



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta de cogeneración
aplicada a desalinización**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Mecánica

P R E S E N T A

Karla Fabiola Mayo Sánchez

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Flor Hernández Padilla



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

A la vida.



Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme un espacio y la oportunidad de obtener todo conocimiento posible desde la preparatoria, así como las herramientas para poder seguir aprendiendo, tanto profesional como personalmente.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería por ofrecerme las bases para mi desarrollo profesional, por ayudarme a ampliar mis perspectivas y hacerme ver que los retos siempre servirán para aprender cada vez un poco más, por enseñarme a confiar más en mí y ayudar a darme cuenta de lo que puedo lograr con ello.

Agradezco al Centro de Ingeniería Avanzada, por brindarme un espacio y sus instalaciones para el desarrollo de una gran parte de este trabajo.

Agradezco especialmente a mi asesora de tesis, la Dra. Flor. Gracias, por tanto. Por su apoyo, por sus ideas, por estar conmigo, aun cuando sentí que ni yo lo estaba, por su tiempo y por su amistad.

Agradezco a mis amigos de la Universidad y de la Prepa, con los que fue mucho más bonito, súper divertido y memorable el camino.

Agradezco a Are, Anita, Ley y Orli, quienes fueron muy especiales y un apoyo fundamental en muchas ocasiones, incluso sin haberse dado cuenta. Los quiero.

Agradezco a mis hermanos: Diana, Lorena, Viridiana y Ricardo, por sus palabras sensatas en los momentos adecuados, por hacerme ver las cosas de forma distinta y por mostrarme que cualquier sueño se puede lograr con decisión y perseverancia. Los amo.

Agradezco a mis padres, Pedro y Margarita, con quienes estoy y estaré infinitamente agradecida por tanto amor y tanto apoyo que me han brindado desde que los conozco, jeje. Gracias, por siempre estar y acompañarme en mis éxitos, así como en mis fracasos. Ustedes han sido uno de los soportes y motores más grandes para mí, así como las personas más maravillosas con quienes he tenido el placer de haber coincidido en esta vida. Las palabras no me bastarían para poder expresar todo el agradecimiento y el amor que les tengo. Son mi todo.

Agradezco a quienes ya no están para ver esto, pero me acompañaron en alguna parte del camino, estuvieron conmigo brindándome todo el amor, y quienes seguro estarían muy felices de verme alcanzar una meta. Chata, Raúl, Alfredito, Frida, viven en mi corazón.

Gracias a todos los profesores que he tenido y que en cada etapa me ayudaron a llegar hasta aquí, compartiendo sus conocimientos conmigo y contribuyendo a mi formación.

Gracias también, a todos aquellos quienes en algún momento se hayan tomado el tiempo de escucharme y compartirme sus ideas, de brindarme algunas palabras de aliento cuando lo necesitaba, a quienes hayan coincidido conmigo en diversos momentos cruciales a lo largo de este camino, y a quienes me hayan brindado algún aprendizaje, aunque parezca que haya pasado desapercibido, sin ello y sin ustedes, no sería quien soy ahora.

A todos ustedes, muchas gracias.

Contenido

Introducción	6
Justificación	9
Planteamiento del problema.....	10
Objetivo General	10
Objetivos Específicos	10
Metodología	11
Capítulo 1. Sector energético	12
1.1 Semblanza del sector energético	12
1.1.1 Sector energético en México.....	14
1.2 Central Nuclear Laguna Verde.....	16
1.2.1 Operación y sistemas	18
1.2.2 Generación Eléctrica y Distribución	19
1.2.3 Reactor BWR-5	20
1.3 Cogeneración.....	28
1.3.1 Ventajas de la cogeneración	28
1.3.2 Aplicaciones de la cogeneración	30
1.3.3 Cogeneración de energía en México y en el mundo	35
Capítulo 2. Sector hídrico	38
2.1 Sector hídrico en México.....	40
2.1.1 Problemática del agua.....	42
2.1.2 Tipos de Agua	43
2.2 Desalinización	46
2.2.1 Métodos de desalinización.....	47
2.2.2 Desalinización en México	53
Capítulo 3. Análisis de Ciclo de Vida.....	55
Análisis de Ciclo de Vida en Procesos.....	55
3.1 Inventario de Ciclo de Vida aplicado a desalinización usando cogeneración.	66
Capítulo 4. Análisis termodinámico de la Central Nuclear.....	67
4.1 Parámetros del proceso	74
4.1.1 Simulación del proceso de la planta Nuclear Laguna Verde	76
4.2 Acoplamientos teóricos de desalinización	83
4.2.1 Planteamiento de Inventario de Análisis de Ciclo de Vida	94
Resultados.	101
Conclusiones.	105

Figuras	106
Tablas.....	108
Bibliografía.....	109

Introducción

Una Producción Más Limpia (P+L) se define como la aplicación continua de estrategias ambientales y metodologías preventivas integradas a los procesos, productos y servicios para poder aumentar la eficiencia global y reducir los riesgos para los seres humanos y el medio ambiente; siendo que en los procesos de producción, una P+L aborda el ahorro de materias primas y energía, la eliminación de materias primas tóxicas y la reducción en cantidades y toxicidad de desechos y emisiones; en el desarrollo y diseño del producto, la P+L aborda la reducción de impactos negativos a lo largo del ciclo de vida del producto: desde la extracción de la materia prima hasta la disposición final; mientras que en los servicios, la P+L aborda la implementación de consideraciones ambientales en el diseño y entrega de servicios (ONU, 2008).

Ya que la energía garantiza el bienestar y funcionamiento económico con un gran impacto social. Al mismo tiempo, la generación y consumo de energía tiene un impacto medioambiental importante. Se estima que dos terceras partes de las emisiones de gases contaminantes provienen de la generación de la energía. Dado que a nivel mundial la demanda de energía crecerá hasta un 30% para 2040, la presión para los países de cubrir esta necesidad energética sin comprometer al medio ambiente aumentará. Los proyectos de Eficiencia Energética (EE) tienen un gran potencial dadas sus características: bajo nivel de inversión (comparados con otras tecnologías limpias) y menor tiempo de implementación. Internacionalmente se reconocen barreras importantes para la implementación de proyectos de EE. Estas barreras contemplan factores institucionales, de información, de financiamiento y de mercado. Por sus características, las asociaciones Público y Privado son mecanismos que se han utilizado globalmente para resolver estas barreras. En línea con los esfuerzos de la Transición Energética, México ratificó el Acuerdo de París donde se establece que el país deberá reducir de manera no condicionada el 22% de sus Gases de efecto Invernadero (GEI) y de contaminantes climáticos de vida corta y así evitar un aumento en la temperatura global de 2°C (Ortiz *et al.*, 2017).

La matriz energética de México se basa principalmente en fuentes de energía provenientes de combustibles fósiles. La generación de electricidad depende de estas fuentes en un 80% por lo tanto, se requiere fomentar medidas de EE para reducir el impacto ambiental del consumo de electricidad. México tiene un potencial para la EE. A través del Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento (FOTEASE), existe un apoyo importante para este tipo de proyectos, pero se deben impulsar nuevos instrumentos que no dependan exclusivamente de las finanzas públicas e impliquen mayor participación de la banca privada y empresas, como se muestra en la Figura 1. Lo anterior para acelerar el cumplimiento de las metas en la reducción de emisiones (Ortiz *et al.*, 2017).

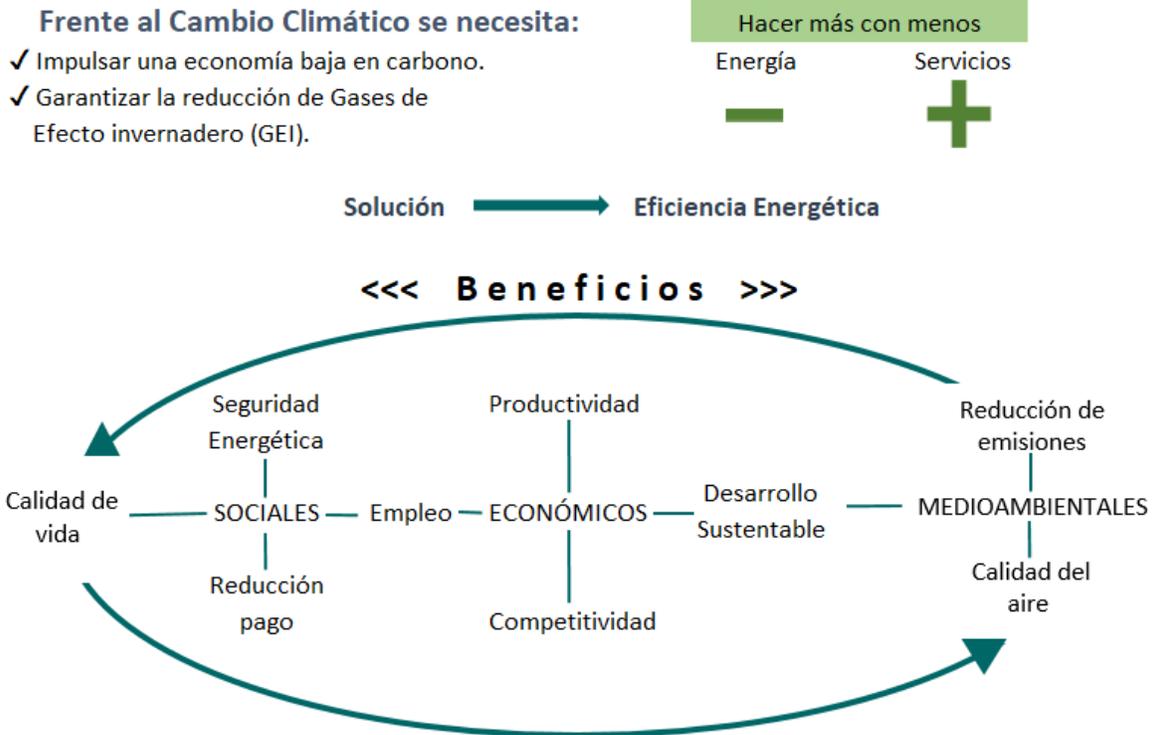


Figura 1. Múltiples beneficios de la eficiencia energética (Ortiz et al., 2017).

Necesidades de eficiencia en la producción energética.

El aumento de la población, el uso de hidrocarburos y los cambios climatológicos que han experimentado algunas zonas del planeta, han producido un desequilibrio entre la demanda y el suministro de agua de calidad, no sólo para abastecer a la población, sino también para la agricultura y la industria. De igual forma, los mismos cambios climáticos que se han experimentado durante los últimos años, han impulsado a la sociedad a buscar alternativas que puedan resolver o minimizar acciones perjudiciales al medio ambiente, propias de los mismos procesos industriales (Flores Espinosa, Perusquía del Cueto and Ortiz Oliveros, 2004c).

En este trabajo, se realizará un análisis de la factibilidad del aprovechamiento de cogeneración en la Central Nuclear de Laguna Verde, aplicándolo a desalinización de un tipo de agua definido, analizando la posibilidad de poder instalar algún dispositivo en el sistema donde sea mayor el aprovechamiento de la energía térmica residual producida en el proceso, comparando distintos tipos de modelos para desalinización o desmineralización del agua, así como distintos dispositivos para el aprovechamiento de la energía residual; todo esto basándose en una propuesta establecida en el boletín No. 19 de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) (Raisic, 1975).

Hasta ahora, se ha determinado un aprovechamiento de energía de más del 300% de eficiencia con respecto a la energía obtenida de fuentes como plantas termoeléctricas, o de fuentes renovables intermitentes. Por otra parte, la energía obtenida por medio de centrales nucleares, ocupa a nivel nacional el 5% de energía eléctrica total generada, y el 17 % de energía mundial generada (Lozano Laez, 1995).

La cogeneración se define como la producción simultánea de calor útil y electricidad a partir de un mismo combustible o fuente de energía primaria. Estos combustibles pueden ser de origen fósil (por ejemplo, gas natural, combustóleo, etc.), renovable (por ejemplo, residuos agrícolas y forestales, biogás, etc.) o incluso hidrógeno. El principio fundamental de la cogeneración es la recuperación del calor residual producto de la combustión en una planta generadora de electricidad, el cual, de otra forma, hubiera sido liberado al medio ambiente, desperdiciando con ello una parte importante de energía todavía disponible. Esta energía, en la mayoría de los casos, puede ser todavía utilizada en diversos usos finales como calefacción de espacios, calentamiento de agua, así como otros procesos térmicos o de refrigeración que se encuentren cercanos a la planta de cogeneración (Cogenera México, 2012a).

Posible aprovechamiento eficiente de energía en las Centrales Nucleares.

Las centrales nucleares presentan diversos puntos de seguridad y de contención, como son las barreras de primer, segundo y tercer orden con las que debe contar el reactor, junto con los edificios de hormigón, para poder controlar de cierta forma, la radiación emitida de los mismos materiales combustibles, al igual que cuenta con sistemas de seguridad, mismos del reactor con los cuales captar la energía nuclear generada, y ésta a su vez transformarla a energía eléctrica (Foro Nuclear, 2010). Siendo así, que ésta misma cogeneración de la central podría utilizarse para la desalinización de agua mar, por lo tanto, aprovecharla para abastecimiento de agua en riegos, para uso de zonas hoteleras, o para uso humano (agua potable) (Raisic, 1975).

Anteriormente se han establecido procesos para desalinización de agua en reactores tipo PWR, pero se tiene planteado realizar el análisis sobre la central nuclear de Laguna Verde, Veracruz; y en dicha central, los dos tipos de reactores son de tipo BWR, y si es el caso con resultados obtenidos, se podría acoplar a distintos reactores que cuenten con las mismas características de los analizados.

Por lo tanto, en este proyecto se planteará teóricamente la factibilidad de poder acoplar algún dispositivo (dependiendo de los resultados de análisis) a ésta cogeneración de energía de la central, para poder establecer un proceso fijo de desalinización de agua de mar, junto con el de producción de energía.

Calor como aprovechamiento energético en ciclos termodinámicos.

El calor producido por los reactores nucleares puede utilizarse para la producción de electricidad o emplearse directamente en procesos industriales. Según el tipo de reactor, el calor puede extraerse a diferentes temperaturas en forma de gas caliente, vapor o agua caliente. La utilización en procesos industriales de vapor a baja presión y temperatura es especialmente prometedora, pues los reactores nucleares existentes en el mercado pueden producir grandes cantidades de tal vapor a costo relativamente bajo. La destilación es el procedimiento más frecuentemente utilizado en las plantas de desalinización. El 90% del total de agua desalinizada se produce actualmente por destilación y el resto se produce por procedimientos que utilizan membranas, como la electrodiálisis y la ósmosis inversa. En el procedimiento de destilación, las necesidades de calor en forma de vapor a baja temperatura y presión son de 45 kWh a 65 kWh por m³ (160 a 240 kJ por kg) de agua producida (Raisic, 1975).

En lo que respecta al primer factor, los reactores refrigerados por agua suministran calor hasta 300° Celsius. Entre estos tipos de reactores se incluyen los reactores de agua a presión (PWR), los reactores de agua en ebullición (BWR), los reactores de agua pesada a presión (PHWR) y los reactores refrigerados por agua ligera y moderados por grafito (LWGR). Los reactores de refrigeración orgánica y moderación por agua pesada (OCHWR) alcanzan temperaturas de unos 400°C, mientras que los reactores reproductores rápidos refrigerados por metal líquido (LMFBR) alcanzan temperaturas de hasta 540°C. Los reactores refrigerados por gas alcanzan temperaturas aun superiores: unos 650°C los reactores avanzados refrigerados por gas y moderados por grafito (AGR), y 950°C los reactores de alta temperatura refrigerados por gas y moderados por grafito (HTGR) (Barnet, Krett and Kupitz, 1991).

El primer proceso que tiene lugar en un reactor nuclear es la conversión de energía nuclear en calor. Ese calor puede utilizarse en una modalidad de funcionamiento «dedicada» a fines de calefacción directos, y en tal caso no se produce electricidad. La otra modalidad es la cogeneración de calor y electricidad. La cogeneración paralela se logra extrayendo parte del vapor de la parte secundaria del generador de vapor antes de que entre en la turbina. La cogeneración en serie se logra extrayendo todo el vapor o parte de él en algún momento durante la expansión del vapor en la turbina cuando éste alcanza la temperatura necesaria para la aplicación prevista. Durante este ciclo, el vapor extraído se emplea también en la producción de electricidad. La cogeneración en serie es idónea para procesos industriales asociados con la calefacción urbana, la desalinización y la agricultura. Hoy algunos países explotan centrales nucleares para producir agua caliente y vapor, con una capacidad total equivalente a menos de 5GWt. En estos países, especialmente en la Unión Soviética, se ha acumulado mucha experiencia en la cogeneración de electricidad y calor (Barnet, Krett and Kupitz, 1991).

Tipos de tecnologías para desalinizar agua

Existen distintos tipos de tecnologías para un proceso de desalinización, la más utilizada hoy en día es la tecnología de desalinización por ósmosis inversa, misma que experimenta mayores avances. Ésta tecnología consiste en hacer pasar agua a través de membranas de modo que retengan sólidos disueltos, de igual forma, existen distintos tipos de poros en las membranas dependiendo el grado de purificación a la cual se quiera tratar el agua de entrada, y para que dicha agua pueda traspasarla necesita estar a alta presión, de ahí viene el gasto energético del proceso, cuantos más sólidos disueltos se quieran tratar en el agua de entrada, mayor será el gasto energético. Las membranas pueden retener más del 98% de los sólidos disueltos, produciendo agua demasiado pura pero al mismo tiempo, con cierto grado de acidez, por lo que requerirá un tratamiento de mineralización para conseguir agua con un pH adecuado para su uso (Martínez, 2015).

Justificación

Esta investigación se propone plantear una propuesta con respecto a un mejor uso de la energía generada por la central nuclear, siendo que, si se genera aproximadamente un 5% de energía a nivel nacional con ella, se pueda adicionar un proceso de cogeneración con el que aumente la

eficiencia de la misma, aplicando ésta cogeneración a un proceso interno de la central como lo es la desalinización de agua para uso industrial.

Planteamiento del problema

La energía térmica del reactor se disipa y no es aprovechada, con las centrales nucleares actuales, solamente se convierte en electricidad el 30% o 35% de la energía térmica que desprende el reactor, disipando el resto al ambiente ya sea mediante torres de refrigeración o el vertido del agua caliente a ríos o al mar. Estos vertidos no sólo son típicos de las centrales nucleares, muchas otras tecnologías como el carbón o el gas natural también vierten grandes cantidades de energía térmica al medio ambiente. Para abril del 2014, de los 432 reactores nucleares que funcionaban en el mundo, 74 utilizaban tecnologías de cogeneración para poder mejorar su eficiencia (Martínez, 2014).

El incremento de los precios de los combustibles fósiles y su alta contribución al calentamiento global, han puesto nuevamente a la energía nuclear en los proyectos para satisfacer la demanda de energía en Europa, Asia y USA. Al igual, la demanda eléctrica en México sigue creciendo, por lo mismo, cualquier tipo de energía que pueda ser aprovechada, y que ésta a su vez no produzca gases de efecto invernadero, es una gran opción. En este caso, la industria nucleoeléctrica en el mundo está resurgiendo con fuerza (Villarreal, 2010).

Objetivo General

Desarrollar una propuesta de cogeneración de un sistema de generación eléctrica nuclear para que la energía residual térmica pueda ser aprovechada en un proceso de desalinización de agua para uso industrial.

Objetivos Específicos

- Investigar sobre el sector energético, sector hídrico, sistemas de cogeneración y desalinización.
- Documentar información acerca de los recursos con los que cuenta el país para poder entender la problemática, generar conciencia de la misma y a su vez poder desarrollar una propuesta de solución.
- Determinar parámetros principales con los cuales funciona el sistema de generación eléctrica de la Central Nuclear Laguna Verde, y a partir de ello, generar un modelo el cual simule el proceso y realizar cálculos para determinar la cantidad de calor residual aprovechable.
- Proponer una forma de cogeneración aplicado a la desmineralización de agua, para así hacer más eficiente el sistema con respecto al inicial sin cogeneración aplicada.

- Seleccionar el sistema de desmineralización de agua basado en: Desmineralización de agua para planta (reactor nuclear), tomando en cuenta la energía y la calidad del agua requerida.
- Plantear un inventario para desarrollar un análisis de ciclo de vida del sistema, comparando el proceso sin cogeneración y el proceso con cogeneración de energía, para así sentar las bases de la evaluación de las eficiencias en los dos procesos.
- Realizar el Análisis de Ciclo de Vida de ambos procesos, utilizando los inventarios generados.
- Realizar discusión de resultados y conclusiones de la investigación.

Metodología

En la Figura 2, se presenta la metodología para el desarrollo de ésta propuesta:

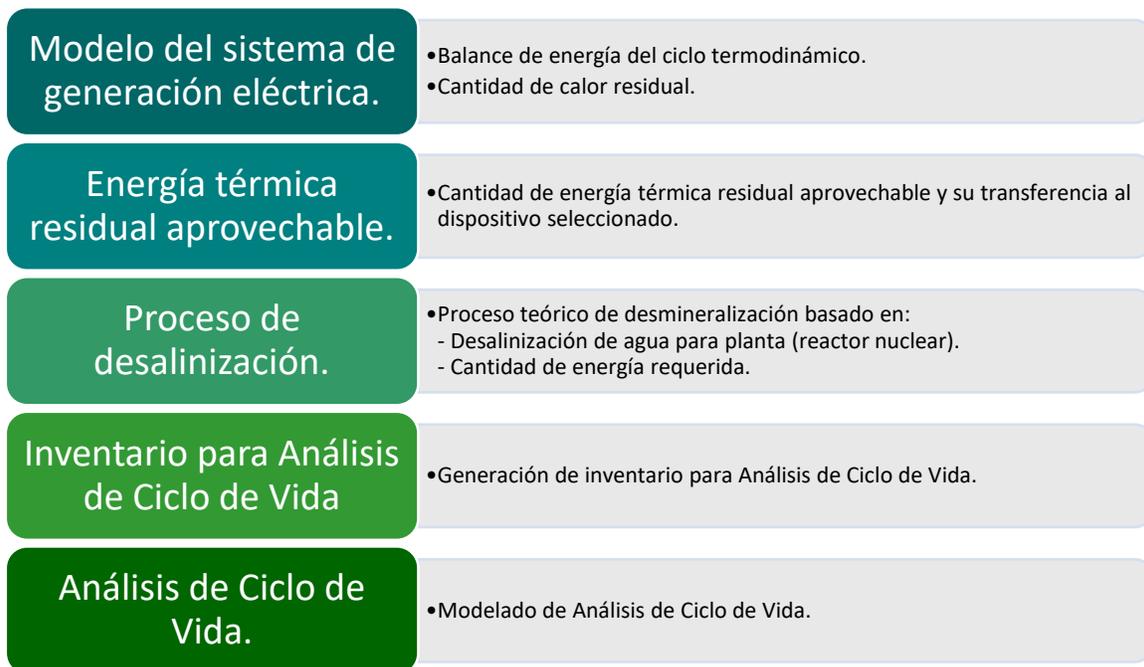


Figura 2. Metodología a seguir para desarrollo de la propuesta planteada.

Capítulo 1. Sector energético

El mundo enfrenta un claro declive de combustibles fósiles y en paralelo un incremento en la demanda energética relacionada a diversos tipos de circunstancias como ineficiencia en las disposiciones de los recursos energéticos o al igual que el aumento significativo de la población, entre otros aspectos. En 2018 se estimó una población mundial de 7,594 mil millones de habitantes (Banco Mundial, 2018a). México cuenta con 1.964 millones de km² de territorio nacional, en donde la proyección a 2030 es no menos a 137.5 millones de habitantes (CONAGUA, 2018l).

En México, la población estimada en el 2018 fue de 126,190,788 de habitantes, con un aumento de 1,413,464 con respecto al año anterior (Figura 3) (Banco Mundial, 2018b).

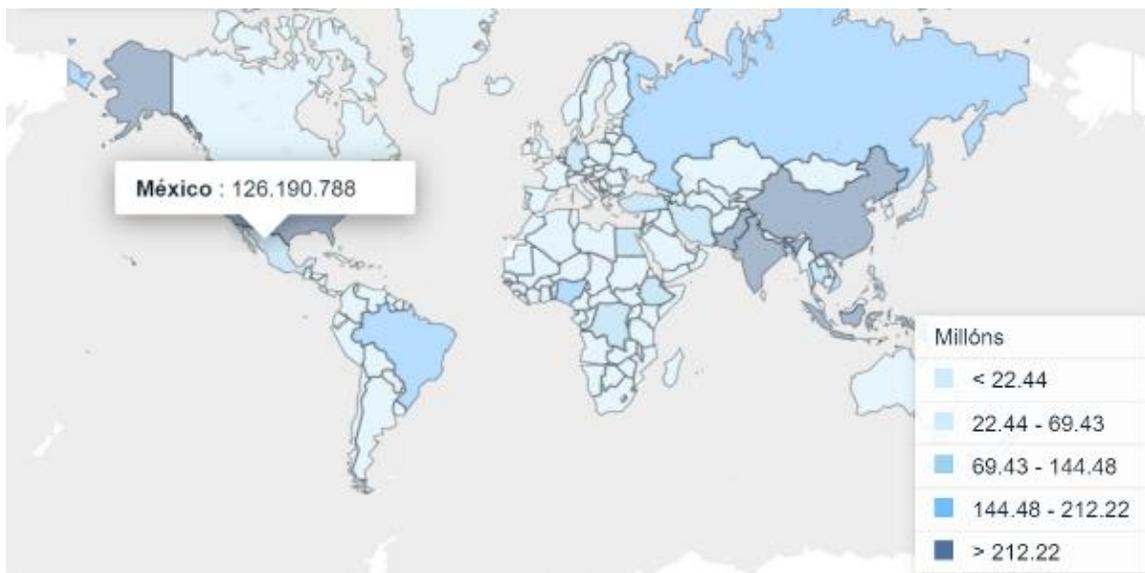


Figura 3. Población mundial y de México en el 2018 (Banco Mundial, 2018b).

A través del tiempo se han ido desarrollando diferentes avances tecnológicos, de acuerdo a las distintas necesidades que el ser humano ha querido cubrir, en general, podríamos hablar de necesidades a cubrir como las básicas para su correcta subsistencia, entre ellas el acceso al agua, comida, salud; y entre otras no tan básicas, pero que son necesarias para un mejor avance de la misma sociedad, sería la energía, ya que la intensidad energética puede definir el avance nacional que se pueda presentar. Es necesario poder buscar soluciones a el desarrollo y mejora continua en todos esos diferentes sectores, en el presente trabajo se tratarán brevemente dos de ellos: el agua y la energía.

1.1 Semblanza del sector energético

La seguridad energética hace referencia a la gestión de tres puntos importantes: la oferta energética proveniente de fuentes locales o externas al país; la confiabilidad de la infraestructura; y la habilidad de los proveedores parar satisfacer la demanda actual y futura (Mulás del Pozo, 2014). La equidad de la misma implica un acceso razonable físico y económico, de la oferta energética a toda la población (Mulás del Pozo, 2014).

El Acuerdo de París sobre el cambio climático que entró en vigor en noviembre de 2016, es en el fondo, un acuerdo sobre energía. Sus objetivos mencionan que es preciso un cambio transformacional del sector energético, fuente de al menos dos tercios de las emisiones de gases de efecto invernadero. Los cambios ya puestos en marcha en el sector de la energía demuestran la promesa y el potencial de la energía de bajas emisiones de CO₂ y confieren credibilidad a una acción significativa en materia de cambio climático. El crecimiento de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía se estancó completamente en 2015. Esto se debió en su mayor parte a una mejora del 1.8% de la intensidad energética de la economía mundial, una tendencia reforzada por los beneficios derivados de la eficiencia energética, así como por el uso generalizado de fuentes de energía más limpias, esencialmente renovables, en todo el mundo. En un momento en que la inversión en exploración y producción de gas y petróleo ha descendido bruscamente, la energía limpia ha atraído una parte creciente de los aproximadamente 1.8 billones USD que se invierten cada año en el sector energético (CONAGUA, 2018i).

Cabe mencionar que al 30 de junio del 2019 se encuentran en operación, a nivel mundial, 450 reactores nucleares, los cuales aportan 2,563 TWh de electricidad suministrada, 396,413 MW(e) de su capacidad total neta; a su vez, se encuentran en construcción 55 reactores nucleares, de los cuales se obtendrán 56,643 MW(e) de capacidad total neta; contando hasta ahora con 17,881 años-reactor de operación (IAEA, 2019a).

La energía nuclear en cifras a nivel mundial para el 2019 se presenta en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Estado de la energía nuclear para el 2019 (IAEA, 2019c).

País	Reactores en:		Electricidad suministrada (TWh)	Cuota Nuclear (%)
	Operación	Construcción		
Alemania	7	0	71.9	11.7
Argentina	3	1	6.5	4.7
Armenia	1	0	1.9	25.6
Bélgica	7	0	27.3	39
Brasil	2	1	14.8	2.7
Bulgaria	2	0	15.4	34.7
Canadá	19	0	94.4	14.9
China	46	11	277.1	4.2
Eslovaquia	4	2	13.8	55
Eslovenia	1	0	5.5	35.9
España	7	0	53.4	20.4
Estados Unidos	98	2	808	19.3
Finlandia	4	1	21.9	32.4
Francia	58	1	395.9	71.7
Hungría	4	0	14.9	50.6
India	22	7	35.4	3.1
Japón	38	2	49.3	6.2
México	2	0	13.2	5.3

Países bajos	1	0	3.3	3.1
Pakistán	5	2	9.3	6.8
Reino Unido	15	1	59.1	17.7
República checa	6	0	28.3	34.5
República de Corea	24	5	127.1	23.7
República Islámica de Irán	1	0	6.3	2.1
Rumania	2	0	10.5	17.2
Rusia	36	6	191.3	17.9
Sudáfrica	2	0	10.6	4.7
Suecia	8	0	65.9	40.3
Suiza	5	0	24.5	37.7
Taiwán, China	5	2	26.7	11.4
Ucrania	15	2	79.5	53
Total	450	46	2563	

Los otros países que se encuentran con reactores en construcción son: Los Estados Unidos Árabes, Bielorrusia, Bangladesh y Turquía.

1.1.1 Sector energético en México

México ha apostado a una única fuente de generación de energía, pero con una limitada visión de alcance de sus hidrocarburos, sin previsión anticipada de otras fuentes de energía y con un modelo de producción y de comercialización que, cada vez menos, busca la creación de conocimientos para innovar productos enriquecidos de la misma materia prima. Se han propiciado impactos ambientales negativos con la contaminación de cuerpos de agua, suelo y atmósfera. El petróleo seguirá siendo, en el futuro previsible, la base energética del transporte. Pero bien se puede abrir un plan de ahorro de hasta 30% en energía en el transporte al electrificar los ferrocarriles, incrementar el transporte por trenes y tranvías, reducir el peso y la potencia de los automóviles e incrementar el número de vehículos ultraligeros (Valdés, 2011). Es indispensable que la industria petrolera mexicana dedique, por mandato de ley, un porcentaje fijo de sus ventas a la investigación sobre el petróleo, pero también sobre fuentes alternas de energía, como ya lo hacen muchas empresas petroleras de los países más avanzados. La inversión en investigación propiciaría el desarrollo de tecnologías integrales que incluirían no sólo la energía, sino también el manejo del agua, producción de alimentos, construcción de edificaciones de energía cero o de mínimo consumo de energía. Asimismo, impulsaría la generación de tecnologías industriales con alta eficiencia energética, el mejoramiento de los servicios urbanos con integración de tecnologías innovadoras para el calentamiento de agua por medios solares y enfriamiento ambiental y el desarrollo de aparatos eléctricos de alta eficiencia energética. Todo lo anterior debería ir acompañado de incentivos fiscales y sociales para generar una nueva cultura energética en el país (Valdés, 2011).

El mix eléctrico que se presentó en el “Balance de Energía, 2018”, con información del Sistema de Información Energética (SIE), de la Secretaría de Energía (SENER), se muestra en las siguientes Tablas 2,3 y Figura 4:

Tabla 2. Consumo final total por tipo de combustible en Petajoules (SENER, 2018a)

	2017	2018	Variación porcentual (%) 2018/2017	Estructura porcentual (%) 2018
Consumo final total	5,500.59	5,393.45	-1.95	100
Consumo no energético total	136.07	109.74	-19.35	2.03
Bagazo de caña	0.24	0.26	11.80	0.00
Gas licuado	1.98	2.80	41.02	0.05
Gas seco	19.78	13.65	-31.01	0.25
Gasolinas y naftas	11.25	5.59	-50.36	0.10
Productos no energéticos	102.82	87.45	-14.95	1.62
Consumo energético total	5,364.52	5,283.70	-1.51	97.97
Carbón	239.15	186.93	-21.83	3.47
Solar	10.89	12.53	15.09	0.23
Combustóleo	29.94	11.61	-61.23	0.22
Coque de carbón	63.75	47.43	-25.61	0.88
Querosenos	172.55	189.77	9.98	3.52
Coque de petróleo	142.36	132.72	-6.77	2.46
Biomasa	300.20	304.80	1.53	5.65
Gas licuado	423.27	423.46	0.05	7.85
Gas seco	734.69	583.11	-20.63	10.81
Electricidad	935.57	1,000.54	6.94	18.55
Diésel	807.73	782.59	-3.11	14.51
Gasolinas y Naftas	1,504.41	1,608.21	6.90	29.82

Tabla 3. Consumo final de energía en el 2017 y el 2018 en México (Petajoules) (SENER, 2018a).

	2017	2018	Variación porcentual (%)	Estructura porcentual (%) 2018
Consumo final total	5,500.59	5,393.45	-1.95	100
Consumo no energético total	136.07	109.74	-19.35	2.03
Petroquímica de Pemex	70.53	56.53	-19.85	1.05
Otras ramas	65.54	53.22	-18.80	0.99
Consumo energético total	5,364.52	5,283.70	-1.51	97.97
Transporte	2,360.16	2,454.70	4.01	45.51
Industrial	1,878.36	1,680.77	-10.52	31.76
Resid, comer y púb	944.09	958.97	1.58	17.78
Agropecuario	181.91	189.27	4.04	3.51

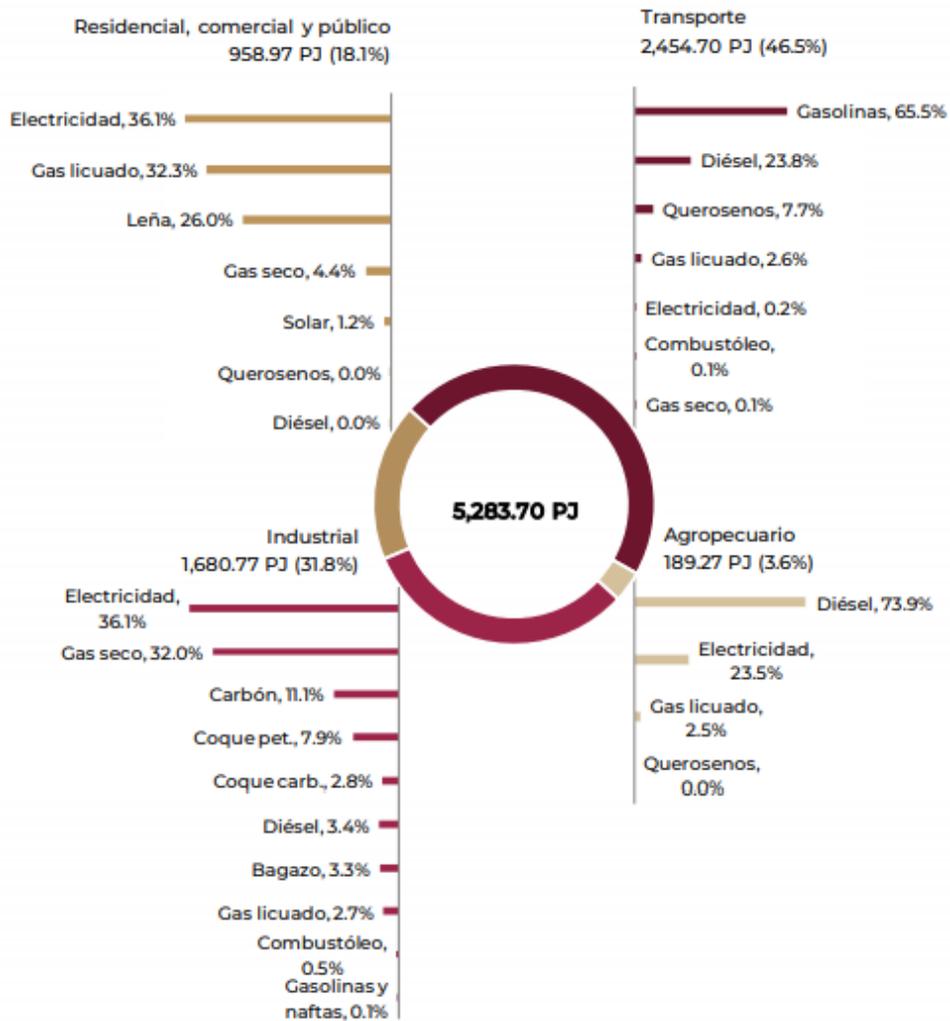


Figura 4. Consumo final energético por sector y energético (SENER, 2018a).

Siendo que energías como micro y mini hidráulica, eólica y solar tienen el inconveniente de presentar intermitencias, lo que implica que deben tener acoplados sistemas de generación de respaldo o de almacenamiento de energía eléctrica para asegurar un abasto continuo de electricidad (Mulás del Pozo, 2014).

1.2 Central Nuclear Laguna Verde

Una central nucleoelectrica es una instalación industrial en cuyo proceso se transforma la energía contenida en los núcleos de los átomos en energía eléctrica utilizable. Es similar a la central termoeléctrica convencional, la diferencia radica en la forma de obtener el calor para la producción de vapor. Mientras que en una termoeléctrica el calor se obtiene quemando combustibles fósiles o extrayendo vapor natural del subsuelo, en una nucleoelectrica el calor se obtiene a partir de la fisión nuclear en un reactor (CFE, 2005).

