 21 años, se consideró los costos de operación y mantenimiento (O&M) de \$0.10 por metro, los costos promedio de construcción de una planta de desalación es de \$2.70 por metro cúbico para los tres escenarios [10]. Los cuales varían de acuerdo con la demanda de agua que debe captar la planta desaladora según el lugar de emplazamiento [10]. Finalmente, se realizó una comparación entre los cálculos del sistema abastecido completamente por la red eléctrica frente al sistema abastecido con energías renovables para cada uno de los tres escenarios, de acuerdo a los precios de ventas obtenidos por cada lugar según el sistema utilizado.

## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS**

#### **3.2 Identificación de zonas vulnerables por escasez hídrica**

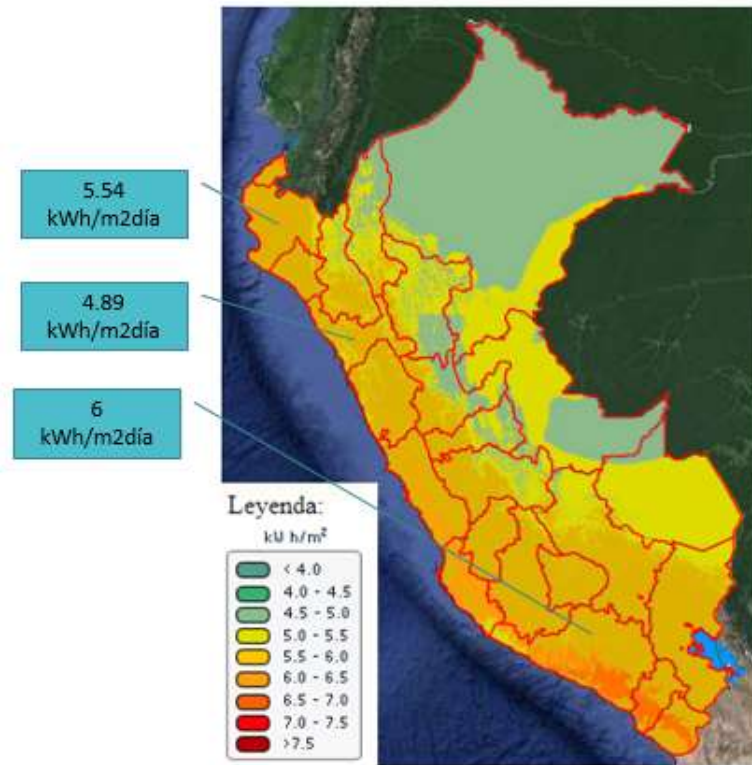
El departamento que se ha elegido a evaluar es aquel que presenta mayor vulnerabilidad, siendo Arequipa el lugar seleccionado, debido a que alberga a 69 363 habitantes sin acceso a agua (**Tabla 2.1**) y posee un crecimiento poblacional del 1.10% (**Tabla 2.2**) ubicándose por encima de Piura. A esto se le añade que Arequipa para el año 2030 presentará un 20% menos de precipitación acumulada anual, ocasionando sequías en este departamento, convirtiéndose en un principal foco de estrés hídrico a comparación de Piura y La Libertad (**Tabla 1.**).

Además, Arequipa posee un buen potencial de recursos renovables, según el Atlas de energía solar y el Atlas eólico del Perú. Asimismo, sí nos referimos al acceso a la red eléctrica, los habitantes de este departamento poseen un mayor acceso de toda la costa. Por todo lo mencionado, Arequipa posee el perfil idóneo para llevar a cabo la demostración del flujo de la metodología que se realizó en cada uno de los tres departamentos analizados previamente.

#### **3.3 Identificación del potencial de los recursos renovables**

##### **3.3.1 Recurso solar**

Para los tres lugares previamente seleccionados son Piura con 5.54 kWh/m<sup>2</sup>día, La Libertad con 4.89 kWh/m<sup>2</sup>día y Arequipa con 6 kWh/m<sup>2</sup>día, como se puede observar en la **Figura 3.6**. Por lo que se validó que los tres departamentos cuentan con un buen potencial solar aprovechable, para realizar el emplazamiento de la planta desaladora.

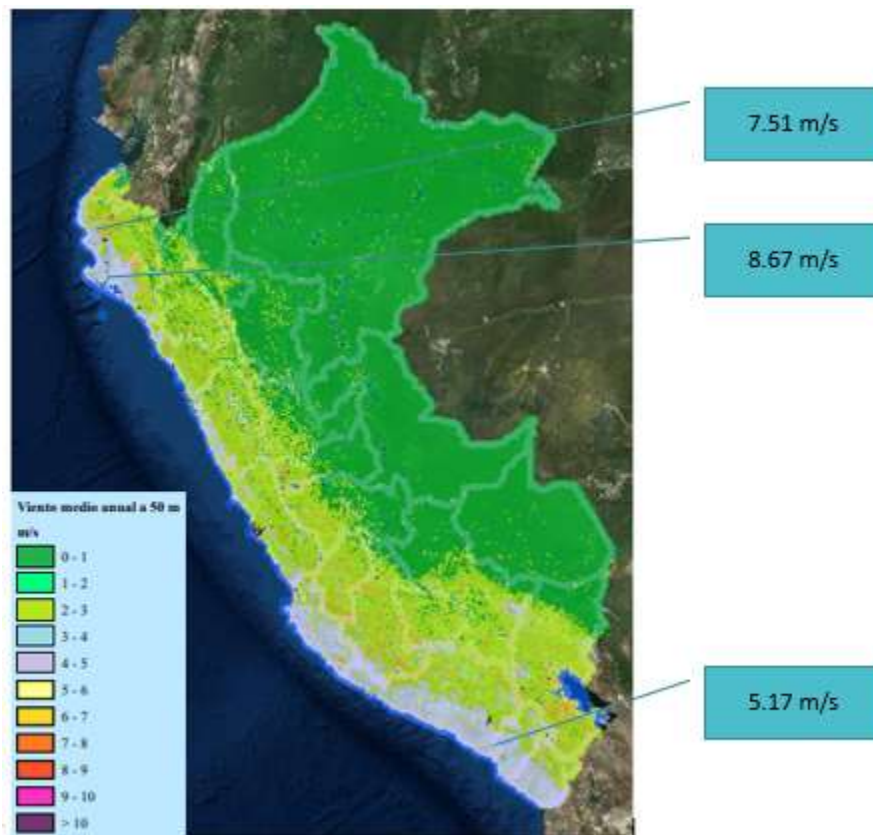


**Figura 3.6:** Energía solar - Promedio anual por departamentos  
Fuente: MINEM (2018)

### 3.3.2 Recurso eólico

De acuerdo con la plataforma Web – GIS del Atlas eólico del Perú, el potencial del recurso eólico elegido es de 7.51 m/s, 8.67 m/s y 5.17 m/s, para Piura, La Libertad y Arequipa, respectivamente. Ver **Figura 3.7**.

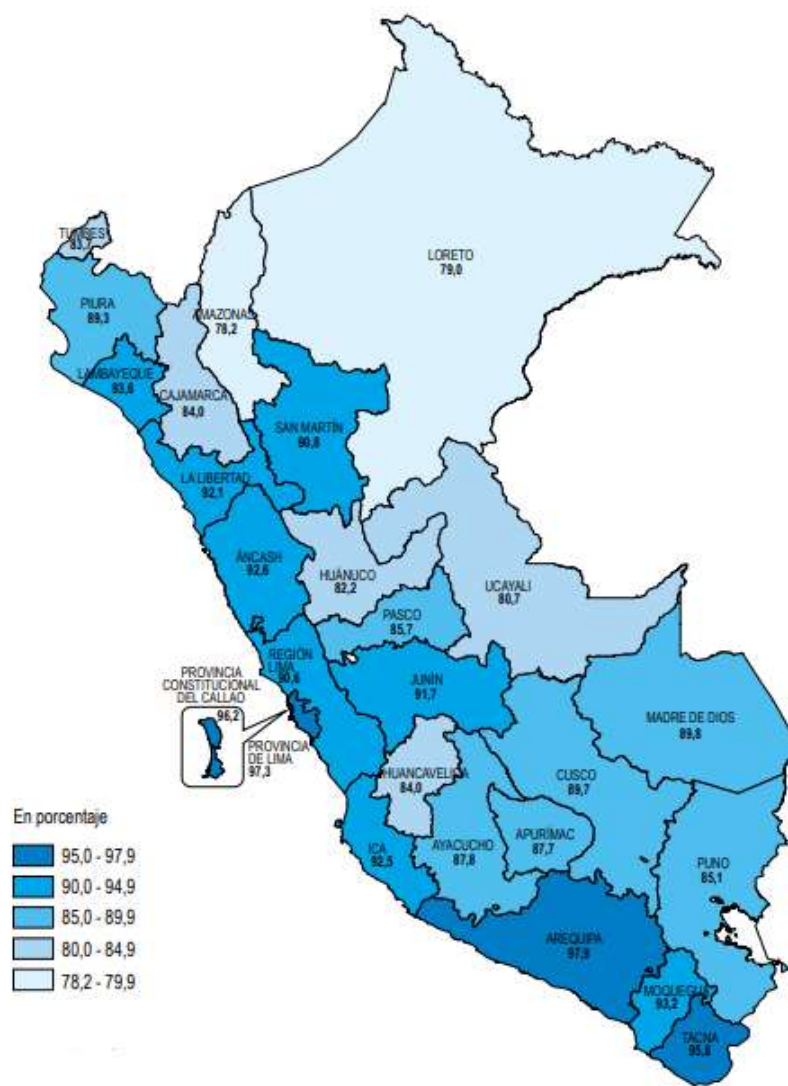




**Figura 3.7:** Energía eólica – Viento medio anual por departamentos.  
Fuente: MINEM (2018)

### 3.4 Accesibilidad a la red eléctrica

De acuerdo con la información que se obtuvo por la INEI y el SEIN, la costa es la que posee una mayor accesibilidad eléctrica a comparación de las demás regiones. Sin embargo, en dentro de la zona costera, existen lugares con mayor acceso a la red eléctrica pública, donde la costa sur posee mayor accesibilidad a la red eléctrica (Arequipa con un 97.9%) a comparación de la costa norte [58], como se puede apreciar en la **Figura 3.**



**Figura 3.8:** Perú – Viviendas con acceso al servicio energía eléctrica mediante red pública, según departamento.  
Fuente: INEI (2017)

### 3.5 Selección del lugar de emplazamiento

De acuerdo con la información recopilada, evaluada y analizada, la provincia de Arequipa que mejor se adapta a los requerimientos es Islay. Se realizó el mismo análisis para los otros dos departamentos restantes, donde se obtuvo que las provincias seleccionadas para el lugar de emplazamiento de la planta desaladora son Paita y Pacasmayo para Piura y La Libertad, respectivamente.

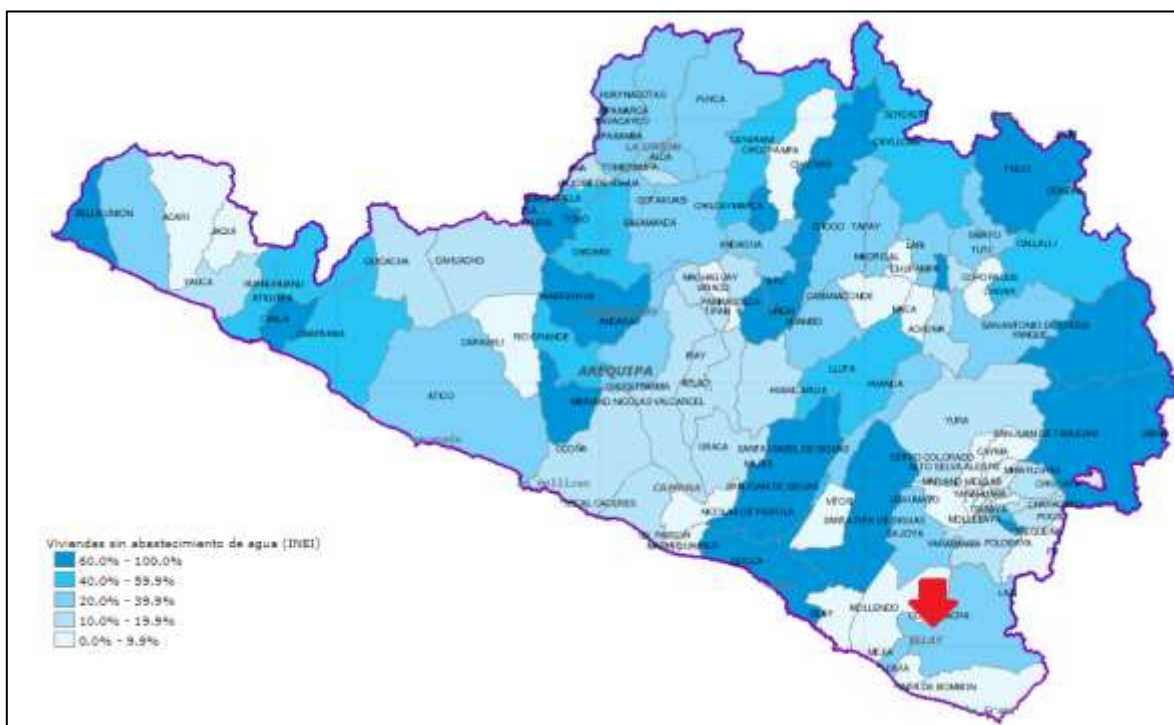
### 3.5.1 Lugar de emplazamiento 1

Se seleccionó como lugar de emplazamiento a la provincia de Islay, ubicado en el departamento de Arequipa, con coordenadas según la **Tabla 3.1**.

Coordenadas Islay	
Sur	Oeste
17°01'11"	72°00'58"

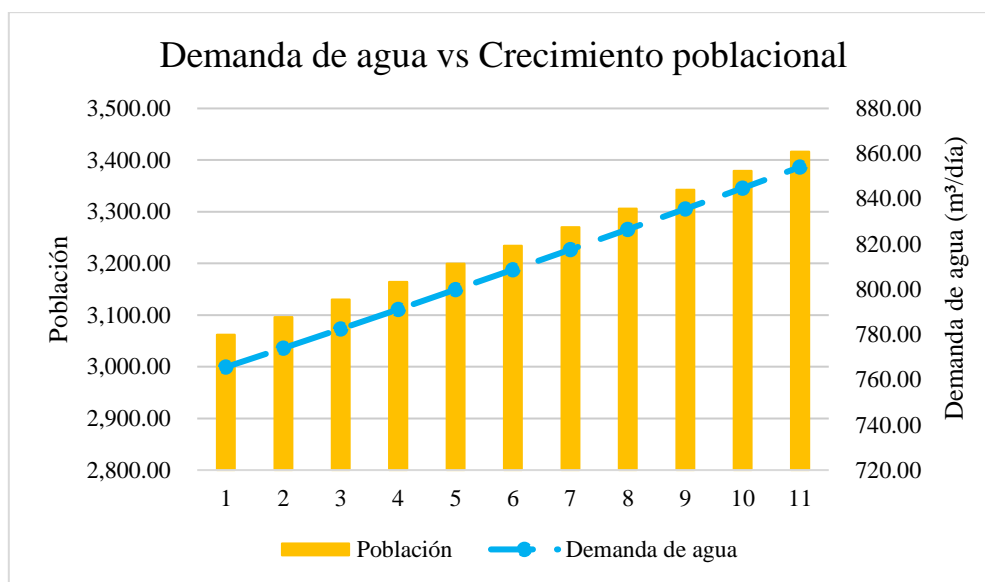
**Tabla 3.1:** Coordenadas de Islay, Arequipa.

De acuerdo con la **Figura 3.1**, el lugar seleccionado presenta una cobertura escasa del recurso hídrico del 40% al 59.9%, equivalente a 3 062 habitantes sin abastecimiento a agua (**Tabla 2.3**).



**Figura 3.1:** Mapa de brechas de servicios básicos: Población sin abastecimiento a agua.  
Fuente: Equipo profesional de Sayhuite

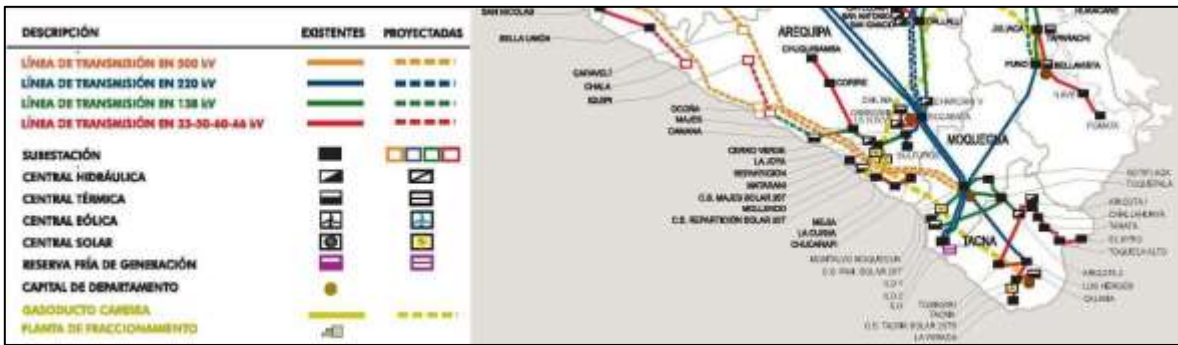
Con la finalidad de considerar la demanda de agua de la población futura, se sobredimensionó el agua a captar en la planta desaladora. Para realizar una proyección de la cantidad de habitantes que no contarán con acceso a agua frente a la demanda de agua que este porcentaje de la población necesitaría en 10 años. Para ello se utilizó el crecimiento poblacional de Arequipa de 1.10% (**Tabla 2.2**) y la **Ecuación 1**. Obteniendo como resultado de la proyección a 3 416,37 habitantes sin acceso al recurso hídrico con una demanda de agua total de 854,09 m<sup>3</sup> (**Figura 3.2**).



**Figura 3.2:** Demanda de agua vs Crecimiento poblacional en Islay.

Fuente: Elaboración propia

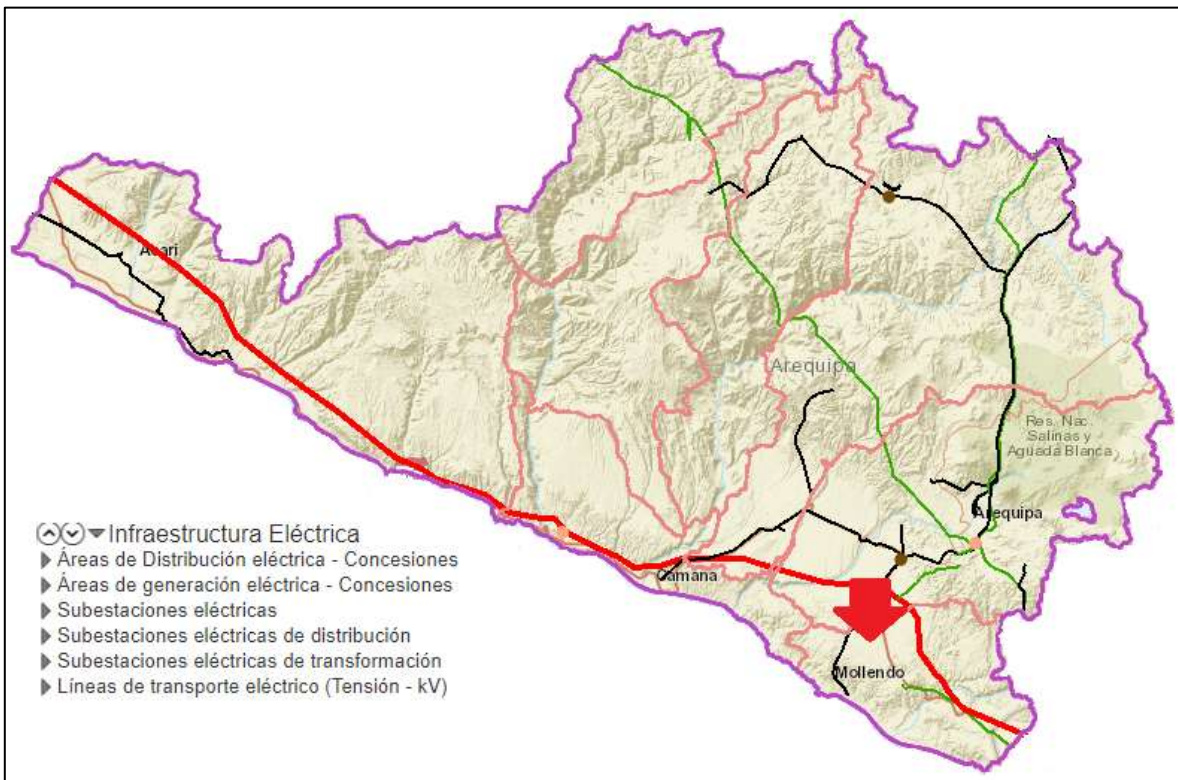
Por otro lado, también es importante que el lugar seleccionado se encuentre cerca a la red eléctrica, para que la planta desaladora pueda ser abastecida según la demanda energética que requiera. Para ello se verificó que el lugar de emplazamiento cuente con una red lo suficientemente apta, se tomó información del SEIN en el sur del país. Según muestra la **Figura 3.3** Arequipa, cuenta con redes de baja, media y alta tensión.



**Figura 3.3:** Mapa de líneas de transmisión eléctrica.

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

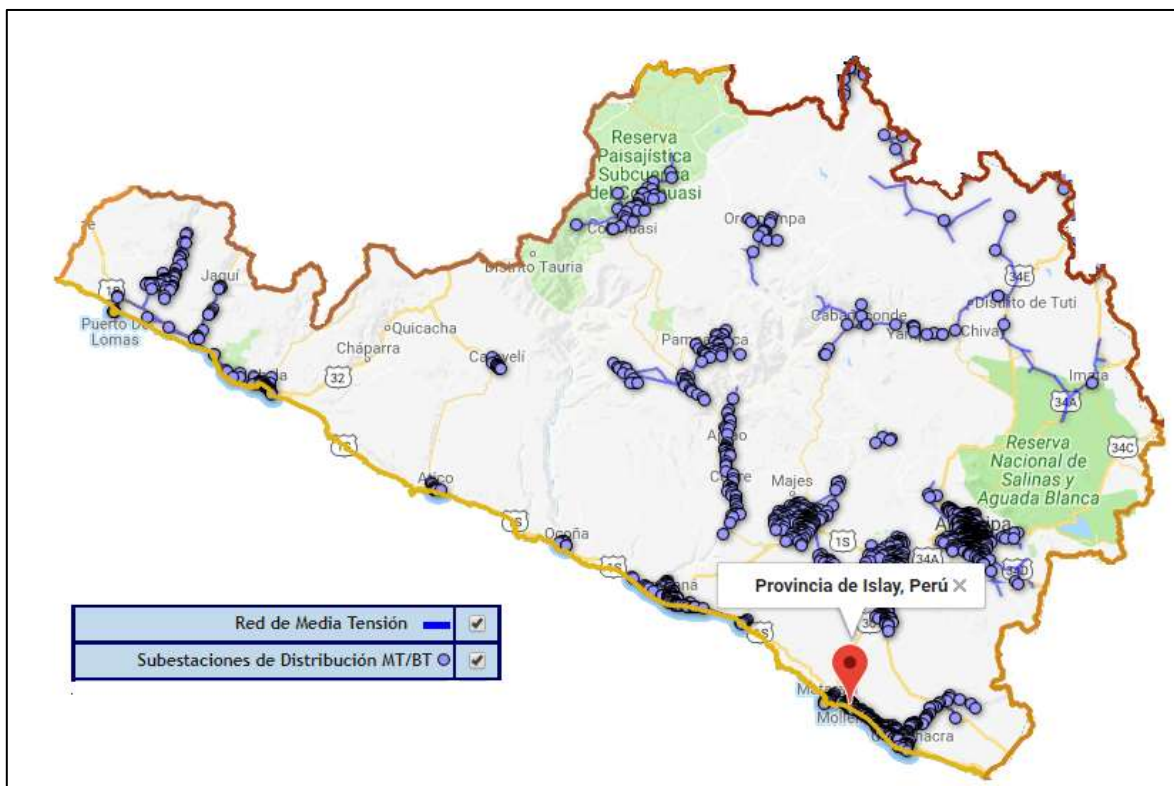
Asimismo, se ingresó al Web – GIS del Atlas eólico del Perú, para constatar que el lugar de emplazamiento cuenta con la infraestructura eléctrica idónea, como se puede observar en la **Figura 3.4**. Se accedió a esta información por medio del MINEM.