La energía nuclear es considerada energía limpia, pero no es una energía renovable (SENER, 2018b).

El suministro de energía se refiere a todos los tipos de energía que se producen, ya sea que se trate de minería de carbón o de energía producida a partir de paneles solares. En la siguiente Figura 5, se muestra el suministro total de la Energía Nuclear a lo largo del tiempo.

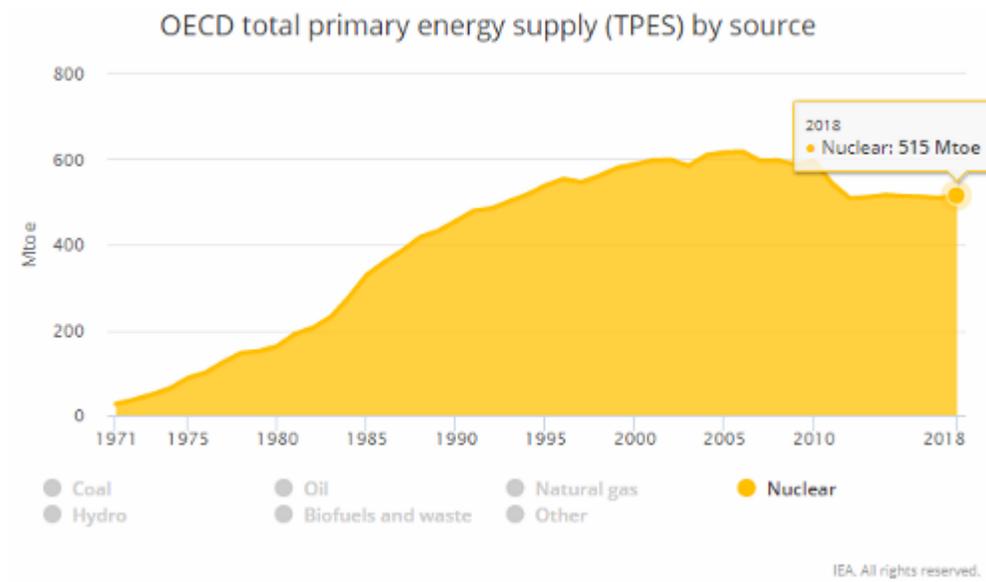


Figura 5. Gráfica del suministro total de energía nuclear a nivel mundial (TPES= Total Primary Energy Supply, Mtoe = Mega toneladas equivalentes de petróleo) (OECD, 2019b).

Parte de la energía necesita ser transformada para ser útil, ya sea a través del refinamiento o la combustión para producir calor o electricidad, en la siguiente Figura 6 se muestra la energía nuclear generada mundialmente en TWh.

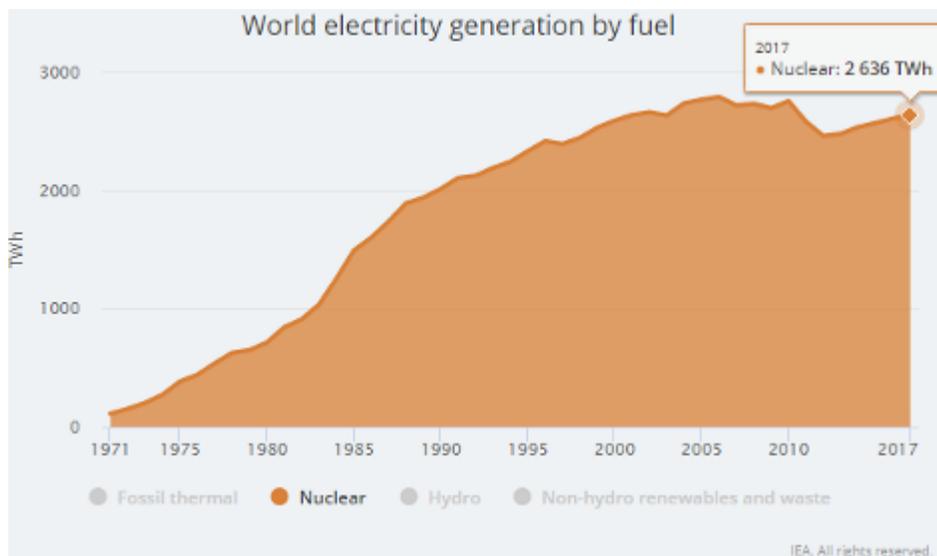


Figura 6. Gráfica de la energía eléctrica generada mundialmente por combustible en este caso nuclear (OECD, 2019a).

El ciclo de vida del combustible para la generación de energía nuclear se presenta en la siguiente Figura 7.

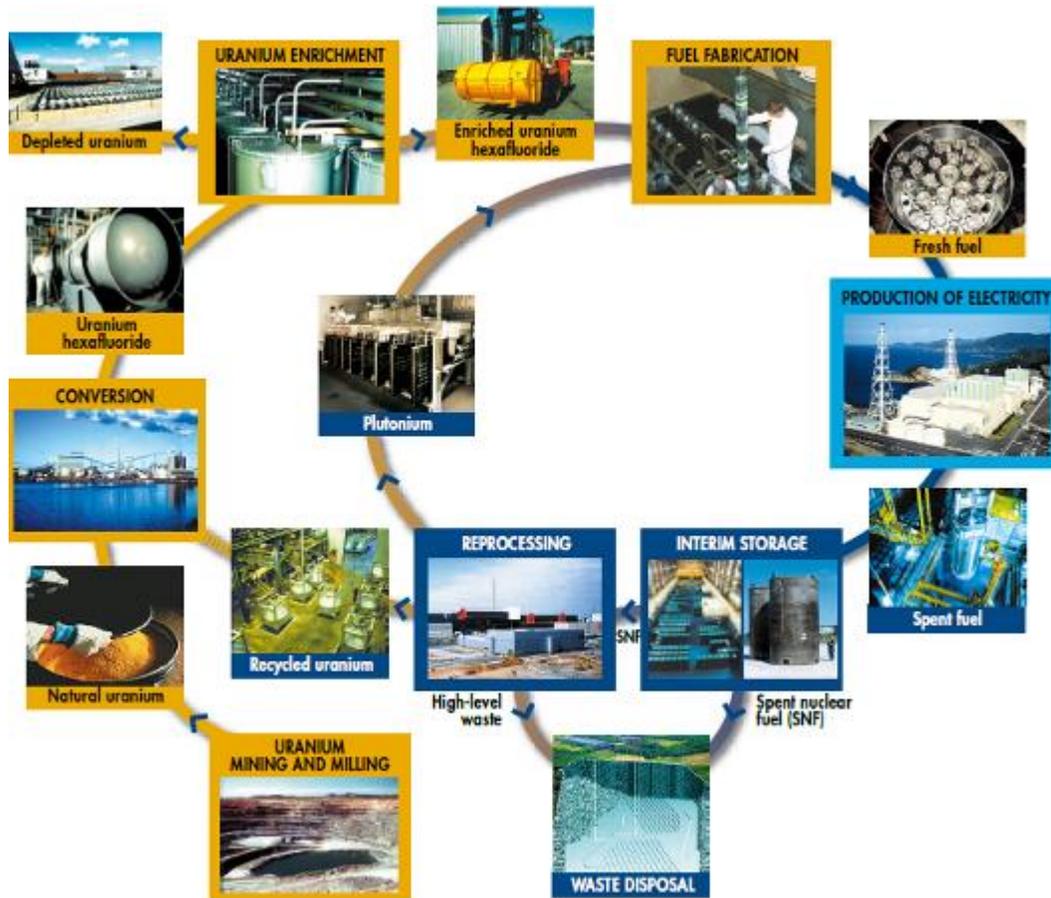


Figura 7. El ciclo del combustible nuclear (OECD and NEA, 2018).

La Central Laguna Verde está localizada en la costa del Golfo de México en el km 42.5 de la carretera federal Cardel-Nautla en el municipio de Alto Lucero, en el Estado de Veracruz.

La Central está integrada por dos unidades, cada una con capacidad de 810 MWe; los reactores son tipo BWR-5 (Boiling Water Reactor), por sus siglas en inglés, y la contención es de tipo MARK II de ciclo directo. El sistema nuclear de suministro de vapor fue provisto por General Electric y el Turbogenerador por Alstom (CFE, 2005).

Con la certificación del organismo regulador mexicano, la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS), la Secretaría de Energía otorgó las licencias para Operación Comercial a la unidad 1 el 29 de julio de 1990 y a la unidad 2 el 10 de abril de 1995. Ambas unidades aportan aproximadamente el 5% de la energía generada en el Sistema Eléctrico Nacional (CFE, 2005).

1.2.1 Operación y sistemas

Siendo el primer proceso que se presenta en el núcleo del reactor de cualquier central nuclear la conversión de energía nuclear en calor, en la práctica dos criterios resultan decisivos: la

temperatura del calor producido (del refrigerante primario) y la presión del vapor producido (Barnet, Krett and Kupitz, 1991).

Los parámetros de operación de la Central Nuclear Laguna Verde se presentan en las Tablas 4 a 6:

Tabla 4. Datos específicos de la turbina de alta presión en la Central Nuclear Laguna Verde (Lozano Laez, 1995).

Turbina de alta presión	
Cantidad	1 turbina
Tipo	Tandem compound, doble flujo axial
Velocidad	1,800 rpm
Temperatura del vapor a la entrada	282 °C
Presión del vapor a la entrada	62.6 kg/cm ² abs
Presión del vapor a la salida	13.9 kg/cm ² abs
Número de extracciones	3

Tabla 5. Datos específicos de la turbina de baja presión en la Central Nuclear Laguna Verde (Lozano Laez, 1995).

Turbina de baja presión	
Cantidad	2 turbinas
Tipo	Tandem compound, doble flujo axial
Velocidad	1,800 rpm
Temperatura del vapor a la entrada	266.9 °C
Presión del vapor a la entrada	12.86 kg/cm ²
Presión del vapor a la salida	50.8 mmHg abs

Tabla 6. Datos específicos del generador de la Central Nuclear Laguna Verde (Lozano Laez, 1995).

Generador	
Tipo	Cerrado, refrigerado con hidrógeno y agua
Potencia efectiva	810 MWe
Frecuencia	60 Hz
Voltaje	22 kV
Velocidad	1,800 rpm
Corriente	24,931 A
Factor de potencia	0.9
Número de polos	4

1.2.2 Generación Eléctrica y Distribución

Algunos datos de la Central nucleoelectrica de Laguna Verde (Lozano Laez, 1995):

Generación Anual: 1,610 MW

Aportación eléctrica al país: 5%
Reactores: 2 General Electric
Tipo de Reactor: BWR-5 (Boiling Water Reactor)
Combustible: Uranio-235 (90 toneladas por reactor)
Líneas de Transmisión hacia: Puebla, Poza Rica y Veracruz.

1.2.3 Reactor BWR-5

Un reactor nuclear es una instalación capaz de iniciar, mantener y controlar las reacciones de fisión en cadena que tienen lugar en el núcleo del reactor, compuesto por el combustible, el refrigerante, los elementos de control, los materiales estructurales y el moderador en el caso de los reactores nucleares térmicos (Lozano Laez, 1995).

Componentes del núcleo del reactor.

El núcleo es la parte del reactor donde se produce y se mantiene la reacción nuclear en cadena. Su objetivo es calentar el agua del circuito primario. Se diseña para operar de forma segura y controlada, de modo que se maximice la cantidad de energía extraída del combustible.

Cada componente del núcleo de reactor, que se muestran en la Figura 9, juega un papel importante en la generación de calor (Lozano Laez, 1995):

- **Combustible.**

El combustible de un reactor nuclear es un material fisionable en cantidades tales que se alcance la masa crítica, y colocado de tal forma que sea posible extraer rápidamente el calor que se produce en su interior debido a la reacción nuclear en cadena. Los combustibles empleados en las centrales nucleares están en forma sólida, aunque varían desde el dióxido de uranio cerámico ligeramente enriquecido, uranio en tubos de aleación de magnesio hasta dióxido de uranio enriquecido o natural en tubos de aleación de zirconio, todo depende del tipo de reactor.

En general, un elemento de combustible está constituido por una disposición cuadrangular de las varillas del combustible, aunque debe mencionarse la disposición hexagonal del reactor ruso de agua a presión VVER. Sujetando los tubos guía a las rejillas de soporte de combustible se consigue que los centros de las varillas de combustible y los tubos guía estén a la misma distancia. Todos los elementos de combustible tienen el mismo diseño mecánico. Algunos contienen haces de barras de control y otros contienen venenos consumibles o fuentes neutrónicas. Para asegurar la calidad de los elementos de combustible, se realizan numerosas inspecciones y ensayos tanto de las materias primas como del producto final.

- **Barras de control**

Los haces de barras de control, mostrados en la Figura 8, proporcionan un medio rápido para el control de la reacción nuclear, permitiendo efectuar cambios rápidos de potencia del reactor y su parada eventual en caso de emergencia. Están fabricadas con materiales absorbentes de neutrones (carburo de boro o aleaciones de plata, indio y cadmio, entre otros) y suelen tener las mismas dimensiones que los elementos de combustible. La reactividad del núcleo aumenta

o disminuye subiendo o bajando las barras de control, es decir, modificando la presencia de material absorbente de neutrones contenido en ellas en el núcleo.

Para que un reactor funcione durante un periodo de tiempo tiene que tener un exceso de reactividad, que es máximo con el combustible fresco y va disminuyendo con la vida del mismo hasta que se anula, momento en el que se hace la recarga del combustible.

En funcionamiento normal, un reactor nuclear tiene las barras de control total o parcialmente extraídas del núcleo, pero el diseño de las centrales nucleares es tal que ante un fallo en un sistema de seguridad o de control del reactor, siempre actúa en el sentido de seguridad de reactor introduciéndose totalmente todas las barras de control en el núcleo y llevando el reactor a parada segura en pocos segundos.

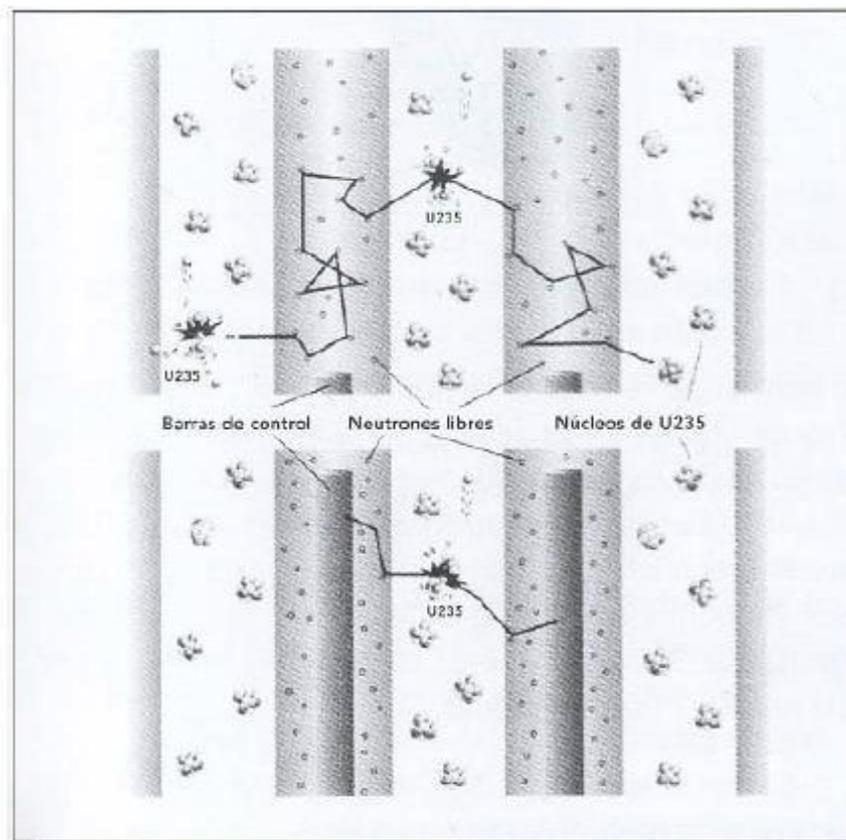


Figura 8. Las barras de control capturan los neutrones libres (Foro Nuclear, 2013).

- **Moderador.**

Los neutrones producidos en la fisión tienen una elevada energía en forma de velocidad. Conviene disminuir su velocidad de modo que aumente la probabilidad de que fisionen otros átomos y no se detenga la reacción en cadena. Esto se consigue mediante choques elásticos de los neutrones con los núcleos del moderador. Entre los moderadores más utilizados están el agua ligera, el agua pesada y el grafito.

- **Reflector.**

Es una reacción nuclear en cadena, un cierto número de neutrones tiende a escapar de la región donde ésta se produce. Esta fuga neutrónica puede minimizarse con la existencia de un medio reflector, aumentando así la eficiencia del reactor. El medio reflector que rodea al núcleo debe tener una baja sección eficaz de captura para no reducir el número de neutrones y que se reflejen el mayor número posible de ellos. La elección del material depende del tipo de reactor. Si tenemos un reactor térmico, el reflector puede ser el moderador, pero si tenemos un reactor rápido el material del reflector debe tener una masa atómica grande para que los neutrones se reflejen en el núcleo con su velocidad original (dispersión inelástica).

- **Blindaje.**

Cuando el reactor esté en operación, se genera gran cantidad de radiación. Es necesaria una protección para aislar a los trabajadores de la instalación de las radiaciones ocasionadas por los productos de fisión. Por ello, se coloca un blindaje biológico alrededor del reactor para interceptar estas emisiones. Los materiales más usados para construir este blindaje son el hormigón, el agua y el plomo.

En estas centrales el agua natural o ligera actúa como refrigerante y moderador del reactor nuclear. El agua, mantenida a una presión de unas 70 atmósferas, entra en ebullición y el vapor producido va directamente a la turbina. Por esta razón, a diferencia de las PWR, no tienen generador de vapor.

- **Control de los reactores nucleares.**

Para que un reactor nuclear funcione durante un periodo de tiempo tiene que tener un exceso de reactividad sobre el valor crítico, para compensar las pérdidas de neutrones que, por diversos fenómenos, tiende a reducirlos. El reactor tiene que funcionar en condiciones de criticidad, lo que significa que el exceso de reactividad que tiene que mantenerse en un valor cero.

Para controlar la reactividad en los reactores nucleares de agua natural, se puede proceder de varias formas, que pueden actuar de forma simultánea y no. La introducción de absorbentes de neutrones en el núcleo por medio de barras de control, es un medio rápido y eficaz de control. En determinadas circunstancias, puede disolverse en el moderador, cuando éste es líquido, un absorbente de neutrones como el ácido bórico.

El diseño de las centrales nucleares es tal que un fallo en los equipos de la instalación siempre actúa en el sentido de máxima seguridad del reactor, insertando todas las barras de control en el núcleo, compensando instantáneamente la reactividad del mismo y parándose el reactor.

Otro tipo de control se realiza con materiales absorbentes o venenos combustibles que van desapareciendo por captura neutrónica. Es frecuente que vayan incorporados en algunos de los elementos combustibles.

La característica principal de estos reactores, además de la ya expresada de la ebullición directa del refrigerante, es el sistema de contención que consta de un edificio de hormigón que constituye el blindaje biológico y dentro de él, la contención propiamente dicha, que es una construcción de acero de forma cilíndrica, como en la Figura 9 y 10.

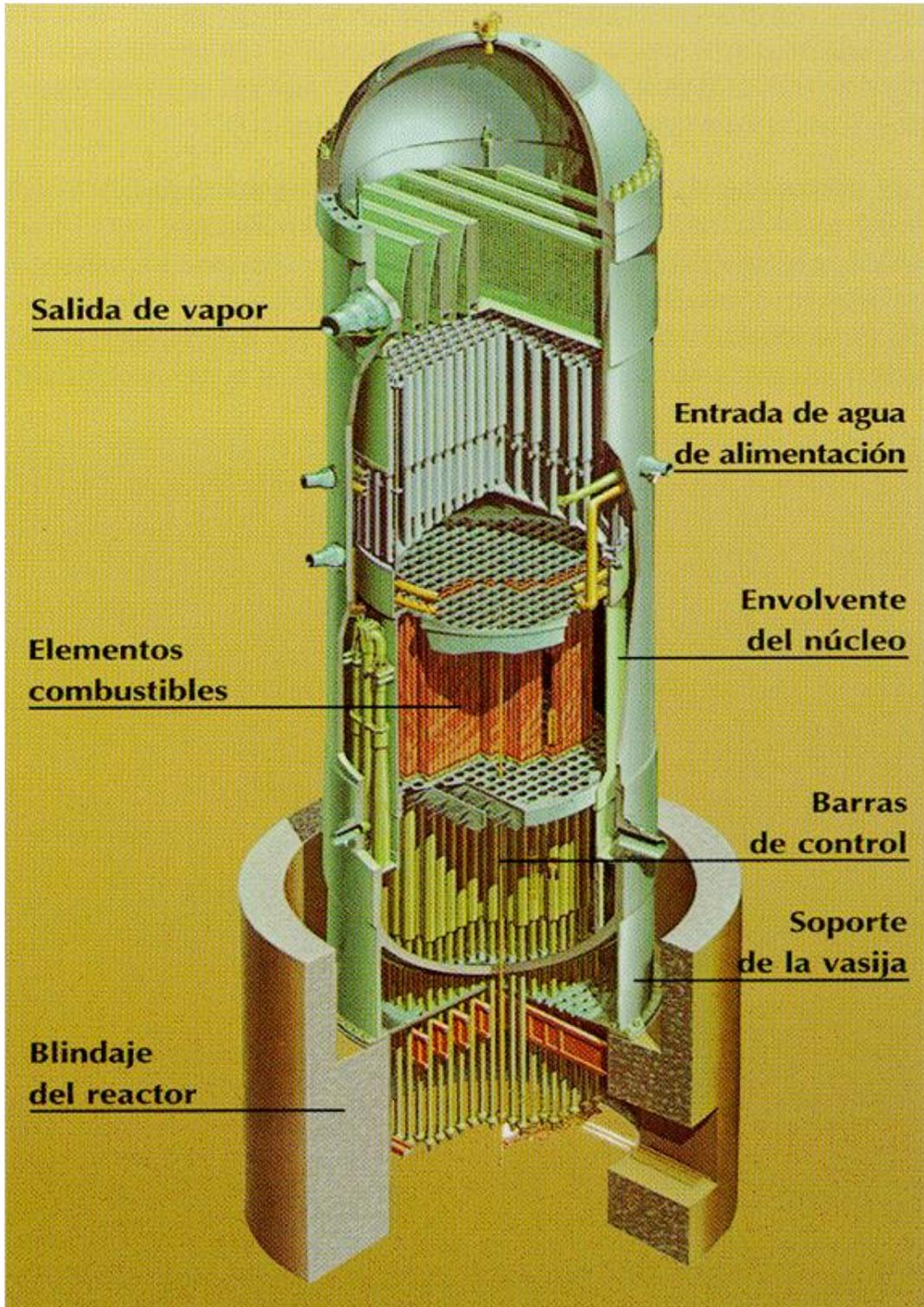
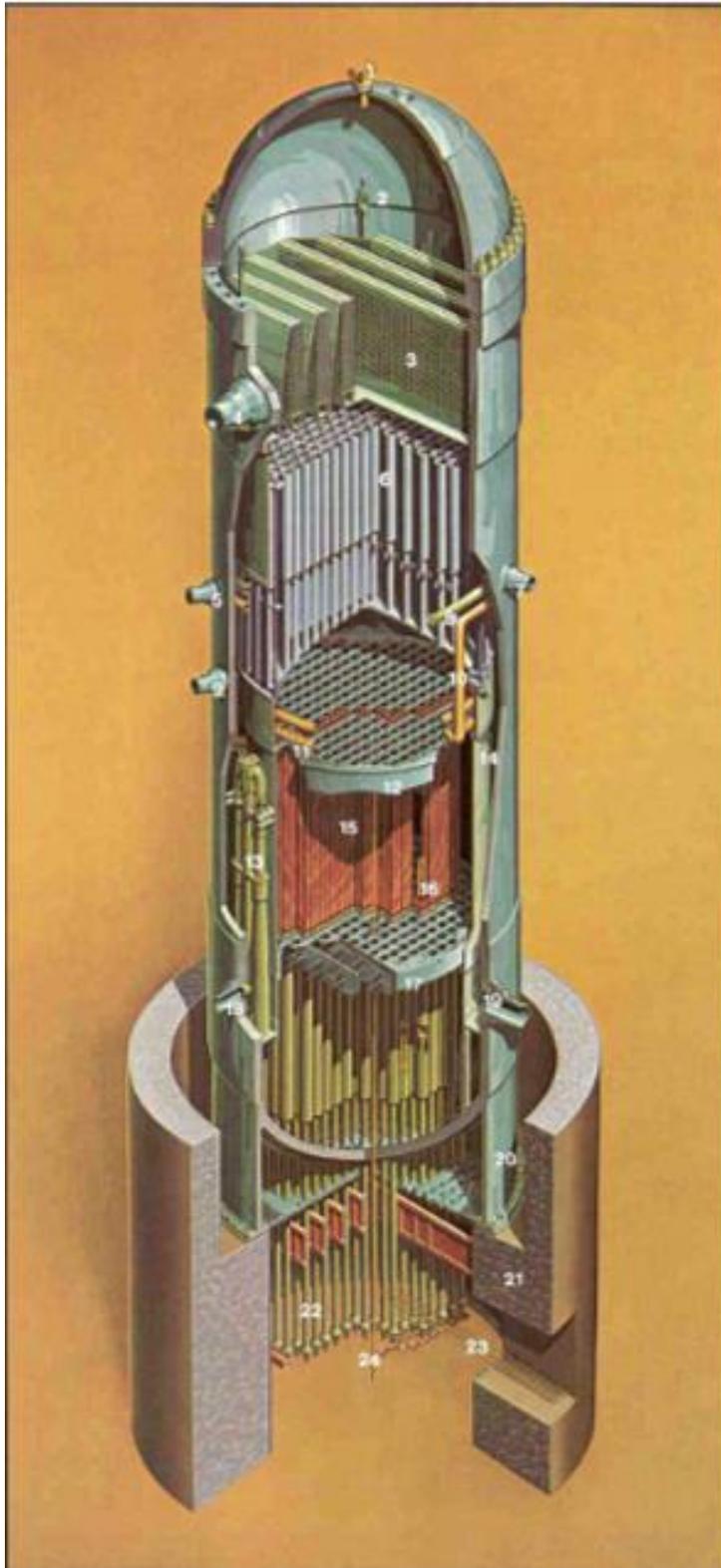


Figura 9. Componentes del núcleo del reactor BWR.



BWR / 5 REACTOR ASSEMBLY

1. VALVULA DE ALIVIO DE PRESIÓN DE LA TAPA
2. ALZADOR DEL SECADOR DE VAPOR
3. ENSAMBLE DE SECADORES DE VAPOR
4. SALIDA DE VAPOR
5. ENTRADA DE INYECCIÓN DEL NUCLEO
6. ENSAMBLE DE SEPARADORES DE VAPOR
7. ENTRADA DE AGUA
8. ASPERSOR DE AGUA ENTRANTE
9. ENTRADA LPCI
10. LINEA DE INYECCIÓN DEL NUCLEO
11. ASPERSORES DE INYECCIÓN DEL NUCLEO
12. GUIA DE BARRAS DE CONTROL
13. ENSAMBLE DE BOMBAS DE CHORRO
14. ENCAMISADO DEL NUCLEO
15. ENSAMBLES DE COMBUSTIBLE
16. LAMINA DE CONTROL
17. PLACA SOPORTE DEL NUCLEO
18. ENTRADA DE AGUA DE RECIRCULACIÓN / BOMBAS DE CHORRO
19. SALIDA DE AGUA DE RECIRCULACIÓN
20. ENCAMISADO DE SOPORTE DE LA VASIA
21. PARED DEL CONTENEDOR
22. GUIAS DE LAS BARRAS DE CONTROL
23. LINEAS HIDRAULICAS DE LAS GUIAS DE LAS BARRAS DE CONTROL
24. MONITOR DE FLUJO INTERNO DEL NUCLEO

GENERAL  ELECTRIC

Figura 10. Ensemble del reactor BWR-5 en una Central Nuclear (General Electric, no date).

Funcionamiento del Reactor BWR-5 de la central nuclear Laguna Verde:

El reactor de la Central nuclear Laguna Verde consiste en un recipiente cilíndrico vertical de acero al carbón (vasija del reactor) diseñado para soportar determinada presión y altas temperaturas. El recubrimiento interno de acero inoxidable ayuda a reducir al mínimo la corrosión y facilita la visibilidad durante las recargas. Dentro del núcleo del reactor se insertan los elementos combustibles para que se lleve a cabo la fusión nuclear (Lozano Laez, 1995).

Los datos técnicos del Reactor BWR, en la Central Nuclear Laguna Verde se presentan a continuación en la Tabla 7:

Tabla 7. Datos técnicos del reactor nuclear BWR-5, que se encuentra en la Central Nuclear Laguna Verde (Lozano Laez, 1995).

	Reactor
Número de unidades	2 x 810 MWe
Tipo de reactor	BWR-5 Reactor de agua ligera en ebullición.
Marca del reactor	General Electric
Combustible	Dióxido de Uranio enriquecido por pastilla desde 0.71% hasta 4.9%
Potencia térmica	2,317 MWt
Presión nominal	70.69 kg/cm ²
Barras de control cruciformes	109 barras de acero inoxidable con varillas que contienen carburo de boro y hafnio.
Flujo del vapor	4,536.38 Ton/h
Calidad del vapor	99.96%
Bombas de recirculación	2 con 4,500 HP de potencia c/u
Flujo nominal total de recirculación al 100% de potencia	9,489.16 Ton/h
Flujo de agua de alimentación	4,537.7 Ton/h
Potencia nominal de cada bomba de recirculación	4,500 HP
Bombas jet internas de recirculación	20
Altura de la vasija	20.80 m
Diámetro exterior	5.30 m
Espesor	13 cm en pared y 18 cm en el fondo
Peso	544.8 Ton
Peso de la tapa	63.5 Ton

Los reactores que se utilizan en ambas unidades de la central son BWR-5 (Boiling Water Reactor) de agua en ebullición o agua hirviendo, tipo de reactor que debe su nombre a que el agua entra en ebullición en el interior de la vasija produciendo el vapor necesario para mover las turbinas (Lozano Laez, 1995).

La vista interna con los diferentes componentes del núcleo del reactor es la siguiente (Figura 11):

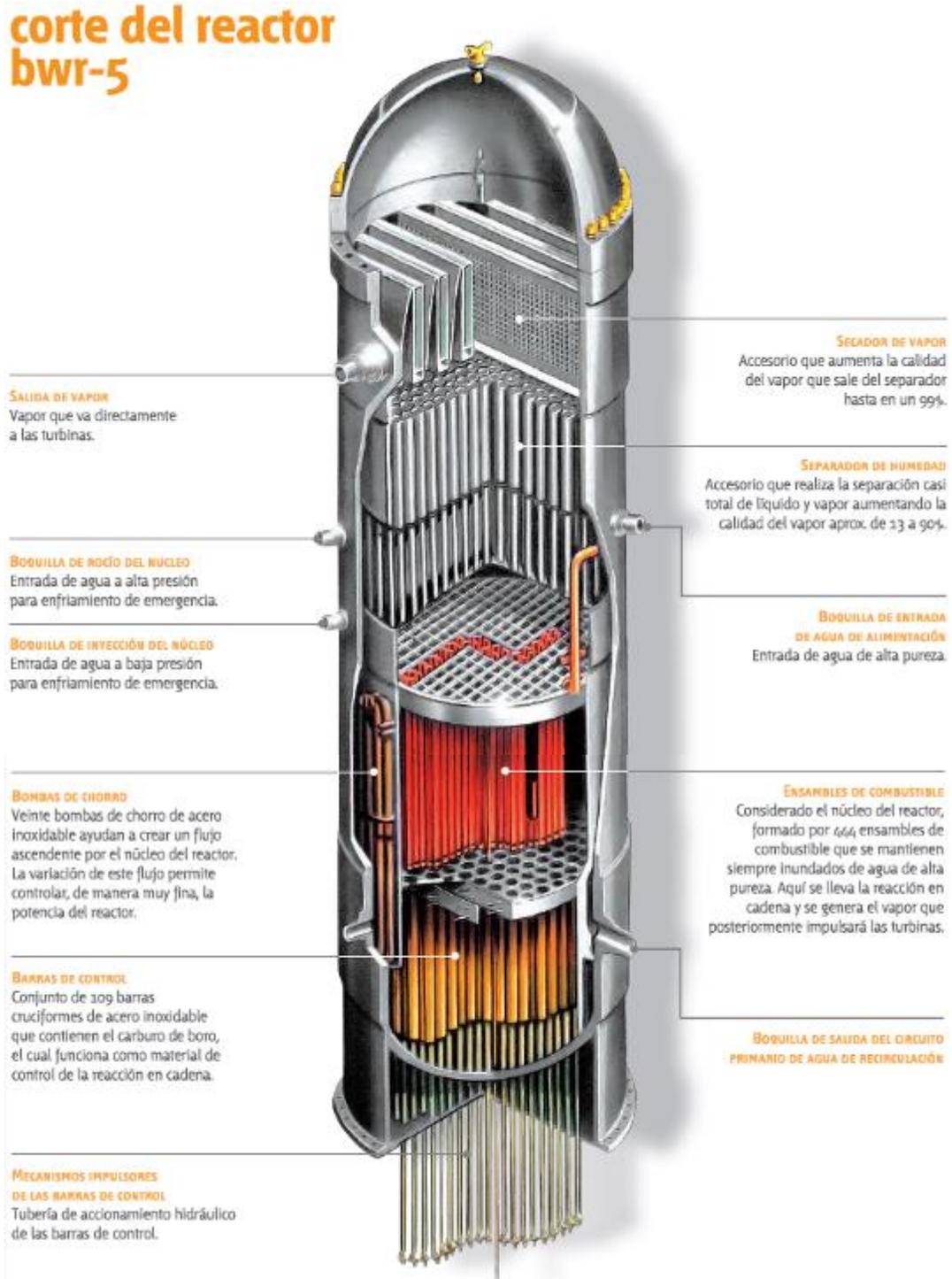


Figura 11. Vista interna, corte del Reactor BWR-5 (Lozano Laez, 1995).

Combustible.

El combustible nuclear está encerrado dentro de la gran vasija llena de agua, donde se produce la ebullición de la misma. El vapor pasa por un sistema de separación y secado del vapor, situado en el interior de la vasija del reactor, antes de ser enviado a la turbina. El vapor, una vez que ha pasado por los álabes de la turbina para mover el generador eléctrico, se condensa en el condensador y se envía directamente a la vasija. El agua de refrigeración se recircula en la vasija para controlar el nivel de ebullición y, en último término, la potencia del reactor. También, en este tipo de reactores se utilizan recalentadores de humedad.

Reactor BWR-5 de la Central Nuclear Laguna Verde:

El reactor de dicha central utiliza como tipo de combustible el Uranio enriquecido en forma de dióxido de uranio (UO_2) el cual es encapsulado en pastillas cerámicas de 0.88 cm de diámetro x 0.9 cm de largo, diseñadas para soportar corrosión y altas temperaturas, con punto de fusión de 2800 °C, las pastillas presentan las siguientes especificaciones de la Tabla 8:

Tabla 8. Ensamblajes de combustible en reactor BWR-5 en Central Nuclear Laguna Verde (Lozano Laez, 1995).

Ensamblajes de combustible	
Tipo	GE12 / GE14
Geometría del combustible	GE12 10x10 (92 varillas de combustible; 78 de 381 cm de longitud activa y 14 varillas de 228.6 cm de longitud activa y 2 barras de agua equivalentes a 8 varillas).
	GE14 10x10 (92 varillas de combustible; 78 de 381 cm de longitud activa y 14 varillas de 213.5 cm de longitud activa y 2 barras de agua equivalentes a 8 varillas).
Peso total del Uranio	88 ton
Material del encamisado	Zircaloy 2
Material del canal de combustible	Zircaloy 2

Una sola de estas pastillas al calentarse produce la misma energía que 810 kg de carbón, 565 litros de petróleo o 480 m³ de gas natural (Lozano Laez, 1995).

El dióxido de Uranio enriquecido por pastilla puede estar enriquecido de 0.71% hasta 4.9%, por lo cual, es imposible que un reactor nuclear explote como una bomba atómica, porque no pueden conjuntarse las distintas condiciones que se requieren para la explosión tenga lugar. Una explosión en una bomba es el resultado de una reacción en cadena sin control y se produce con Uranio altamente enriquecido en un porcentaje superior al 95%, el Uranio del reactor contiene solo el 4% de dicho material (Lozano Laez, 1995).

1.3 Cogeneración

El principio fundamental de la cogeneración es la recuperación del calor residual producto de la combustión en una planta generadora de electricidad, el cual, de otra forma, hubiera sido liberado al medio ambiente, desperdiciando con ello una parte importante de la energía todavía disponible. Esta energía, en la mayoría de los casos, puede ser todavía utilizada en diversos usos finales como calefacción de espacios, calentamiento de agua, así como otros procesos térmicos o de refrigeración que se encuentren cercanos a la planta de cogeneración (Cogenera México, 2012a).

La cogeneración de energía se define como la producción simultánea de calor útil y electricidad a partir de un mismo combustible o fuente de energía primaria. Estos combustibles pueden ser de origen fósil (por ejemplo, gas natural, carbón, etc.), renovable (por ejemplo, residuos agrícolas y forestales, biogás, etc.) o incluso hidrógeno (Cogenera México, 2012a).

1.3.1 Ventajas de la cogeneración

En las Figuras 12 y 13, se muestra la comparación de proceso de generación eléctrica sin cogeneración y proceso de generación eléctrica con cogeneración de energía.