**Figura 3.4:** Infraestructura Eléctrica en Arequipa.

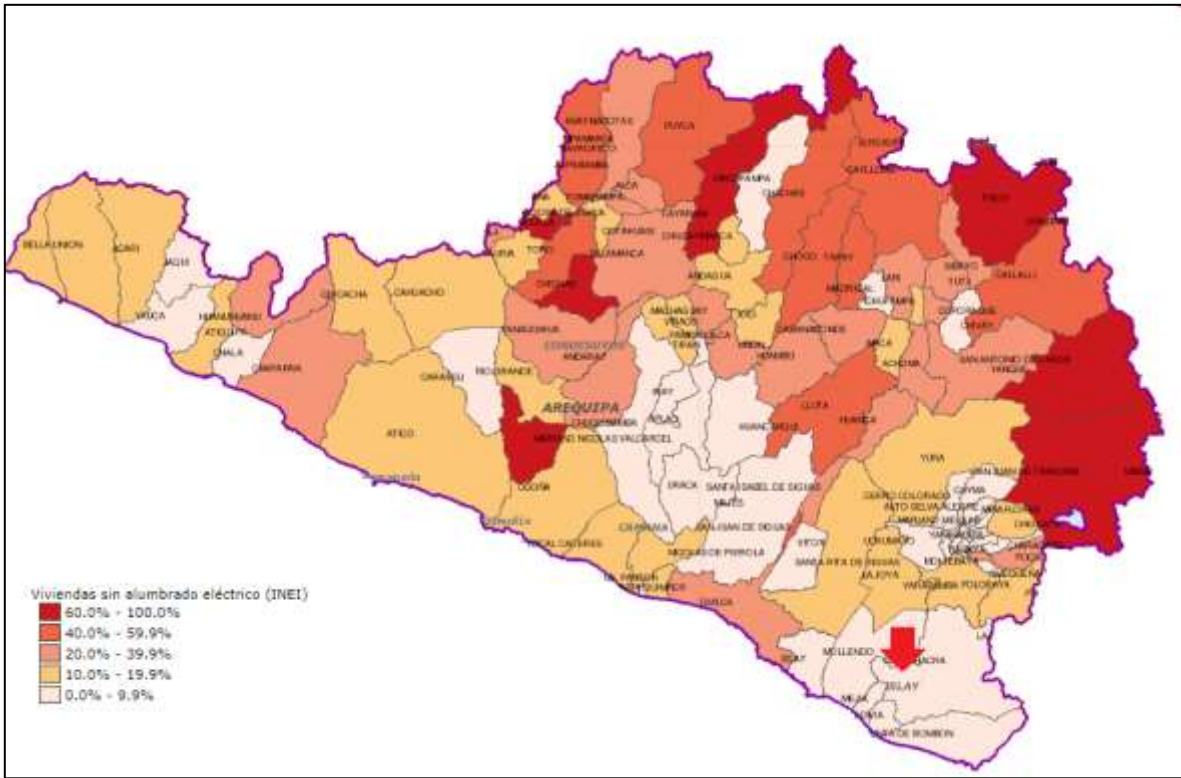
Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

Además, también se tomó información del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minas (OSINERGMIN), para verificar que la provincia de Islay cuente con Acceso a Red de Media Tensión y Subestaciones de MT/BT, de acuerdo con la **Figura 3.5**. Donde se observó que la provincia cuenta con dichas instalaciones, logrando con ello un ahorro en la instalación de redes de mediana tensión a baja tensión.



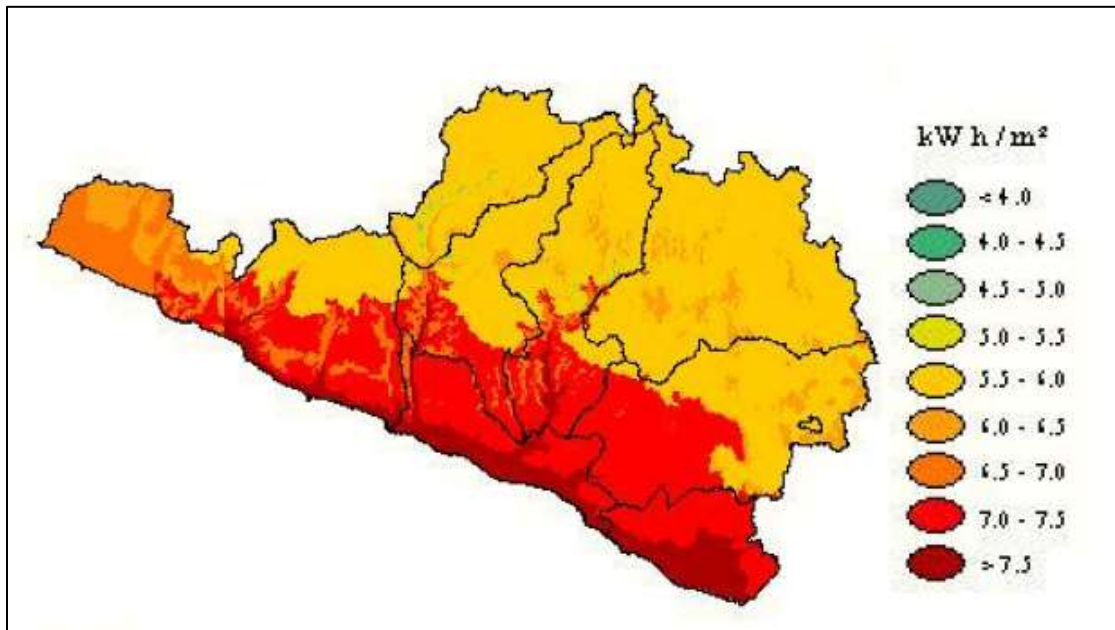
**Figura 3.5:** Acceso a Red de Media Tensión y Subestaciones de Distribución de MT/BT  
Fuente: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minas.

En cuanto al abastecimiento eléctrico del departamento, solo un 9% de habitantes carecen de este servicio, lo cual reduce el caso de conflictividad que se podría producir al momento de realizar la implementación del proyecto, como se puede apreciar en la **Figura 3.6**. En la cual se observó que casi el 100% de los habitantes no tienen problema con la conexión a red, lo cual significa que en el futuro no habrá conflictos sociales por la falta de energía en la región.



**Figura 3.6:** Mapas brechas de servicios básicos: Población sin acceso a la red eléctrica.  
Fuente: Equipo profesional de Sayhuite

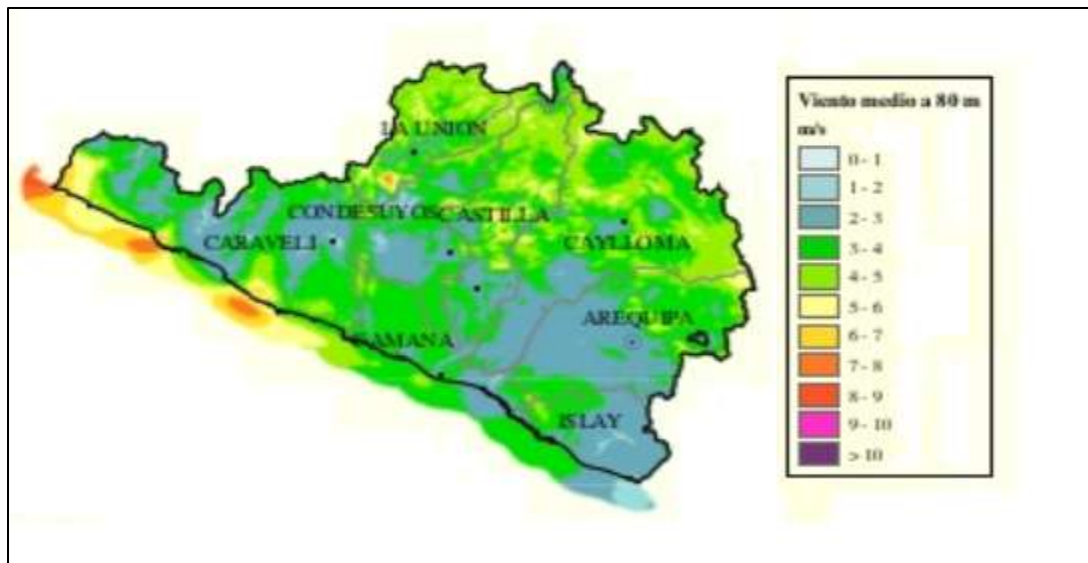
En cuanto al potencial de los recursos renovables de Arequipa, se obtuvo que la radiación promedio anual en Islay se encuentra entre 6 a 6.5 KWh/m<sup>2</sup>día. Siendo un curso solar altamente aprovechable en la zona, como se puede apreciar en la **Figura 3.7**.



**Figura 3.7:** Mapa de Radiación Solar en Arequipa.

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y la Dirección General de Electrificación Rural (DGER-MEM)

Con respecto al recurso eólico, Islay posee una velocidad de viento medio de 3 a 5 m/s anual, a una altura de 80 m, como muestra la **Figura 3.8**.



**Figura 3.8:** Mapa de Velocidad de Viento en Arequipa.

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y la Dirección General de Electrificación Rural (DGER-MEM)



Otro aspecto importante a tener en cuenta es que el lugar seleccionado no coincida con ninguna Área Natural Protegida por el Estado (ANP) o Reservas. En este caso la provincia de Islay no genera ningún impacto en ninguna ANP ni en reservas que se encuentran en el departamento de Arequipa, como se muestra en la **Figura 3.9**.



**Figura 3.9:** Mapa de Áreas Naturales Protegidas por el Estado.  
Fuente: Portal institucional del Sayhuite.

Como último filtro, se verificó que la provincia de Islay contará con vías de acceso, hacia otros poblados y ciudades cercanas. De acuerdo con la **Figura 3.10**, el lugar seleccionado posee factibilidad en el transporte de personal, maquinarias e insumos para el desarrollo del proyecto, disminuyendo los costos de inversión.



**Figura 3.10:** Red Vial Nacional en Arequipa  
Fuente: Portal institucional del Sayhuite.

Finalmente, se cumplió el mismo procedimiento para la provincia de Pacasmayo y Paita, donde se obtuvo como resultado que los lugares seleccionados no coinciden con Áreas Protegidas y cuentan con abastecimiento eléctrico, lo cual hace más factible el emplazamiento de la planta desaladora en todos los escenarios.

### 3.6 Diseño de la planta de ósmosis inversa

El consumo de energía está en función a la demanda de agua que requiere la población. Para el cálculo de dicha demanda, se utilizó la **Ecuación 1**, donde se obtuvo como resultado, la **Tabla 3.2:** Demanda de agua para Islay, Pacasmayo y Paita.