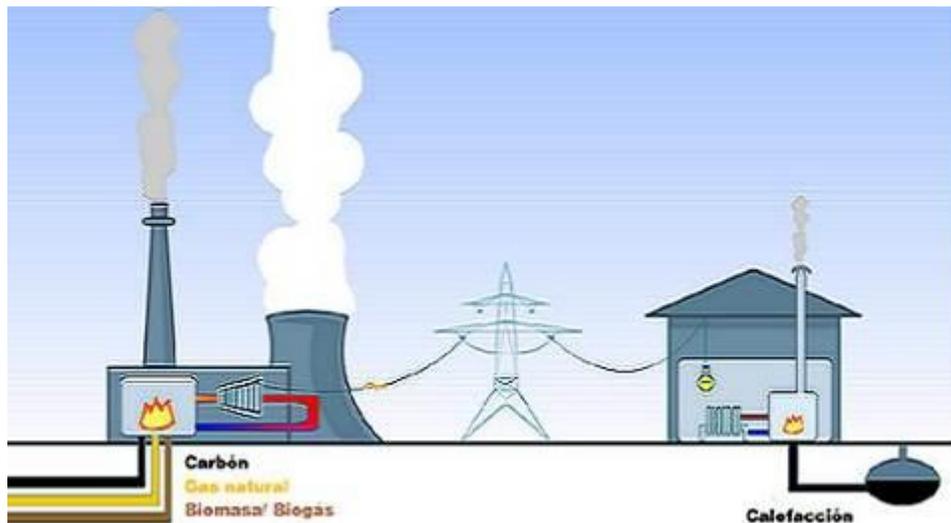


Figura 12. Proceso de generación de energía eléctrica sin cogeneración de energía (Cogenera México, 2012e).

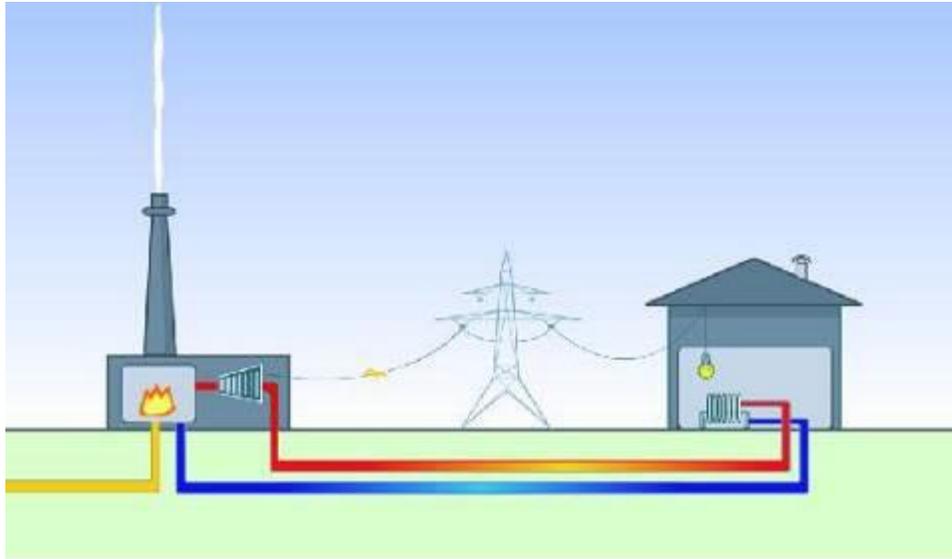


Figura 13. Proceso de generación de energía eléctrica con cogeneración de energía (Cogenera México, 2012d)

Solo por el hecho de aprovechar el calor residual proveniente de la planta generadora de electricidad, en otras aplicaciones térmicas, un proceso de cogeneración usualmente convierte del 75% al 80% del combustible en energía útil, mientras que las plantas más modernas alcanzan hasta un 90% o más. De aquí surge la importancia de la cogeneración en el contexto de una política de ahorro y uso eficiente de la energía, ya que a nivel mundial la eficiencia promedio en el caso de plantas de generación tradicionales a base de combustibles fósiles es de 35% al 37%, mientras que en las de ciclo combinado se alcanzan eficiencias de poco más del 50% (Cogenera México, 2012a).

Una comparación porcentual del aprovechamiento de la energía primaria entre un sistema tradicional de generación de electricidad y un sistema de cogeneración se presentará en los siguientes diagramas, mostrando la generación de energía tradicional, no considerando los ciclos combinados que podrían tomarse como tipo de cogeneración superior (Figura 14):

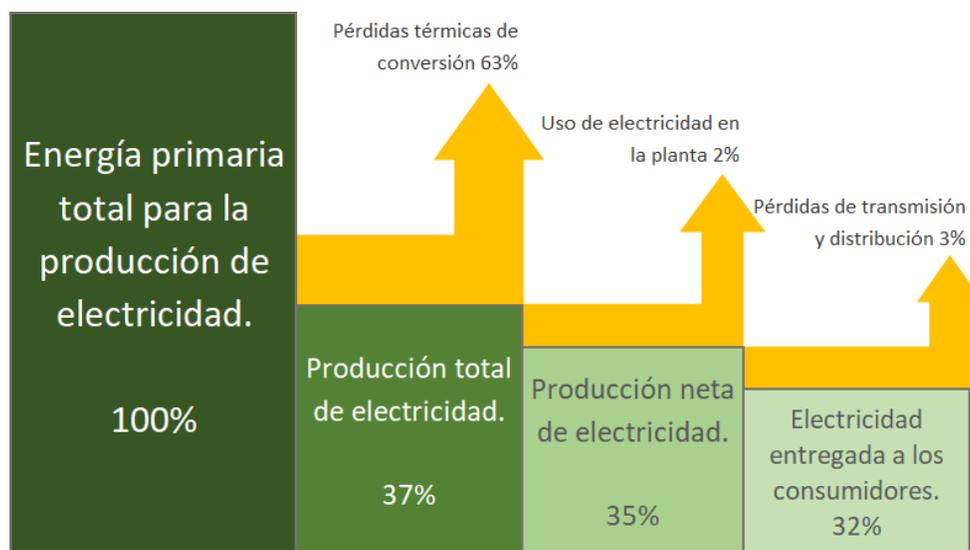


Figura 14. Gráfico del sistema de generación de electricidad sin cogeneración (Cogenera México, 2012c).

Se ilustra únicamente los sistemas de cogeneración que producen energía eléctrica conjuntamente con vapor u otro tipo de energía térmica secundaria (Figura 15):

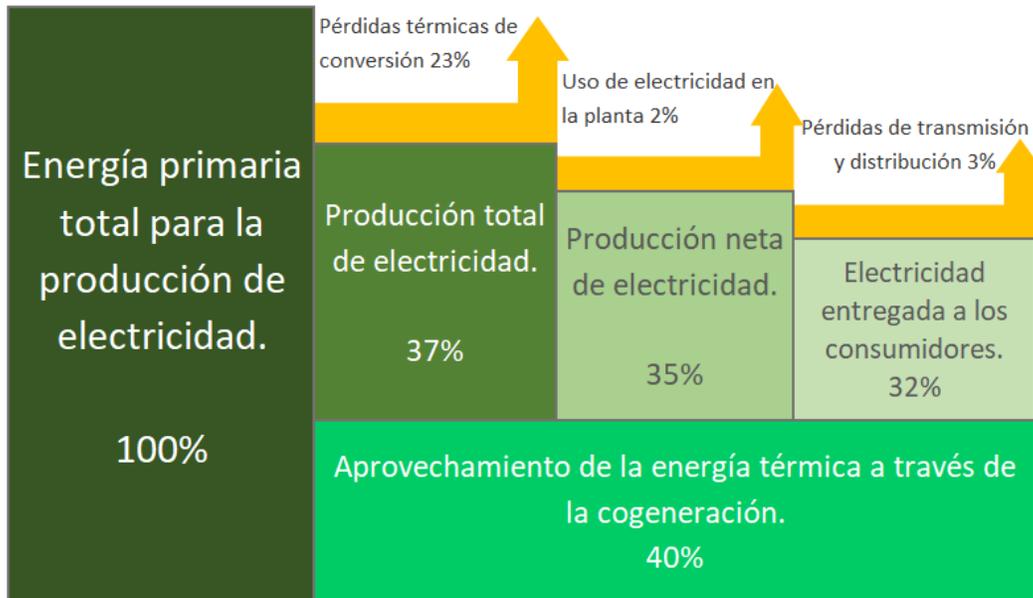


Figura 15. Gráfico del Sistema de generación de electricidad con cogeneración de energía (Cogenera México, 2012b).

Entre los beneficios de la cogeneración están los siguientes (CMM, 2010):

- Casi duplica la eficiencia respecto a una planta termoeléctrica convencional.
- Al ser más eficiente reduce la emisión de contaminantes y de gases de efecto invernadero.
- Reduce los requerimientos de las líneas de transmisión y las pérdidas asociadas con éstas.
- Mejora la confiabilidad del sistema al disminuir el requerimiento de carga a la red eléctrica.
- Produce considerables ahorros económicos.

1.3.2 Aplicaciones de la cogeneración

Calor residual.

Algunas aplicaciones relacionadas con el calor, dependen concretamente de la variación de esta misma, yendo desde temperaturas bajas hasta 1000 °C; pudiendo aprovecharse en distintos rubros, siendo uno de ellos la desalinización de agua de mar (Barnet, Krett and Kupitz, 1991).

Los sistemas de cogeneración pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de arreglo que se elija para la producción de electricidad y calor de sistemas superiores (Topping cycles) e inferiores (Bottoming cycles); siendo los sistemas superiores los más comunes y utilizando el calor residual producto de la generación de electricidad para producir vapor utilizable en diferentes procesos; los sistemas inferiores utilizan directamente la energía generada para satisfacer las necesidades térmicas de los procesos, mientras que el calor residual se utiliza para la generación de electricidad (CMM, 2010).

Una configuración especial que está basada en sistemas superiores y que es utilizada en la industria eléctrica es el ciclo combinado. En un ciclo combinado de gas natural, el gas natural es quemado en

turbinas de gas que a su vez generan electricidad. Los gases de combustión que salen de una turbina de gas son aprovechados para la generación de vapor y el accionamiento de turbinas de vapor generan electricidad adicional. El condensado producto de la turbina de gas puede ser aprovechado para procesos que requieren menor temperatura y para sistemas de calefacción en edificios.

En la Figura 16, se puede observar el esquema de un sistema superior de cogeneración:

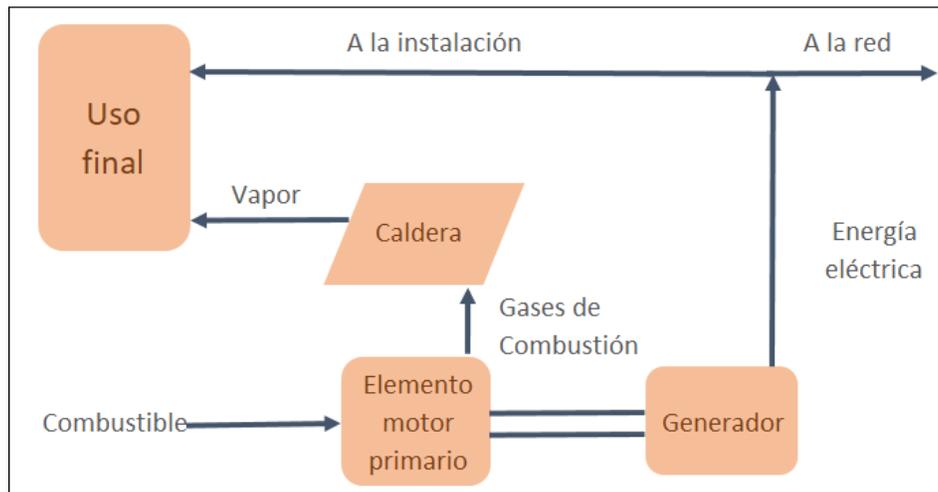


Figura 16. Esquema de un sistema superior de cogeneración (CMM, 2009c).

En la Figura 17, se puede observar el esquema de un sistema inferior de cogeneración:

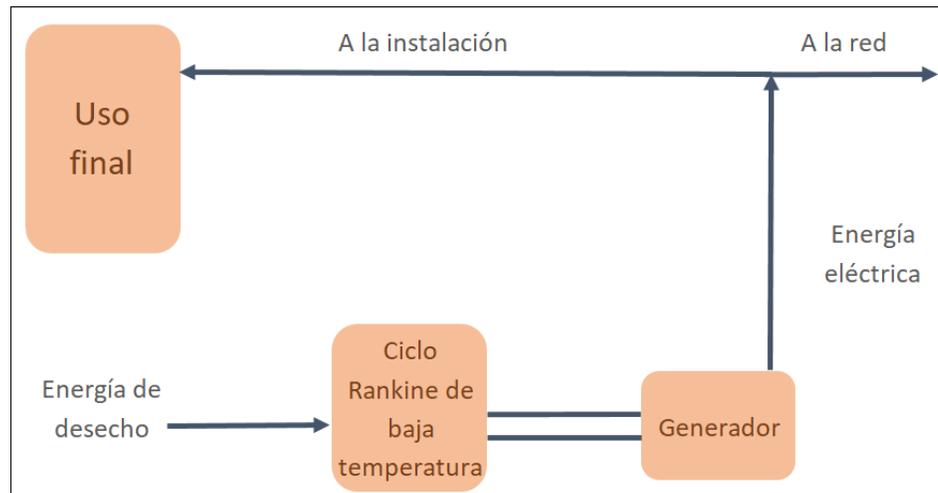


Figura 17. Esquema de un sistema inferior de cogeneración (CMM, 2009b).

En la Figura 18, se puede observar el ejemplo de un sistema de ciclo combinado con cogeneración.

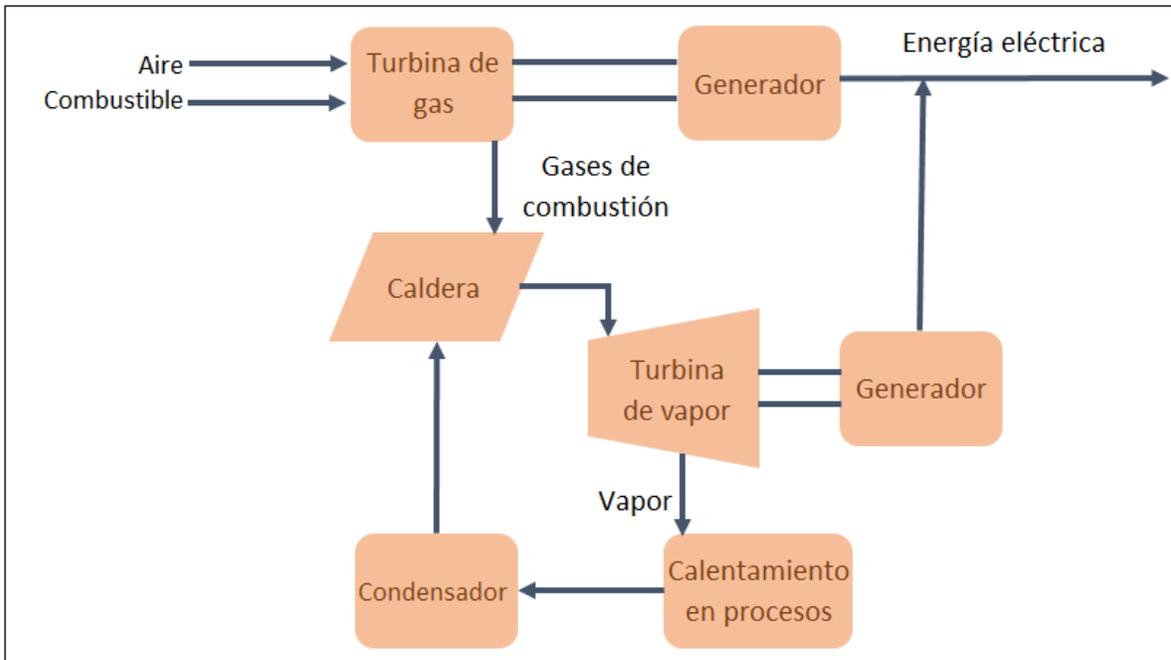


Figura 18. Ejemplo de sistema de ciclo combinado con cogeneración (CMM, 2009a).

Los sistemas de cogeneración básicamente están formados por los siguientes elementos (CMM, 2010):

- 1) Elemento motor primario: Son los equipos que transforman la energía contenida en los combustibles (gas natural, combustóleo, gasóleo) en energía mecánica que posteriormente accionará generadores eléctricos. Los equipos incluyen turbinas de gas, turbinas de vapor y motores de combustión interna (ciclo Otto, ciclo Diésel).
- 2) Sistema de aprovechamiento de la energía mecánica: La energía mecánica generada por el elemento anterior, es transformada en energía eléctrica por generadores eléctricos.
- 3) Sistema de aprovechamiento de calor: Los equipos principales de aprovechamiento de calor utilizados en los sistemas de cogeneración incluyen dispositivos utilizados en instalaciones de producción de calor o agua caliente.

La recuperación de calor.

Investigaciones han demostrado que entre el 80% y el 90% de la energía eléctrica utilizada en un compresor de aire industrial se convierte en calor (CMM, 2010), y en muchos casos, una unidad de calor bien diseñada puede recuperar entre el 50% y 90% de esta energía disponible y aprovecharla para calentar agua o aire; siendo los usos típicos para la recuperación de calor la calefacción, el calentamiento en procesos industriales, el calentamiento de agua, calentamiento de aire, o el precalentamiento de agua para calderas.

Existen distintos dispositivos dependiendo el tipo de energía que se requiera cogenerar (térmica, mecánica); para la parte térmica, existen dispositivos conocidos como generadores termoeléctricos, los que ocupan el efecto Seebeck, el cual se genera cuando dos metales distintos a temperaturas diferentes se ponen en contacto formando una unión bimetálica y entre ambos lados de la unión se genera una fuerza electromotriz.

Los materiales termoeléctricos convierten la energía calorífica en electricidad, basándose en el efecto Seebeck y el efecto Peltier. Esto lleva a utilizar energía térmica apenas utilizable o casi perdida en aplicaciones productivas de la manera más eficiente posible. La eficiencia de conversión de calor se caracteriza por la figura de mérito ZT que se relaciona con el coeficiente de Seebeck (S), la conductividad térmica (κ), la conductividad eléctrica (σ) y la temperatura absoluta (T) por la siguiente ecuación (Rademann, Raghuwanshi and Hoell, 2016):

$$ZT = \frac{S^2}{\kappa} \sigma T$$

El factor $S^2 \sigma T$, es típicamente optimizado en los semiconductores a través del doping. Lo cual les otorga la más alta ZT (Duque Solís, 2013). La ZT de un solo material es algo irrelevante, ya que el arreglo para un módulo de generación de electricidad o de refrigeración consta de parejas de materiales. Un material termoeléctrico deberá presentar alta conductividad eléctrica, baja conductividad térmica y deberá mantener un gradiente de temperatura, en donde la conductividad eléctrica se calcula con:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{RA}$$

ρ = Resistividad del volumen

L = Distancia entre las terminales

R = Resistencia del material

A = Área de la sección transversal

También se tiene que la conductividad térmica del mismo material a una temperatura en particular está definida por la difusividad térmica (α), la densidad (d) y la capacidad calorífica específica (C_p) asumiendo una transferencia unidireccional a través de él, siendo:

$$\kappa = \alpha d C_p$$

El fenómeno clave para generar el efecto termoeléctrico es el efecto Seebeck, donde la electricidad se genera debido a las diferencias de temperatura. El coeficiente de Seebeck es una propiedad intrínseca de los materiales relacionada con sus propiedades electrónicas y a su vez, es independiente de su geometría. También se puede definir como la diferencia de potencial eléctrico (o termovoltaje generado) creado por un gradiente de temperatura, ΔT , al que se expone el material (Ponnamma *et al.*, 2017). En la Figura 19, se explica gráficamente la dirección del flujo de carga durante el efecto Seebeck, el enfriamiento, así como la generación de electricidad.

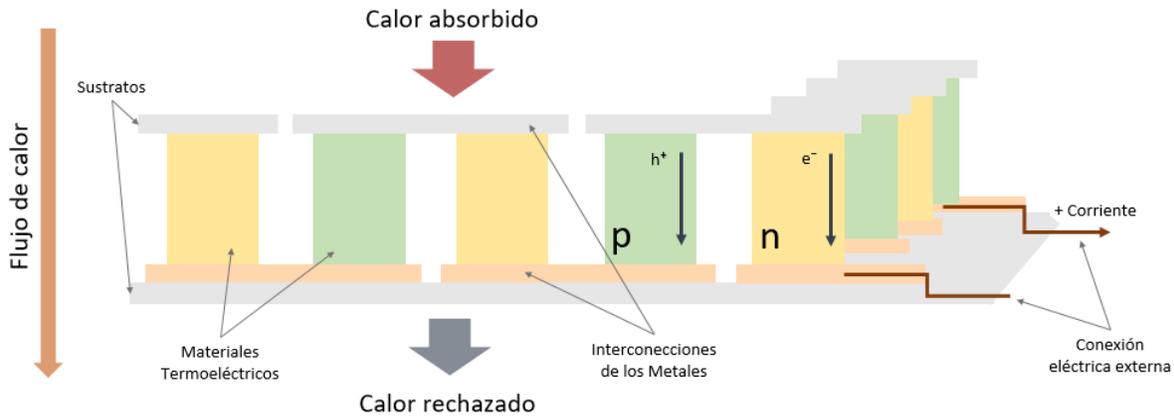


Figura 19. Diagrama de un dispositivo termoeléctrico típico (Saidur et al., 2012).

En la Figura 19 se muestran dos materiales en una pareja TE, un tipo-n y un tipo-p, en donde se representa la figura de merit (Z) con la siguiente expresión:

$$ZT = \frac{(a_p - a_n)^2 T}{[(\rho_n \kappa_n)^{1/2} + (\rho_p \kappa_p)^{1/2}]}$$

El coeficiente de rendimiento ϕ (para refrigeración) y el coeficiente de eficiencia η (para generación de energía) de la pareja TE está dado por el poder de entrada de la carga (W) sobre el flujo de calor (Q_H), el cual es positivo ya que es desde la fuente de calor hasta su disipador:

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \left[\frac{(1 + ZT_M)^{\frac{1}{2}} - 1}{(1 + ZT_M)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{T_C}{T_H}\right)} \right]$$

Donde T_H es la temperatura en el lado caliente, T_C a temperatura en su lado frío y T_M es la temperatura promedio. Se puede observar que η es proporcional a $(1 + ZT_M)^{\frac{1}{2}}$.

Para elegir los materiales que del generador termoeléctrico es importante fijarse en los valores que conforman la figura de merit (Z), el coeficiente de Seebeck (S), la conductividad eléctrica (σ) y en la conductividad térmica (κ). De estas propiedades, los metales son los que poseen la mayor conductividad eléctrica y la mayor conductividad térmica, por otro lado, los cerámicos, poseen las cifras más bajas en estas dos propiedades, mientras que los semiconductores se encuentran en la mitad. En cuanto a los coeficientes de Seebeck los metales poseen las cifras más bajas mientras que los cerámicos, se encuentran en la cima, pero los semiconductores poseen las mejores figuras de merit, debido a que tienen la mejor combinación de estas tres propiedades (S, σ , κ).

Los semiconductores usados en la fabricación de los módulos termoeléctricos se pueden dividir en tres tipos, según su temperatura óptima de funcionamiento: de baja temperatura (<450 K), aleaciones de bismuto con antimonio, telurio y selenio; de temperatura media (850 K) que son materiales basados en telurio de plomo; y de alta temperatura (1300 K) que están basados en silicio y germanio.

Como se puede observar en la Figura 20, el Bi_2Te_3 es considerado el mejor termoeléctrico a temperatura ambiente, con un ZT alrededor de 1. Pertenece a la clase de materiales termoeléctricos con un coeficiente de Seebeck grande.

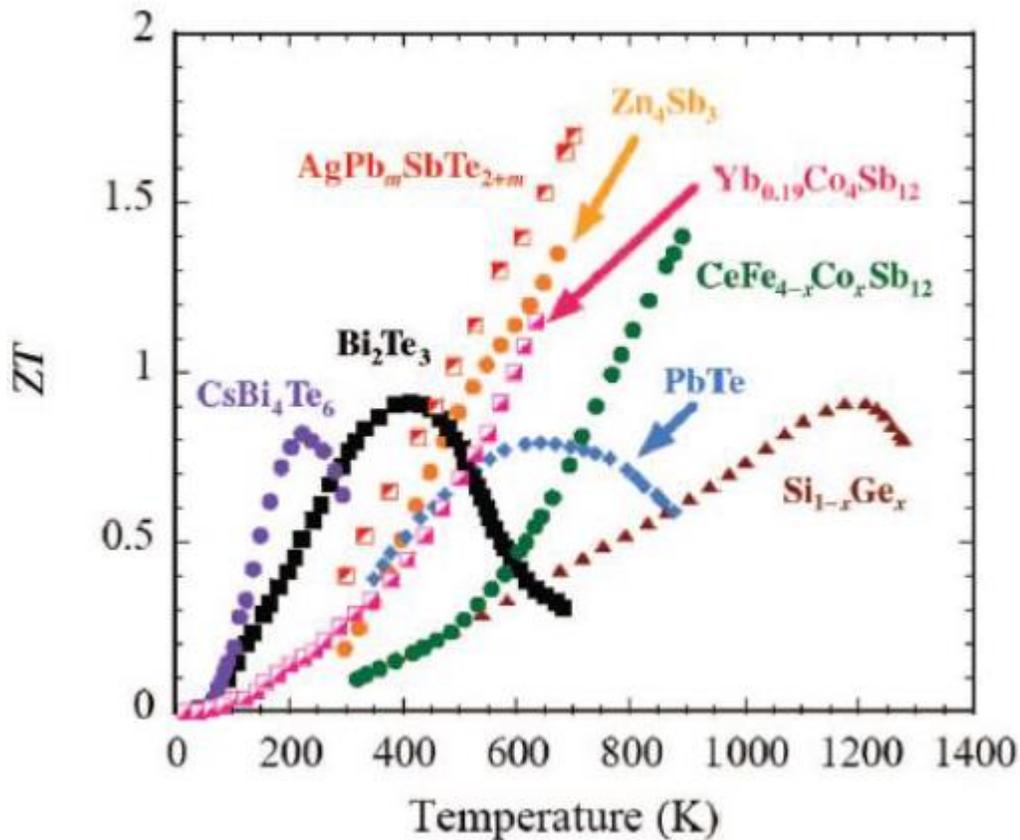


Figura 20. Gráfica de la figura de mérito ZT en función de la temperatura para distintos materiales termoeléctricos (Subramanian, 2006).

El bismuto de telurio es un semiconductor que posee conductividad tanto n como p. Debido a que presenta buenas propiedades termoeléctricas y a su alta figura de mérito, es un material muy usado, junto con algunas de sus posibles aleaciones, en módulos de Peltier y Seebeck, teniendo en cuenta que este comportamiento solo se presenta con temperaturas por debajo de los 450 K (Duque Solís, 2013).

1.3.3 Cogeneración de energía en México y en el mundo

Hoy en día existe gran variedad de proyectos en los cuales se aplique la cogeneración, los cuales se pueden clasificar según su capacidad instalada en proyectos de gran, mediana y pequeña escala, así como de micro y mini cogeneración. Para cada clasificación existen tecnologías, combustibles y distintas aplicaciones que son significativas, y las cuales se presentan a continuación en la Tabla 9 (Cogenera México, 2012a):

- Cogeneración en gran escala.

Tabla 9. Cogeneración en gran escala.

Capacidad del proyecto.	>100 MWe
Tecnología.	Turbina de gas y turbina de vapor.
Aplicaciones.	Sistemas de calefacción municipales, complejos industriales, etc.

Ejemplo proyecto: Planta de cogeneración en la isla de Grain, Kent, Reino Unido; 1,275 MWe y 340 MWt; 3 x 425 MW turbina de gas; gas natural; entrada en operación 2010 (Alstom, 2011).

- Cogeneración en mediana escala.
- Cogeneración en industrias.

Cogeneración a nivel mundial.

Actualmente en la industria a nivel internacional, para algunos países como Finlandia o Dinamarca, se presenta un porcentaje alrededor del 30% de energía eléctrica generada por sistemas de cogeneración instalados dentro de la misma planta. La importancia cada vez mayor de ciclos de cogeneración se debe a que permite duplicar la eficiencia del proceso de generación de potencia, por lo que ofrece un gran potencial para el ahorro de energéticos primarios (CMM, 2010).

De acuerdo a la Agencia Internacional de la Energía (IEA), a nivel internacional, la cogeneración representa el 9% de la generación total de energía y ha sido considerada como una alternativa para incrementar la eficiencia energética y reducir emisiones de gases de efecto invernadero. Se muestra en la Figura 21 la aportación de la cogeneración a la generación total de energía eléctrica para varios países, por ejemplo, en países como Finlandia y Dinamarca, la utilización de la cogeneración llega a ser mayor al 30%, mientras que para México sólo es del 4.5%.

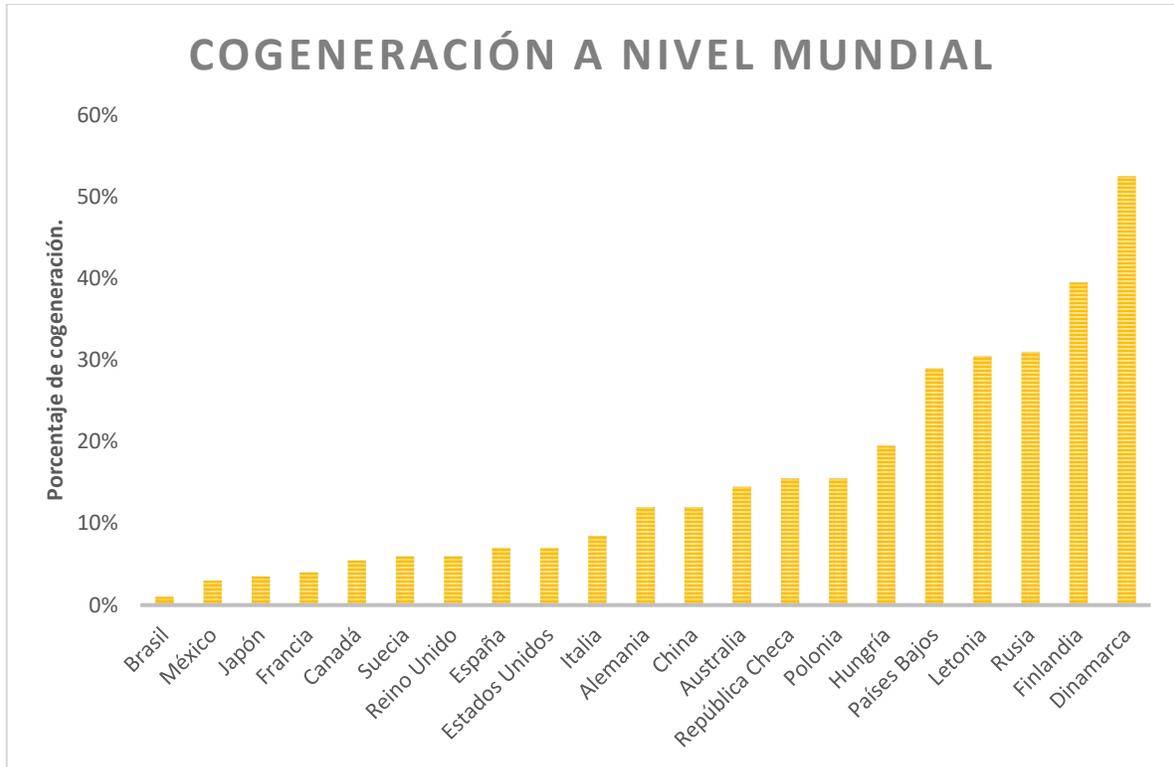


Figura 21. Cogeneración a nivel mundial (CMM, 2010).

Potencial de cogeneración en México.

En un estudio realizado por la CONUEE y la GIZ en 2009, se mostró que el potencial total nacional de cogeneración se encontraba dividido en tres sectores importantes para su aplicación: sector industrial, sector azucarero, y del petróleo y gas; con un posible ahorro de energía anual de 66.7 millones de barriles de petróleo equivalente, reduciendo las emisiones de CO₂ en 8.7 millones de toneladas de CO₂ por año. En ese estudio se presentó un potencial de cogeneración en México de 10,164 MW (CONUEE, 2009).

Capítulo 2. Sector hídrico

El agua es la única sustancia que puede encontrarse en la naturaleza en estado sólido (hielo), líquido (agua) o gaseoso (vapor de agua); es el único líquido que se expande al congelarse: por eso el hielo flota sobre el agua (CONAGUA, 2018e). El total de agua en la Tierra, hasta el 2018, es de 1386 billones de hm^3 , del cual, solo el 0.77% es agua dulce a la cual puede acceder el ser humano (CONAGUA, 2018f), y el mayor uso estimado a nivel mundial es el agrícola, con el 70% de agua empleada (CONAGUA, 2018l).

En la Figura 22, se puede apreciar la distribución del recurso hídrico a nivel mundial para el 2017:

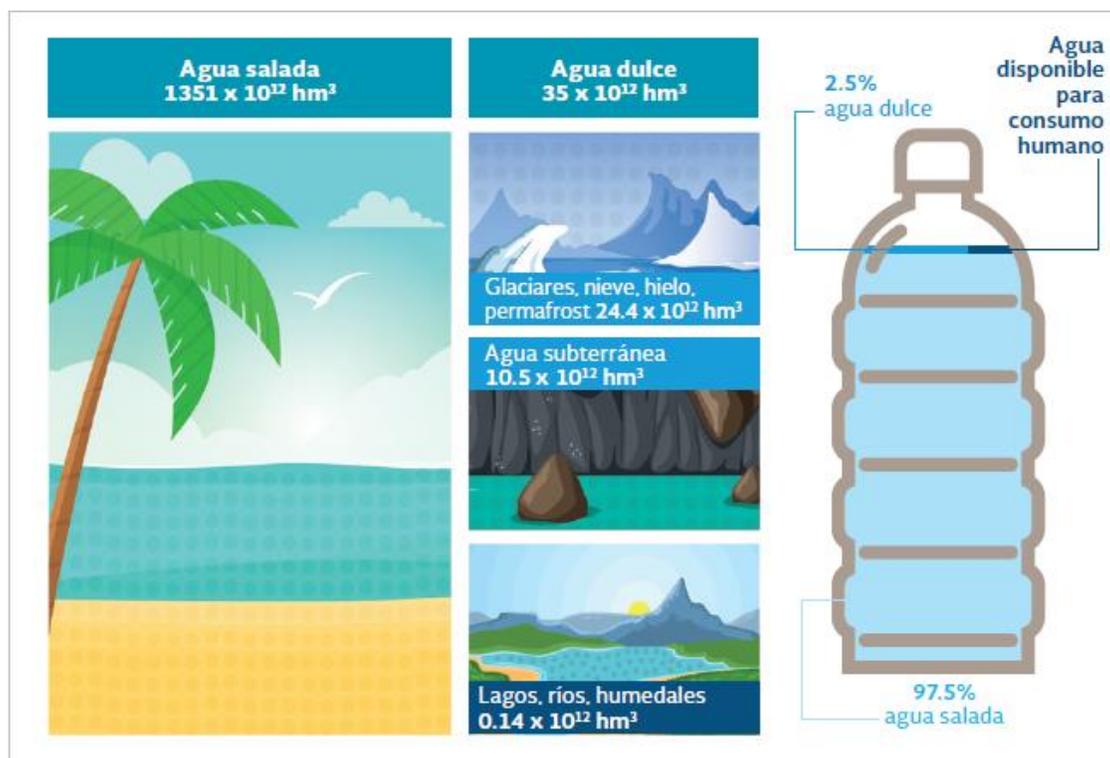


Figura 22. Distribución del agua en el mundo (CONAGUA, 2018g).

En una casa es necesaria para bañarse, cocinar, lavar ropa, limpieza; también es necesaria en cualquier tipo de industria (textil, minera, agrónoma, ganadera, energética, etc.), por lo que se considera un recurso estratégico en el desarrollo económico y social de cualquier país (INEGI, 2019).

En la Tabla 10, se muestran los países del mundo con mayor extracción de agua, donde México se ubica en el séptimo lugar. La clasificación de usos en esa tabla considera el agrícola, el industrial (incluyendo enfriamiento de centrales de energía) y el abastecimiento público. Los valores de cada país varían y son los últimos disponibles en la fuente; para México están actualizados al 2017.

El principal uso del recurso hídrico a nivel mundial, conforme a estimaciones de la FAO (2011), es el agrícola con el 70% de la extracción total (CONAGUA, 2018g).

Tabla 10. Países con mayor extracción de agua y porcentaje de uso agrícola, industrial y abastecimiento público (CONAGUA, 2018m).

País	Extracción total de agua (miles de millones de m ³ /año)	% Uso Agrícola	% Uso Industrial	% Uso abastecimiento público
India	761	90.4	2.2	7.4
China	598.1	64.4	22.3	13.3
Estados Unidos de América	485.6	36.1	51.2	12.8
Pakistán	183.5	94	0.8	5.3
Indonesia	113.3	81.9	6.5	11.6
Irán (República Islámica de)	93.3	92.2	1.2	6.6
México	87.84	76	9.6	14.4
Vietnam	82.03	94.8	3.7	1.5
Filipinas	81.56	82.2	10.1	7.6
Japón	81.45	66.8	14.3	18.9
Egipto	78	85.9	2.6	11.5
Brasil	74.83	60	17	23
Iraq	66	78.8	14.7	6.5
Federación de Rusia	61	19.9	59.8	20.2
Tailandia	57.31	90.4	4.8	4.8
Uzbekistán	56	90	2.7	7.3
Italia	53.75	44.1	35.9	17.6
Turquía	42.01	80.9	10.7	15.5
Canadá	38.8	12.2	80.2	14.2
Argentina	37.78	73.9	10.6	15.5
España	37.35	68.2	17.6	14.2
Bangladesh	35.87	87.8	2.1	10
Chile	35.43	83	13.4	3.6
Myanmar	33.23	89	1	10
Alemania	33.04	0.6	83.3	13.8
Francia	30.23	10.4	71.5	18.1
Sudáfrica	15.5	62.5	10.5	27

Como puede observarse es necesario tomar medidas urgentes para resguardar el recurso del agua; y las principales opciones para la solución de la escasez de agua son (Nava E., 2008):

- Hacer grandes obras públicas o presas para embalse y trasvase;
- Instalar desalinizadoras para producir agua potable;
- Explotar mesuradamente los acuíferos; o
- Tratar aguas de desecho.