Provincia	Demanda de agua (m <sup>3</sup> /día)
Islay	766
Pacasmayo	2,956
Paita	3,763

**Tabla 3.2:** Demanda de agua para Islay, Pacasmayo y Paita.  
Fuente: Elaboración Propia

Sin embargo, debido a los fenómenos naturales que afectan la zona y teniendo en cuenta la proyección de la demanda a 10 años (**Figura 3.2**), se realizó un sobredimensionamiento del 35%, por lo que tuvo como resultado la **Tabla 3.3**.

Provincia	Demanda de agua (m <sup>3</sup> /día)
<b>Islay</b>	1,000
<b>Pacasmayo</b>	4,000
<b>Paita</b>	5,000

**Tabla 3.3:** Demanda de agua sobredimensionada para Islay, Pacasmayo y Paita  
Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con la demanda de agua sobredimensionada, se procedió a calcular el caudal de captación por medio de la **Ecuación 2**. Obteniendo un caudal a captar por el sistema de desalación, de acuerdo con la **Tabla 3.4**.

Provincia	Demanda de agua (m <sup>3</sup> /día)
<b>Islay</b>	2,200
<b>Pacasmayo</b>	8,888
<b>Paita</b>	11,111

**Tabla 3.4:** Caudal de agua a captar para Islay, Pacasmayo y Paita.  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.6.1 Cuantificación de la demanda energética de la planta

El enfoque de cuantificación de la energía de la planta se basó en la demanda energética del consumo de las bombas, ya que, el consumo de los demás equipos de la planta desaladora es despreciable.

Es por ello que, como punto de partida del cálculo de este consumo energético de las bombas, se utilizó el valor del caudal a captar (**Ecuación 2**) por la planta desaladora.

Seguidamente, se utilizó la **Ecuación 3**, **Ecuación 4**, **Ecuación 5**, **Ecuación 6**, **Ecuación 7**, **Ecuación 8**, **Ecuación 9** y **Ecuación 10** para el cálculo de la demanda energética que requiere cada uno de los ocho tipos de bombas que se utiliza el sistema de la planta desaladora. De acuerdo con los cálculos realizados y mediante la **Ecuación 13**, se obtuvo para Islay que el consumo diario de energía de todas las bombas del sistema es 15,909.21 kWh/día, como muestra la **Tabla 3.5**.

	(m <sup>3</sup> /h)	Nº de bombas	Consumo (KW)	Tiempo (h)	Consumo Diario (kWh/día)
<b>Bomba de captación</b>	92.59	1	34.55	24	829.21
<b>Bombas de baja presión</b>	124.2	1	1.05	24	25.26
<b>Bombas de alta presión</b>	340.7	2	546.20	24	10,428.56
<b>Bombas Booster</b>	375.1	3	144.81	24	3,475.42
<b>Bombas de contralavado Filtros de Anillas</b>	241.3	1	22.10	24	658.86
<b>Bombas de contralavado Ultrafiltración</b>	180.0	1	11.30	24	330.47
<b>Bombas de contralavado CIP</b>	35.60	1	4.90	24	151.20
<b>Bombas de agua producto</b>	43.35	1	0.43	24	10.26
<b>Total</b>					15,909.21

**Tabla 3.5:** Resumen del consumo energético diario de las bombas que requiere la planta desaladora.  
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se realizó los mismos cálculos para cada una de las provincias, donde se obtuvo la **Tabla 3.6**.

Provincia	Consumo Diario (kWh/día)
<b>Pacasmayo</b>	35,330
<b>Paita</b>	50,438

**Tabla 3.6:** Consumo energético diario de las bombas que requiere la planta desaladora para Pacasmayo y Paita.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.7 Viabilidad del recurso renovable

#### 3.7.1 Recurso Solar

*Arequipa – Islay*

Debido a que la zona se encuentra ubicada a una latitud de 17° al sur, las zonas de mayor potencial de energía solar del país se encuentran entre los 16° y 18° de latitud sur. Como se muestra en la **Tabla 3.7**.

Datos Generales	
Mes	kWh/m <sup>2</sup> día
<b>Enero</b>	6.57
<b>Febrero</b>	6.32
<b>Marzo</b>	6.12
<b>Abril</b>	5.53
<b>Mayo</b>	4.89
<b>Junio</b>	4.49
<b>Julio</b>	4.64
<b>Agosto</b>	5.19
<b>Setiembre</b>	6.00
<b>Octubre</b>	6.73
<b>Noviembre</b>	7.08
<b>Diciembre</b>	7.04

**Tabla 3.7:** Recurso solar aprovechable en Islay  
Fuente: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio.

Se obtuvo un promedio de los datos registrados en **Tabla 3.7**, dando como resultado que la zona registra un promedio anual de 5.9 kWh/m<sup>2</sup>día. Teniendo como máximo 7.08 kWh/m<sup>2</sup>día en el mejor de los escenarios y un mínimo de 4.49 kWh/m<sup>2</sup>día en el peor de los casos. Dichos valores calculados son suficientes para llevar a cabo el prediseño del Sistema

Fotovoltaico, que abastecerá la energía que demanda el sistema de bombeo de la planta desaladora.

#### *La Libertad – Pacasmayo*

Para la provincia de Pacasmayo, de acuerdo a los datos recopilados por la NASA, se calculó un promedio anual de 5.6 kWh/m<sup>2</sup>día, alcanzando como máximo 6.7 kWh/m<sup>2</sup>día y un mínimo de 4.1 kWh/m<sup>2</sup>día, tal como se puede observar en la **Tabla 3.8**.

Mes	kWh/m <sup>2</sup> día
<b>Enero</b>	6.6
<b>Febrero</b>	6.63
<b>Marzo</b>	6.72
<b>Abril</b>	6.4
<b>Mayo</b>	5.4
<b>Junio</b>	4.23
<b>Julio</b>	4.11
<b>Agosto</b>	4.31
<b>Setiembre</b>	4.95
<b>Octubre</b>	5.78
<b>Noviembre</b>	6.12
<b>Diciembre</b>	6.39
<b>Promedio anual</b>	5.6

**Tabla 3.8:** Promedio anual de Radiación en Pacasmayo.  
Fuente: Elaboración propia

En Pacasmayo se tiene un potencial solar medianamente aprovechable a comparación de Islay; sin embargo, puede llegar a cubrir parte de la demanda energética de la planta desaladora.

### *Piura – Paita*

La radiación promedio anual para Paita es de 5.9 kWh/m<sup>2</sup>día, alcanzando como máximo 7 kWh/m<sup>2</sup>día y un mínimo de 4.4 kWh/m<sup>2</sup>día, tal como se observa en la **Tabla 3.9**

Mes	kWh/m <sup>2</sup> día
<b>Enero</b>	6.96
<b>Febrero</b>	6.97
<b>Marzo</b>	6.83
<b>Abril</b>	6.64
<b>Mayo</b>	5.66
<b>Junio</b>	4.62
<b>Julio</b>	4.39
<b>Agosto</b>	4.77
<b>Setiembre</b>	5.34
<b>Octubre</b>	5.9
<b>Noviembre</b>	6.23
<b>Diciembre</b>	6.66
<b>Promedio anual</b>	5.9

**Tabla 3.9:** Promedio anual de Radiación en Paita.  
Fuente: Elaboración propia

Debido a que la radiación promedio anual es muy similar a la provincia de Islay, se puede decir que los valores calculados son suficientes para llevar a cabo el prediseño del Sistema Fotovoltaico.

### **3.7.2 Recurso Eólico**

#### *Arequipa – Islay*

Se utilizaron los datos de la **Tabla 3.10** para calcular los valores de distribución de frecuencia del viento. Los cuales indicaron que la distribución de frecuencia del viento posee un factor de forma (k) = 3.99 y un factor de escala (c) = 6.03.

Datos Generales	
<b>Velocidad media</b>	3.3 m/s
<b>Altura</b>	100 m

**Tabla 3.10:** Valores obtenidos para hallar los factores de forma y escala Islay.  
Fuente: Ministerio de Energía y Minas

### *La Libertad – Pacasmayo*

De la igual manera, se realiza el análisis para el escenario de Pacasmayo, donde se obtuvo como resultado un factor de forma ( $k$ ) = 3.36 y un factor de escala ( $c$ ) = 10.84, por medio de los datos de la **Tabla 3.11**.

Datos Generales	
<b>Velocidad media</b>	9.03 m/s
<b>Altura</b>	100 m

**Tabla 3.11:** Valores obtenidos para hallar los factores de forma y escala Pacasmayo.  
Fuente: Ministerio de Energía y Minas

### *Piura – Paita*

En el caso de Paita, se obtuvo como resultado un factor de forma ( $k$ ) = 2.91 y un factor de escala ( $c$ ) = 10.06, según los datos de la **Tabla 3.12**

Datos Generales	
<b>Velocidad media</b>	8.67 m/s
<b>Altura</b>	100 m

**Tabla 3.12:** Valores obtenidos para hallar los factores de forma y escala Paita.  
Fuente: Ministerio de Energía y Minas

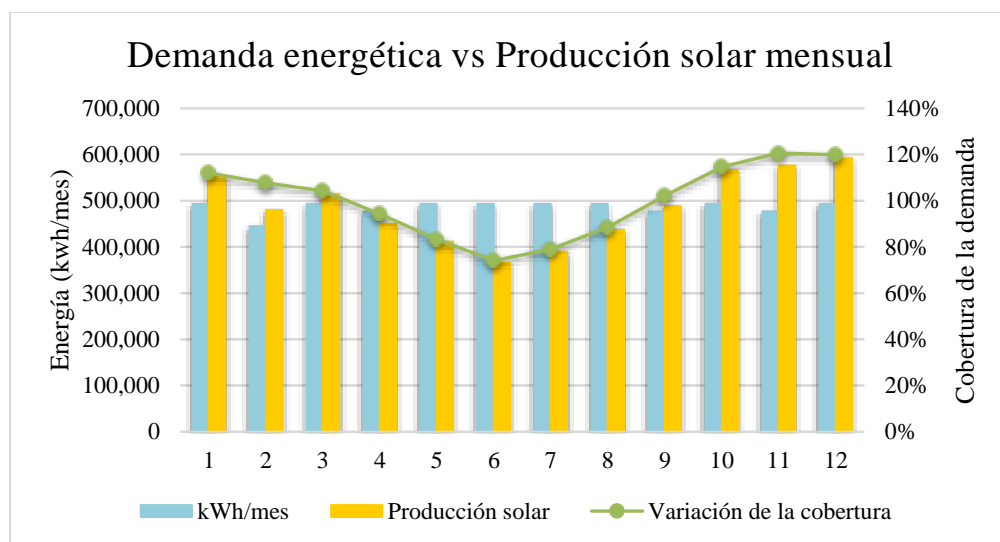


### 3.8 Cálculo de la potencia de las plantas de generación eléctrica abastecidas con energías renovables

#### 3.8.1 Plantas solares fotovoltaicas

##### *Arequipa – Islay*

De acuerdo a los resultados obtenidos por medio de la **Ecuación 17**, para aminorar los costos de inversión, se plantea implementar una central solar fotovoltaica de 3 117 kWp y cubrir la demanda energética. La energía que podría producir una central solar fotovoltaica de esa potencia a lo largo del año se aprecia en la **Figura 3.11**



**Figura 3.11:** Variación de la energía solar con respecto a la demanda energética del sistema de bombeo anual de la planta desaladora en Islay.