2.1 Sector hídrico en México

Existen 37 regiones hidrológicas en México (Figura 23), las cuales, para fines administrativos, se agrupan en 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA) (Figura 24) (CONAGUA, 2018j).



Figura 23. Mapa de regiones hidrológicas en México (CONAGUA, 2018k).

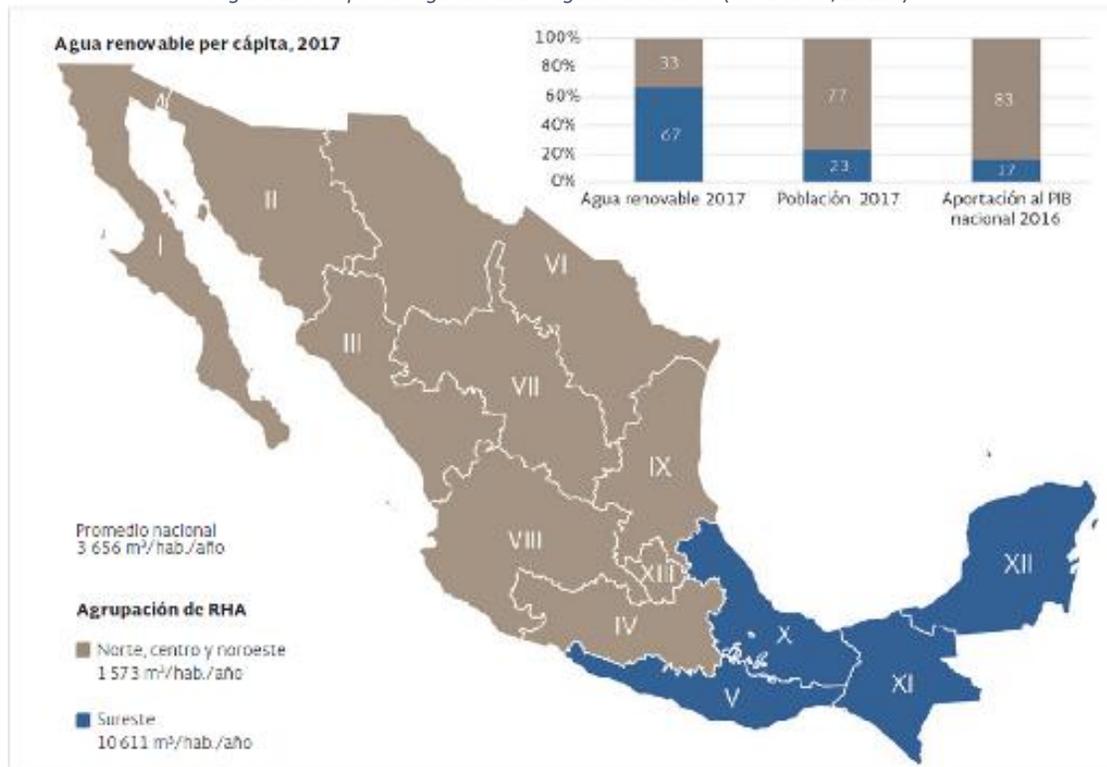


Figura 24. Contraste regional entre agua renovable y desarrollo (CONAGUA, 2018c).

La población, el agua renovable (AR) y el PIB presentan variaciones importantes a nivel regional. Al agruparse las regiones hidrológico-administrativas V, X, XI y XII, que se encuentran en el sureste del país, se pueden contrastar con las regiones restantes.

Las regiones del sureste presentan dos terceras partes del agua renovable en el país, con una quinta parte de la población que aporta la quinta parte del PIB nacional (Figura 4.). Considerando el agua renovable per cápita, a disponible en las regiones del sureste es siete veces mayor que la disponible en el resto de las regiones hidrológico-administrativas de nuestro país (CONAGUA, 2018d).

Las cuencas son unidades naturales del terreno, definidas por la existencia de una división de las aguas superficiales debida a la conformación del relieve. La CONAGUA ha definido 757 cuencas hidrológicas al 7 de julio del 2016 junto con sus disponibilidades, conforme a la norma NOM-011-CONAGUA-2000, de las cuales 649 se encontraban en situación de disponibilidad (CONAGUA, 2018j).

En la Estadística del Agua en México, edición 2018 (CONAGUA, 2018j), se menciona que México cuenta con 653 acuíferos para la administración de aguas subterráneas, los cuales aportan el 39% del volumen para usos consuntivos, siendo que 105 están en condición de sobreexplotación, 32 con presencia de suelos salinos y agua salobre y 18 con intrusión marina; también cuenta con 757 cuencas para la administración de aguas superficiales, en donde 8 son cuencas transfronterizas, y 51 son ríos principales.

Los valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico (conformando al cálculo de agua renovable) en México son los que se muestran en la siguiente figura (Figura 25):

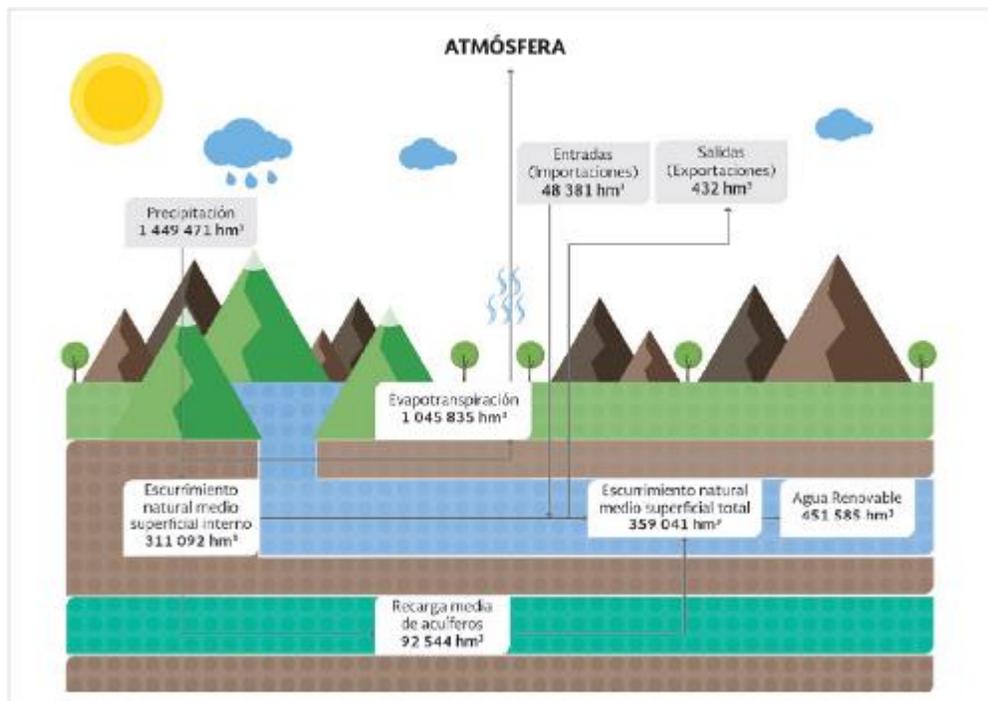


Figura 25. Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2017 (CONAGUA, 2018n).

Usos.

En México, el 77% del agua se utiliza en la agricultura, %14% en el abastecimiento público; 5% en las termoeléctricas y 4% en la industria (Figura 26) (INEGI, 2019).

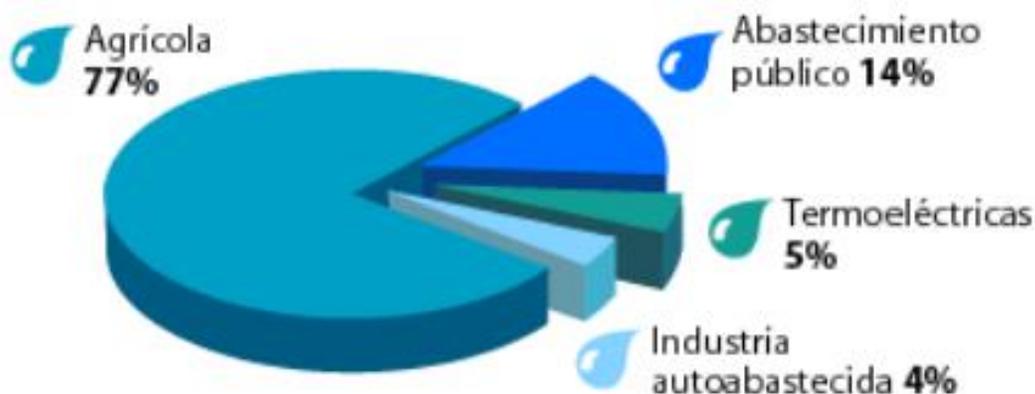


Figura 26. Gráfico de los usos del agua (CONAGUA, 2011).

En el uso agrícola, el agua se utiliza para el riego de cultivos; en el abastecimiento público, se distribuye a través de las redes de agua potable (domicilios, industrias y a quienes estén conectados a dichas redes); en la industria autoabastecida, son aquellas empresas que toman el agua directo de los ríos, arroyos, lagos y acuíferos del país; y en las termoeléctricas, el agua se utiliza para producir electricidad (INEGI, 2019).

Dependiendo la industria, la cantidad de agua utilizada durante el proceso de producción de un bien. El agua es necesaria para el desarrollo de productos naturales:

- En México existen más de 4mil 462 presas; 667 de ellas están consideradas como grandes, por su capacidad de almacenamiento.
- En nuestro país, la principal función de las presas es la generación de energía; en menor medida se utilizan para actividades agrícolas, sobre todo en el norte de la República.
- En México la presa de mayor capacidad es la Belisario Domínguez ubicada en el estado de Chiapas, le sigue la Infiernillo localizada en Guerrero y Michoacán.

2.1.1 Problemática del agua

La problemática del agua que ha enfrentado México en los últimos años puede sintetizarse en tres grandes rubros (Nava E., 2008):

- La consistente distribución inequitativa del recurso por razón de su ubicación vis a vis asentamientos humanos.
- Las condiciones de escasez (estrés hídrico) por sobreexplotación de acuíferos (Figura 27).
- Los altos niveles de contaminación, deterioro o modificación localizados en extensas áreas del territorio mexicano.

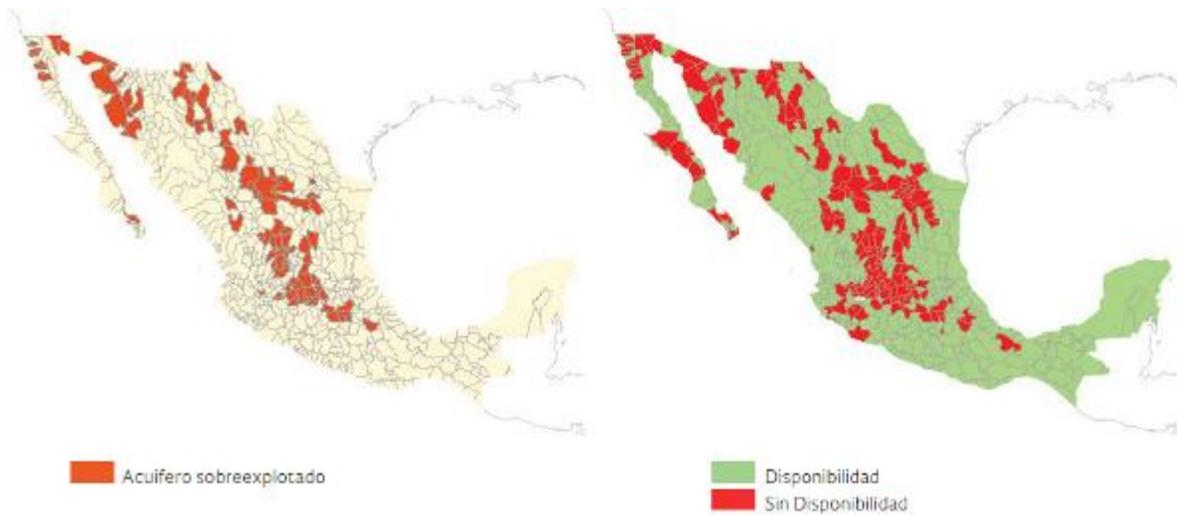


Figura 27. Estado de los Acuíferos en México, 2017 (CONAGUA, 2018h).

En este sentido, la escasez, o bien estrés hídrico, es provocada fundamentalmente por la “sobreexplotación de acuíferos”, concepto éste último que se refiere a que la extracción del líquido es superior al de la recarga del mismo al menos en un 10%. Según datos de la Comisión Nacional del Agua, el país se ha dividido para fines de administración del agua en 653 acuíferos. De estos, 104 se encuentran sobreexplotados y de ellos se extrae casi el 60% del agua subterránea para todos los usos. En los últimos 30 años, dicha sobreexplotación ha aumentado considerablemente: 32 acuíferos en esta situación en 1975; 36 en 1981; 80 en 1985; 97 en 2001, y 104 en 2003 (Nava E., 2008).

2.1.2 Tipos de Agua

La disponibilidad de agua no implica que su calidad permita su uso, la contaminación natural y la del hombre han provocado que sea necesario dar un tratamiento a la misma antes de destinarla al consumo humano, uso agrícola e industrial, ya que la calidad del agua varía de acuerdo a la región donde se encuentra y al tipo de contaminantes del subsuelo (Dévora Isiordia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012d).

La salinidad que puede presentarse en distintos cuerpos de agua, y su clasificación con el tipo de agua se muestra en la siguiente Tabla 11:

Tabla 11. Tipos de Salinidad (Dévora Isiordia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012c).

Agua	SDT (mg/l)
Ultrapura	0.03
Pura	0.3
Desionizada	3
Potable	<1,000.00
Salobre	1,000.00 - 10,000.00
Salina	10,000.00 - 30,000.00
Marina	30,000.00 - 50,000.00

El agua obtenida de los procesos de desalinización es perfectamente utilizable en la agricultura, turismo y consumo humano, pero exigen una eliminación aún más selectiva de iones, por lo cual, lo ideal es realizar una comparación entre los diferentes procesos de desalinización, tanto térmicos como de membranas, en donde pueda considerarse el costo de producción, consumo energético, parámetros de operación y aplicación del agua producto (Dévora Isiordia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012d).

Los parámetros se deberán seleccionar de igual forma, considerando la salinidad del agua a tratar y la del agua producto, ya que de esto dependerá el tipo de tecnología a utilizar; ya que existen procesos híbridos en la desalinización en donde se ofrecen ventajas económicas, donde puede regularse la calidad del agua producto (OIEA, 2000).

La siguiente Tabla 12, muestra las características de los diferentes tipos de aguas susceptibles a desalinizar:

Tabla 12. Características de los diferentes tipos de aguas susceptibles a desalinizar (Flores Espinosa, Perusquía del Cueto and Ortiz Oliveros, 2004b).

Tipos de agua	Características mg/mL
De río o baja concentración	500 < SDT < 3,000
Agua salobre	3,000 < SDT < 30,000
Agua marina	30,000 < SDT < 50,000
Agua residual	Agua procedente de áreas urbanas o industriales

SDT=Sólidos Disueltos Totales

La calidad del agua se determinará por las cantidades de los distintos tipos de sustancias que se muestran a continuación en la siguiente Tabla 13:

Tabla 13. Calidad del agua (CONAGUA, 2018b).

			
DBO5	DQO	SST	CF
Demanda Bioquímica de Oxígeno	Demanda Química de Oxígeno	Sólidos Suspendedos Totales	Coliformes Fecales
Indica la materia orgánica biodegradable	Indica la materia orgánica	Indica los sólidos y materia orgánica en suspensión	Indica bacterias del tracto intestinal humano
Ocasionada por descargas de aguas residuales municipales	Ocasionada por descargas de aguas residuales en general	Ocasionada por descargas residuales, desechos agrícolas y erosión	Ocasionada por descargas domésticas principalmente

De igual forma, tanto la salinidad como la composición química varían de un mar a otro, lo que explica cambios de densidad, así como otros parámetros físicos y químicos, mostrando en la siguiente Tabla 14, la composición química aproximada de un litro de agua de mar:

Tabla 14. Salinidad y composición química del agua de mar (Pontes, 1996).

Componente	Cantidad	Unidades
Cloruro de sodio	24,0	g
Cloruro de magnesio	5,0	g
Sulfato neutro de sodio	4,0	g
Cloruro de calcio	1,1	g
Cloruro de potasio	0,7	g
Bicarbonato de sodio	0,2	g
Bromuro de sodio	0,096	g
Ácido bórico	0,026	g
Cloruro de estroncio	0,024	g
Fluoruro de sodio	0,003	g
Agua destilada	1	MI

(Salinidad aproximada 34.5% - pH 7.9 - 8.3)

En la siguiente Figura 28, se muestra de forma gráfica la salinidad del mar en territorio mexicano.

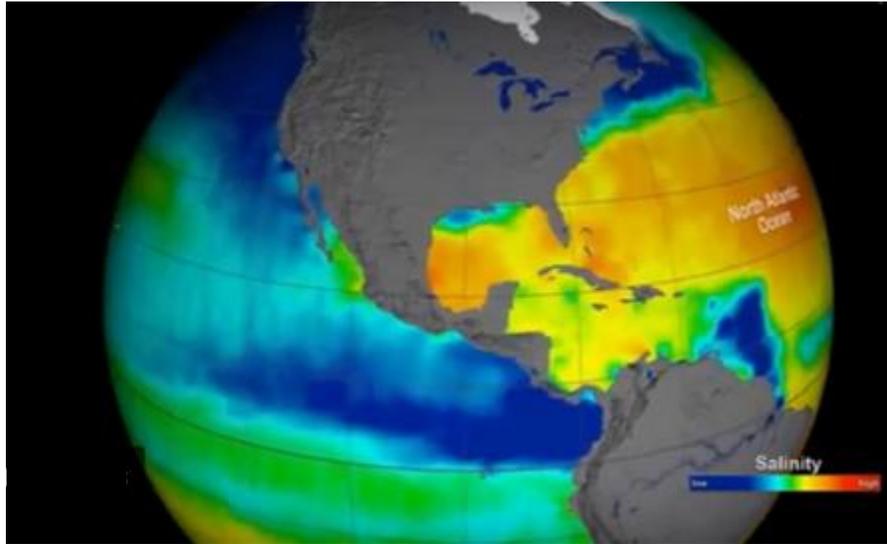


Figura 28. Cómo se forma la sal en los mares y océanos (Nasa Earth Science, 2012).

2.2 Desalinización

La desalinización consiste en un proceso donde se reduce la salinidad del agua hasta cierto nivel donde ésta pueda ser utilizable (Universidad de Nevada, 2000); este proceso maneja tres flujos:

- Agua de mar o salina a ser tratada (agua de alimentación).
- Agua de baja concentración en sal (agua producto).
- Agua rechazada, la cual contiene alta concentración de sales (salmuera).

La calidad del agua obtenida por los métodos de desalinización se muestra en la siguiente Tabla 15:

Tabla 15. Calidad de agua obtenida por desalinización (Flores Espinosa, Perusquía del Cueto and Ortiz Oliveros, 2004a).

Uso	Sólidos totales disueltos en mg/kg	Características particulares
Industrial	5 - 5,000	Dependiendo de su uso.
Agrícola	< 2,000	Dependiendo del tipo de tierra, clima, métodos de riego, uso de fertilizantes, etc.
Uso humano	< 500	Con características aptas como agua potable, según la Norma Mexicana NOM-011-CNA-2000

2.2.1 Métodos de desalinización

Existen diversos tipos de desalinización, diferenciándose por costos, impactos ambientales, calidad del producto y energía consumida de cada uno (Dévora Isiordia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012d), el agua desalinizada se utiliza para el consumo humano, en procesos industriales y en forma muy limitada para riego agrícola (Dévora Isiordia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012d).

Los diferentes procesos de desalinización se muestran en la siguiente Tabla 16:

Tabla 16. Clasificación de los procesos de desalinización (Dévora Isiordia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012a).

Tipo de separación	Energía utilizada	Proceso	Sistema
Separación del agua de sales	Vapor	Evaporación	Destilación solar
			Destilación súbita simple
			Destilación en tubos sumergidos
			Destilación súbita multietapa
	Frío	Cristalización	Destilación multiefecto de tubos horizontales
			Destilación multiefecto de tubos verticales
			Compresión mecánica de vapor
			Termo compresión de vapor
Presión	Membrana	Formación de hidratos	
		Congelación	
Carga eléctrica	Membrana selectiva	Ósmosis Inversa	
		Electrodiálisis	
Separación de sales del agua	Atracción química	Resina	Intercambio iónico

Estrategias que estudian el proceso de desalinización:

El sistema de desalinización consiste en proceso de alimentación de agua salobre o marina a una planta desalinizadora, que tiene como función acondicionar y eliminar sales del agua de alimentación, para así poder obtener agua producto y un rechazo de la misma, la salmuera.

Ya que este proceso puede realizarse mediante dos procesos como se ha mencionado, el térmico y el mecánico, y que también se diferencian porque uno utiliza combustibles fósiles como energético (sistemas térmicos) y el otro utiliza energía eléctrica (membranas de alta presión) (Dévora Isiordia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012d), pero ya que se ha comprobado que con un proceso híbrido puede obtenerse desalinización de agua de mar, al igual que puede regularse la desalinización deseada del agua producto (OIEA, 2000), y es específico, la desalación nuclear se diferencia de la desalación convencional porque la fuente de energía se origina en un reactor nuclear. Mientras que en una central térmica clásica el calor de la caldera es generado por la combustión de un combustible fósil, en una central nuclear el calor proviene de los procesos de fisión de los núcleos de uranio dentro de un reactor (IAEA, 2002).

Los procesos de desalinización:

Los procesos de desalinización para obtener agua a gran escala se dividen principalmente en proceso térmicos y mecánicos, los cuáles utilizan membranas permeables, los cuáles son los siguientes (K. Buross, 2000):

- Procesos térmicos.

Aproximadamente la mitad de toda la producción de agua desalada en el mundo se realiza por proceso térmicos, cuyo principio es la destilación, donde para poder lograr la destilación es necesario bajar el punto de ebullición controlando la presión de vapor del agua, lo que a su vez permite poder ahorrar energía para alcanzar el punto de ebullición del agua, al igual que poder lograr un mayor control de la deposición de compuestos. La diferencia entre los diversos procesos térmicos de desalación consiste principalmente en cómo se maneja el punto de ebullición y cómo se lleva a cabo el control de depósitos compuestos residuales.

- Proceso de membranas o mecánicos.

La ósmosis inversa consiste en el paso de una solución líquida de mayor concentración, a través de una membrana permeable, para obtener una solución de menor concentración. Con un flujo altamente presurizado se puede obtener agua libre de sales. Este sistema requiere de un pretratamiento (físicoquímico y bacteriológico) más riguroso del agua de alimentación en contraparte al usado en el proceso térmico, con el objeto de remover cualquier sólido suspendido; además se debe evitar la precipitación de sales e incluso el crecimiento de microorganismos que puedan “tapar” las membranas. También es necesario realizar un post tratamiento, mediante la desinfección y el control del pH, para estabilizar el agua producto.

2.2.1.1 Procesos térmicos

Este tipo de procesos de destilación requieren calor para poder provocar el cambio de estado del agua en el agua producto, independientemente de la salinidad que presente ésta, en el cuál el agua de alimentación se calienta hasta evaporarse, posteriormente dicho vapor pasa a ser captado para poder condensarlo, con lo que a su vez se obtendría el agua producto con una salinidad menor, y a su vez agua sobrante, salmuera (Porta, 2012); (Hiriart, 2007).

De estos sistemas térmicos, se derivan los siguientes tipos de desalinización:

- Destilación por Compresión Mecánica de Vapor (MVC).

Éste tipo de sistemas funcionan comprimiendo vapor de agua, lo que causa la condensación sobre la superficie de transferencia de calor (un tubo) lo que permite al calor de la condensación ser transferido a la salmuera del otro lado de la superficie resultando en la vaporización de ésta. El compresor es el requerimiento de energía principal, este aumenta la presión en el lado del vapor y baja la presión del lado del agua salada para bajar su temperatura de ebullición (Rizzuti, M. Ettouney and Cipollina, 2007).

En la Figura 29, se muestra el funcionamiento de un equipo de desalinización de agua marina por medio de compresión de vapor, donde se utiliza un elemento de calefacción en una caldera, y se comprime el vapor para así poder obtener agua con una disminución considerable de sales.

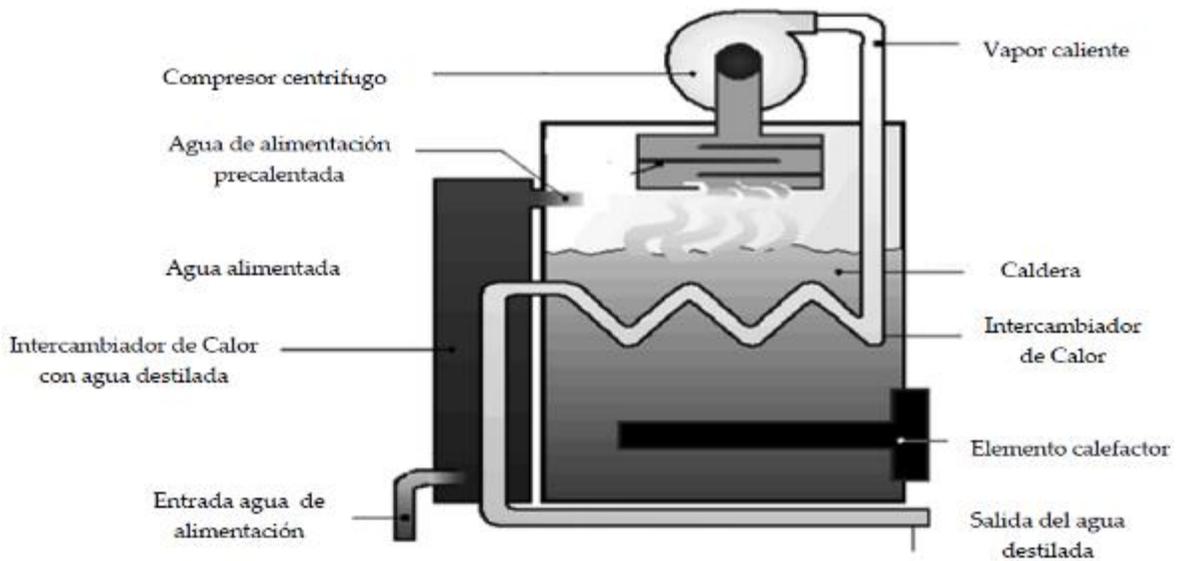


Figura 29. Esquema de desalinización por compresión mecánica de vapor (MVC) (Norland Intl, 2004).

- Destilación Flash Multietapa (MSF).

En este proceso el agua de mar es calentada en un tanque por medio de un serpentín o tubos en paralelo que contienen algún fluido caliente, posteriormente se pasa a otro tanque, llamado etapa, donde la presión reducida permite que el agua hierva. Posteriormente el agua vaporizada es captada, enfriada y condensada para obtener el agua producto. El calor latente liberado en la condensación del vapor es utilizado para calentar la salmuera en otra etapa y el producto destilado se colecta en cascada, en cada uno de los tanques colocados en paralelo con la salmuera y se bombea a un tanque de almacenamiento (D. Khawaji, K. Kutubkhanah and Wie, 2007). La tasa de producción de este proceso, depende de la temperatura del agua salada y del número de etapas que se lleven a cabo, siendo que el agua desalinizada en este proceso contiene generalmente de 2 a 10 ppm de sólidos disueltos, por lo tanto, es remineralizada por potabilización.

En la Figura 30, se puede muestra el proceso de desalinización mediante destilación flash multietapa:

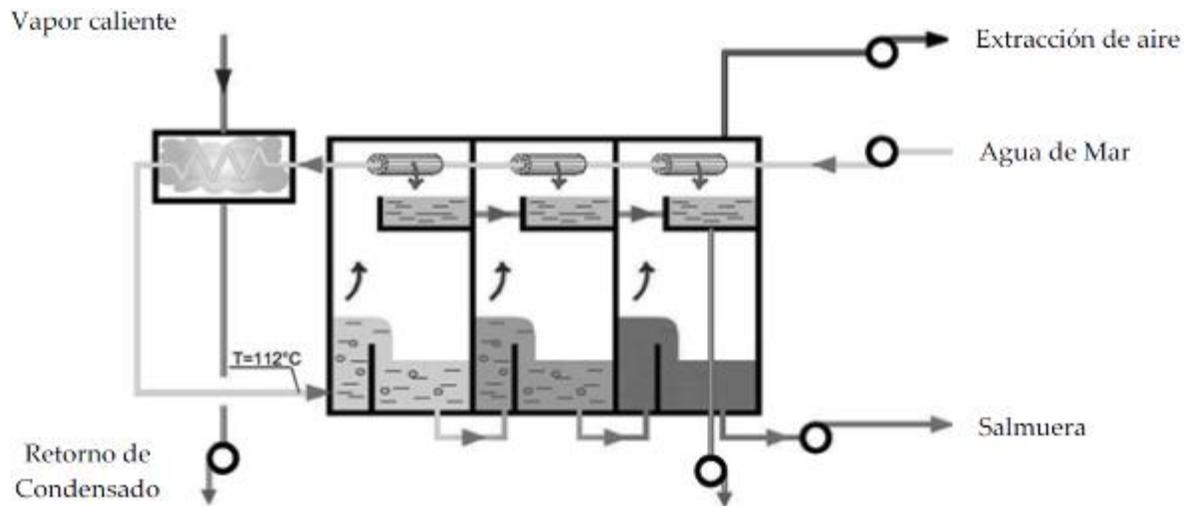


Figura 30. Esquema de desalinización mediante destilación flash multietapa (MSF) (Veolia, 2009).

- Destilación Multiefecto (MED).

Las plantas MED se configuran con base a tubos verticales u horizontales. El vapor se condensa en un lado de un tubo lo que ocasiona la evaporación de agua salada en el otro lado. El agua salina al evaporarse es distribuida sobre la superficie exterior de tubos calentados. Dentro de cada efecto MED, se rocía agua marina fresca sobre un grupo de tubos de intercambio térmico mientras el vapor que fluye a través de los tubos se condensa volviéndose agua pura. Fuera de los tubos, la delgada película de agua marina hierve a medida que absorbe el calor del vapor. El vapor resultante pasa a través de eliminadores de rocío para atrapar gotas de salmuera remanentes antes de que el vapor se introduzca en los tubos para el próximo efecto. El proceso se repite a través de toda la planta. Configuraciones MED alternativas que emplean tubos verticales o superficies de transferencia de calor de plantas también están disponibles (WHO, 2007).

La presión se reduce secuencialmente en cada efecto a medida que la temperatura se reduce y se proporciona más calor en cada etapa para mejorar el desempeño del proceso y este tipo de instalaciones cubren grandes superficies.

En la Figura 31, se muestra gráficamente el proceso de destilación multiefecto.

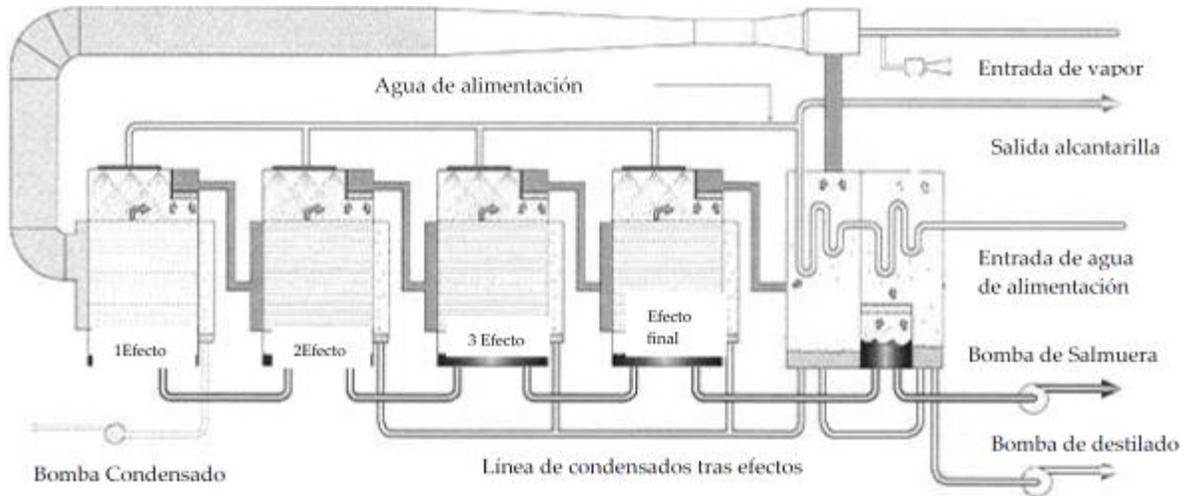


Figura 31. Proceso de Destilación Multiefecto (MED) (Cetema, 2008).

2.2.1.2 Procesos mecánicos

Los procesos mecánicos funcionan por medio de membranas, es un proceso que separa el agua salina en dos vertientes, una corriente de agua potable y con baja concentración de sales disueltas y, una corriente de salmuera concentrada. Los sistemas más utilizados son Ósmosis Inversa y Electrodiálisis.

- Ósmosis Inversa.

El sistema toma su nombre por realizarse el paso de las soluciones en forma contraria a los procesos osmóticos normales, o sea, 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 (Arreguín Cortés and Martín Domínguez, 2000), como puede verse en la Figura 32.

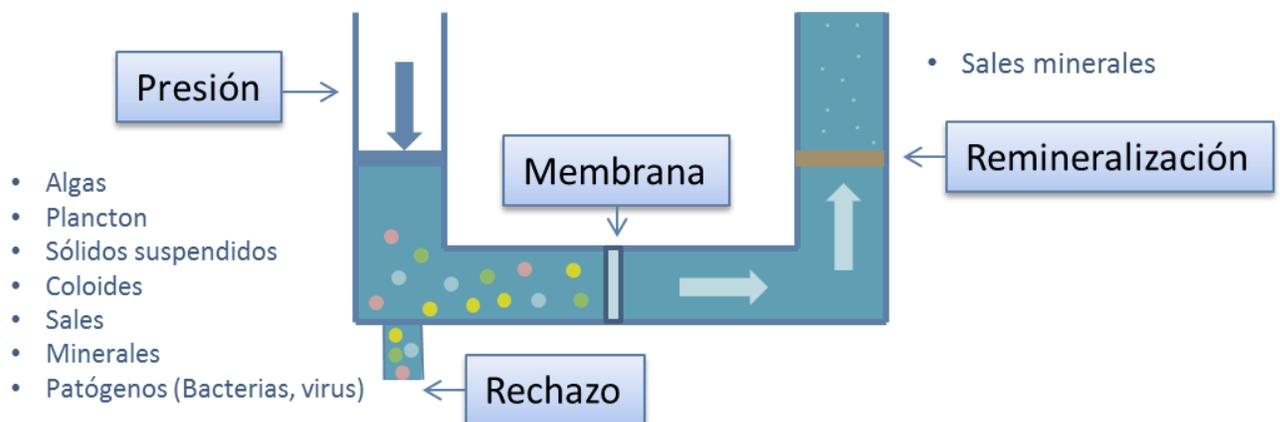


Figura 32. Proceso de ósmosis inversa (Procedetecs, 2018).

Por tanto, cuanto mayor sea la salinidad del agua de alimentación, mayor será su presión osmótica a superar. Consta de obra de toma de captación de agua de mar, seguido de un sistema de pretratamiento consistente en filtros de carbón activado y filtros de arena, hasta el paso de los bastidores de membranas de ósmosis inversa, lugar donde se aplican químicos para regular el pH del agua de alimentación, adición de anticrustrantes para evitar depósitos de sal en las membranas. Desalinizada el agua, se conecta un tren de postratamiento para desinfectar el agua producto usando lámparas UV, cloración y ozonación que permite asegurar la calidad del agua en líneas de distribución y almacenamiento. Debido al arreglo en serie o paralelo de las membranas, el espacio ocupado por la planta es pequeño, haciendo de esto una ventaja respecto a los sistemas térmicos (Dévora Isiordia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012d).

La Figura 33, presenta el proceso que sigue la desalinización por ósmosis inversa.

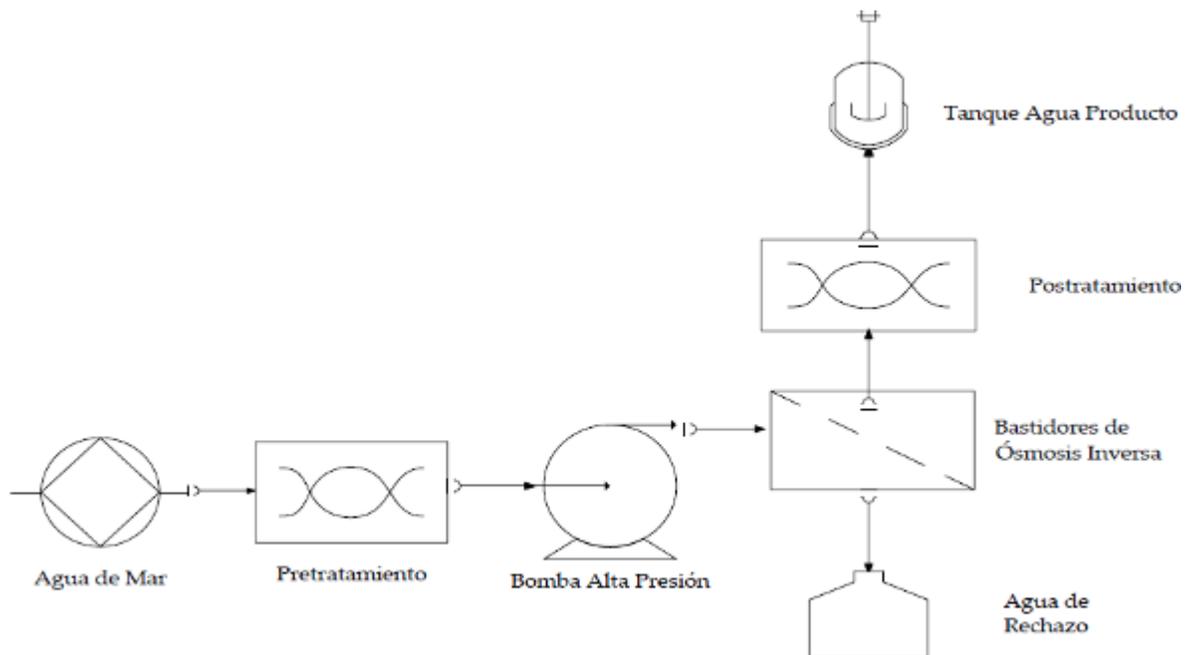


Figura 33. Esquema general de una planta de Ósmosis Inversa (RO) (Dévora Isiordia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012b).