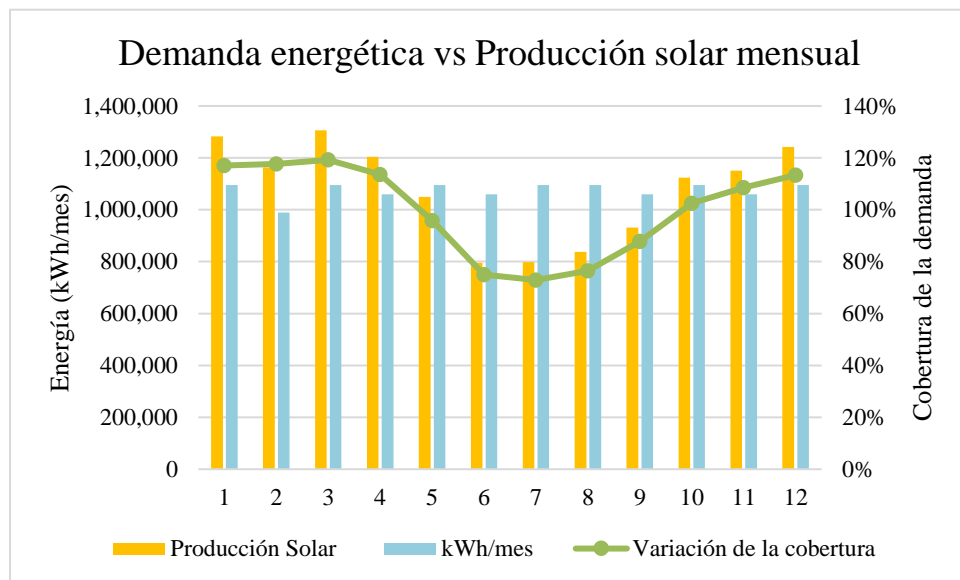
Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la **Figura 3.11**, los meses de mayor disponibilidad de energía solar para la zona son enero, octubre, noviembre y diciembre, y los meses de menos disponibilidad son mayo, junio, julio y agosto, mientras que la demanda energética de la

planta se mantiene en un rango de 6 MWh/año. El porcentaje restante deberá provenir de la red eléctrica.

*La Libertad – Pacasmayo*

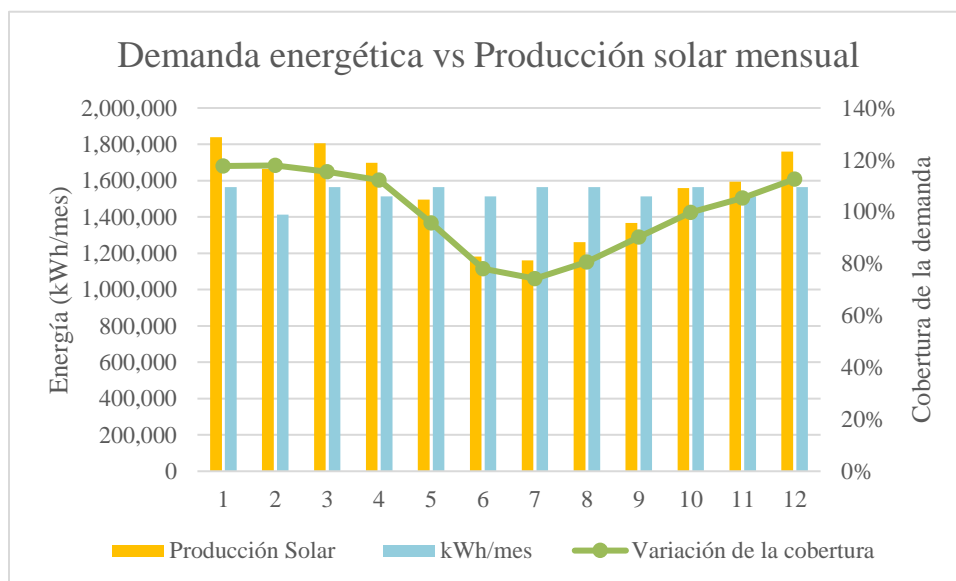
Para el caso de Pacasmayo, se calculó un SS. FV de 7 374 kWp para cubrir la demanda energética de la planta desaladora de 12.8 MWh/año. Como se puede observar en la **Figura 3.12**.



**Figura 3.12:** Variación de la energía solar con respecto a la demanda energética del sistema de bombeo anual de la planta desaladora en Pacasmayo.  
Fuente: Elaboración propia

*Piura – Paita*

De acuerdo a los cálculos realizados, se obtuvo un SS.FV de 10 033 kWp, para cubrir una demanda energética de 18.4 MWh/año que requiere el sistema de bombeo de la planta desaladora ubicada en la provincia de Paita, como se puede observar en **Figura 3.13**.



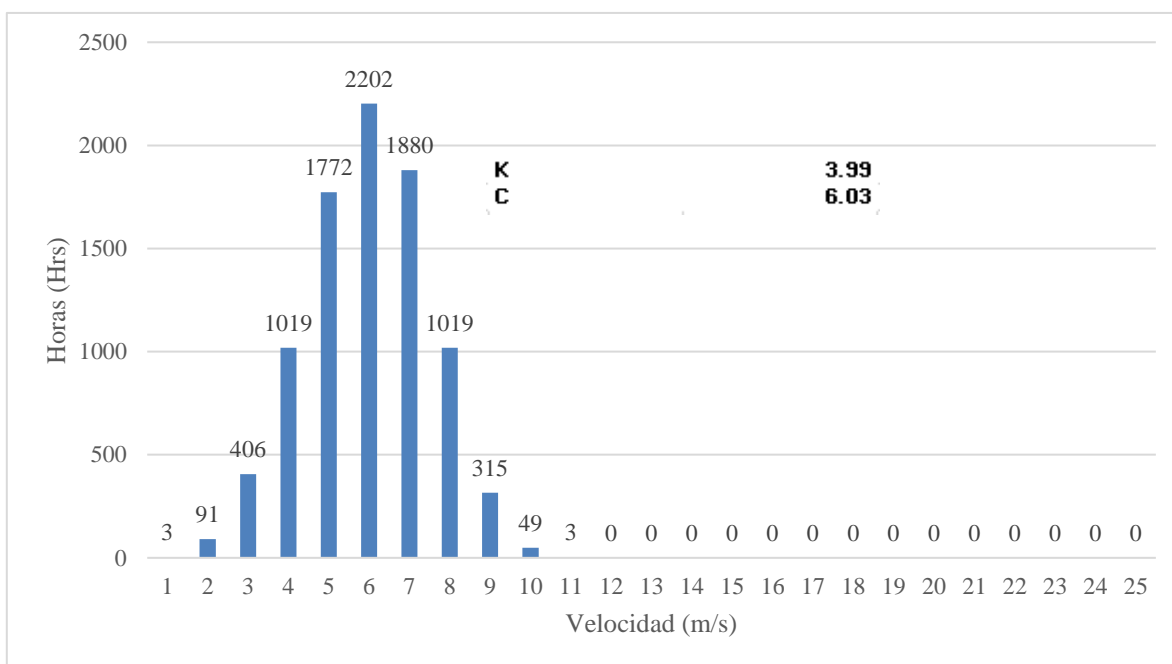
**Figura 3.13:** Variación de la energía solar con respecto a la demanda energética del sistema de bombeo anual de la planta desaladora en Paita.

Fuente: Elaboración propia

### 3.8.2 Plantas eólicas

#### *Arequipa – Islay*

Para un factor de forma (k) de 3.99 y un factor de escala (c) de, 6.03, se obtuvo la siguiente distribución de Weibull.

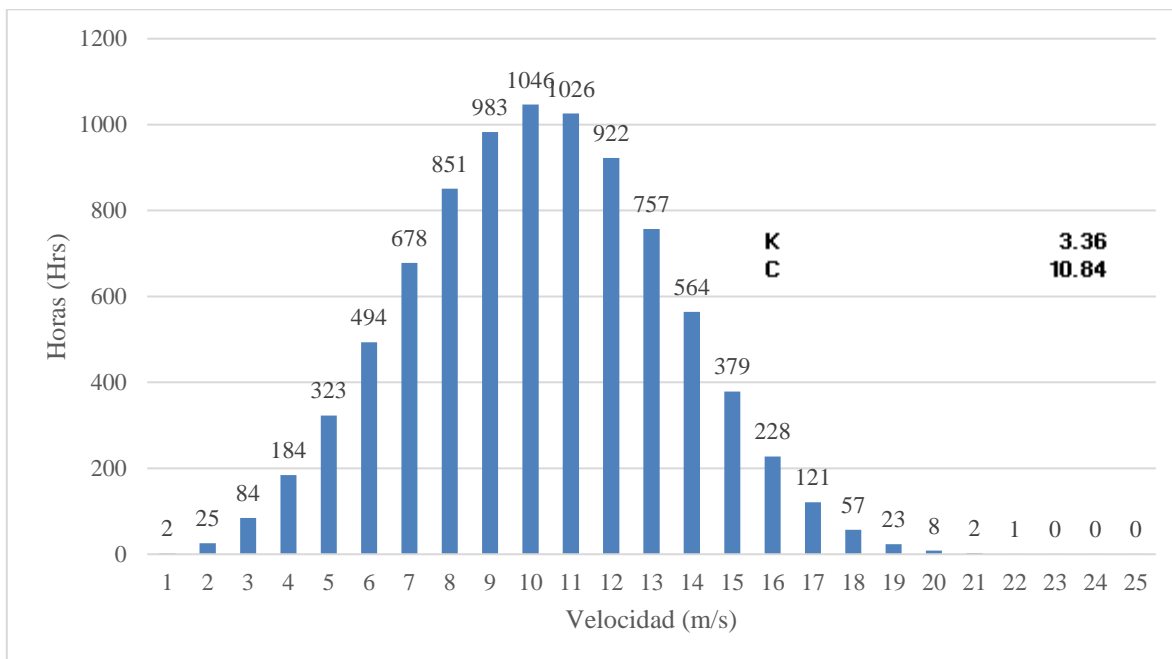


**Figura 3.14:** Distribución del Factor de Weibull - Islay.  
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar los resultados obtenidos para la Provincia de Islay muestran que la mayor frecuencia de velocidades son del orden de 6 m/s, lo que no satisface la velocidad mínima requerida (10 m/s) para ser aprovechados en energía útil eólica (**Figura 3.14**), lo que indica que el recurso no podría abastecer la demanda de energía del sistema de bombeo de la planta desaladora.

*La Libertad – Pacasmayo*

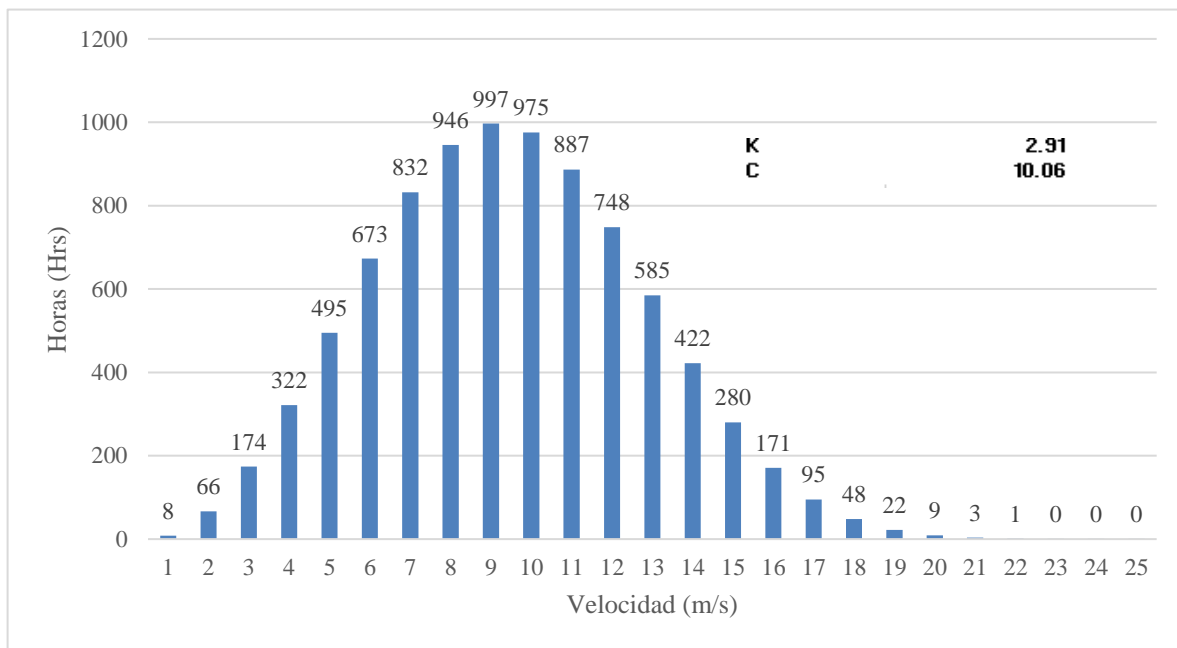
Como muestra **Figura 3.15**. Lo cual indica que la provincia posee un buen potencial eólico para abastecer la demanda de energía que requiere la planta desaladora.