- Electrodiálisis.

La tecnología de la electrodiálisis (ED) es un proceso de separación electroquímico, donde los iones son transferidos a través de membranas de intercambio iónico, por medio de un campo de corriente continua (Merrill, 1986)(Mani, 1991).

En este proceso, las sales disueltas ionizadas atraviesan las membranas y de esta forma se eliminan a las partículas cargadas eléctricamente, no produce una eliminación total de sales, sino que en la práctica la reducción de salinidad es del orden del 40%, para efectuar una determinada reducción se dispone de una cascada de células de electrodiálisis.

La Figura 34, representa el proceso de desalinización por Electrodiálisis.

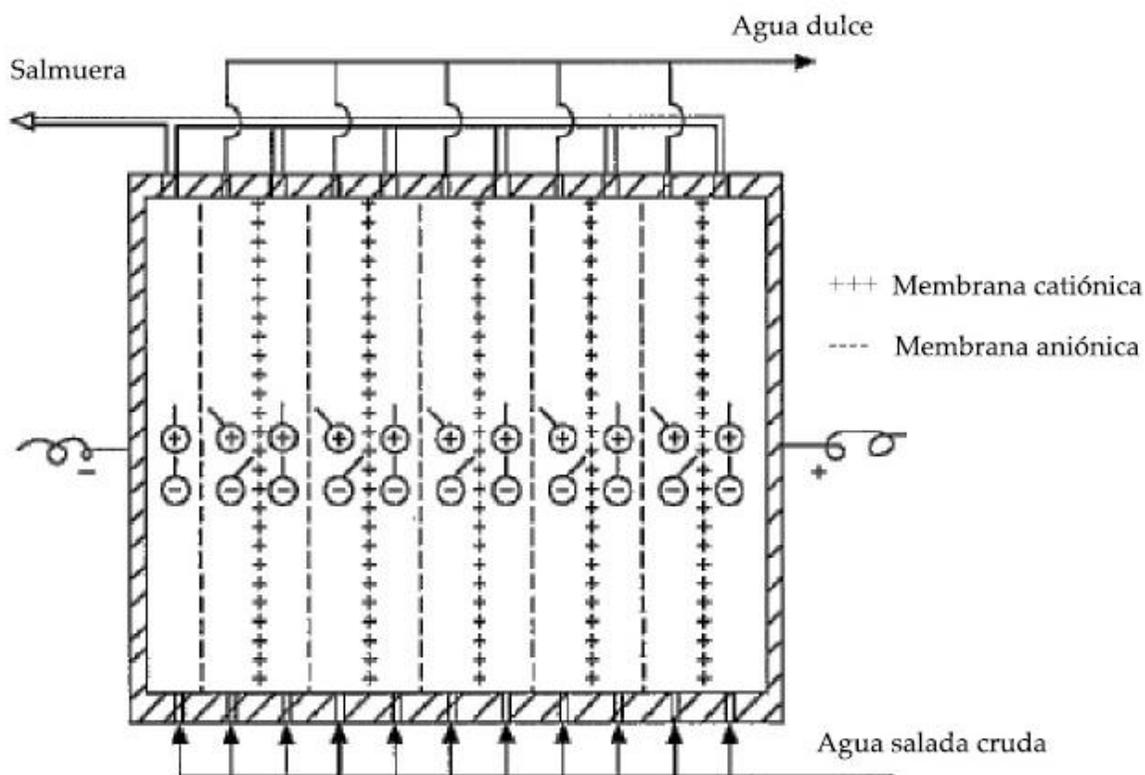


Figura 34. Esquema general del proceso de desalinización por electrodiálisis.

2.2.2 Desalinización en México

La capacidad mundial de desalinización ha crecido de 1980 con una capacidad de producción de 950,000 m³/d hasta 3,350,000 m³/d. Como fuente de abastecimiento al proceso, se tiene que la más utilizada es la proveniente de agua de mar con un 66%, el agua salobre con un 22%. Por otra parte, los sectores con más uso de agua producto son el municipal con 66% y el industrial con un 23% (Tabla 17) (Dévora Isiordia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012d).

Tabla 17. Plantas desalinizadoras de agua instaladas en México, por entidad federativa.

Nomenclatura: OI-Ósmosis Inversa, MCV-Compresión Mecánica de Vapor, MSF-Flash Multietapa, S-Solar, D-Destilación (Dévora Isiordia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012d).

Entidad federativa	Sitios con plantas desalinizadoras	No. de unidades	% Nacional	Operan		Proceso					Capacidad (m ³ /d)
				Sí	No	OI	MCV	MSF	S	D	
Baja California	23	38	8.74	24	14	26	7	2	3	0	51938
Baja California Sur	71	73	16.78	53	20	63	6	0	4	0	36971
Campeche	8	19	4.37	14	5	16	2	0	1	0	5456

Coahuila	31	33	7.59	23	10	30	1	0	1	1	7668
Colima	17	18	4.14	2	16	17	1	0	0	0	2856
Edo. De México	3	4	0.92	2	2	4	0	0	0	0	7000
Ciudad de México	14	17	3.91	12	5	15	0	0	1	1	95471
Durango	26	26	5.98	13	13	26	0	0	0	0	868
Guerrero	6	6	1.38	3	3	6	0	0	0	0	2355
Jalisco	3	4	0.92	3	1	3	0	0	1	0	2865
Morelos	2	23	4.83	21	2	20	1	0	0	0	110
Nuevo León	5	6	1.15	5	1	5	0	0	0	0	2847
Oaxaca	1	5	0.92	4	1	4	0	0	0	0	14256
Quintana Roo	79	124	28.51	73	51	121	2	0	1	0	53339
San Luis Potosí	1	1	0.23	1	0	1	0	0	0	0	60
Sonora	16	22	5.06	15	7	17	2	0	1	2	9349
Tamaulipas	4	4	0.92	2	2	4	0	0	0	0	5100
Veracruz	9	15	3.45	11	4	13	1	0	0	1	12167
Yucatán	1	3	0.23	1	2	1	0	0	0	0	700
Total Nacional	320	441	100.0	282	159	392	23	2	13	5	311376

La legislación mexicana establece que las aguas saladas interiores, el mar territorial y las aguas salobres son de dominio público. Es así que las actividades relacionadas con la desalinización, de acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales, requieren de una concesión. Respecto a la desalinización, la legislación no la menciona. Asimismo, las dependencias federales con atribuciones para reglamentar la desalación no han establecido una norma para regular las obras de toma, la disposición de las descargas de salmuera y el impacto al ambiente. Por ello, en 2012 México inició el proceso de definición de una norma oficial, pero aún no ha llegado a su conclusión (Arreguín Cortés and López Pérez, 2015).

Capítulo 3. Análisis de Ciclo de Vida

Análisis de Ciclo de Vida en Procesos.

El Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta que evalúa el desempeño ambiental de un producto. Aborda los aspectos y los posibles impactos ambientales a lo largo del Ciclo de Vida atribuibles al producto, desde la adquisición de materia prima, hasta la producción final de su vida útil y la disposición (ISO14040; 14044,2006).

Es necesario mencionar que el Ciclo de Vida es un conjunto de etapas consecutivas e interrelacionadas del sistema desde la adquisición de materias primas o generación de recursos naturales hasta su eliminación final, se muestra una representación gráfica en la Figura 35.

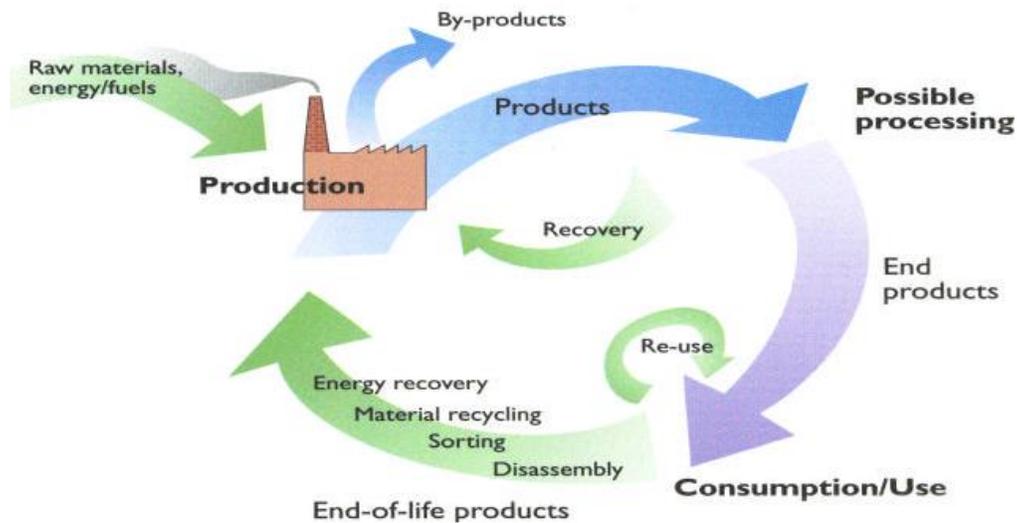


Figura 35. Ciclo de Vida de un producto. Fuente: FADU-UBA. Arquitectura. 2009. Instituto Argentino de Certificación.

Existen diferentes tipos de softwares para ayudar al Análisis de Ciclo de Vida, los cuales son los siguientes: TRACI, CMLCA, OpenLCA, Umberto, Sustainable Minds, SimaProS, Gaby Software, CES Edupack 2018, SolidWorks.

El resumen histórico del Análisis de Ciclo de Vida se presenta en la Tabla 18:

Tabla 18. Resumen histórico del Análisis de Ciclo de Vida (Orozco Herrera, 2012).

Periodo	Evento
60's	Primeros esfuerzos sobre el análisis energético.
70's	Primera crisis del petróleo.
80's	Se definen los principios del PLA (Product Line Analysis). EMPA desarrolla el primer cálculo de ACV.

90's	Encuentro de SETAC en Vermont. Empieza el desarrollo de las ISO. Formulación de las ISO 14040-44.
2006	Última actualización de las normas 14040.

Sus aplicaciones son:

- Ayuda a la comparación entre productos o con una norma estándar.
- Ayuda a mejorar un producto existente o diseñar un nuevo producto.
- Ayuda a generar información para mejorar estrategias.

Las áreas de protección son las siguientes:

- Salud Humana.
- Calidad del ecosistema.
- Recursos y Servicios ecosistémicos.

Las áreas de preocupación son las siguientes: Agua y Carbono.

Ya que todo recae en cuánta agua se contamina y cuánto bióxido de carbono se genera.

La gestión de una central nuclear debe efectuarse de manera segura y eficaz a lo largo de todo su ciclo de vida, desde el diseño hasta la clausura, y debe perseguir el objetivo general de suministrar electricidad fiable y asequible (IAEA, 2019b).

El Ciclo de Vida es el conjunto de etapas consecutivas e interrelacionadas del sistema desde la adquisición de materias primas o generación de recursos naturales hasta su eliminación final (Figura 36).



Figura 36. Ciclo de Vida (Orozco Herrera, 2012).

El Análisis de Ciclo de Vida es la metodología de evaluación de cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, mediante la identificación y cuantificación de los recursos, así como los residuos emitidos al entorno, para analizar el impacto de estos sobre el medio ambiente y evaluar e implementar posibles mejoras (Figura 37).



Figura 37. Análisis de Ciclo de Vida (Orozco Herrera, 2012).

La definición del Análisis de Ciclo de Vida es:

Procedimiento objetivo de evaluación de cargas energéticas y ambientales correspondientes a un proceso o a una actividad, que se efectúa identificando los materiales, la energía utilizada y las emisiones liberadas en el ambiente natural. La evaluación se realiza en el ciclo de vida completo del proceso o actividad, incluyendo la extracción y tratamiento de la materia prima, la fabricación, el transporte, la distribución, el uso, el reciclado, la reutilización y la disposición final (SETAC, 1993).

Es un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad porque:

- Identifica y cuantifica tanto el uso de materia y energía como los vertidos de todo tipo al entorno.
- Determina el impacto del consumo de materia y energía y de las descargas al medio ambiente.
- Evalúa las oportunidades de realizar mejoras ambientales.

El estudio incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de: extracción y procesado de materias primas; producción, transporte y distribución; uso, reutilización y mantenimiento; reciclado y disposición final.

Los aspectos básicos de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida son:

Objetivos del Análisis de Ciclo de Vida:

1. Reducir los impactos ambientales de un producto y/o proceso.
Disminuyendo: Energía, materias primas, emisiones, etc.
2. Identificar posibles mejoras en el sistema.

El ACV estudia los aspectos e impactos ambientales potenciales durante la vida de un producto, a partir de la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, el uso y la disposición final. Las categorías generales de los impactos ambientales que necesitan ser considerados incluyen el uso de recursos, la salud humana y las consecuencias ecológicas.

El ACV puede ayudar en:

- La identificación de oportunidades para mejorar los aspectos ambientales de productos en varios puntos de su ciclo de vida;

- La toma de decisiones tanto en la industria como en las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales (por ejemplo, planificación estratégica, fijación de prioridades, diseño o rediseño de productos o procesos);
- La selección de indicadores ambientales pertinentes, incluyendo técnicas de medición; y
- La comercialización (por ejemplo, una declaración ambiental, un esquema de sello ambiental o eco-etiquetado, o una declaración ambiental de producto).

Ventajas y desventajas del ACV:

Ventajas:

- Objetividad y transparencia.
- Aceptado en diferentes sectores.
- Globalidad.
- Concepción integral del producto.

Desventajas.

- Complejidad.
- Atemporal.
- No mide efectos locales.
- No incluye los riesgos.

La estructura del ACV es la Interpretación, el Análisis de Inventario, la Evaluación del impacto y la Definición de Objetivo y el Alcance, como se muestra en la Figura 38.

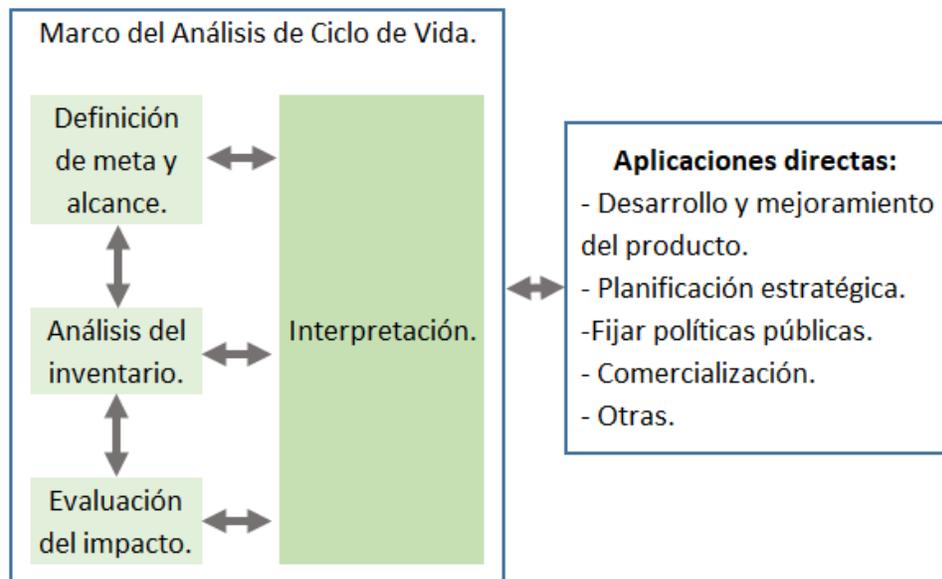


Figura 38. Metodología del ACV según ISO 14040 (Orozco Herrera, 2012).

Definición del objetivo y el alcance del ACV.

En esta fase se establecen los objetivos del estudio, su extensión y profundidad, siendo, probablemente, la parte más crítica del ACV. Los objetivos deben dar una idea clara del propósito, del sistema que se estudia y de las aplicaciones esperadas, incluyendo sus limitaciones.

El análisis del inventario del ciclo de vida consiste en un proceso técnico basado en la recopilación de datos técnicos, en la que se cuantifica el consumo de energía y materias primas, así como las emisiones al medio natural. Es esta la parte de mayor requerimiento de recursos.

La evaluación de impacto es un proceso técnico, cualitativo y/o cuantitativo para caracterizar y analizar los efectos de las cargas medioambientales identificadas en la fase del Inventario. Esta etapa se compone de tres pasos: Clasificación, Caracterización y Ponderación.

El análisis de mejoras o la interpretación, es la última fase y corresponde a la presentación de los resultados, de forma que facilite la identificación de las áreas de posible mejora.

Metodología del ACV.

Existen dos tipos de ACV:

- ACV atribucional, el cual se orienta a la descripción de flujos (medioambientalmente relevantes) de entrada y salida del sistema y subsistemas estudiados.
- ACV consecuencial, el cual se orienta a la descripción de cómo se ven afectados estos flujos dependiendo de las decisiones que se tomen. Está orientado a describir las consecuencias ambientales de una decisión. → Se considera apropiado para la toma de decisiones.

Fases del ACV.

- Definición de objetivo y alcance del estudio: Se definen los objetivos globales del estudio y se establecen la finalidad del mismo, el producto a estudiar, la audiencia a la que se dirige y el alcance o magnitud del estudio, es decir, los límites del sistema. Así mismo se define la unidad funcional.
- Análisis de inventario: En la fase de inventario se contabilizan todas las cargas ambientales asociadas al ciclo de vida de la unidad funcional.
- Evaluación de los impactos del ciclo de vida: consiste en interpretar el inventario, analizando y evaluando los impactos producidos por las cargas ambientales.
- Interpretación de los resultados obtenidos en el estudio.

Etapas de desarrollo de un ACV.

El Análisis de Ciclo de Vida es una técnica que permite evaluar los potenciales impactos medioambientales asociados con un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando los consumos de energía y materias primas, así como los vertidos de residuos y las emisiones que tienen lugar a lo largo de todo el Ciclo de Vida (Figura 39) (Romero Díaz de Ávila, 2012), que son:

- Adquisición de materias primas.
- Fabricación, procesado y formulación de productos
- Distribución y Transporte
- Uso/reutilización y mantenimiento
- Gestión de residuos (reciclado, valorización, eliminación en vertedero, etc.)



Figura 39. Etapas de desarrollo de un ACV (Romero Díaz de Ávila, 2012).

Si bien todos los ACV deben cubrir las mismas etapas, el nivel de detalle no es el mismo en todos ellos, ya que depende del objetivo a cubrir. Ello da lugar a la diferenciación de tres tipos de ACV:

-ACV conceptual.

Es el ACV más sencillo. Se trata de un estudio básicamente cualitativo, cuya finalidad principal es la identificación de los potenciales impactos que son más significativos. Los datos que se utilizan son cualitativos y muy generales.

-ACV simplificado.

Es el segundo en escala de complejidad. Consiste en aplicar la metodología del ACV para llevar a cabo un análisis selectivo (tomando sólo en consideración datos genéricos y abarcando el Ciclo de Vida de forma superficial), seguido de una simplificación (centrándose en las etapas más importantes) y un análisis de la fiabilidad de los resultados.

-ACV completo.

Es el nivel más complejo. Consiste en realizar un análisis en detalle, tanto del inventario como de los impactos, de forma cuali y cuantitativa.

El desarrollo de un Análisis de Ciclo de Vida, de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 14040, debe cubrir las siguientes etapas metodológicas:

- Definición del objetivo y alcance del estudio.
- Análisis de inventario.
- Evaluación de impacto.
- Interpretación.

Definición del objetivo y alcance del estudio.

La definición de objetivos comprende la exposición de los motivos por los que se desarrolla el estudio y la descripción del destinatario del mismo. El alcance es la definición de la amplitud, profundidad y detalle del estudio.

-Definición del objetivo.

La definición del objetivo del análisis debe ser clara y coherente con la aplicación que se va a dar al estudio.

La definición de objetivos debe incluir:

- Identificación del receptor y del realizador del estudio.
- Razones para realizar el estudio y el tipo de información que se espera obtener de él.
- Aplicación prevista del estudio y uso que va a hacerse con los resultados.
- Destinatario previsto del estudio (es decir, si será un informe interno, si se hará público y a quién).
- Si procede, el uso del ACV en aseveraciones comparativas.

- Definición del alcance del ACV. Esta etapa debe reflejar claramente la extensión del estudio lo cual implica, de acuerdo a la norma ISO 14040, la consideración y descripción de los siguientes puntos:

- Sistema del producto a estudiar.
- Funciones del sistema del producto.
- Selección de la unidad funcional.
- Establecimiento de los límites del sistema.
- Establecimiento de las reglas de asignación de cargas ambientales.
- Tipos de impacto a evaluar, la metodología de evaluación y la interpretación.
- Requisitos que deben cumplir los datos del inventario.
- Hipótesis y limitaciones.
- Requisitos de calidad de los datos.

El alcance también debe incluir el tipo de revisión crítica a efectuar, si esta es necesaria de acuerdo con los objetivos del estudio y el tipo y formato del informe final.

Análisis de inventario de ciclo de vida.

Esta fase consiste en la cuantificación de las entradas y salidas del sistema en estudio, en la que se incluye el uso de recursos (materias primas y energía), las emisiones a la atmósfera, suelo y aguas y la generación de residuos. Los datos obtenidos en esta fase son el punto de partida para la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida.

Las etapas a cuantificar son las seis que componen el Ciclo de Vida del producto/proceso:

- Adquisición de materias primas: esta etapa comprende desde las actividades necesarias para la adquisición de materias primas o de energía hasta la primera fase de manufactura o procesamiento del material.
- Manufactura, procesado y formulación: esta etapa comprende las etapas que tienen lugar desde la introducción de las materias primas en el proceso hasta que se obtiene el producto final.
- Distribución y Transporte: el transporte comprende el movimiento de materiales o de energía entre las diferentes operaciones en cualquier etapa del ciclo de vida, incluida la extracción de recursos. La distribución comprende el paso de los productos manufacturados desde su salida de fábrica hasta el usuario final.
- Uso/Reutilización/Mantenimiento: los límites de esta etapa comienzan con la distribución de los productos o materiales y termina cuando estos productos o materiales pasan a ser residuos.

- Reciclado: comprende todas las actividades necesarias para recoger el residuo y devolverlo a un proceso de fabricación.
- Gestión de Residuos: incluye todos los mecanismos de tratamiento de los residuos (estudio de las posibles alternativas de gestión).

Siempre que sea posible, es recomendable utilizar datos directamente obtenidos del proceso en estudio, a través de: Medidas "in situ", balances de materia y energía, entrevistas, fuentes bibliográficas, etc.

El inventario, a fin de dar una visión global del producto/proceso al que corresponde, además de los datos cuantificados debe constar de:

- Diagramas de flujo que dejen claro el sistema en estudio, así como las relaciones que tienen lugar dentro del mismo.
- Descripción detallada de cada unidad de proceso, listando la categoría de los datos asociados con cada una de ellas.
- Desarrollo de una lista donde se especifiquen las unidades de medida de cada parámetro.
- Descripción de los métodos empleados para recoger los datos y de las técnicas de cálculo empleadas para cada categoría de datos.
- Instrucciones informando claramente de fuentes documentales para casos especiales, irregularidades, o cualquier otra circunstancia asociada con la recogida de datos.

Evaluación de impacto de ciclo de vida.

La fase de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida relaciona los resultados del Análisis de Inventario con los efectos ambientales a que dan lugar, con el fin de valorar la importancia de los potenciales impactos que generan. En el contexto del ACV, se define un impacto como la anticipación razonable de un efecto, ya que no se trata de determinar impactos reales, sino de ligar los datos obtenidos en el inventario con una categoría de impacto y cuantificar la contribución a esta de cada uno de ellos. La Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida consta de tres etapas:

- Clasificación.
- Caracterización y análisis técnico de significancia (o normalización).
- Valoración

Clasificación.

La fase de clasificación consiste en el agrupamiento de las cargas ambientales debidas al consumo de recursos y a la generación de emisiones y residuos, en función de los potenciales efectos ambientales que produce cada una de ellas.

Entre los efectos que se consideran en un ACV están los siguientes:

- Consumo de Recursos.
- Calentamiento Global.
- Reducción de la Capa de Ozono.
- Acidificación.
- Eutrofización.
- Formación de oxidantes fotoquímicos.
- Generación de residuos.

Caracterización y Análisis de Significancia (Normalización).

La caracterización es el cálculo de la contribución potencial de cada compuesto detectado en el análisis de inventario a un efecto ambiental.

Por ejemplo, cuando se considera el efecto de la acidificación, habría que considerar las cargas ambientales debidas a las emisiones que contribuyen al mismo, esto es, CO_2 , NO , NO_2 , NO_x , NH_3 , HCl y HF . Debido a que para valorar el efecto global de la acidificación es necesario tener todas las emisiones en unidades idénticas, se toma una como referencia y se expresa el resto en función de ella. Para este efecto concreto, se toma como referencia el SO_2 , se le asigna valor 1 y se expresa el resto como equivalentes de SO_2 .

Así, para medir la contribución del efecto de acidificación, se recurre a un factor de caracterización denominado potencial de acidificación (AP), el cual se define como la capacidad de una unidad de masa contaminante de emitir H^+ para absorber radiación infrarroja en relación con la capacidad del SO_2 .

La contribución parcial de cada sustancia a este efecto se calcula como el producto de su potencial de acidificación por la masa de esa sustancia que es emitida al aire.

De acuerdo a esto, la contribución total a la acidificación puede definirse como la suma de las contribuciones parciales:

$$\text{Contribución total a acidificación} = \Sigma(AP_i \cdot m_i)$$

$$\text{Contribución total a acidificación} = \Sigma(AP_i \cdot m_i)$$

Donde:

AP_i : Potencial de acidificación de la sustancia i

m_i : Masa de sustancia i emitida al aire

Las unidades vienen expresadas en kg de SO_2 equivalentes.

Con el fin de analizar la importancia relativa de cada efecto considerado durante la caracterización, se recurre a un “análisis técnico de significancia” (término propuesto por ISO), también llamado “normalización” (término propuesto por SETAC). Este paso consiste en el cálculo de la contribución relativa de cada efecto ambiental a las cargas totales del producto/proceso en estudio.

La normalización es necesaria debido al hecho de que los valores que se obtienen durante la caracterización, como se ha expuesto, están expresados en diferentes unidades. La normalización permite trasladar los resultados de la clasificación a unidades que permitan su comparación y su interpretación.

Tras la normalización de cada efecto, se lleva a cabo la agregación de los datos, con lo que se obtiene un perfil ambiental del Ciclo de Vida bajo estudio.

Valoración.

El siguiente paso a llevar a cabo dentro de la fase de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida es la Valoración. El objetivo de esta etapa es determinar qué efecto causa el menor impacto teniendo en cuenta el Ciclo de Vida completo, para lo que los efectos ambientales son sopesados unos con otros con la finalidad de comparar los perfiles normalizados obtenidos en la etapa anterior.

Interpretación del ACV.

La Interpretación es la combinación de los resultados del análisis de inventario y de la evaluación de impacto, en la cual se proporcionan resultados coherentes con el objetivo y el alcance definidos. A veces, puede implicar un proceso iterativo de revisión y actualización del alcance, así como de la naturaleza y la calidad de los datos recopilados para que sean coherentes con el objetivo y el alcance.

El análisis puede incluir medidas cualitativas y cuantitativas de mejoras, como cambios en el producto, en el proceso, en el diseño, sustitución de materias primas, gestión de residuos, etc. De igual forma, puede ir asociada con las herramientas de prevención de la contaminación industrial, tales como minimización de residuos, o rediseño de productos.

Revisión crítica.

El concepto de revisión crítica ha sido incorporado como requerimiento en la norma UNE-EN ISO 14040 enfocada, sobre todo, a ACV donde se llevan a cabo aseveraciones comparativas.

La misión del proceso de revisión crítica es asegurar que:

- Los métodos utilizados en el ACV son coherentes con ISO 14040.
- Los métodos usados en el ACV son técnica y científicamente válidos.
- Los datos utilizados son apropiados y razonables con el objetivo del estudio.
- Las interpretaciones reflejan las limitaciones identificadas y el objetivo del estudio.
- El informe del estudio es transparente y coherente.

En los objetivos del estudio debe definirse si la revisión crítica va a ser llevada a cabo, así como el motivo de su realización, aspectos que cubrirá y con qué detalle y personas involucradas en el proceso.

Hay que distinguir tres tipos de revisión crítica:

- Revisión por expertos internos. La revisión crítica la lleva a cabo un experto interno independiente del estudio del ACV, familiarizado con los requisitos de la norma ISO 14040 y con experiencia científica y técnica. El informe de revisión puede ser preparado por la persona que realiza el ACV y revisado por el experto interno o puede ser preparado en su totalidad por el experto interno. El informe debe incluirse en el informe del estudio de ACV.
- Revisión por experto externo. Es llevada a cabo por un experto externo independiente del estudio de ACV. El experto debe estar familiarizado con la norma ISO 14040 y tener experiencia científica y técnica. El informe de revisión puede ser preparado por la persona que realiza el ACV y revisado por el experto externo o puede ser preparado en su totalidad por el experto externo. El informe de revisión, los comentarios y cualquier respuesta hecha a las recomendaciones hechas por el revisor deben incluirse en el informe del estudio de ACV.
- Revisión por partes interesadas. En este caso, el cliente que encarga el estudio selecciona un experto externo independiente para presidir el grupo revisor. De acuerdo al objetivo, alcance y presupuesto disponible para la revisión, el experto externo selecciona a otros revisores independientes cualificados. El informe de revisión, el informe del grupo revisor, los comentarios de los expertos y cualquier respuesta a las recomendaciones hechas por el revisor o por el grupo deben incluirse en el estudio de ACV.

Fase 1. Definición de objetivos y alcance.

- Motivos, uso y destinatario final.
- Funciones y unidad funcional.
- Límites del sistema.

- Reglas de corte.

Definición del objetivo.

El objetivo debe establecer sin ambigüedad la aplicación proyectada, las razones para efectuar el estudio y los destinatarios previstos, es decir, a quiénes serán comunicados los resultados del estudio.

Alcance del estudio (incluye, entre otras cuestiones).

- Sistema Producto.
 - Funciones del Sistema Producto.
 - Función relevante para el ACV.
 - Procedimiento de asignación.
 - Unidad funcional.
 - Tipos de impacto y la metodología de evaluación del impacto.
 - Suposiciones y limitaciones.
 - Límites del sistema producto.
 - Desempeño del producto.
 - Flujo de referencia.
-
- Funciones del sistema estudiado.
 - Unidad funcional.
 - Sistema que se estudiará y sus límites.
 - Procedimientos utilizados en la asignación de cargas.
 - Tipos de impacto y metodología usada en la evaluación de impacto.
 - Requisitos de calidad de los datos.

Fase 2. Análisis del inventario (ICV)

- Procedimientos de recopilación de datos.
- Descripción de los procesos unitarios.
- Procedimientos de cálculo.
- Análisis de sensibilidad.
- Criterios de asignación.

Fase 3. Evaluación de Impacto (EICV).

- Selección de categorías de impacto, indicadores, etc.
- Clasificación.
- Caracterización.
- Pasos opcionales: normalización, agrupación, valoración, etc.

En la Figura 40, se muestra una lista de emisiones y categorías en la evaluación del impacto del ACV.

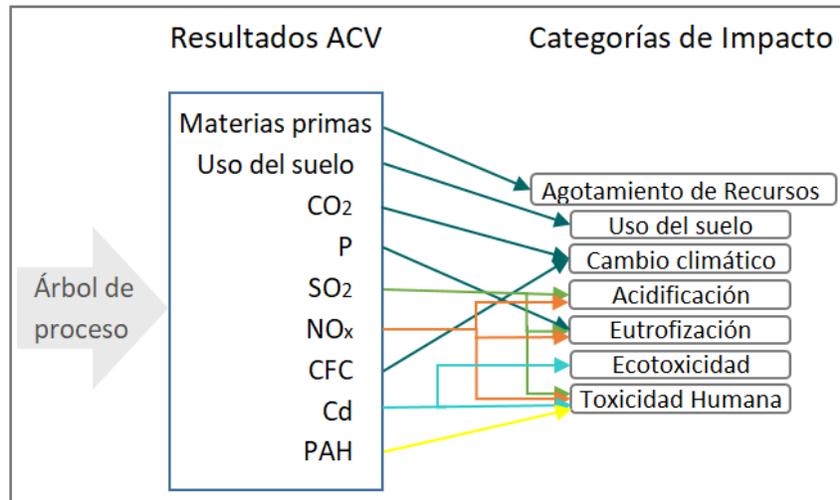


Figura 40. Evaluación del impacto del ciclo de vida.

Caracterización o definición de categorías de impacto.

La siguiente Tabla 19, ejemplifica una definición de las distintas categorías de impacto que pueden generarse en un ACV:

Tabla 19. Categorías de impacto y etapas del proceso (Orozco Herrera, 2012).

CATEGORÍAS DE IMPACTO	Etapas del proceso.			
	MATERIAS PRIMAS	GENERACIÓN	DISTRIBUCIÓN	TOTAL
GWP (kg CO ₂ eq./MWh)	2,56E+09	1,22E+08	2,07E+08	2,88E+09
ODP (kg CFC/MWh)	3,74E+01	0,00E+00	1,38E+01	5,12E+01
ACD (kg SO ₄ /MWh)	1,11E+07	4,91E+05	1,48E+06	1,31E+07
EUT (kg NO ₄ /MWh)	1,67E+07	6,67E+05	1,67E+06	1,90E+07
RECURSOS (m ³ /MWh)	2,20E+05	0,00E+00	2,47E+03	2,23E+05

GWP: se utiliza el efecto de las emisiones durante un periodo de 100 años.

3.1 Inventario de Ciclo de Vida aplicado a desalinización usando cogeneración.

El Análisis de Ciclo de Vida aplicado a procesos de desalinización ha ayudado a determinar la cantidad de energía aprovechada, junto con las mejoras ambientales, ya que el calor residual aplicado a un proceso de desalinización, de forma de cogeneración, evita pérdidas de calor residual y le da una aplicación específica en este caso. De igual forma, ha ayudado a determinar el tipo de desalinización más conveniente a usar dependiendo del proceso que se requiera, dadas las cantidades de energía residual o aprovechable, así como el tipo y la cantidad de agua a desalar como el tipo y cantidad de agua producto requerida.

Gracias al ACV aplicado a éstos procesos, se determina el mejor tipo de desalinización, incluso mejorándolo a tal punto de utilizar procesos híbridos de los diferentes tipos de desalinización.

Hoy en día, éstos tipos de análisis de siguen realizando, para profundizar en investigaciones y a su vez, en sus mismas aplicaciones.

Capítulo 4. Análisis termodinámico de la Central Nuclear

El análisis termodinámico permite analizar el funcionamiento de la planta mediante un razonamiento matemático, empleando ecuaciones de conservación de masa y de energía, que relacionan las entalpías de entrada u de salida de cada sistema en función de su presión, temperatura y flujo refrigerante que circula en cada uno de estos (Santillan, Valle and Alberto, 2015).

Descripción del proceso utilizado en la Central Nuclear Laguna Verde (Figura 41) (Lozano Laez, 1995):

Todo el proceso de generación de electricidad por medio de energía nuclear, se explica a través del ciclo termodinámico.

El ciclo comienza en el núcleo del reactor, que está cubierto de agua, en donde se realiza la fisión. Producto de ésta se genera gran cantidad de calor que es absorbido por el agua que sirve como refrigerante hasta hervir y convertirse en vapor. El vapor pasa de las turbinas que mueven el generador eléctrico y éste produce la electricidad que pasa a los transformadores para ser incorporada al sistema eléctrico nacional que la hará llegar hasta sus diferentes usos. El proceso es el siguiente:

1. El agua que inunda el reactor, hierve en la misma vasija a partir del calor generado por la fisión nuclear convirtiéndose en vapor.
2. El vapor, ya seco, sale del reactor y llega a la turbina de alta presión.
3. De la turbina de alta presión pasa al separador de humedad y recalentador de vapor (MSR). El vapor sale del MSR y entra en las turbinas de baja presión.
4. Dada la expansión que sufre el vapor al llegar a las turbinas, se obtiene vapor a alta velocidad que mueve sus álabes y al generador eléctrico.
5. La electricidad producida pasa a los transformadores para ser incorporada al sistema eléctrico nacional.
6. Luego de mover las turbinas, el vapor pasa al condensador, enfriándose con agua de mar para convertirse en líquido y volver al reactor.
7. El agua de mar fluye por tubos que atraviesan el condensador y jamás entra en contacto con el agua del reactor, regresando intacta al mar.

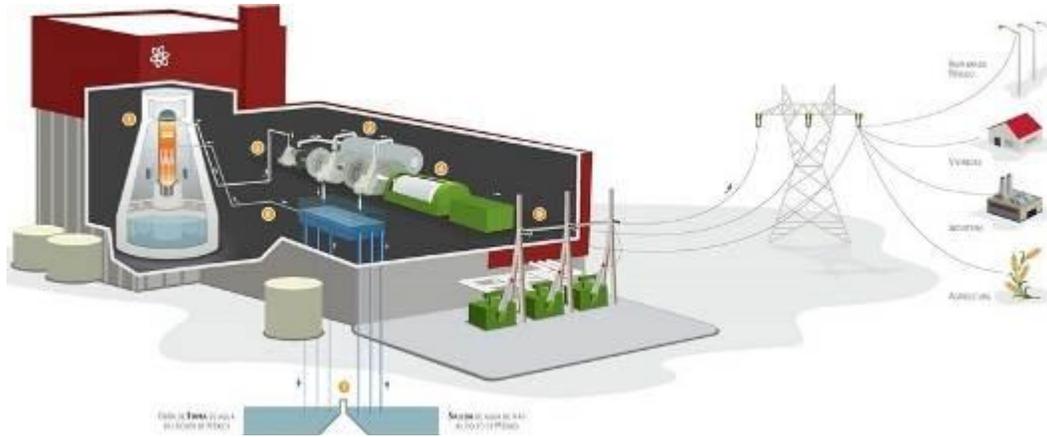


Figura 41. Proceso del ciclo utilizado en la Central Nuclear Laguna Verde para la generación de electricidad (Lozano Laez, 1995).