**Figura 3.15:** Distribución del Factor de Weibull – Pacasmayo  
Fuente: Elaboración propia

*Piura – Paita*

Como se observa en la **Figura 3.16**, la velocidad promedio de la zona es de aproximadamente 8.7 m/s y de acuerdo con los factores calculados, se tiene que la zona seleccionada posee un potencial eólico considerable para abastecer la planta desaladora.



**Figura 3.16:** Distribución del Factor de Weibull – Paita  
Fuente: Elaboración propia

### 3.9 Cálculo de los costes por producción de agua

#### 3.9.1 Cálculo de los costes del emplazamiento de las plantas desaladoras por producción de agua

Teniendo en cuenta un costo promedio de construcción de una planta de desalación es de \$ 2.42 el metro cúbico (\$/m<sup>3</sup>) y los costos variables (mantenimiento, personal, filtro, productos químicos, transporte) para Islay es de \$ 0.0078 m<sup>3</sup> [10], como muestra la siguiente tabla:

Provincia	Producción m3/año	Costo de inversión \$USD/m3
<b>Paíta</b>	4,055,555	2.42
<b>Pacasmayo</b>	3,244,485	2.42
<b>Islay</b>	811,030	2.42

**Tabla 3.13:** Costos de inversión para la instalación de la planta de la planta desaladora por m3.  
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos en la **Tabla 3.13**, el costo de inversión para los tres lugares no varía, por lo que el costo de inversión para el emplazamiento de una planta desaladora es de \$2.42 el metro cúbico.

Se calculó por medio de la **Ecuación 19** un costo total del sistema de la planta desaladora para cada provincia, como muestra **Tabla 3.14**.

Provincia	Producción m3/año	Costo de la planta (\$USD)	Costo de variables \$USD/año
<b>Paíta</b>	4,055,555	9,848,444	158,827
<b>Pacasmayo</b>	3,244,485	7,878,755	101,649
<b>Islay</b>	811,030	1,969,686	6,653

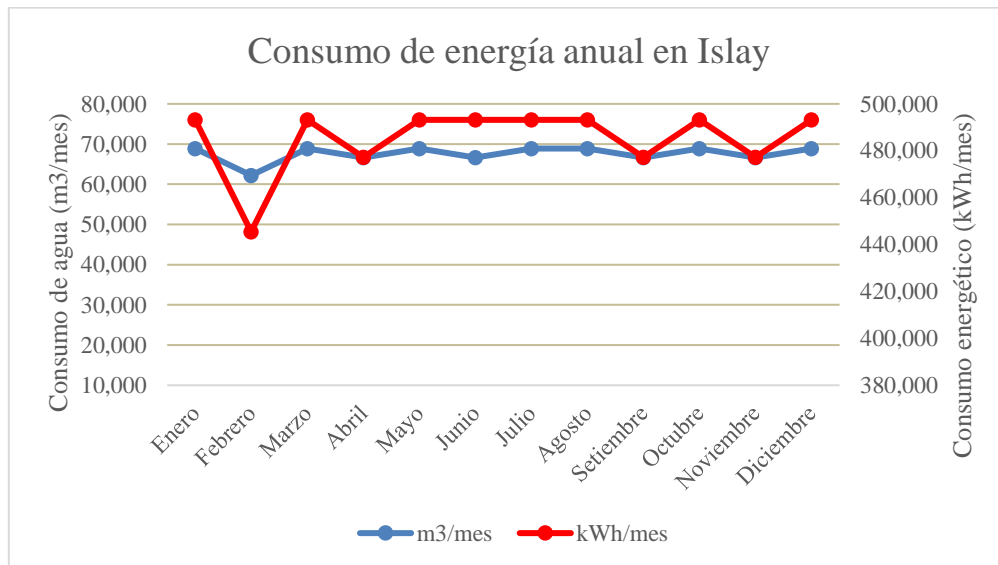
**Tabla 3.14:** Costos de la instalación de la planta y variables anual.  
Fuente: Elaboración propia

### 3.9.2 Cálculo de los costes del consumo de energía de la red eléctrica por producción de agua

#### Arequipa – Islay

La demanda de energía del sistema de bombeo de la planta desaladora, según la Tabla 3.5. es de 5.8 GWh/año para producir 811 mil m<sup>3</sup>/año, como se muestra en la

**Figura 3.17.**



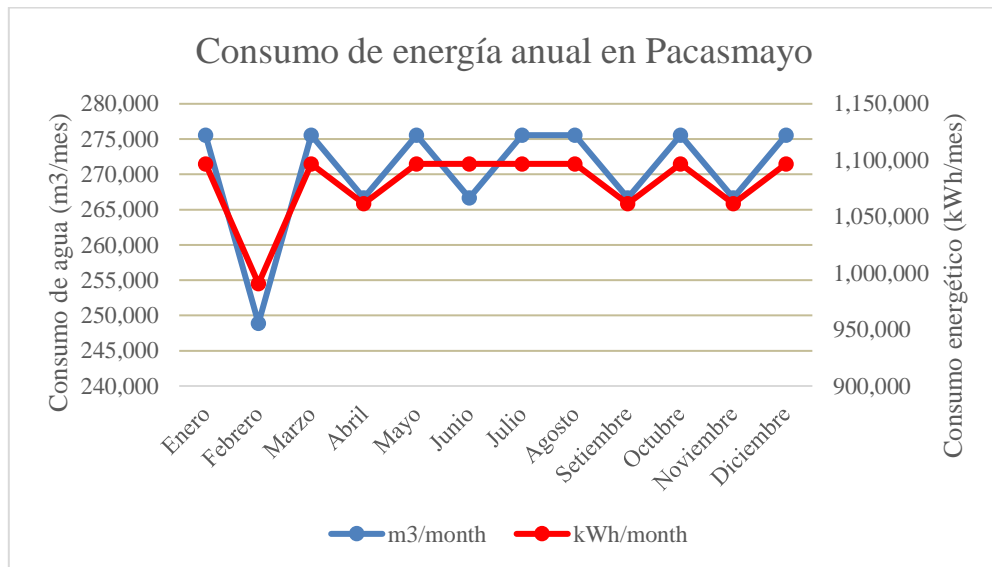
**Figura 3.17:** Consumo de energía anual por m<sup>3</sup> de agua - Islay  
Fuente: Elaboración propia



Por último, de acuerdo con la data del SEIN, se asume que el costo de energía se encuentra en \$0.19 el kWh y sabiendo que el consumo de energético del sistema es 5.8 GW al año, se calcula que para producir 811 mil m<sup>3</sup>/año se tendrá un costo de \$1.1 millones al año considerando que la planta será abastecida totalmente con energía de la red.

#### *La Libertad – Pacasmayo*

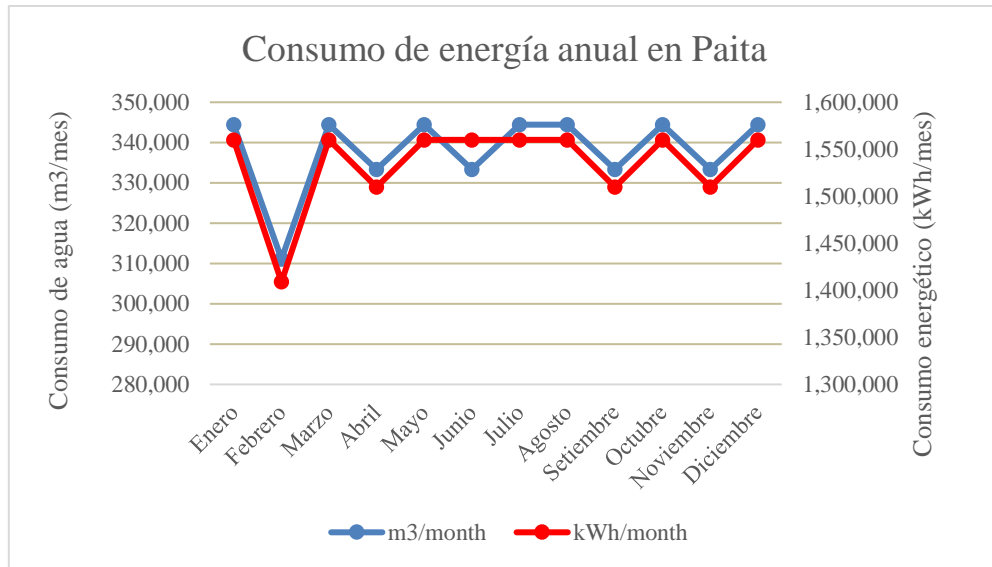
Se obtuvo como resultado que la demanda energética para la provincia de Pacasmayo es de 12.8 GWh/año para producir 3.24 millones de m<sup>3</sup>/año, como muestra la **Figura 3.18**, con un costo de energía de \$2.5 millones al año.



**Figura 3.18:** Consumo de energía anual por m<sup>3</sup> de agua - Pacasmayo  
Fuente: Elaboración propia

#### *Piura – Paita*

En caso de Paita, de acuerdo a los cálculos se obtuvo que el sistema de bombeo de la planta desaladora requiere un consumo energético de 18.4 GWh/año para producir 4 millones de m<sup>3</sup>/año, como se puede observar en la **Figura 3.19**, lo cual equivale a un costo de energía de \$3.5 millones al año.



**Figura 3.19:** Consumo de energía anual por m3 de agua - Paita  
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, de los tres escenarios evaluados se obtuvo el costo de la energía por metro cúbico para cada uno de ellos, sin considerar el costo de emplazamiento de las plantas desaladoras, por medio de la **Ecuación 20**, como se puede apreciar en la **Tabla 3.15**.

Provincia	Producción (m <sup>3</sup> /año)	Red eléctrica \$/m <sup>3</sup>
<b>Paita</b>	4,055,555.15	0.90
<b>Pacasmayo</b>	3,244,485.00	0.80
<b>Islay</b>	811,030.00	1.4

**Tabla 3.15:** Cuadro resumen del costo de la energía por metro cúbico de agua para cada provincia seleccionada.

Fuente: Elaboración propia

### 3.9.3 Cálculo de los costes de las plantas solares fotovoltaicas por producción de agua

Se realizó el cálculo de los costes de inversión de las plantas solares fotovoltaicas para cada provincia seleccionada, que se presentan en la **Tabla 3.16**.

Provincias	Sistema Solar		Inversión \$USD/SOLAR
	HSP	SISTEMA (kWp)	
<b>Paita</b>	6	10,033	9,807,187
<b>Pacasmayo</b>	5.7	7,374	7,234,532
<b>Islay</b>	6	3,673	3,116,693

**Tabla 3.16:** Costos del Pre-diseño de un Sistema Fotovoltaico para cada provincia.  
Fuente: Elaboración propia

Seguidamente se aplicó la **Ecuación 20**, donde se obtuvo los costos de inversión inicial para la instalación de las plantas solares fotovoltaicas y el emplazamiento de las plantas desaladoras por metro cúbico, como se muestra en la **Tabla 3.17**.