El ciclo utilizado en la central nuclear, con los datos mostrados, es un ciclo Rankine ideal regenerativo con recalentamiento. El ciclo Rankine es considerado el mejor ciclo para procesos termodinámicos en centrales eléctricas de vapor (Pahuamba, 2017).

-Ecuaciones:

El ciclo Rankine ideal no incluye ninguna irreversibilidad interna y se compone por los siguientes procesos (Figura 42 y 43):

1. Compresión isentrópica en una bomba (4-1).
2. Adición de calor a presión constante en una caldera (1-2).
3. Expansión isentrópica en una turbina (2-3).
4. Rechazo de calor a presión constante en un condensador (3-4).

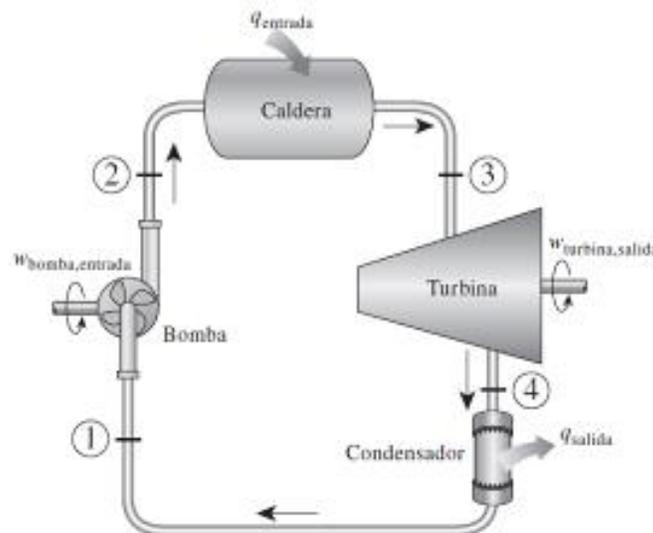


Figura 42. Diagrama del Ciclo Rankine ideal simple (Çengel and Boles, 2012).

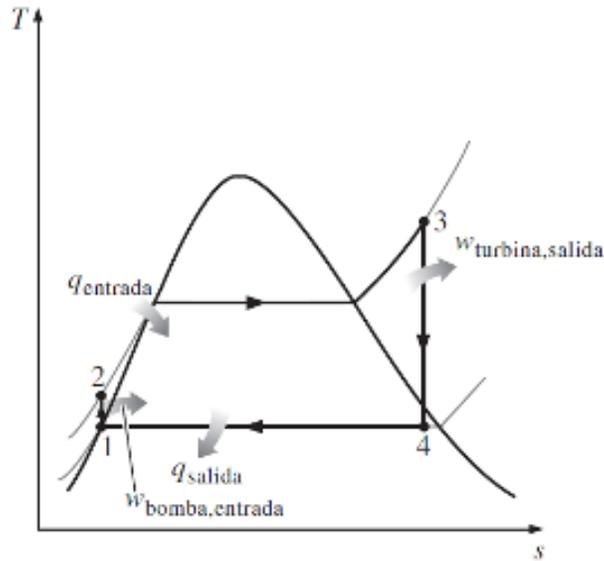


Figura 43. Diagrama T-s del ciclo Rankine ideal simple (Çengel and Boles, 2012).

El análisis de energía del ciclo Rankine.

Los componentes del ciclo Rankine, que son bomba, caldera, turbina y condensador; son dispositivos de flujo estacionario, por lo que los cambios en la energía cinética y potencial del vapor suelen ser pequeños respecto de los términos de trabajo y de transferencia de calor y, por consiguiente, casi siempre son insignificantes. Por lo que la ecuación de energía del flujo estacionario por unidad de masa de vapor se reduce a (Çengel and Boles, 2012):

$$(q_{entrada} - q_{salida}) + (w_{entrada} - w_{salida}) = h_s - h_e$$

La eficiencia térmica del ciclo Rankine se determina a partir de:

$$\eta_{tér} = \frac{w_{neto}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}}$$

Donde:

$$w_{neto} = q_{entrada} - q_{salida} = w_{turbina,salida} - w_{bomba,entrada}$$

La fricción del fluido y las pérdidas de calor hacia los alrededores son las dos fuentes más comunes de irreversibilidades.

La fricción del fluido ocasiona caídas de presión en la caldera, el condensador y las tuberías entre diversos componentes; la pérdida de calor del vapor hacia los alrededores cuando el fluido circula por varios componentes, por lo que para mantener el mismo nivel de salida neta del trabajo es necesario transferir más calor hacia el vapor en la caldera y así poder compensar estas pérdidas de calor indeseables. Como consecuencia, la eficiencia del ciclo disminuye (Figura 44) (Çengel and Boles, 2012).

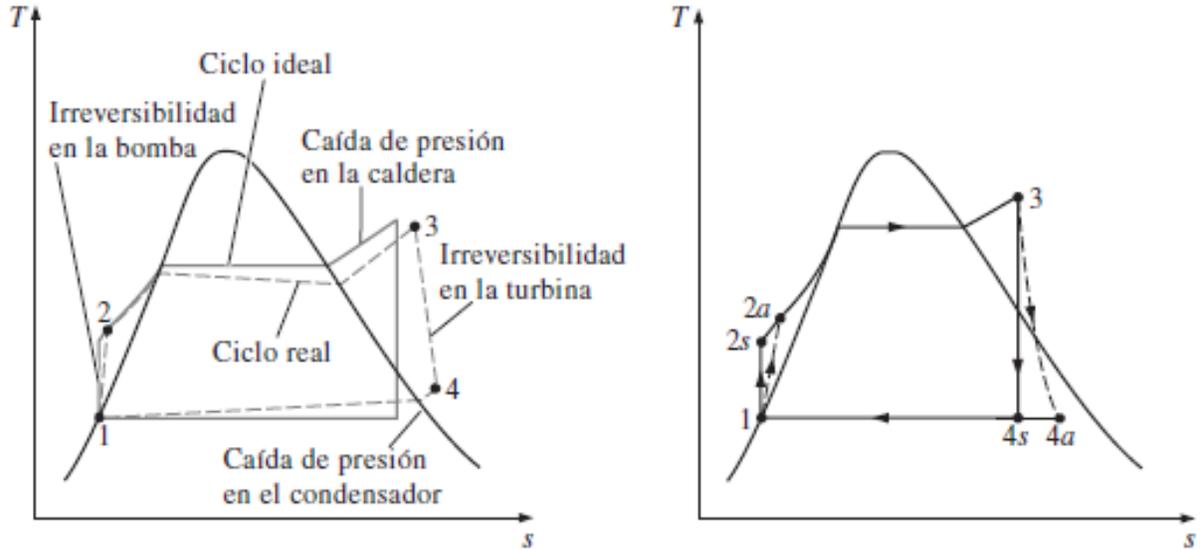


Figura 44. Desviación real de potencia de vapor respecto del ciclo de Rankine ideal. Y efecto de las irreversibilidades de la bomba y la turbina en el ciclo Rankine ideal (Çengel and Boles, 2012).

El ciclo Rankine ideal con recalentamiento:

El aumento en la presión de la caldera incrementa la eficiencia térmica del ciclo Rankine, pero también incrementa el contenido de humedad del vapor a niveles aceptables entonces se puede pensar en dos posibilidades:

1. Sobrecalentar el vapor a temperaturas muy altas antes de que entre a la turbina. Ésta sería la solución deseable porque la temperatura promedio a la que se añade calor también se incrementaría, lo cual aumentaría la eficiencia del ciclo. Sin embargo, no es una solución viable ya que requiere elevar la temperatura del vapor hasta niveles metalúrgicamente inseguros.
2. Expandir el vapor en la turbina en dos etapas y recalentarlo entre ellas. En otras palabras, modificar el ciclo Rankine ideal simple con un proceso de recalentamiento. El recalentamiento es una solución práctica al problema de humedad excesiva en turbinas y es comúnmente utilizada en modernas centrales eléctricas de vapor.

El único propósito del ciclo de recalentamiento es reducir el contenido de humedad del vapor en las etapas finales del proceso de expansión. Si se contara con materiales que soportaran temperaturas suficientemente altas, no habría necesidad del ciclo de recalentamiento (Figura 45).

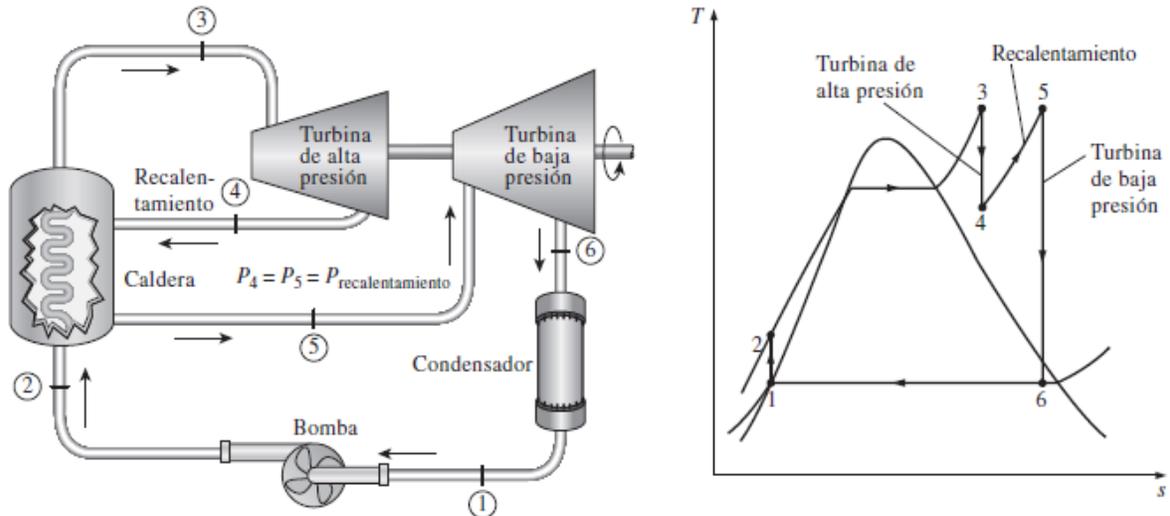


Figura 45. El ciclo Rankine ideal con recalentamiento y diagrama T-s del ciclo (Çengel and Boles, 2012).

El ciclo Rankine ideal regenerativo.

Un proceso de regeneración práctico en las centrales eléctricas de vapor se logra con la extracción o “drenado” o “purga” del vapor de la turbina en diversos puntos. Este vapor, que podría producir más trabajo si se expandiera aún más en la turbina, se utiliza en cambio para calentar el agua de alimentación. El dispositivo donde el agua de alimentación se calienta mediante regeneración se llama regenerador o calentador de agua de alimentación (CAA).

La regeneración no solo mejora la eficiencia del ciclo, también proporciona un medio conveniente de desaerar el agua de alimentación (al eliminar el aire que se filtra al condensador) para evitar la corrosión en la caldera. Asimismo, ayuda a controlar el gran flujo volumétrico del vapor en las etapas finales de la turbina (debido a los grandes volúmenes específicos a bajas presiones). Por consiguiente, la regeneración se utiliza en todas las centrales eléctricas de vapor modernas desde su introducción a principios de la década de 1920.

Un calentador del agua de alimentación es un intercambiador de calor donde éste se transfiere del vapor al agua de alimentación mediante la mezcla de ambos flujos de fluido (calentadores de agua de alimentación abiertos) o sin mezclarlos (calentadores de agua de alimentación cerrados).

Ciclo Rankine ideal regenerativo con recalentamiento.

Una central eléctrica de vapor que opera en un ciclo Rankine ideal regenerativo con recalentamiento, con dos calentadores de agua de alimentación, uno abierto y otro cerrado, además de un recalentador, operará como el siguiente esquema, presentando un calentador abierto de agua de alimentación, otro cerrado y un recalentador (Figura 46):

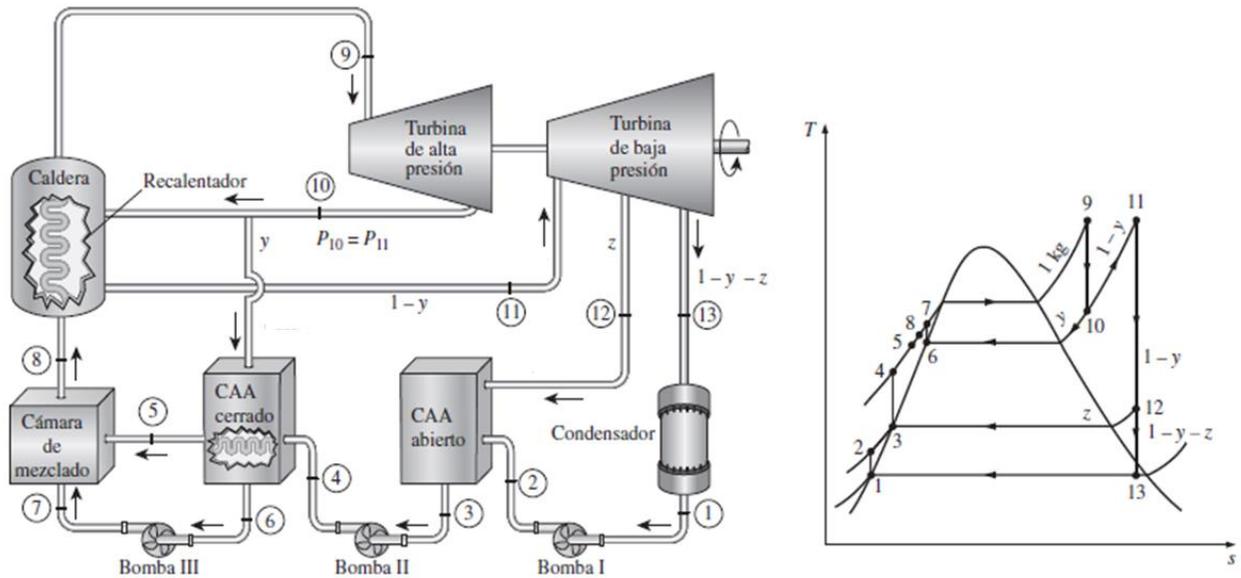


Figura 46. El ciclo Rankine ideal regenerativo con recalentamiento (Çengel and Boles, 2012).

Para los diferentes componentes se tiene lo siguiente:

Para la Caldera:

$$q_{ent} = h_9 - h_8 \quad ; \quad \text{por unidad de masa.}$$

$$\dot{Q}_{ent} = \dot{m}(h_9 - h_8) \quad ; \quad \text{por unidad de tiempo.}$$

Para la turbina de Alta Presión:

$$w_{turb} = h_{10} - h_9 \quad ; \quad \text{por unidad de masa.}$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}(h_{10} - h_9) \quad ; \quad \text{por unidad de tiempo.}$$

Para el Recalentador:

$$q_{ent} = h_{11} - h_{10} \quad ; \quad \text{por unidad de masa.}$$

$$\dot{Q}_{ent} = \dot{m}(h_{11} - h_{10}) \quad ; \quad \text{por unidad de tiempo.}$$

Para la turbina de Baja Presión:

$$w_{turb} = h_{13} - h_{11} \quad ; \quad \text{por unidad de masa.}$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}(h_{13} - h_{11}) \quad ; \quad \text{por unidad de tiempo.}$$

Para el condensador:

$$q_{sal} = h_1 - h_{13} \quad ; \quad \text{por unidad de masa.}$$

$$\dot{Q}_{sal} = \dot{m}(h_1 - h_{13}) \quad ; \quad \text{por unidad de tiempo.}$$

Para la bomba:

$$w_{bomb} = h_4 - h_1 \quad ; \quad \text{por unidad de masa.}$$

$$\dot{W}_{bomb} = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad ; \quad \text{por unidad de tiempo.}$$

En el ciclo real, se consideran las irreversibilidades en diversos componentes, la fricción del fluido y las pérdidas de calor indeseables hacia los alrededores son las dos fuentes más comunes de las irreversibilidades.

De particular importancia son las irreversibilidades que suceden dentro de la bomba y la turbina. Una bomba requiere una entrada de trabajo mayor, y una turbina produce una salida de trabajo más pequeña como consecuencia de las irreversibilidades. En condiciones ideales, el flujo por estos dispositivos es isentrópico. La desviación de las bombas y turbinas reales de las isentrópicas se compensa exactamente empleando eficiencias adiabáticas (Pahuamba, 2017).

Para la bomba:

$$\eta_{bomb} = \frac{W_i}{W_r} = \frac{h_{1i}-h_4}{h_{1r}-h_4}$$

Para la turbina:

$$\eta_{turb} = \frac{W_r}{W_i} = \frac{h_2-h_{3r}}{h_2-h_{3i}}$$

Donde los estados 1r y 3r son los estados de salida reales de la bomba y la turbina respectivamente, 1i y 3i son los estados correspondientes para el caso isentrópico. La eficiencia térmica de este ciclo se expresa como:

$$\eta_{térmica} = \frac{W_{neto}}{Q_{ent}} = \frac{W_{turb}-W_{bomb}}{Q_{ent}} = 1 - \frac{q_{sal}}{q_{ent}}$$

El ciclo Rankine con recalentamiento.

El recalentamiento es un procedimiento mediante el cual no solamente puede lograrse un aumento de la eficiencia termodinámica de un ciclo de Rankine, sino también una reducción del grado de condensación en las turbinas. El ciclo con recalentamiento consiste en permitir que el vapor de la caldera inicialmente sobrecalentado, se expanda primero en una turbina de alta presión hasta una presión a la cual apenas comience la condensación, luego volver a calentar el vapor mediante un proceso a presión constante, en un equipo llamado recalentador (generalmente un haz de tubos en el interior de la caldera) y finalmente expandirlo hasta la presión del condensador en una turbina de baja presión (Figura 47).



Figura 47. Diagrama T-s del ciclo Rankine con recalentamiento.

La incorporación de un recalentamiento simple en una central eléctrica moderna eleva la eficiencia del ciclo en 4 o 5 por ciento, ya que se incrementa la temperatura promedio a la cual el calor se transfiere al vapor. Contiene la planta de producción de agua desmineralizada de alta pureza, para uso en el ciclo de vapor

4.1 Parámetros del proceso

Se recabaron los siguientes datos del proceso termodinámico en la previa investigación del ciclo termodinámico que realiza la Central Nuclear Laguna Verde, se presenta un diagrama de ello en la Figura 48.

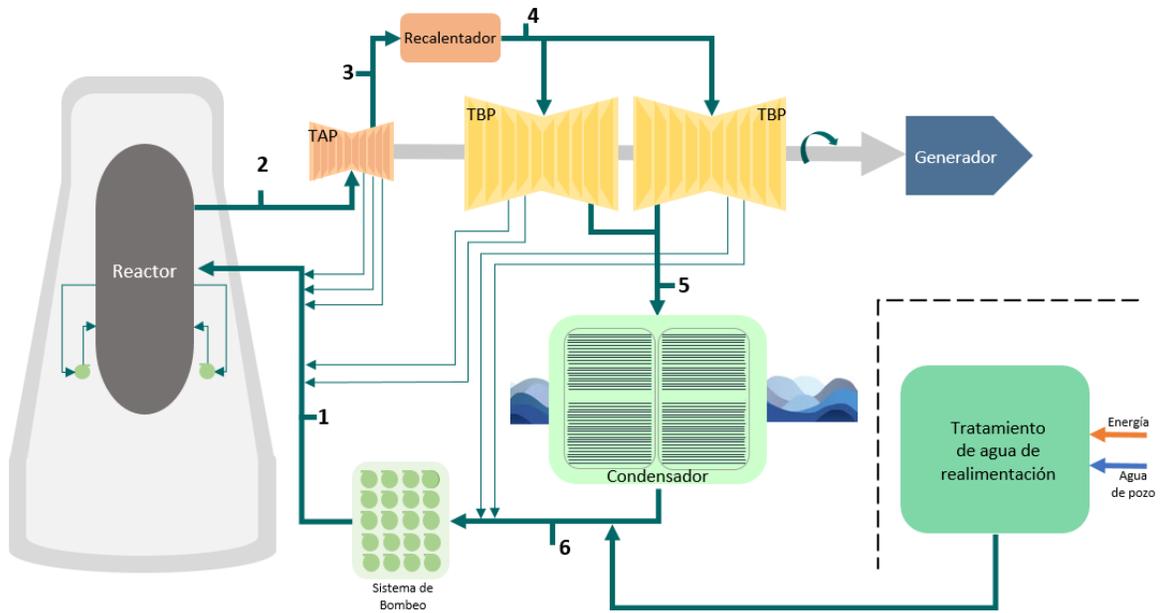


Figura 48. Diagrama del proceso termodinámico analizado en la Central Nuclear Laguna Verde.

Se presentan a continuación los datos con los que se cuentan para realizar el balance térmico:

Estado 1.

$$P_1 = 69.32321 \text{ bar}$$

Estado 2.

$$P_2 = 61.38963 \text{ bar}$$

$$T_2 = 555.15 \text{ K}$$

Estado 3.

$$P_3 = 13.63124 \text{ bar}$$

Estado 4.

$$P_4 = 12.61135 \text{ bar}$$

$$T_4 = 540.05 \text{ bar}$$

Estado 5.

$$P_5 = 0.067727 \text{ bar}$$

Tanto la planta nuclear de Laguna Verde funciona con reactores tipo agua en ebullición de ciclo directo; es decir, el vapor se genera en el núcleo del reactor y pasa a mover las turbinas para después ser condensado y regresar a un ciclo cerrado de nueva cuenta a enfriar el reactor y producir de nuevo vapor.

4.1.1 Simulación del proceso de la planta Nuclear Laguna Verde

Se simuló el proceso de la planta nuclear Laguna Verde, en el software TermoGraf v5.7 tomando en cuenta las siguientes condiciones:

Como se muestra en las Figuras 49 y 50, fue un diagrama T-s, tomando en los dispositivos un control de masa, unidades en Energía, y agua como flujo de trabajo.

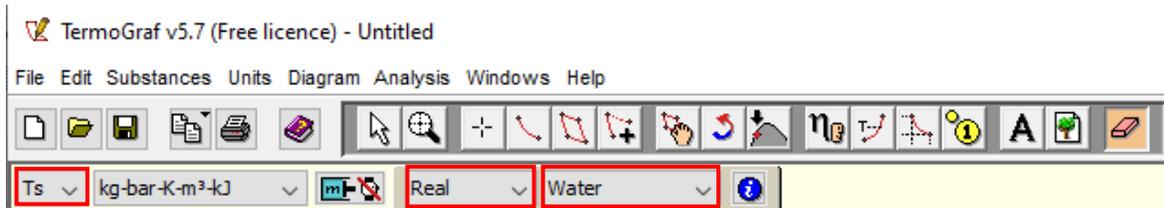


Figura 49. Condiciones con las que se simuló el proceso termodinámico en TermoGraf v5.7.

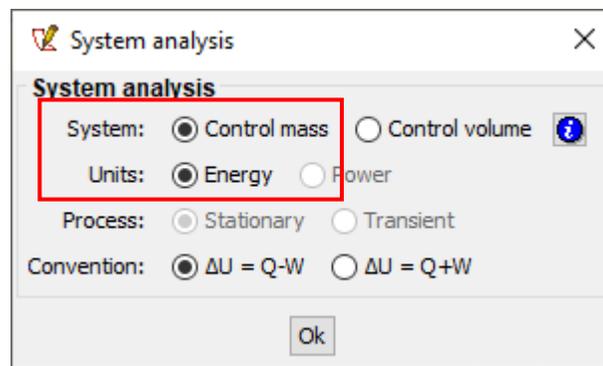


Figura 50. Condiciones de análisis para el proceso termodinámico en TermoGraf v5.7.

Una vez seleccionadas las condiciones de operación, se modeló cada proceso con base a datos con los que se contaba de cada proceso, de igual forma, cabe mencionar que el modelo que se simuló se realizó sin contar las extracciones tanto de la Turbina de Alta Presión, como de las Turbinas de Baja Presión, ya que se desconocen datos de puntos de reinserción de dichas extracciones al ciclo, quedando el ciclo desarrollado de la siguiente forma:

1. Proceso 1-2.

En este proceso del punto 1 al 2, el flujo es calentado aumentando su temperatura en el reactor, cambiando de estado líquido a vapor como se observa en el diagrama de la Figura 51.

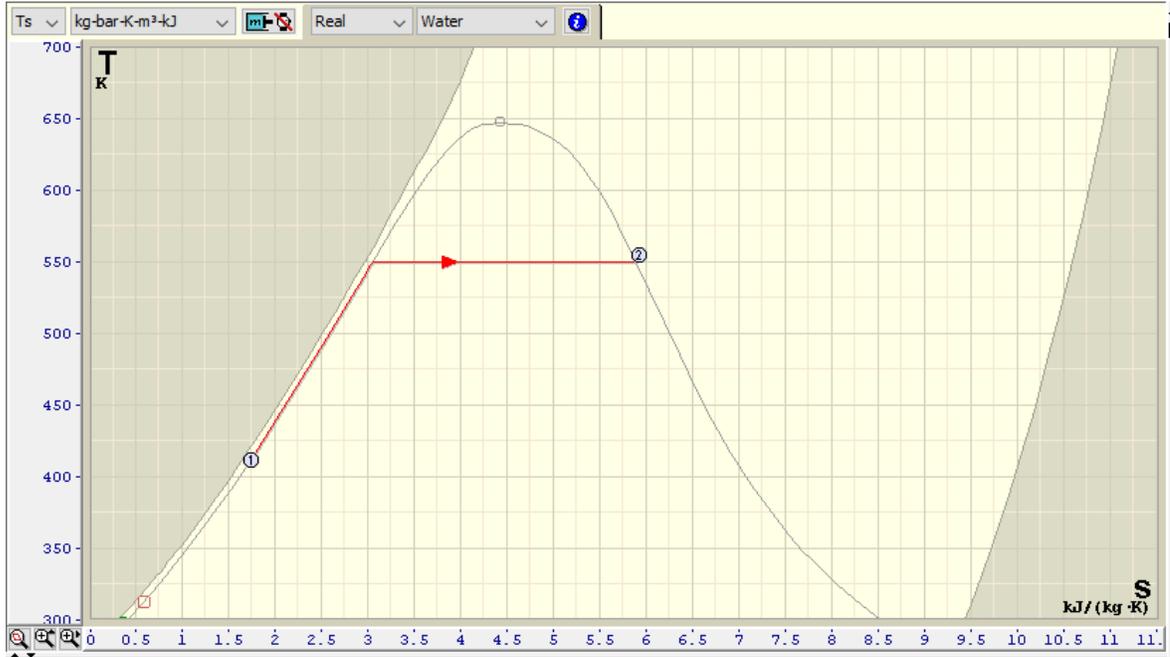


Figura 51. Simulación del Proceso 1-2 del ciclo termodinámico.

2. Proceso 2-3.

En este proceso el flujo de trabajo sale del reactor como vapor y es conducido a la turbina de alta presión, en donde disminuye su temperatura y presión como se muestra en el diagrama de la Figura 52.

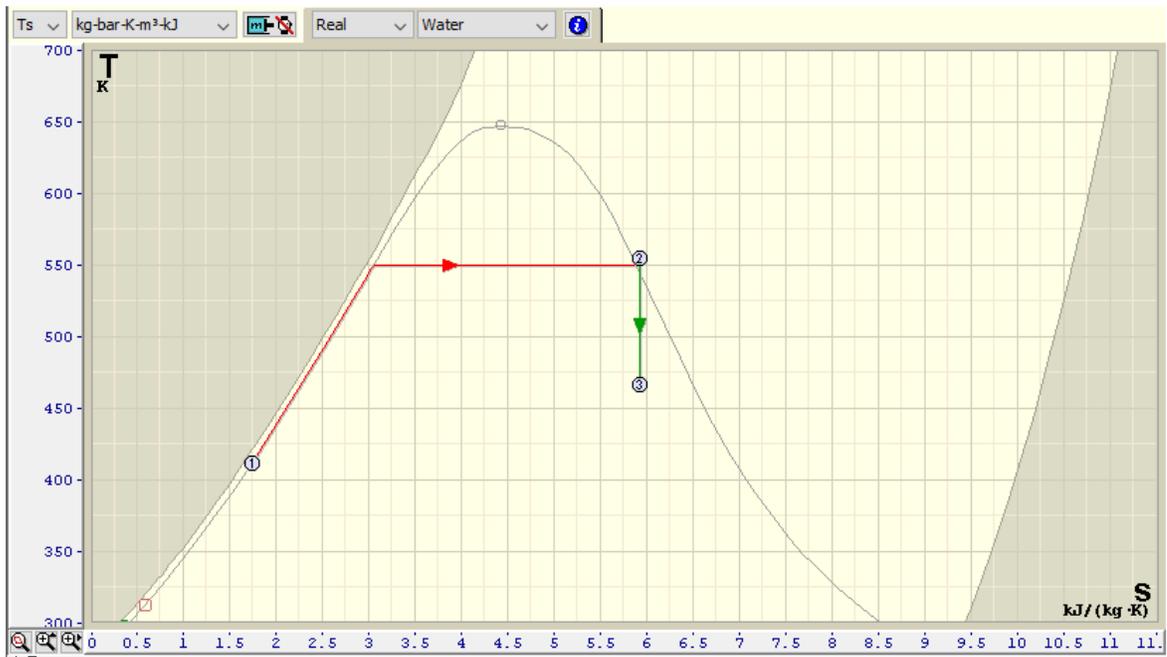


Figura 52. Simulación del Proceso 2-3 del ciclo termodinámico.

3. Proceso 3-4.

En este proceso el fluido pasa a un recalentador en donde se aprovecha la energía térmica con la que ya cuenta el fluido y se le suministra otra cantidad para aumentar su temperatura, como de muestra en el diagrama de la Figura 53.

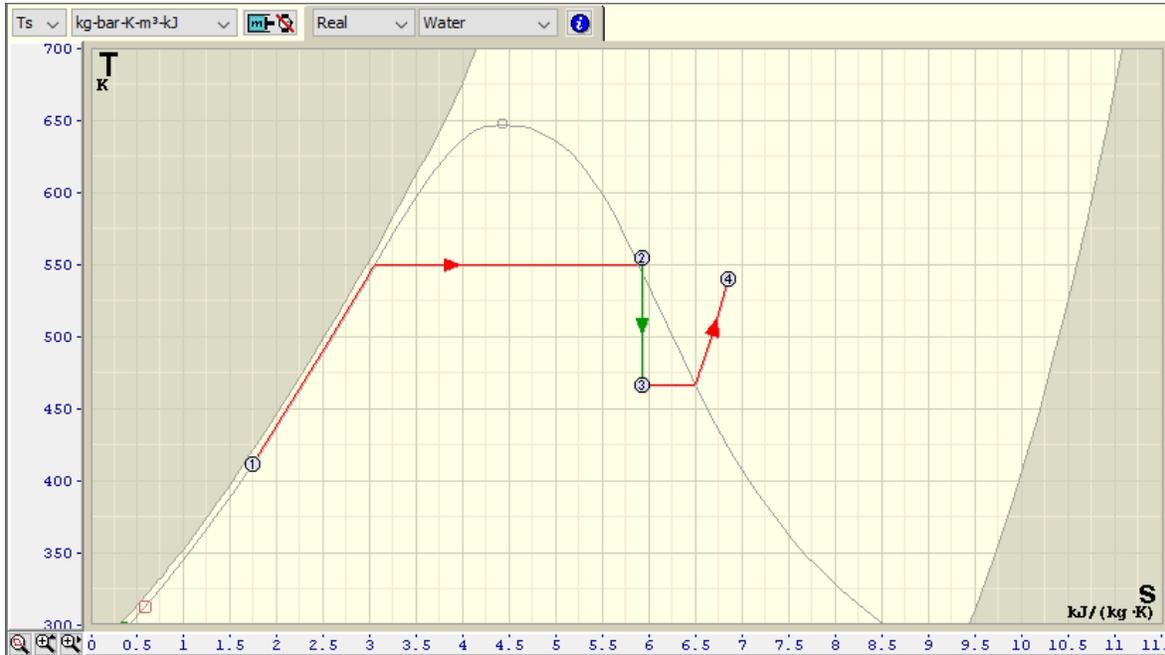


Figura 53. Simulación del Proceso 3-4 del ciclo termodinámico.

4. Proceso 4-5.

En esta parte del proceso, el fluido entra a las dos turbinas de baja presión, en las cuales decae considerablemente su temperatura y presión, como se muestra en el diagrama de la Figura 54.

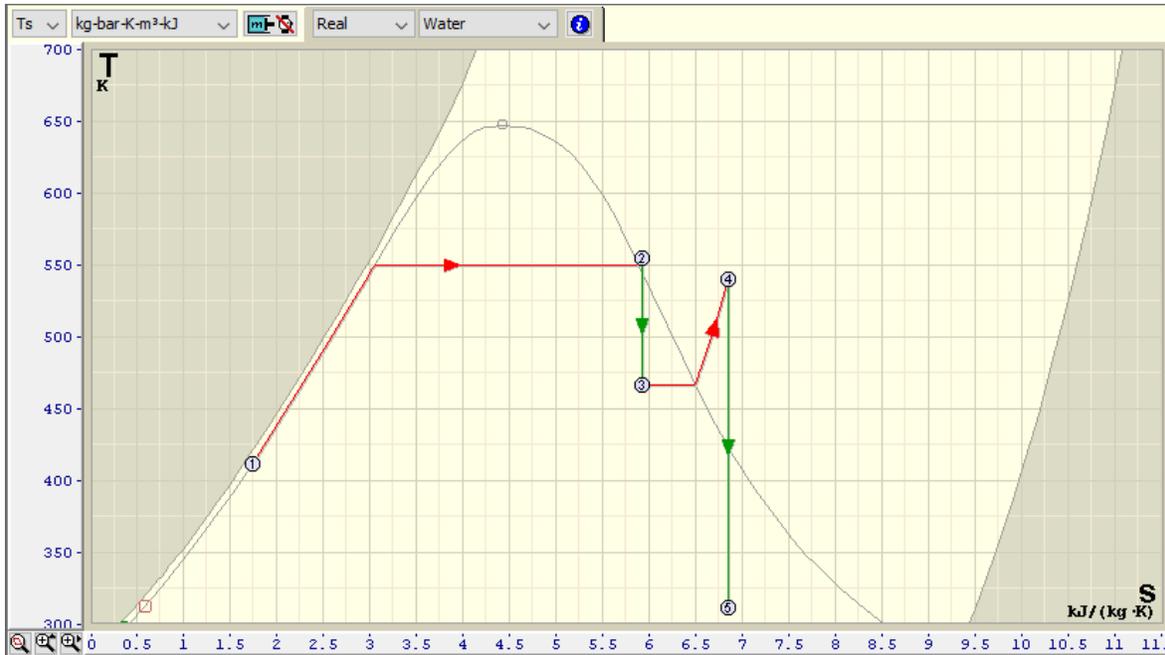


Figura 54. Simulación del Proceso 4-5 del ciclo termodinámico.

5. Proceso 5-6.

En esta parte del proceso, el fluido es condensado para poder ser bombeado nuevamente al reactor y repetir el ciclo, como se muestra en el diagrama de la Figura 55.

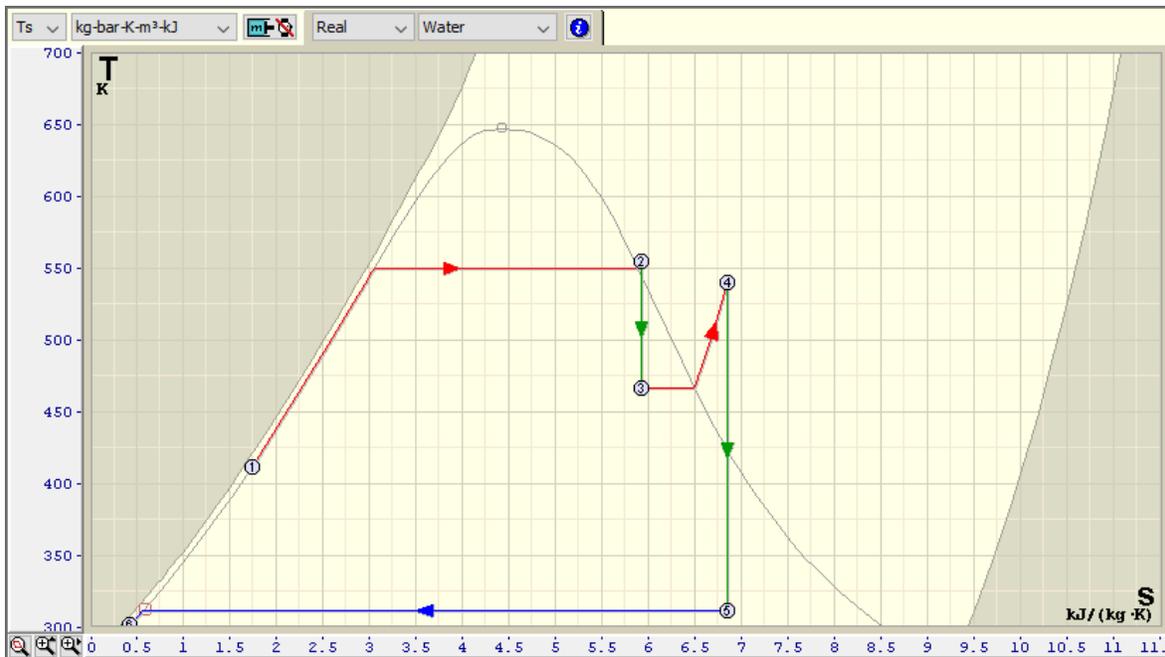


Figura 55. Simulación del Proceso 5-6 del ciclo termodinámico.

El proceso del ciclo termodinámico completo se muestra en el diagrama de la Figura 56.

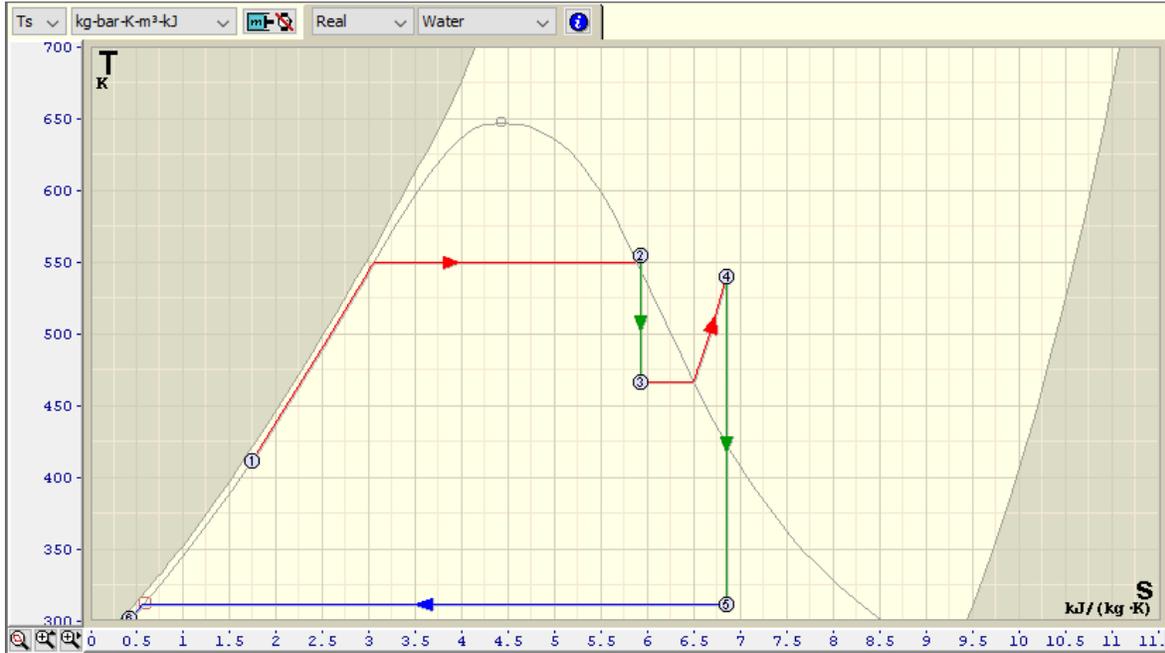


Figura 56. Proceso completo del ciclo termodinámico.

Los resultados de la simulación se muestran en la Tabla 20 y en la Tabla 21:

Tabla 20. Resultados de la simulación de cada Estado en el ciclo termodinámico.

Estado	P (bar)	v (m ³ /kg)	T (K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg·K))	X
Estado 1	61.390	0.001	364.517	381.228	387.584	1.205	---
Estado 2	61.390	0.032	555.150	2605.050	2804.230	5.918	---
Estado 3	13.631	0.125	466.936	2355.830	2526.780	5.918	0.867
Estado 4	13.631	0.175	540.050	2728.330	2966.610	6.834	---
Estado 5	0.068	17.198	311.497	2001.360	2117.840	6.834	0.812
Estado 6	0.068	0.001	301.497	118.283	118.290	0.412	---

Tabla 21. Resultados de la simulación de cada Proceso en el ciclo termodinámico.

Proceso	m (kg)	W (kJ)	Q (kJ)	ΔU (kJ)	ΔH (kJ)
Proceso 1-2	1142.92	2.20E+05	2.53E+06	2.31E+06	2.53E+06
Proceso 2-3	1142.92	2.85E+05	0	-2.85E+05	-3.17E+05
Proceso 3-4	1142.92	76961.7	5.03E+05	4.26E+05	5.03E+05
Proceso 4-5	1142.92	8.31E+05	0	-8.31E+05	-9.70E+05
Proceso 5-6	1142.92	-1.33E+05	-2.29E+06	-2.15E+06	-2.29E+06

Las propiedades termodinámicas se obtuvieron en función de los datos de temperaturas y presiones de entrada y salida de los sistemas, tomándose como referencia las condiciones normales de operación para el funcionamiento de la central nucleoelectrónica.

Balance de energía.

El balance de energía de cada proceso se determina mediante la aplicación de la primera Ley de la termodinámica, teniendo que para cada sistema la energía de entrada será igual a la energía de salida, donde se obtendrá la energía presente en forma de calor y/o trabajo en cada etapa, siendo ésta:

$$\sum (Q_e - Q_s) - \sum (W_s - W_e) + \sum m_e(h_e + ec_e + ep_e) - \sum m_s(h_s + ec_s + ep_s) = \Delta E_{sist}$$

Siendo:

$$\Delta E_{sist} = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p$$

Para el análisis de calor y trabajo en los dispositivos del proceso se toma en cuenta que:

$$(Q_{ent} - Q_{sal}) + (W_{ent} - W_{sal}) = h_{sal} - h_{ent}$$

La transferencia de calor o trabajo realizado por los dispositivos se calcula a partir de las entalpías de entrada y salida. A continuación, se expresan las ecuaciones para cada sistema:

-Reactor:

El reactor tiene como función calentar el fluido de trabajo. La siguiente ecuación, proporciona el cálculo de energía térmica en el reactor.

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

-Turbina Alta Presión:

En la turbina el flujo sufre una expansión, esto se verá reflejado a la salida del flujo, puesto que la presión y la temperatura serán menores a la salida. La siguiente ecuación, calcula el trabajo ideal de la turbina.

$$\dot{W}_{Ti} = \dot{m}(h_2 - h_3)$$

Con la eficiencia de la turbina se podría calcular el trabajo real o de flecha realizado, calculándolo con:

$$\dot{W}_T = \eta_T \dot{W}_{Ti}$$

Y el calor perdido en la turbina se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_T = \dot{W}_{Ti} - \dot{W}_T$$

-Recalentador:

El recalentador se divide en dos circuitos.

$$\dot{Q}_{Int} = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

-Turbinas Baja Presión:

Se utilizarán las mismas ecuaciones que se utilizaron para la turbina de A.P. pero con sus entalpías respectivas.

$$\dot{W}_{Ti} = \dot{m}(h_4 - h_5)$$

- Condensador.

$$Q_{sal} = (h_5 - h_1)$$

- Bombas de recirculación.
Con $q=0$

$$W_{Bomba\ ent} = (h_2 - h_1) \quad \text{o} \quad W_{Bomba\ ent} = v(P_2 - P_1)$$

$$\text{Donde } h_1 = h_f \text{ a } P_1 \quad \text{y} \quad v \cong v_1 = v_f \text{ a } P_1$$

Para calcular la eficiencia teórica total se tiene que:

$$\eta_{térmica} = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{Q}_{ent}} = \frac{\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{bomb}}{\dot{Q}_{ent}} = 1 - \frac{q_{sal}}{q_{ent}}$$

Siendo:

$$q_{sal} = 2285000 \text{ kJ} \quad ; \quad q_{ent} = 502700 \text{ kJ} + 2533000 \text{ kJ} = 3035700 \text{ kJ}$$

Queda:

$$\eta_{térmica} = 1 - \frac{2285000 \text{ kJ}}{3035700 \text{ kJ}}$$

Por lo que:

$$\eta_{térmica} = 1 - \frac{2285000}{3035700} = 0.24729058$$

$$\eta_{térmica} = 24.72\%$$

Se calculó que la eficiencia teórica de la planta es de 24.72%, una eficiencia regular para una planta nuclear total es considerada entre el 30% y el 40% (Planas, 2009). Ésta eficiencia se planea incrementar al proponer un proceso de cogeneración, aplicándolo a desalinización de agua.

4.2 Acoplamientos teóricos de desalinización

Se planteará principalmente el modelo al cual se pretende desarrollar cálculos para la cantidad de calor rechazado aprovechable y para así determinar a su vez el dispositivo teórico de transformación de calor a energía, y la cantidad de agua que podrá ser tratada con esa misma.

Del modelo anteriormente presentado, se analizarán las condiciones que presenta el intercambiador de calor (Figura 57) y así, determinar la cantidad de calor que podrá ser aprovechada por el dispositivo a utilizar.

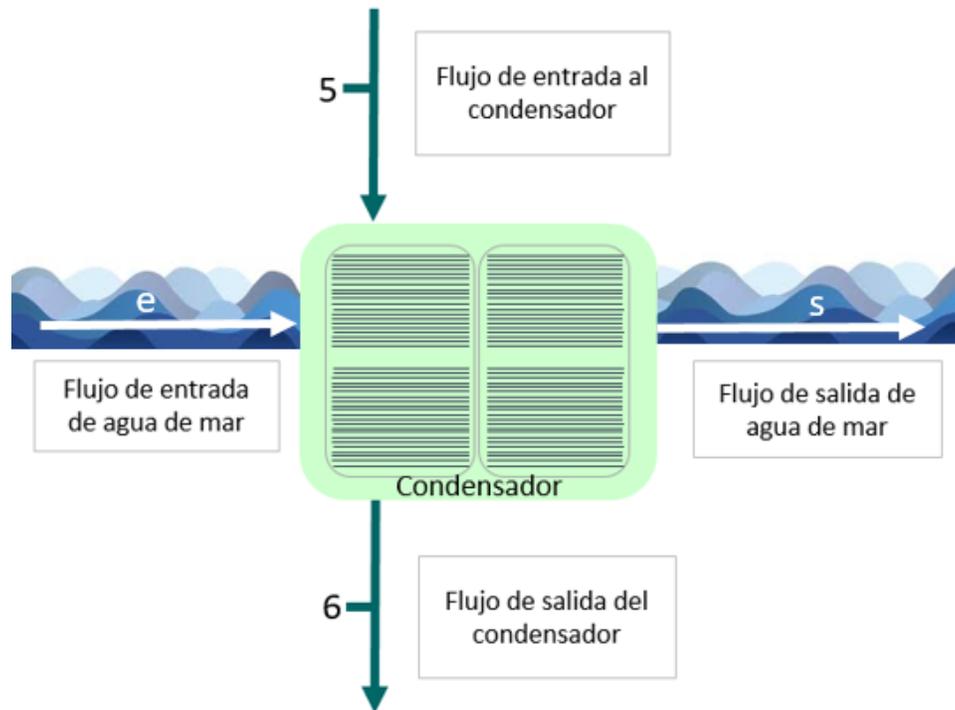


Figura 57. Condiciones del intercambiador de calor.

Las condiciones que se presentan en cada punto son:

-Flujo de entrada de agua del proceso al condensador, flujo 5.

$$T_5 = 38.347^{\circ}C$$
$$h_5 = 2117.84 \frac{kJ}{kg}$$

-Flujo de salida de agua del proceso del condensador, flujo 6.

$$h_6 = 230.621 \frac{kJ}{kg}$$

-Flujo de entrada de agua de mar al condensador, flujo e.

Para determinar las condiciones de éste punto, se identificó la temperatura inicial a la que se encuentra el agua de mar a una profundidad no mayor a 100m, y en la región en la que se encuentra

la CNLV, considerada zona tropical, la cual se presenta en un rango de 22°C a 25°C (Cifuentes Lemus, Torres-García and Frías Mondragón, 2002), por lo que se tomará un rango medio de temperatura de 23.5°C.

$$T_e = 23.5^{\circ}C$$

Y una presión en un rango de 1019 hPa a 1025 hPa, por lo cual se tomará un rango medio de 1023 hPa.

$$P_e = 1023 \text{ hPa}$$

-Flujo de salida de agua de mar del condensador, flujo s.

Para definir la temperatura de salida, se tomó como referencia los grados de centrales nucleares eléctricas que utilizan agua de río como refrigerante, y su diferencia de temperatura ronda los 3°C para proteger la flora y fauna al regresar el agua al río (Sociedad Nuclear Española, 2020), en la CNLV al regresar el agua al mar, se hace pasar por un canal abierto de 1680 m de longitud para disipar el calor transferido por el vapor (Lozano Laez, 1995), pero se sabe que la temperatura del agua de circulación incrementa 10 °C a su paso por el condensador (Aguirre Sánchez, 2015), por lo que la temperatura de salida considerada será de 33.5°C.

$$T_s = 33.5^{\circ}C$$

Y la presión de salida será considerada igual que la de entrada.

$$P_s = 1023 \text{ hPa}$$

Para evaluar la cantidad de calor rechazado en este proceso, se realizará un balance de energía en el condensador, utilizando la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a C_p \Delta T \text{ (kW)}$$

En donde:

$$\dot{Q}_a = \text{Calor rechazado}$$

$$\dot{m}_a = \text{Flujo másico del agua de mar}$$

$$C_p = \text{Cp del agua de mar}$$

$$\Delta T = \text{Diferencia de temperaturas}$$

Quedando:

$$\dot{Q}_a = \left(27800 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \left(0.94 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^{\circ}C}\right) (33.5^{\circ}C - 23.5^{\circ}C)$$

$$\dot{Q}_a = 261320 \text{ kW}$$

Si el calor rechazado de 261320000W es igual a una superficie efectiva total de 48710m² del condensador, se supondrá que para transferir 1W de calor, la superficie efectiva será de $1.864 \times 10^{-4} \text{m}^2$.

El calor rechazado pasará por una conversión de termoeléctrica para así ser cogenerado y utilizado en la planta de tratamiento de agua, el diagrama de la configuración se presenta en la Figura 58.

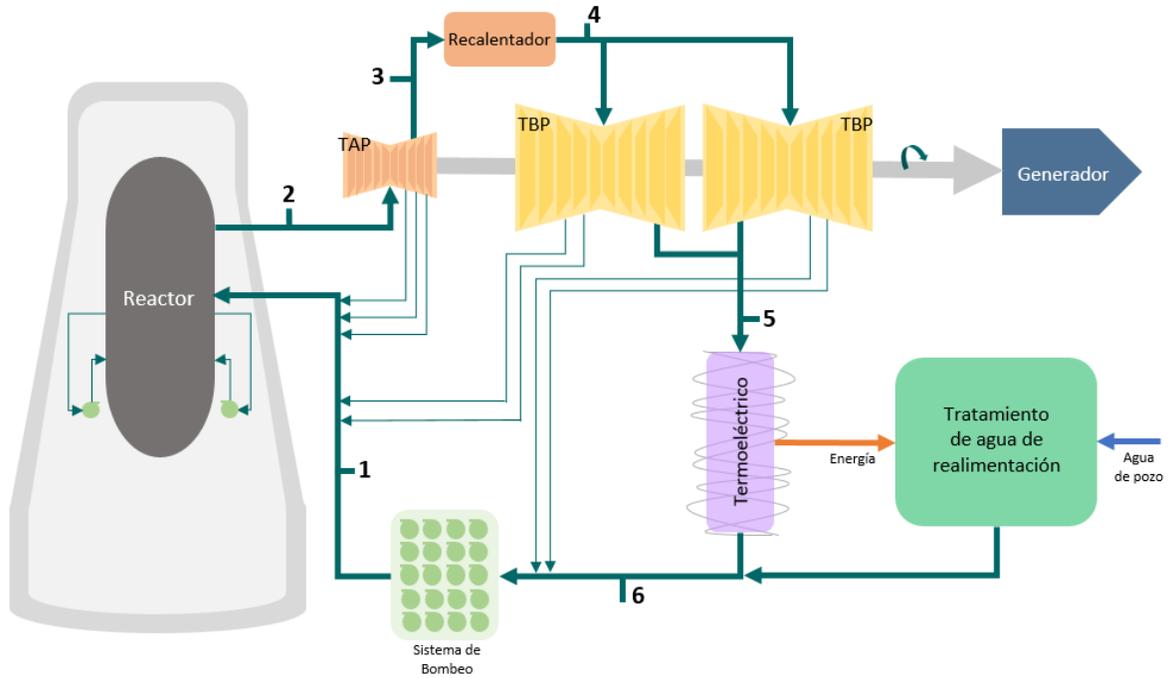


Figura 58. Diagrama del ciclo termodinámico de la Central Nuclear Laguna Verde con la configuración de cogeneración.

Se realizará el análisis de transformación de energía en el dispositivo termoelectrico, representado en el diagrama de la Figura 59.

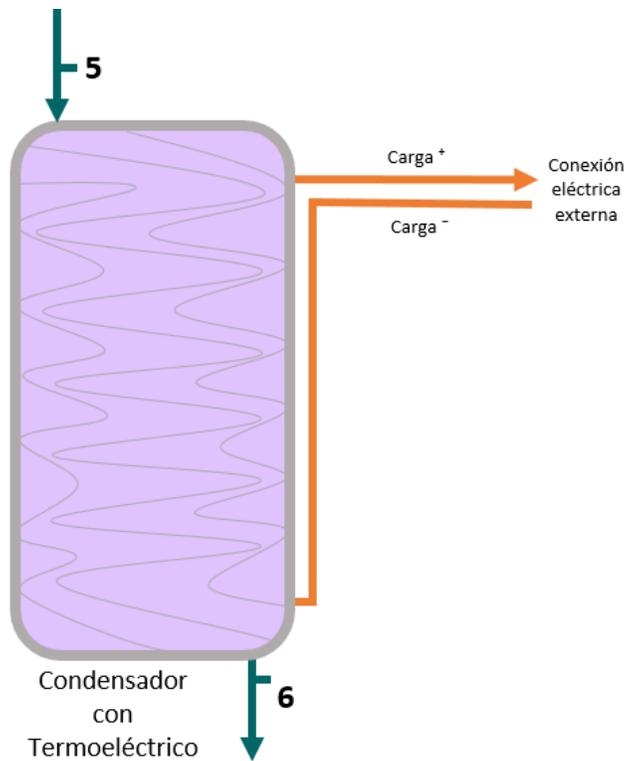


Figura 59. Condensador con dispositivos termoelectricos acoplados.

Para obtener la potencia requerida para desalinizar la cantidad de agua requerida para solventar la pérdida, aprovechando el calor rechazado de 261320 kW, considerando una condición de transferencia de calor ideal hacia el dispositivo, se planteó utilizar generadores termoeléctricos comerciales conectados en serie, éstos tipos de termogeneradores siguen en investigación y desarrollo, para mejorar sus eficiencias.

Se propondrán generadores termoeléctricos eTEG™ HV56, de Nextreme Thermal Solutions, capaces de producir 1.5mW de potencia y un voltaje de circuito abierto de 250 mV a una diferencia de temperatura de 10 °K, contando con una superficie de 11mm² y 0.6mm de espesor (Nextreme Thermal Solutions Inc., 2011).

Utilizando la Ley de Fourier, para cuantificar la conducción $H = \frac{Q}{\Delta t}$, el cual será proporcional al gradiente de temperaturas $\frac{dT}{dx}$ y al área transversal A a la dirección del flujo, queda la siguiente expresión:

$$H = -kA \frac{dT}{dx}$$

Donde k es la conductividad térmica del material, el signo menos es una consecuencia de la segunda ley de la Termodinámica, en donde se requiere que la temperatura fluya de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura.

Se realizará el cálculo para el flujo de calor de la celda, con paredes planas, considerando un estado estacionario, en donde el gradiente de temperatura y el flujo de calor no presenten variaciones en el tiempo, y en donde el área de la sección transversal de la celda permanezca constante.

Se determina el flujo de calor de dicha celda con lo siguiente (Figura 60):

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{T_H - T_C}{dx}$$

Donde:

k = conductividad térmica del material

A = área transversal en la dirección del flujo de calor

$$\Delta T = T_H - T_C$$

T_H = Temperatura del lado más caliente.

T_C = Temperatura del lado más frío.

dx = diferencial de x

Siendo la Resistencia térmica: $R = \frac{k}{L}$

Conociendo que:

Resistencia térmica de la celda: $R = 13.1 \frac{K}{W}$

Conductividad térmica de la celda: $K = 0.076 \frac{W}{Km}$

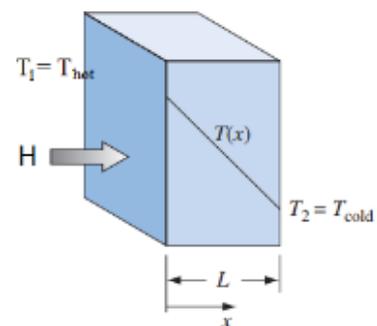


Figura 60. Diagrama del fenómeno de transferencia de calor por conducción.

Quedando lo siguiente:

$$H = - \left(0.076 \frac{W}{Km} \right) (0.000011m^2) \left(\frac{10K}{0.0006m} \right)$$

$$H = -0.0139333 (W)$$

Que es el calor conducido y aprovechado por una celda, por lo que, para transformar los 261.32 MW, se requerirá de una superficie efectiva total de 18755.024m², con los que se podrá obtener un total de 28.1325MW generados, de los cuales, se podrá obtener la energía requerida para el proceso de desmineralización.

Para poder determinar el tipo de desmineralizador que se ocupará, se requiere determinar la calidad de agua de entrada, así como la calidad del agua producto, tomando en consideración que el tipo de agua con la cual trabaja la central es agua de pozo con un tratamiento para su disposición en el proceso del reactor y de los demás sistemas, ésta agua de pozo proviene, según lo mencionado en la visita de campo a la Central Nuclear de Laguna Verde, de un pozo que se encuentra en una parte de la Costera de Veracruz llamada “El Viejón” (Figura 61), sin embargo, no se cuenta con información gubernamental que respalde dicha información. Los pozos existentes en la región de la Costera de Veracruz, incluyendo el pozo de donde se extrae el agua para la planta, varían en la calidad de agua que presentan conforme éstos se acercan cada vez más a la costa, aumentando en la cantidad de STD. La concentración de STD presenta valores que varían de 256 ppm a 568 ppm; que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la norma mencionada para el agua potable (CONAGUA, 2018a).

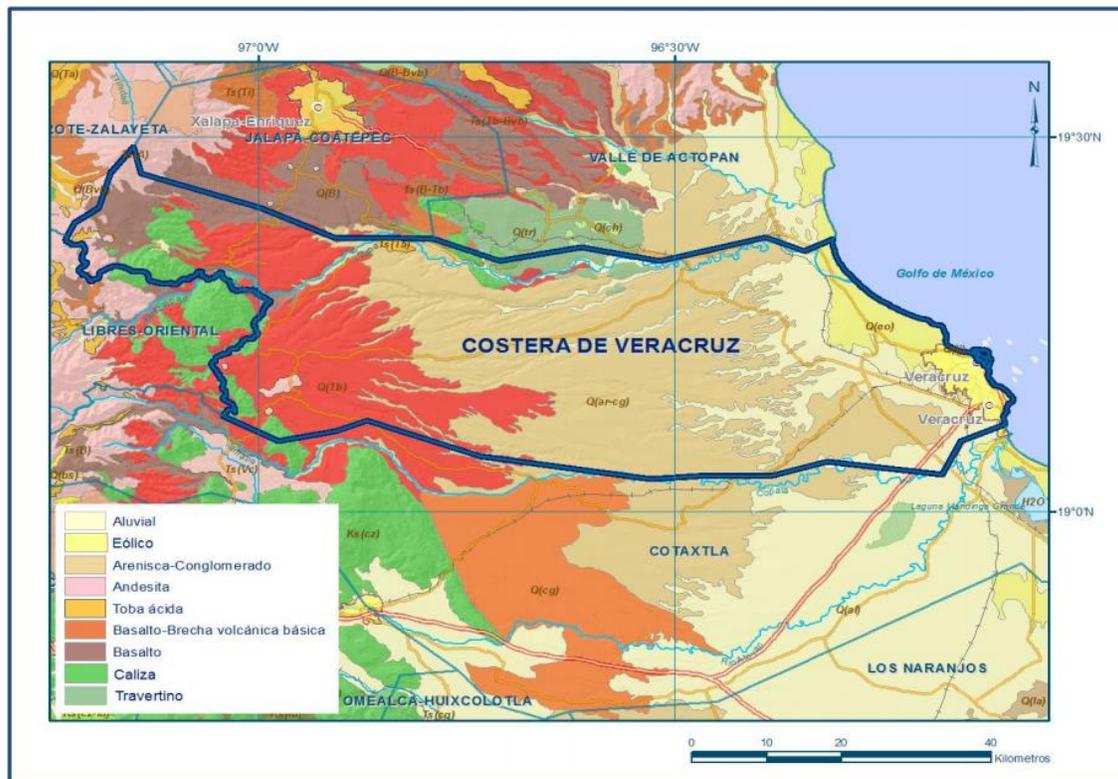


Figura 61. Geología general de los acuíferos en la Costera de Veracruz (CONAGUA, 2018a).

La localidad de “El Viejón” se encuentra cercana a la costa (Figura 62), por lo que se tomará en cuenta para el análisis una cantidad media del rango de ppm que es de 412 ppm y el rango máximo, que es de 568 ppm.

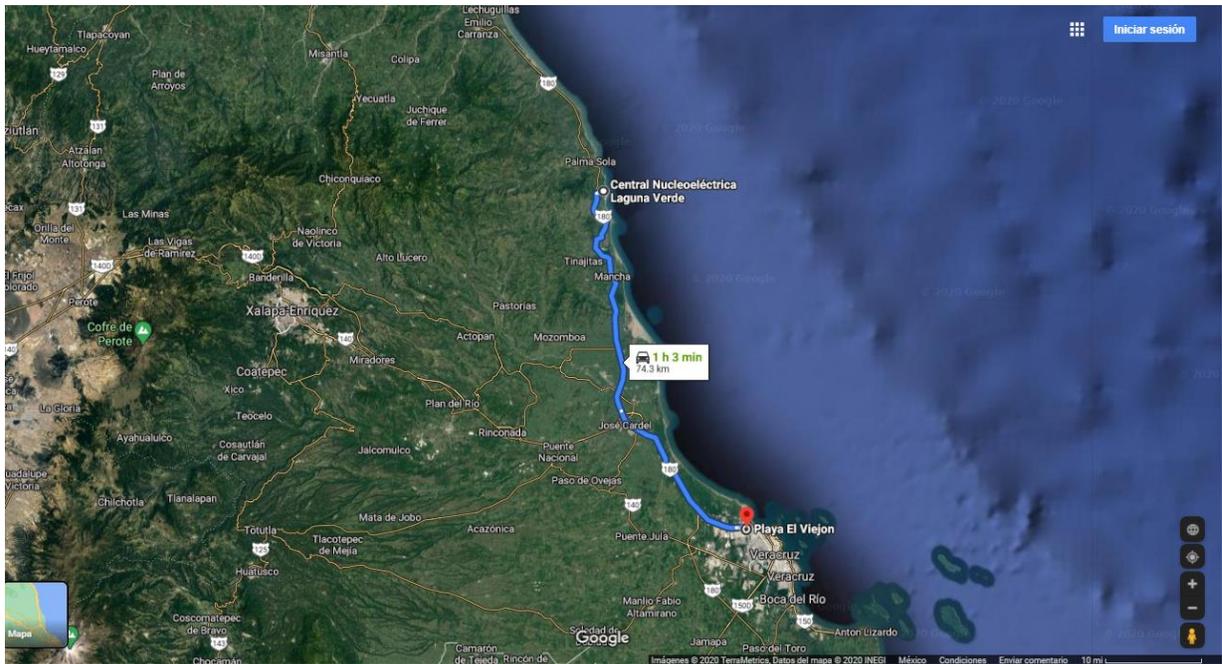
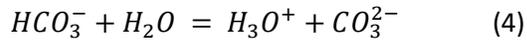
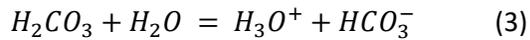
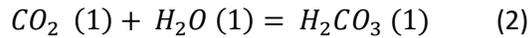
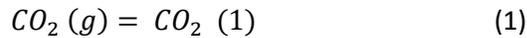


Figura 62. Distancia de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde a la región del pozo en “El Viejón” (Google Maps, 2020).

La calidad de agua producto a la cual se buscará llegar debe cumplir los requisitos de calidad y ser utilizada como el agua con la que opera el reactor y los sistemas de transformación termodinámica del proceso.

En la gran mayoría de los reactores de investigación y de energía comercial en todo el mundo, el agua es una fuente primaria de componentes de refrigeración para eliminar el calor de los productos de fisión y para la moderación de neutrones. La mayoría de estos se ven afectados directamente por la calidad del agua, ya que la misma tiene que ver con la operación a largo plazo de las instalaciones de los reactores, incluidos los sistemas de almacenamiento de agua para combustible nuclear, por lo que requiere ciertos parámetros en la calidad del agua, para evitar el deterioro como corrosión de los materiales metálicos que se utilizan comúnmente en éstos sistemas.

El pH y la conductividad son los dos parámetros más utilizados en la caracterización de la calidad del agua. El agua pura tiene poca conductividad, pero conduce débilmente la corriente eléctrica que indica la presencia de iones, es decir, H^+ y OH^- , la molécula del agua disociada. A $25^\circ C$, el $10^{-5} \%$ de las moléculas de agua están ionizadas y el agua pura tiene un valor de pH de 7. Sin embargo, esta es solo el caso de un volumen de agua completamente aislado. En la mayoría de los casos el agua está expuesta a una atmósfera con una determinada composición como el aire. Se absorberán componentes de la atmósfera (disueltos) en el agua y posteriormente reaccionar con él. Un componente prominente en el aire es el CO_2 , que se disuelve y reacciona con el agua de acuerdo con las reacciones que comienzan con (1), el equilibrio entre CO_2 en el aire y disuelto en el agua:



El efecto final de la absorción de CO_2 por el agua de la atmósfera es la formación de más H^+ , con la consiguiente reducción del pH a 5.7 para la actual concentración atmosférica de aproximadamente 300 ppm de CO_2 (Sindelar, R.L. Chandler, G.T. Mickalonis, 2010).

La Agencia Internacional de Energía Atómica, recomienda un seguimiento de los siguientes parámetros de composición en la primera etapa (Tabla 22), para la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde, se ocupará dicho valor recomendado del límite de Sólidos permitidos en la calidad del agua ligera o de moderación, la cual es < 5mg/L, o 5ppm (IAEA, 2011).

Tabla 22. Parámetros físico-químicos recomendados, límites y seguimiento de frecuencias para el agua en la pérdida de combustible (decaimiento radiactivo) y pilas de almacenamiento (IAEA, 2011)

Parameter	Value (limit)	Monitoring frequency
pH	4.5 to 7	Weekly
Conductivity	< 10 μ S/cm	Weekly
Solids	< 5 mg/L	Every six months
Cu concentration	< 0.1 mg/L	Every six months
Cl concentration	< 0.1 mg/L	Every six months
Nitrate (NO ₃), mg/L	< 10 mg/L	Every six months
Sulphate (SO ₄ ²⁻), mg/L	< 10 mg/L	Every six months
Fe concentration	< 1.0 mg/L	Every six months
Al concentration	< 1.0 mg/L	Every six months
Temperature	< 45°C	Monthly
Radioactivity level (*)	(See note below)	Weekly
Turbidity (**)	(See note below)	

Para seleccionar el tipo de desalinizador más adecuado, se requiere definir el tipo de agua de entrada y agua producto, en este caso el agua producto es la utilizada del pozo de agua de la localidad “El Viejón”, con la cual se realizará el análisis de 568 ppm; para el agua producto, se buscará generar agua ligera para el reactor, con una calidad < 5 ppm.

Ahora bien, el cálculo para poder determinar la cantidad de agua con la que opera el reactor es el siguiente:

El flujo de entrada másico al reactor es de 4527.7 Ton/h, con lo cual, se obtienen las siguientes transformaciones de unidades:

Total de agua ligera que entra al reactor:

$$4527.7 \frac{\text{Ton}}{\text{hr}} = 4106623.9 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} = 4106623.9 \frac{\text{lt}}{\text{h}} = 4106.624 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Total de agua de enfriamiento que viene del mar: $27.8 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 27800 \frac{\text{lt}}{\text{s}}$

Con un total de 108664.8 Ton/día los necesarios para el funcionamiento del reactor.

Con lo que se llega a la cantidad de agua perdida en la central, tomando en cuenta un porcentaje de pérdida del 5%, se considerará una pérdida media de 205.3312m³/h.

Una vez realizado el análisis termodinámico, se obtuvo que el calor residual aprovechable para cogeneración sería de 261.32 MW. Se seleccionará un tipo de acoplamiento teórico ya existente, utilizando sus parámetros de operación más eficientes.

La técnica más utilizada actualmente a nivel mundial para desalar agua es la Ósmosis Inversa, que alcanza casi el 70% del total; seguida de la MSF (18%), la MED (7%), la Nanofiltración (3%) y por último la Electrodialisis (2%) (AEDyR, 2019b).

Algunos acoplamientos que pueden utilizarse para aprovechar el calor residual son los que se muestran a continuación (Tabla 23), mencionando el porcentaje de eficiencia aproximado para cada uno de los procesos:

Tabla 23. Parámetros de operación y diseño de distintos procesos de desalinización.

Parámetros de diseño del proceso: desalinización	
Proceso	% Eficiencia
Térmicos	
CV-Compresión de Vapor	-
MED-Destilación Multiefecto	7%
MSF-Destilación Fash Multietapa	18%
Mecánicos (Presión)	
RO	70%
Nanofiltración	3%
Eléctrico (Campo eléctrico)	
Electrodialisis	2%

Por los porcentajes de eficiencia, se elegirá el proceso de desalinización de ósmosis inversa para ésta propuesta, ya que cuenta aproximadamente con 70% de eficiencia.

Ósmosis inversa:

Actualmente el consumo energético de una planta desalinizadora de agua de mar por ósmosis inversa es de alrededor de 3 kWh/m³ (para agua de mar), mientras que en las primeras plantas de evaporación era de más de 50 kWh/m³ (AEDyR, 2019a).

Considerando que el agua de mar presenta ≈40000 ppm, se considerará para agua de pozo, tomando en cuenta el rango máximo, una calidad de 568 ppm, por lo que la energía requerida será de 0.0608571 kW/m³.

El agua producto se utilizaría en la central, y el consumo de agua para realimentación sería analizado para un 5% de pérdida, que son 205.3312m³/h, para retroalimentar en la planta y que tenga un correcto funcionamiento.

Se toma en cuenta los porcentajes de eficiencia de los distintos procesos de desalinización (Tabla 26), por lo que el análisis se enfocará al proceso de desalinización por Ósmosis Inversa, que es el proceso más eficiente, por lo cual se requiere analizar el proceso de la siguiente forma, calculando presión osmótica de las membranas en el dispositivo:

La presión osmótica de una disolución se puede calcular con la ley de Van't Hoff (Estevan and García, 2007):

$$P_o = i \cdot M \cdot R \cdot T$$

En donde:

P_o es la presión osmótica que se pretende calcular, expresada en atm.

i es el "factor de Van't Hoff" y se expresa el grado de disociación del soluto.

M es la concentración molar de la disolución, expresada en moles/litro.

R es la constante de los gases, igual a 0.082 atm x lt/Mol/°K

T es la temperatura en grados Kelvin

Para el agua de entrada que es el agua de pozo, se considera la calidad de 568 ppm mencionada anteriormente y una temperatura promedio de la región entre 25°C y 31°C, la cuál sería de 28°C, igual a 301.15 K. La densidad del agua con 500 ppm de salinidad, a 28°C, será de 0.9962 kg/l, por lo que la densidad de la calidad considerada a la misma temperatura es:

$$568 \text{ ppm} = 1.1315696 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

Y tomando en cuenta el peso molecular del cloruro de sodio es de 58.44, por lo que la concentración molar para 568 ppm, será de:

$$M = \frac{0.568 \frac{\text{g sal}}{\text{kg agua}} \cdot 1.1316 \frac{\text{kg agua}}{\text{l}}}{58.44 \frac{\text{g sal}}{\text{mol}}} = 10.9992 \times 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

Para calcular el factor de Van't Hoff:

Los electrolitos débiles que no se disocian por completo la ecuación de Van't Hoff viene expresada por:

$$i = 1 + a(q - 1)$$

Siendo:

i ; el factor de corrección de Van't Hoff.

a ; el grado de ionización del soluto, que indica qué cantidad de soluto que se disoció.

Q ; el número total de iones liberados en la ionización de un compuesto.

Otra manera de representar el factor de Van't Hoff es a través de la siguiente ecuación:

$$i = \frac{\text{Número real de partículas en disolución después de la disociación}}{\text{Número total de partículas si no se hubiese disociado}}$$

Por lo que quedaría lo siguiente para 568 ppm:

$$i = \frac{5 \text{ ppm}}{568 \text{ ppm}} = 8.8028169 \times 10^{-3}$$

Siendo:

$$i = \text{Factor de Van't Hoff con valor máximo del rango de STD}$$

$$\frac{\text{Número real de partículas en disolución después de la disociación} = 5 \text{ ppm}}{\text{Número total de partículas si no se hubiese disociado} = 568 \text{ ppm}}$$

Ya que la calidad de agua producto a la que se busca llegar es al agua ligera para el reactor, con una calidad < 5 ppm.

Al igual que la calidad del agua obtenida para distintos usos, en este caso, industria (Tabla 24):

Tabla 24. Calidad de agua obtenida por desalinización (Flores Espinosa, Perusquía del Cueto and Ortiz Oliveros, 2004a).

Uso	Sólidos totales disueltos en mg/kg	Características particulares
Industrial	5 - 5,000	Dependiendo de su uso.
Agrícola	< 2,000	Dependiendo del tipo de tierra, clima, métodos de riego, uso de fertilizantes, etc.
Uso humano	< 500	Con características aptas como agua potable, según la Norma Mexicana NOM-011-CNA-2000

Por lo que para calcular el i requerido se tiene que para 568 ppm:

$$i = \frac{5 \text{ STD}}{568 \text{ STD}} = 8.8028 \times 10^{-3}$$

En consecuencia, la presión osmótica del agua de pozo con 568 ppm a 28°C es de:

$$P_o = i \cdot M \cdot R \cdot T = 8.8028 \times 10^{-3} \cdot 10.9992 \times 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot 0.082 \frac{\text{atm} \times \text{l}}{\frac{\text{mol}}{\text{K}}} \cdot 301.15 \text{ K}$$

$$P_o = 2.391 \times 10^{-3} \text{ atm}$$

La energía necesaria para presurizar un volumen V de cualquier fluido incompresible a la presión P equivale al producto de la presión por el volumen:

$$W = P \cdot V$$

Puesto que la presión en el lado del agua pura es nula, esta será la energía consumida por el volumen de agua V al atravesar la membrana impulsado por la presión P . Si el volumen osmotizado es 1m^3 , el consumo de energía sería:

$$W = P \text{ atm} \cdot 1\text{m}^3 = P \text{ atm} \cdot \text{m}^3 \cdot 0.02815 \frac{\text{kWh}}{\text{atm} \cdot \text{m}^3}$$

$$W = 0.02815 \cdot P \text{ kWh}$$

Esta expresión es generalizable a cualquier proceso de ósmosis inversa desarrollado en condiciones ideales: la energía consumida por 1m^3 de agua al atravesar una membrana de ósmosis inversa, expresada en kWh/m^3 , equivale a la presión del trabajo P expresada en atm, multiplicada por el factor de conversión de la unidad de energía $\text{atm} \cdot \text{m}^3$ a la unidad kWh que es 0.02815.