Provincia	Producción m <sup>3</sup> /año	Planta + Solar \$/m <sup>3</sup>
<b>Paita</b>	4,055,555	1.5
<b>Pacasmayo</b>	3,244,485	1.2
<b>Islay</b>	811,030	2

**Tabla 3.17:** Costos totales de inversión m<sup>3</sup> de agua con solar.  
Fuente: Elaboración propia

### 3.9.4 Cálculo de los costes de las plantas eólicas por producción de agua

En la **Tabla 3.18** se presentan los costos del prediseño de plantas eólicas para el abastecimiento de las plantas desaladoras en las tres provincias seleccionadas.

Provincias	Eólica		SISTEMA (kWp)	Inversión \$USD/EÓLICO
	k	c		
<b>Paita</b>	2.91	10.06	6,150	9,840,000
<b>Pacasmayo</b>	3.36	10.84	4,100	6,560,00
<b>Islay</b>	3.99	6.03	12,200	42,640,000

**Tabla 3.18:** Costos del Pre-diseño de un Sistema Eólico para cada provincia.

Fuente: Elaboración propia

Donde se aplicó la **Ecuación 20**, se obtuvieron los costos de inversión inicial para la instalación de las plantas eólicas y el emplazamiento de las plantas desaladoras por metro cúbico, como se puede observar en la **Tabla 3.19**.

Provincia	Producción m <sup>3</sup> /año	Planta + Eólica \$/m <sup>3</sup>
<b>Paita</b>	4,055,555	1.3
<b>Pacasmayo</b>	3,244,485	1.2
<b>Islay</b>	811,030	31

**Tabla 3.19:** Costos totales de inversión m<sup>3</sup> de agua con eólico.

Fuente: Elaboración propia

### 3.10 Comparación de los costos de escenarios de abastecimiento de las plantas desaladoras de agua de mar

En resumen, empleando un Sistema Fotovoltaico (SS. FV), un Sistema Eólico o Energía eléctrica para abastecer la demanda de energía, se obtuvo un costo de inversión por

metro cúbico tal como muestra la **Tabla 3.20** para cada sistema. El cálculo se presenta en la **Tabla 3.18, Tabla 3.16 y Tabla 3.13.**

Provincia	Producción m <sup>3</sup> /año	Planta + Solar \$/m <sup>3</sup>	Planta + Eólica \$/m <sup>3</sup>	Planta +Red eléctrica \$/m <sup>3</sup>
<b>Paita</b>	4,055,555	1.5	1.3	1.6
<b>Pacasmayo</b>	3,244,485	1.2	1.2	1.4
<b>Islay</b>	811,030	2	31	2

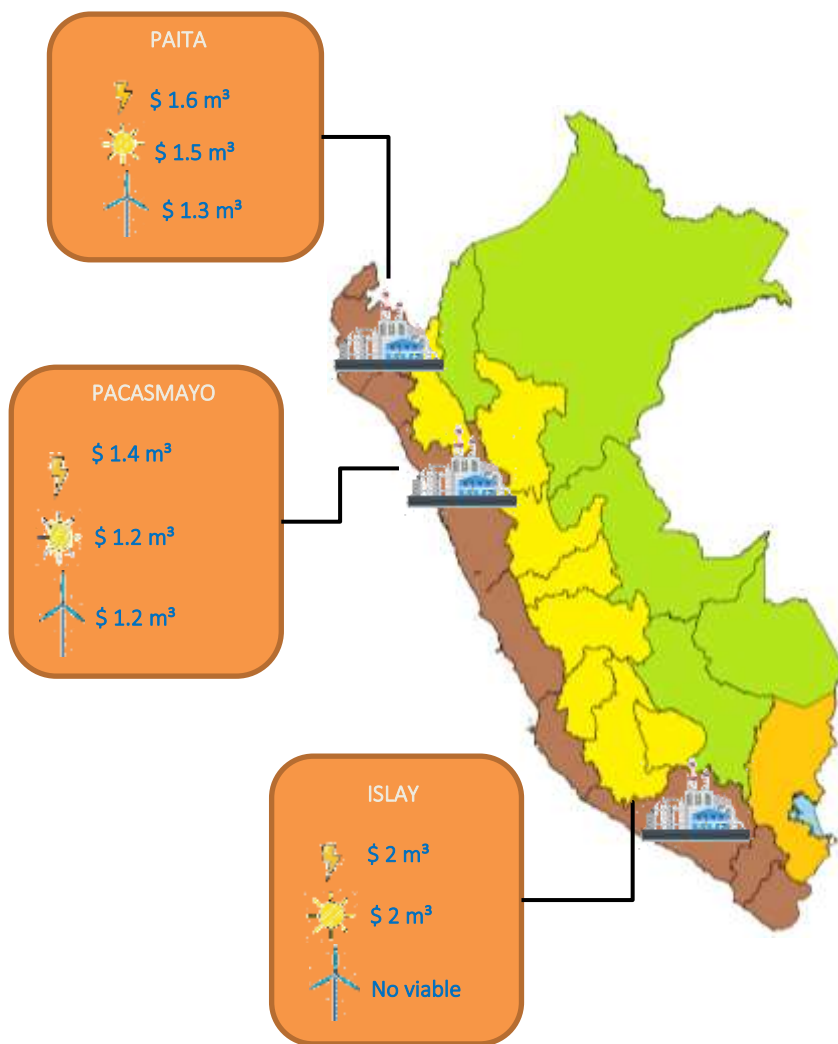
**Tabla 3.20:** Costos totales de inversión m<sup>3</sup> de agua con RER.

Fuente: Elaboración propia

En la **Tabla 3.20.** se muestran los costos totales de inversión por m<sup>3</sup> de agua producida por la planta desaladora abastecida por el SS. FV y el Sistema Eólico, incluyendo los costos de inversión inicial de las variables y del emplazamiento de la planta desaladora, los cuales se calcularon por medio de la **Ecuación 20.**

Como se puede apreciar en la **Tabla 3.20,** los costos totales de inversión para la producción de agua ascienden a comparación de un sistema de tratamiento de agua dulce convencional. Sin embargo, se debe considerar que otras formas de provisión de agua a las zonas serían por medio de cisternas las cuales tienen un costo mucho más elevado, llegando a un precio de \$7 m<sup>3</sup>[19]. Asimismo, los Sistemas RER ahorran la energía que se consume de la red, lo cual permite vender el agua a un menor precio por m<sup>3</sup>.

De acuerdo a los cálculos obtenidos en la **Tabla 3.18, Tabla 3.16, Tabla 3.15, Tabla 3.14, Tabla 3.13 y Tabla 3.20.** Se obtiene la siguiente **Figura 3.21,** que muestra los diferentes escenarios para el emplazamiento de una planta desaladora abastecida por tres tipos de fuente de energía (solar, eólica y red eléctrica), considerando un mismo costo de inversión inicial para la construcción únicamente de la planta desaladora es de \$2.81 por m<sup>3</sup> para los tres escenarios elegidos en la zona costera peruana, el costo de inversión inicial del proyecto variará de acuerdo al tipo de energía con la que es abastecida.



**Figura 3.21:** Comparación de los precios por m3 producido para cada provincia.  
Fuente: Elaboración propia

En caso se realice el emplazamiento en cada uno de esos tres escenarios, según los cálculos para un proyecto con tiempo de vida de 21 años, se obtiene por medio de la **Ecuación 21**, el precio al que se debe vender, para recuperar el costo inversión de la planta desaladora abastecida por cada uno de los tres tipos de fuente energética, como se puede observar en la.

Por cada uno de los escenarios se obtiene un ahorro diferente, con un mismo payback de 5 años, de acuerdo con el tipo de fuente energética seleccionada. La ventaja que presenta el uso de las energías renovables a comparación de solo consumir energía de la red es que, a pesar de vender a un menor precio, se pueden obtener precios competitivos con la red eléctrica, permitiendo que el precio de venta sea más accesible y al mismo tiempo generar ahorros considerables, como se aprecia en la **Tabla 3.22**.

Provincia	Producción m3/año	Red eléctrica \$/año	Solar \$/año	Eólica \$/año
<b>Paita</b>	4,055,555	368,816.46	1,008,577.13	189,019.46
<b>Pacasmayo</b>	3,244,485	10,764.82	11,945.17	180,578.14
<b>Islay</b>	811,030	17,108	344,303	No viable

**Tabla 3.22:** Ganancia anual de acuerdo al tipo de fuente energética de abastecimiento.

Fuente: Elaboración propia

Realizando una comparación entre los cálculos de los para cada uno de los lugares de emplazamiento seleccionados, se obtiene en términos técnicos – económicos que Paita se presenta como el escenario más atractivo para realizar una inversión, ya que presenta un buen potencial en ambos recursos renovables, además de tener un precio altamente competitivo en ahorros. Sin embargo, en términos sociales la provincia que requiere mayor atención con respecto al acceso hídrico es Islay, a pesar de que las condiciones de potencial de recursos renovables sean poco favorables, puesto que, de acuerdo con las proyecciones de la data histórica, la provincia se verá gravemente afectada por el estrés hídrico.

Finalmente, se debe tener en cuenta que, si se tuviera un cambio en la regulación peruana, por un sistema de generación distribuida más empresas se animarían a invertir en este tipo de proyectos, ya que sería menos costos generar energía, debido a que podrían venderla a la red, logrando con ello una matriz energética más diversa y un mercado más competitivo.

## CONCLUSIONES

1. De acuerdo con los estudios realizados se identificó los departamentos costeros de mayor vulnerabilidad debido a la escasez hídrica a nivel nacional y la demanda de agua requerida siendo los más afectados: La Libertad con 23,178 m<sup>3</sup>/día, Piura con 34,799 m<sup>3</sup>/día y Arequipa con 17,340 m<sup>3</sup>/día, debido a que poseen la mayor cantidad de habitantes sin acceso a agua potable y a los constantes fenómenos ambientales.
2. Los lugares elegidos son: Paita, Pacasmayo e Islay para Piura, La Libertad y Arequipa, respectivamente. Los cuales poseen un gran potencial aprovechable de recursos renovables para su empleo como energía útil, pues poseían una radiación promedio anual entre 5.6 a 5.9 kWh/m<sup>2</sup>día y una velocidad de vientos promedio entre 4.84 m/s y 9.03 m/s y no contaba con ninguna área protegida, haciendo viable el proyecto en la zona. Asimismo, estos tres departamentos cuentan con instalaciones de líneas eléctricas y subestaciones, lo cual corrobora su acceso a la red eléctrica.
3. De acuerdo con los cálculos obtenidos para los sistemas de las plantas desaladoras de ósmosis inversa, se obtiene un precio por producción de metro cúbico bastante factible de \$ 1.6 m<sup>3</sup>, \$ 1.4 m<sup>3</sup> y \$ 2 m<sup>3</sup> para Paita, Pacasmayo e Islay respectivamente, debido a que la tecnología empleada a comparación de otras tecnologías de desalación tiene un consumo menor de energía.
4. Al realizar una comparación entre los cálculos del sistema abastecido completamente por la red frente el sistema abastecido con RER se obtiene que Pacasmayo es la mejor opción ya que se para un mismo payback el precio de venta al cual se oferta el agua siendo de \$1.2 m<sup>3</sup> es menor que el sistema abastecido solo por red eléctrica obteniendo un precio de \$1.4 m<sup>3</sup>.
5. En términos económicos el mejor lugar para realizar el emplazamiento de una planta desaladora es Paita provincia de La Libertad, sin embargo, dada la condición futura Islay provincia de Arequipa debería ser un punto principal que atender, ya que cuenta con un estrés hídrico elevado.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Maddocks, R. S. Young y P. Reig, «World Resources Institute,» 26 Agosto 2015. [En línea]. Available: <http://www.wri.org/blog/2015/08/ranking-world%E2%80%99s-most-water-stressed-countries-2040>. [Último acceso: 12 04 2018].
- [2] MINAGRI, «Conflictos sociales, acceso al agua y previsiones Conflictos sociales, acceso al agua y previsiones,» de *MINAGRI*, Lima, 2005.
- [3] OMS, «Series Informes Técnicos N° 11, Desigualdades en el acceso, uso y gasto con el agua potable en América Latina y el Caribe,» Organización Mundial de la Salud, Lima, 2001.
- [4] M. Liliana, «Agua y Cambio Climático en Lima, Callao y sus Valles Perú,» de *Cámara de Comercio de Lima I Foro Internacional Sobre Cambio Climático*, Lima , 2014.
- [5] INEI, «Perú: Crecimiento y distribución de la población, 2007,» INEI, Lima, 2008.
- [6] M. L. M. Siña, «Prefactibilidad técnica y económica de una planta desaladora de agua marina para la minería alimentada con energía generada por una planta de concentración solar,» 2011, p. 11.
- [7] F. Rouco, «¿La Solución está en el mar?, La desalación podría ser una solución para reducir la escasez de agua,» 2016, pp. 4-5.
- [8] B. Marin, «MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA REFORMA DE PLANTAS DESALADORA,» de *II Seminario Internacional de Desalación en Antofagasta*, Antofagasta, 2010.
- [9] E. Z. Mayo, «Desalinización de agua del mar mediante energías renovables,» Plataforma Solar de Almería-CIEMAT.

- [10] J. C. Montava, «Diseño de una planta desalinizadora con sistema de osmosis inversa para producir 20000 m<sup>3</sup>/día,» 2016 .
- [11] S. Tabra, «La preocupante y desigual situación del agua en el Perú,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.servindi.org/actualidad/84511>. [Último acceso: 17 Junio 2017].
- [12] ANA, «8th World Water Forum 2018,» Brasilia, 2018.
- [13] INEI, «El Peru tiene una población de 31 millones 488 mil 625 habitantes,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/el-peru-tiene-una-poblacion-de-31-millones-488-mil-625-habitantes-9>. [Último acceso: 19 Marzo 2018].
- [14] EnerNews, «Desalinizadoras: Cómo avanzan y garantizan el desarrollo,» 2017.
- [15] Tecnología Proyecta, «Planta desalinizadoras, El mar como fuente de agua potable,» Tecnología Proyecta.
- [16] Fluence News Team, «Desalinización en América Latina,» Fluence , 29 Enero 2016. [En línea]. Available: <https://www.fluencecorp.com/es/desalinizacion-en-america-latina/>. [Último acceso: 12 Abril 2018].
- [17] Construcción y Vivienda, «El mar como fuente de agua potable,» Construcción y Vivienda, 30 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.construccionyvivienda.com/component/k2/el-mar-como-fuente-de-agua-potable>. [Último acceso: 18 Marzo 2018].
- [18] INEI, «Perú: Formas de acceso al agua y saneamiento básico, 2016,» INEI, Lima, 2016.
- [19] SUNASS, «Comprar agua por camión cisterna les cuesta 72 soles mensuales a familias limeñas,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.sunass.gob.pe/boletin2016/febrero/notacentral1.html>. [Último acceso: 19 Marzo 2018].
- [20] S. Ríos-Tobón, R. M. Agudelo-Cadavid y L. A. Gutiérrez-Builes, «Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano,» 2017.

- [21] D. A. M. JIMÉNEZ, «¿trasvases o desalación?,» de *El debate en España y experiencias internacionales en la gestión del agua*, Madrid.
- [22] MINAM, «La Contribución Nacional del Perú-iNDC: agenda para un desarrollo climáticamente responsable,» MINAM, Lima.
- [23] E. Delyannis, V. Belessiotis y S. Kalogirou, "Thermal Solar Desalination", *Methods and Systems*, 2016.
- [24] R. Gonzáles Enríquez, G. E. Dévora Isiordia y N. E. Ponce Fernández, «Técnicas para desalinizar agua de mar y su desarrollo en México,» pp. 57-68, 2012.
- [25] R. Bours y X. Used, «La importancia de la seguridad en la desalación,» pp. 1-3, 2008.
- [26] C. Guaita, P. Muñoz, A. Rivera, J. Tobar y D. Uribe, «Plantas desalinizadoras de Agua de Mar,» Atacama, 2009.
- [27] B. O. Delgado, «Modelado de un sistema de desalación de agua de mar basado en la tecnología de destilación multiefecto con alimentación en serie,» 2013.
- [28] «Desalación de agua para hacerlas aptas para el consumo humano, "¿Qué es la desalación?»,» 2013. [En línea]. Available: [aula.aguapedia.org/pluginfile.php/3772/mod.../TEMA3.%20DESALACION.pdf?](http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/3772/mod.../TEMA3.%20DESALACION.pdf?) [Último acceso: 8 Mayo 2017].
- [29] A. H. Montesinos, «Desalación de aguas osmosis inversa implicaciones medioambientales y lucha contra la sequía,» 2008.
- [30] F. García, J. Quintana y I. Nuez, *Optimización de una planta de ósmosis inversa utilizando energías renovables*, 2004.
- [31] *Capítulo 3, Procesos de separación por membranas*, 2006.
- [32] Infraplast, «Soluciones sustentables,» Infraplast, 25 Abril 2015. [En línea]. Available: <http://www.infraplast.cl/california-apuesta-por-las-plantas-desalinizadoras-tras-larga-sequia/>. [Último acceso: 2018 Junio 15].
- [33] COES, «OPERACIÓN COMERCIAL DE CENTRALES Y/O UNIDADES DE GENERACIÓN,» COES, Lima, 2018.

- [34] IRENA, Perú: Evaluación del estado de preparación de las energías renovables, Lima: IRENA, 2014.
- [35] COES, Resumen estadístico anual 2014, Lima: COES, 2014.
- [36] MINEM, Plan Energético Nacional 2014-2025, Lima: MINEM, 2014.
- [37] OSINERGMIN, La industria de la energía renovables en el Perú, 10 años de contribuciones del cambio climático, Lima: OSINERGMIN, 2017.
- [38] P. G. Aita, «MATRIZ ENERGETICA Y DESARROLLO SOSTENIBLE,» de *Expo-Energía*, Lima, 2015.
- [39] ADINELSA, «PARQUES E PARQUES EÓLICOS COMO PROYECTOS DE LICOS COMO PROYECTOS DE,» de *Potencial eólico en el Perú*, Lima, 2014.
- [40] H. Zhang, J. Baeyens, J. Degreve y G. Caceres, «Concentrated solar power plants: Review and design methodology,» de *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, pp. 466-481.
- [41] OSINERGMIN, La industria de la Electricidad en el Perú: 25 años de aportes al crecimiento económico del país, Lima: OSINERGMIN, 2016.
- [42] IRENA, The Power to Change, IRENA, 2016.
- [43] M. Günther, M. Joemann y S. Csambor, "Parabolic Trough Technology", de *Advanced CSP Teaching Materials*, Cologne: Institute of Solar Research, 2012.
- [44] A. Vásquez, J. Tamayo y J. Salvador, La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático., Lima, 2017.
- [45] M. Roldán, J. Fernández-Reche, L. Valenzuela, A. Vidal y E. Zarza, CFD MODELLING IN SOLAR THERMAL ENGINEERING, *Engineering Applications of Computational Fluid Dynamics*, 2015.
- [46] MINAM, Estrategia Nacional ante el Cambio Climático, Lima: MINAM, 2014.
- [47] OSINERGMIN, «Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería,» 16 Febrero 2016. [En línea]. Available: [http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro\\_documental/Institucional/Bolet%C3%](http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Bolet%C3%91n)

ADn%20Institucional/NP%20Subasta%20de%20energ%C3%ADas%20renovables%20-%20Osnergmin.pdf. [Último acceso: 15 Junio 2018].

- [48] D. Ávila-Prats, R. Alesanco-García y J. Veliz-Alonso, «Sistemas híbridos con base a las energías renovables para el suministro de energía a plantas desaladoras,» 2011.
- [49] ANA, «Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú,» MINAGRI, Lima, 2013.
- [50] SEDAPAL, «Consumo promedio de agua potable,» 09 Febrero 2017. [En línea]. Available: [http://www.sedapal.com.pe/noticias1/-/asset\\_publisher/mRM0/content/mayor-consumo-de-agua-potable-por-habitante-dia-se-registra-en-san-isidro?redirect=http%3A%2F%2Fwww.sedapal.com.pe%2Fnoticias1%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_mRM0%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%](http://www.sedapal.com.pe/noticias1/-/asset_publisher/mRM0/content/mayor-consumo-de-agua-potable-por-habitante-dia-se-registra-en-san-isidro?redirect=http%3A%2F%2Fwww.sedapal.com.pe%2Fnoticias1%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_mRM0%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%). [Último acceso: 15 Junio 2018].
- [51] MINEM, «Altas de la Energía Solar de Perú,» MINEM, 05 Junio 2013. [En línea]. Available: <http://dger.minem.gob.pe/atlassolar/>. [Último acceso: 01 Julio 2018].
- [52] MINEM, «Web-Gis del Atlas eólico del Perú,» MINEM, [En línea]. Available: [http://mapas.minem.gob.pe/map\\_eolico/](http://mapas.minem.gob.pe/map_eolico/). [Último acceso: 19 Marzo 2018].
- [53] INEI, «Acceso a la Electricidad,» INEI, Lima, 2016.
- [54] SEIN, «Mapa del SEIN,» SEIN, 17 Agosto 2016. [En línea]. Available: <https://www.osnergmin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/MapaSEIN/>. [Último acceso: 08 Junio 2018].
- [55] SERNAP, «Servicio Nacional de Áreas Protegidas,» SERNAP, 01 Enero 2018. [En línea]. Available: <http://www.sernap.gob.go/>. [Último acceso: 19 Marzo 2018].
- [56] SINAMPE, «Áreas Naturales Protegidas de administración nacional que son gestionadas y administradas por el SERNAP,» SINAMPE, 01 Enero 2018. [En línea]. Available: <http://www.sernap.gob.pe/el-sinanpe>. [Último acceso: 19 Marzo 2018].
- [57] SMA, «Coeficiente de rendimiento - Factor de calidad de la instalación fotovoltaica,» SMA, 2015.

- [58] INEI, Encuesta Nacional de Programas Presupuestales 2011-2016, Lima: INEI, 2017.
- [59] E. Quintanilla, Perú: Soluciones para un mercado eléctrico de alto crecimiento - Promoción de energías renovables... y competitivas, Lima, 2016.
- [60] The International Renewable Energy Agency (IRENA), RENEWABLE ENERGY AUCTIONS ANALYSING 2016, Abu Dhabi, 2017.
- [61] MEDESA, «Capítulo 2: Desalación de Agua de Mar,» *MEDESA*, pp. 2-4.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1: Scrip en Matlab para el cálculo del factor de rozamiento “f” con el uso de la ecuación de Colebrook-White

```
>> % Programa que calcula el coeficiente de Fricción
>> % para la fórmula de HW.
clear;
% re=input('Número de Reynolds (Adim.): ')
% e=input('Rugosidad Absoluta (m): ')
% d=input(' Diámetro (m): ');
>> re=422884.84; % Número de Reynolds
>> k=0.000021; % Rugosidad Absoluta
>> d=0.230329433; % Diámetro interno
>> % proponemos valores de a y b
a=0.0;
b=10;
% Proponemos un valor de f inicial para que entre al ciclo
f=1;
while abs(f)>0.00001

% Calculamos el valor de C
c=(a+b)./2;
% Evaluamos en C
fa=1/sqrt(c);
fb=-2*(log((k/d)/3.71+2.51/(re*sqrt(c))))*0.434294481903252000;
```



```
f=fb-fa;  
if f>0  
b=c;  
else  
a=c;  
end  
end  
>> fprintf('Factor de Pérdida de carga =%8.9f \n', c)  
Factor de Pérdida de carga =0.014192089
```