Dado que la presión osmótica P_o de una disolución es aquella a la que se pone en marcha el proceso de ósmosis inversa, la energía mínima necesaria para extraer 1m^3 de agua pura a partir de una disolución mediante un dispositivo ideal de ósmosis inversa será:

$$W_{\min} = 0.02815 \times P_o \text{ (kWh)}$$

Para el agua de pozo en las condiciones descritas anteriormente, la presión osmótica será:

$$P_o = 2.391 \times 10^{-3} \text{ (atm)}$$

Por consiguiente, la mínima energía para desalinizar 1m^3 de agua de pozo con 568 ppm de calidad, a 28°C mediante un dispositivo de ósmosis inversa, en condiciones ideales, de:

$$W_{\min} = 0.02815 \text{ (kWh)} \times 2.391 \times 10^{-3} \text{ (atm)} = 6.73069 \times 10^{-5} \text{ (kWh)}$$

Por lo que la potencia mínima requerida para desalinizar 1m^3 de agua de entrada con calidad 568 ppm a calidad 5 ppm del agua de salida expresada en Watts, será la siguiente:

$$W_{\min} = 0.00673069 \times 10^{-5} \text{ (W)}$$

Esta sería la energía mínima para generar agua con calidad de agua ligera, con calidad inicial de agua de pozo con 568 ppm.

Si el proceso de ósmosis inversa presenta una eficiencia del 70%, se requerirá de 17.9663 kW para realizar el proceso y desalinizar 205.3312m^3 que se requieren reponer en la planta.

Dicha energía se considerará para el funcionamiento de la planta, junto con la que requieren las bombas de recirculación en el ciclo, las cuales son 22 y cada una trabaja a 4500hp, también se contará la energía del excitador para el funcionamiento del generador, por lo cual, sumando éstas cifras, da un total de:

$$0.01796 \text{ kW} + 9366.43 \text{ kW} = 9366.448 \text{ kW} = 9.366 \text{ MW}$$

Éstos 9.366 MW son los que requerirá la planta para funcionar en condiciones normales; con la propuesta de cogeneración, se cogenerarían 261.32 MW, para utilizar 0.01796 kW en la producción de agua de reposición.

4.2.1 Planteamiento de Inventario de Análisis de Ciclo de Vida

Se planteará el Inventario para realizar el Análisis de Ciclo de Vida, quedando lo siguiente:

Primeras dos tablas serán para el proceso de Generación eléctrica sin cogeneración, para generar 810 MW y para generar 1 MW, para realizar el Análisis de Ciclo de Vida se requiere dejar en términos para generar 1 MW.

- Sin Cogeneración.

Generación eléctrica sin cogeneración, para generar 810 MW (Tabla 25):

Tabla 25. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para generación eléctrica sin Cogeneración, para generar 810 MW.

Para generar 810 MW			
Entradas		Salidas	
Uranio	88 Ton	Energía	810 MW
Agua proceso termodinámico	4106.6239 m ³ /h	Agua-5%	3901.2927 m ³ /h
Energía funcionamiento planta	9.36644796 MW	Energía disipada al mar	261.32 MW
Agua de mar para enfriar	100080 m ³ /h		
Material de tubos condensador	48710 m ²		

Generación eléctrica sin cogeneración, para generar 1 MW (Tabla 26):

Tabla 26. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para generación eléctrica sin Cogeneración, para generar 1 MW.

Para generar 1 MW			
Entradas		Salidas	
Uranio	0.10864 Ton	Electricidad generada	1 MW
Agua proceso termodinámico	5.06990 m ³ /h	Agua-5%	4.81641 m ³ /h
Electricidad funcionamiento planta (mix) (Ya incluye el de ósmosis)	0.01156 MW	Energía disipada al mar	0.322617 MW
Agua mar	123.55555 m ³ /h		
Material de tubos condensador	60.135802 m ²		

- Con Cogeneración.

Generación eléctrica con cogeneración, para generar 810 MW (Tabla 27):

Tabla 27. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para generación eléctrica con Cogeneración, para generar 810 MW.

Para generar 810 MW			
Entradas		Salidas	
Uranio	88 Ton	Energía	810 MW
Agua proceso termodinámico	4106.6239 m ³ /h	Agua-5%	3901.29270 m ³ /h
Energía funcionamiento planta	9.36643 MW		

Generación eléctrica con cogeneración, para generar 1 MW (Tabla 28):

Tabla 28. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para generación eléctrica con Cogeneración, para generar 1 MW.

Para generar 1 MW			
Entradas		Salidas	
Uranio (ton)	0.1086419 Ton	Energía	1 MW
Agua proceso termodinámico	5.069906 m ³ /h	Agua-5%	4.81641074691358 m ³ /h
Energía funcionamiento planta	0.0115634 MW		

Proceso de cogeneración, para generar 810 MW (Tabla 29):

Tabla 29. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para proceso de cogeneración, para generar 810 MW.

Para generar 810 MW			
Entradas		Salidas	
Energía de entrada	261.32 MW	Energía transformada	0.00001796626 MW
Material (tipo y cantidad)	7.246394 m ²		

Proceso de conversión de energía, para generar 1 MW (Tabla 30):

Tabla 30. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para proceso de cogeneración, para generar 1 MW.

Para generar 1 MW			
Entradas		Salidas	
Energía de entrada	0.322617283 MW	Energía eléctrica cogenerada	0.000017966268 MW
Material	0.0089461664 m ²		

Proceso de tratamiento de agua para generar 810 MW (Tabla 31):

Tabla 31. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para tratamiento de agua, para generar 810 MW.

Para generar 810 MW			
Entradas		Salidas	
Energía entrada	0.000017966 MW	Energía	810 MW
Agua tratada	205.331195 m ³ /h		

Proceso de tratamiento de agua para generar 1 MW (Tabla 32):

Tabla 32. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para tratamiento de agua, para generar 1 MW.

Para generar 1 MW			
Entradas		Salidas	
Energía entrada	2.2180577865E-08 MW	Energía	1 MW
Agua tratada	0.2534953024 m ³ /h		

El inventario generado, previamente expuesto, se utilizará para el análisis de ciclo de vida que a continuación se describe:

Se planteó un diagrama del proceso para realizar el Análisis de Ciclo de Vida, utilizando OpenLCA (Figura 63).

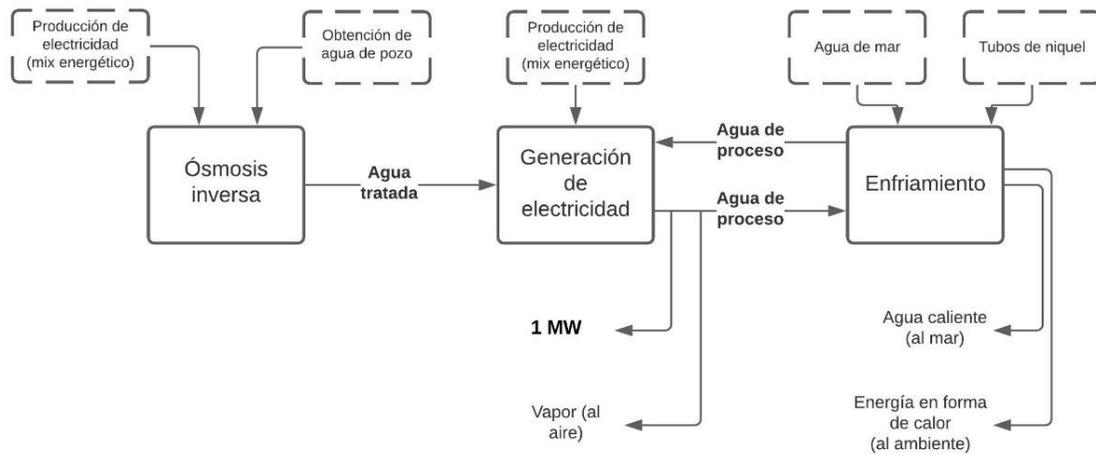


Diagrama de flujo de proceso, sin cogeneración

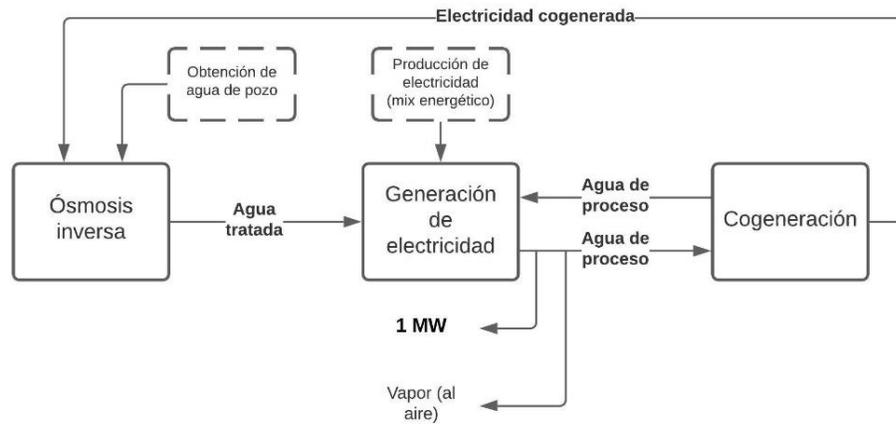


Diagrama de flujo de proceso, con cogeneración

Figura 63. Diagrama del proceso.

En el programa OpenLCA se establecieron los parámetros con los cuales se modelaría (Figura 64).



Figura 64. Parámetros del modelo.

Las condiciones que se plantearon en el modelo fueron utilizadas con base al inventario generado (Figura 65).

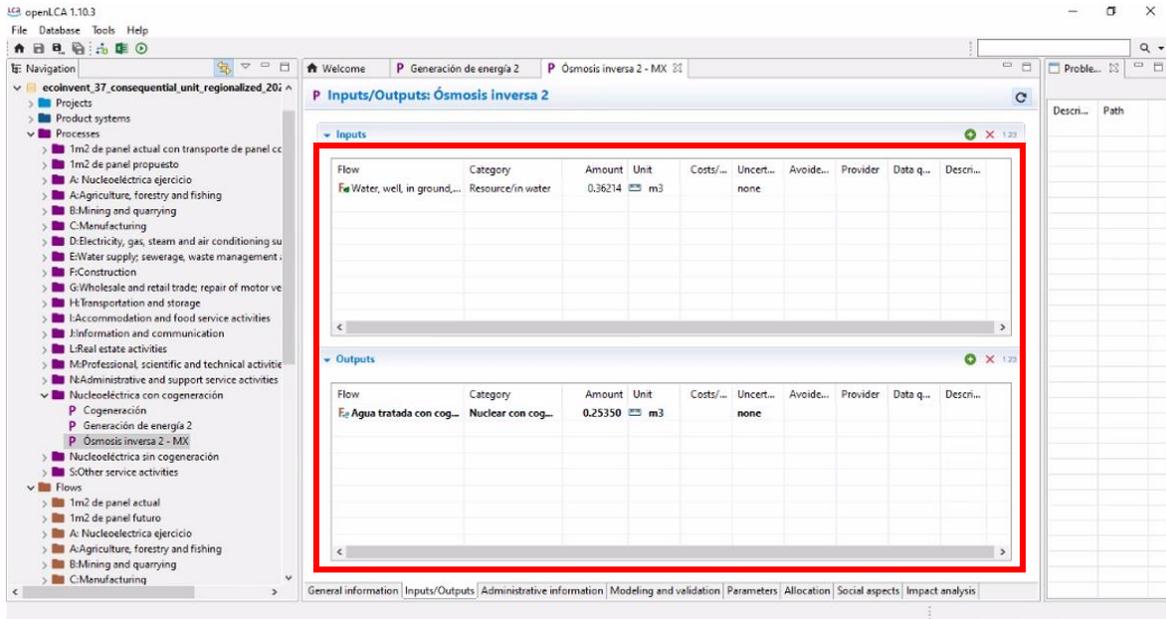


Figura 65. Condiciones con las que se generará el ACV.

Planteando entonces un diagrama en el programa en donde modelara el proceso con las condiciones (Figura 66).

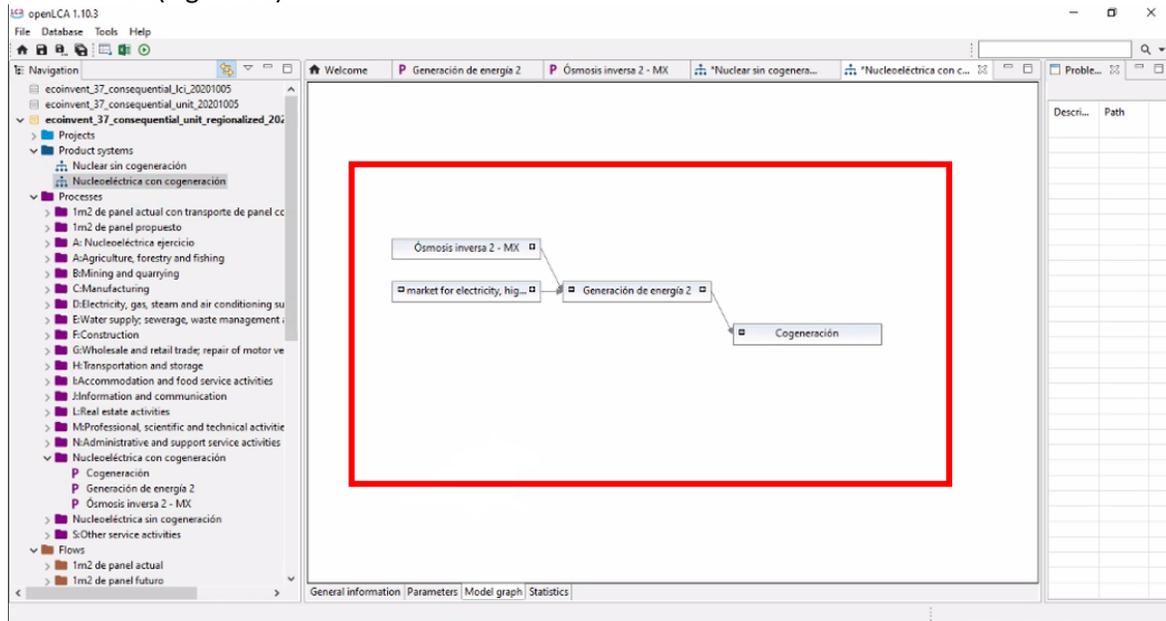


Figura 66. Diagrama del modelo planteado.

Se corrió la simulación con los datos previamente establecidos, para obtener datos de las categorías de impacto (Figura 67).

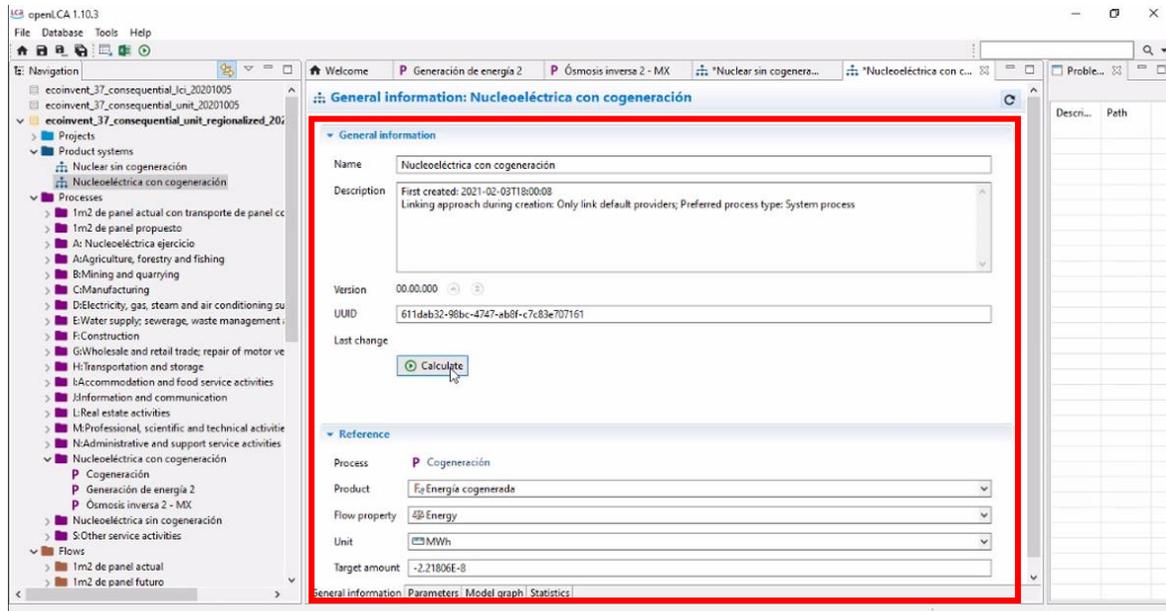


Figura 67. Cálculo del Análisis.

Se utilizó la metodología de impacto de CML 2001, y fue modelado para cambio climático (Figura 68).

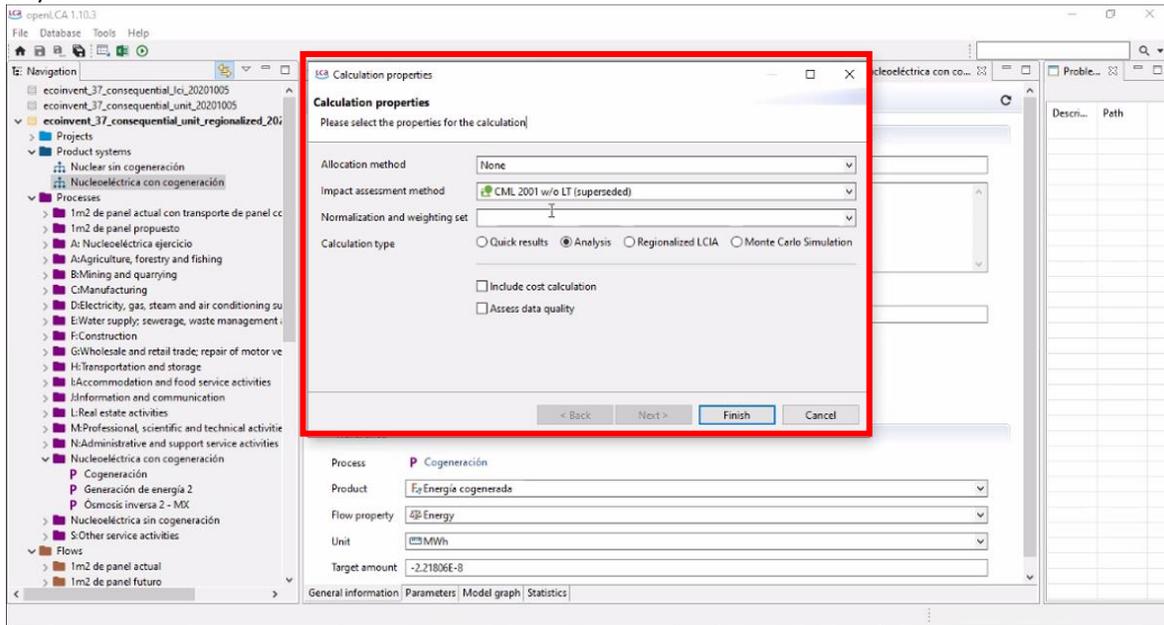


Figura 68. Metodología utilizada.

Los resultados del Análisis fueron presentados con las entradas y las salidas de cada proceso (Figura 69).

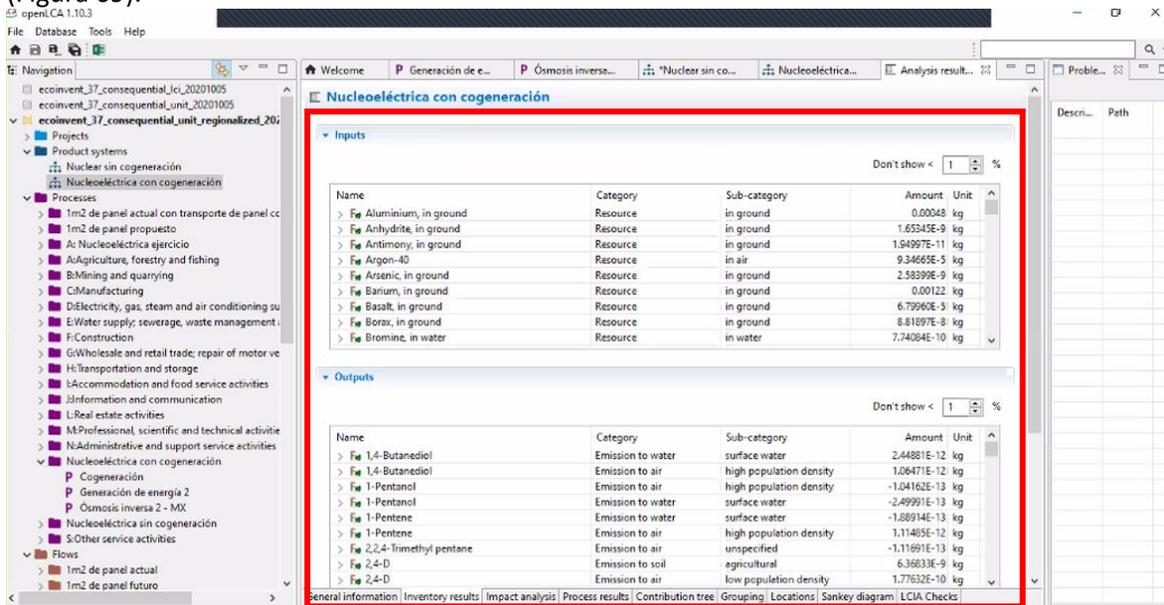


Figura 69. Entradas y salidas de cada proceso.

Resultados.

Los resultados obtenidos en el análisis de ciclo de vida se presentan a continuación:

En la Tabla 33 y 34 se muestran los datos utilizados para el modelado de ACV.

Tabla 33. Datos para Generación de electricidad sin cogeneración.

Generación de electricidad sin cogeneración				
Proceso	Entradas		Salidas	
	Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad
Ósmosis inversa	Electricidad del mix energético	2.22E-08 MW	Agua tratada	0.25349530 m ³ /h
	Agua de pozo	0.3621361 m ³ /h	-	-
Generación de electricidad	Agua tratada	0.2534953 m ³ /h	Vapor	0.253495302 m ³ /h
	Electricidad del mix energético	0.0115634 MW	Electricidad al mix energético	1 MW
Condensación	Agua de mar	123.55555 m ³ /h	Energía en forma de calor	0.322617284 MW
	Tubos de incotel aleación 600	10138.896 kg	Agua de proceso	4.816410747 m ³ /h

Tabla 34. Datos para Generación de electricidad con cogeneración.

Generación de electricidad con cogeneración				
Proceso	Entradas		Salidas	
	Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad
Ósmosis inversa	Electricidad generada por cogeneración	2.22E-08 MW	Agua tratada	0.2534955302 m ³ /h
	Agua de pozo	0.3621361 m ³ /h	-	-
Generación de electricidad	Agua tratada	0.253495 m ³ /h	Agua de proceso	5.069906049 m ³ /h
	Electricidad del mix energético	0.0115634 MW	Electricidad al mix energético	1 MW
Cogeneración de energía	Agua de proceso	5.069906 m ³ /h	Electricidad cogenerada	2.21806E-08 MW

Se evaluaron dos categorías de impacto con la metodología CML 2001, estas categorías fueron:

Cambio climático (GWP20), que tiene como unidades kg de CO₂-Eq y Agotamiento de recursos abióticos, que tiene como unidades kg de antimonio- Eq. En la Tabla 35 se muestran los resultados obtenidos para los dos escenarios generados, con proceso de cogeneración y sin el proceso de cogeneración.

Tabla 35. Resultados obtenidos.

	Con cogeneración	Sin cogeneración
Cambio Climático (GWP20)	5.90 kgCO ₂ -Eq.	66277.10 kgCO ₂ -Eq.
Agotamiento de recursos abióticos	0.04 kg antimonio-Eq.	555.26 kg antimonio-Eq.

Como puede apreciarse, existe una diferencia significativa en los resultados de ambos procesos, a continuación, se hablará de los resultados en cada una de las categorías, mencionando el ahorro generado, los procesos y los flujos que más participación tienen en cada una de ellas. En la Figura 70, se muestra de forma más visual el porcentaje que representa el nuevo escenario con cogeneración, a comparación del escenario sin ella.

- Cambio climático (GWP20)

En la comparación de los resultados de la Tabla 35, se puede ver que en esta categoría se genera una reducción de 66,271.20 kg de CO₂-Eq en la generación de 1 MW de energía.

Respecto al escenario sin cogeneración, el flujo principal es el dióxido de carbono, además los procesos con mayor contribución son la producción de níquel y de acero, dichos procesos son realizados para poder obtener los tubos de aleación de níquel-cromo-aluminio necesarios para intercambiar calor con el ambiente en el proceso de enfriamiento.

Revisando el escenario con cogeneración, se encontró que también el dióxido de carbono es el flujo con mayor impacto, por otro lado, son los procesos de producción de gas natural y de lignito los que tienen una mayor responsabilidad del impacto en esta categoría, estos procesos son usados en la generación de electricidad que es usada en la generación de energía.

- Agotamiento de recursos abióticos

Comparando los dos escenarios se percibe que existe una disminución de 555.26 kg de antimonio-Eq entre los resultados de evaluar la producción de 1MW sin cogeneración y con cogeneración.

Al igual que en la categoría anterior, los procesos con mayor contribución son la producción de carbón y lignito, para el escenario con cogeneración, y la producción de níquel y aluminio para el escenario sin cogeneración. Sin embargo, en lugar de ser el dióxido de carbono el flujo principal, en esta categoría lo es el carbón. En la Figura 70, se muestra la comparación % de contribución por categoría.

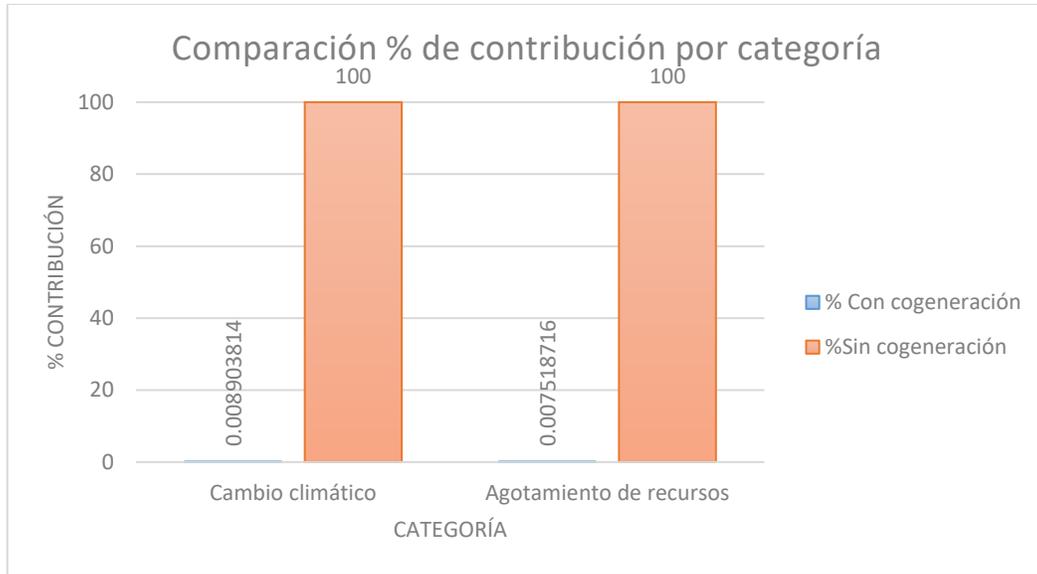


Figura 70. Comparación en % de la contribución por categoría.

Es relevante mencionar que las reducciones observadas, como es posible deducir, son consecuencia tanto de que ya no fuera necesario ni el uso de tubos para el enfriamiento del agua (pues se ocupará el dispositivo para generar energía a través de la temperatura de esta agua), como de la anulación de electricidad requerida del mix energético en el proceso de ósmosis inversa (puesto que ahora será usada la cogeneración para suplirlo).

Otra observación es que el vapor generado fue modelado, sin embargo, la metodología no lo considera como contribuyente al impacto de cambio climático, por lo que no generó un cambio en los resultados, sin embargo, se sabe que el vapor en un escenario real, si impacta al aumento de calentamiento global.

En la Figura 71, se muestra el balance de energía, en donde se puede apreciar que los valores de electricidad generada, la obtenida del mix para la generación de energía y la necesaria para el proceso de ósmosis, no se modifican en ninguno de los dos escenarios, sin embargo, en el proceso de cogeneración la electricidad cogenerada tiene un valor negativo equivalente al de la electricidad para ósmosis, esto quiere decir que el proceso de cogeneración se produce la cantidad de energía necesaria para poder realizar ósmosis inversa.

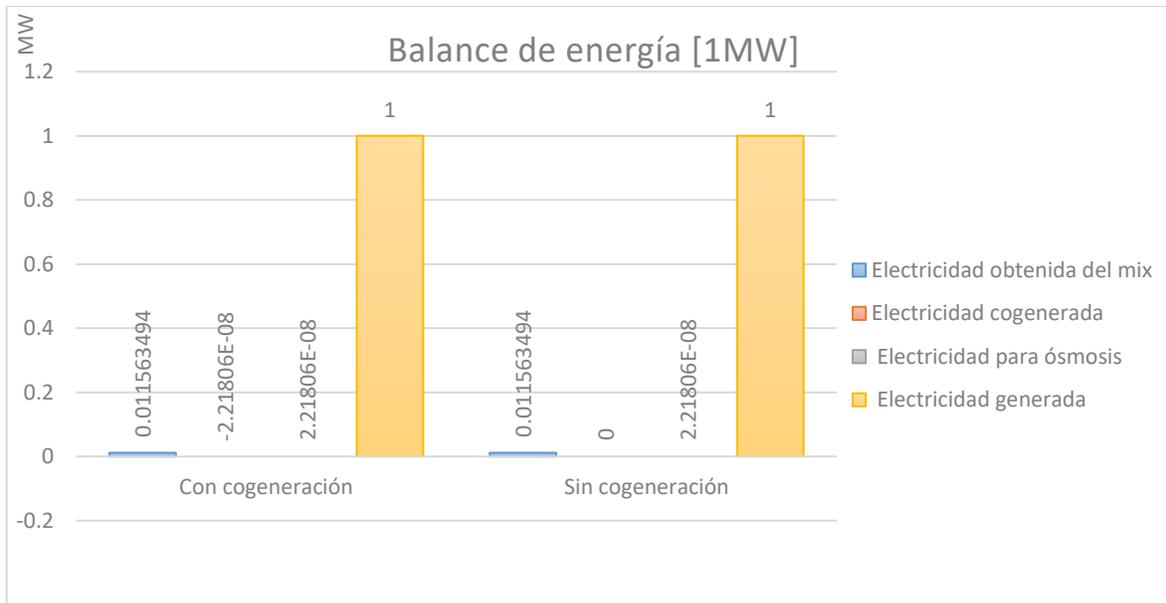


Figura 71. Resultados del ACV del Balance de energía.

Conclusiones.

Para obtener la cantidad de calor aprovechable, se obtuvo un modelo generado con datos investigados sobre la misma Central Nuclear, para aproximar el modelo lo más que se pudiera al proceso de generación eléctrica original, éste balance dependió de varios factores, incluyendo factores ambientales; con lo cual se obtuvo la cantidad de calor residual que, en condiciones originales, iría al sumidero, desaprovechándose y afectando parte del factor ambiental.

Una gran parte de la cogeneración de energía depende mucho tanto del tipo de energía para cogenerar, como de los dispositivos a utilizar, ya que su eficiencia y funcionamiento, marcarán la calidad y cantidad de energía que se logre aprovechar, por lo cual, en este caso se plantea un dispositivo comercial, el cual se logró adaptar a las condiciones presentadas en el modelo generado, pero, se hace la observación, de que el desarrollo de éste tipo de dispositivos y su tecnología, es parte muy importante para poder generar cantidades de energía significativas, con cogeneración.

La aplicación que en este caso se le dio a esa cogeneración, fue el tratamiento de agua que requiere la planta para realimentar el proceso de generación eléctrica, la cual se tomaba del mix eléctrico para su funcionamiento; para éste tipo de desmineralización, se seleccionó el proceso más eficiente, en este caso el de ósmosis inversa, pero para diversas aplicaciones, partiendo del tipo de agua que se requiere tratar, se han mejorado eficiencias con procesos híbridos de desalinización, para un recurso como el agua, es imprescindible poder buscar formas en donde se pueda tratar y darle un uso racional. Para la aplicación que se le daría en este modelo generado de la Central Nuclear se obtuvo para el tipo de agua requerido, la cantidad de energía para la presión osmótica que se requeriría para su tratamiento.

Tanto los datos del modelo de generación eléctrica planteado, como el modelo de generación eléctrica con cogeneración, brindaron datos importantes del uso de recursos tanto de agua como de electricidad, para poder obtener inventarios con los cuales se modelarían ambos sistemas para su posterior evaluación al realizar el Análisis de Ciclo de Vida.

Con el Análisis de Ciclo de Vida de ambos procesos y su comparación, se pudo observar la diferencia que se presenta de forma ambiental al buscar métodos en los que se puedan mejorar eficiencias en el uso de recursos de cualquier tipo, ya que el aumento de eficiencia de cualquier proceso, puede ser significativo a largo plazo.

Con todo esto se planteaba evaluar y analizar el impacto ambiental que se generaba al agregar un proceso de cogeneración dentro del proceso ya existente, ya que se ven involucrados varios factores que pudieran pasar desapercibidos al momento, pero que pueden tomarse en cuenta para las decisiones a tomar en futuros proyectos de generación eléctrica de cualquier tipo, tanto para su investigación, su desarrollo o su mejora.

Figuras

Figura 1. Múltiples beneficios de la eficiencia energética (Ortíz et al., 2017).	7
Figura 2. Metodología a seguir para desarrollo de la propuesta planteada.	11
Figura 3. Población mundial y de México en el 2018 (Banco Mundial, 2018b).	12
Figura 4. Consumo final energético por sector y energético (SENER, 2018a).	16
Figura 5. Gráfica del suministro total de energía nuclear a nivel mundial (TPES= Total Primary Energy Supply, Mtoe = Mega toneladas equivalentes de petróleo) (OECD, 2019b).	17
Figura 6. Gráfica de la energía eléctrica generada mundialmente por combustible en este caso nuclear (OECD, 2019a).	17
Figura 7. El ciclo del combustible nuclear (OECD and NEA, 2018).	18
Figura 8. Las barras de control capturan los neutrones libres (Foro Nuclear, 2013).	21
Figura 9. Componentes del núcleo del reactor BWR.	23
Figura 10. Ensamble del reactor BWR-5 en una Central Nuclear (General Electric, no date).	24
Figura 11. Vista interna, corte del Reactor BWR-5 (Lozano Laez, 1995).	26
Figura 12. Proceso de generación de energía eléctrica sin cogeneración de energía (Cogenera México, 2012e).	28
Figura 13. Proceso de generación de energía eléctrica con cogeneración de energía (Cogenera México, 2012d).	29
Figura 14. Gráfico del sistema de generación de electricidad sin cogeneración (Cogenera México, 2012c).	29
Figura 15. Gráfico del Sistema de generación de electricidad con cogeneración de energía (Cogenera México, 2012b).	30
Figura 16. Esquema de un sistema superior de cogeneración (CMM, 2009c).	31
Figura 17. Esquema de un sistema inferior de cogeneración (CMM, 2009b).	31
Figura 18. Ejemplo de sistema de ciclo combinado con cogeneración (CMM, 2009a).	32
Figura 19. Diagrama de un dispositivo termoeléctrico típico (Saidur et al., 2012).	34
Figura 20. Gráfica de la figura de merit ZT en función de la temperatura para distintos materiales termoeléctricos (Subramanian, 2006).	35
Figura 21. Cogeneración a nivel mundial (CMM, 2010).	37
Figura 22. Distribución del agua en el mundo (CONAGUA, 2018g).	38
Figura 23. Mapa de regiones hidrológicas en México (CONAGUA, 2018k).	40
Figura 24. Contraste regional entre agua renovable y desarrollo (CONAGUA, 2018c).	41
Figura 25. Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2017 (CONAGUA, 2018n).	41
Figura 26. Gráfico de los usos del agua (CONAGUA, 2011).	42
Figura 27. Estado de los Acuíferos en México, 2017 (CONAGUA, 2018h).	43
Figura 28. Cómo se forma la sal en los mares y océanos (Nasa Earth Science, 2012).	46
Figura 29. Esquema de desalinización por compresión mecánica de vapor (MVC) (Norland Intl, 2004).	49
Figura 30. Esquema de desalinización mediante destilación flash multietapa (MSF) (Veolia, 2009).	50
Figura 31. Proceso de Destilación Multiefecto (MED) (Cetenma, 2008).	51
Figura 32. Proceso de ósmosis inversa (Procedetecs, 2018).	51
Figura 33. Esquema general de una planta de Ósmosis Inversa (RO) (Dévora Isirdia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012b).	52
Figura 34. Esquema general del proceso de desalinización por electrodiálisis.	53
Figura 35. Ciclo de Vida de un producto. Fuente: FADU-UBA. Arquitectura. 2009. Instituto Argentino de Certificación.	55
Figura 36. Ciclo de Vida (Orozco Herrera, 2012).	56
Figura 37. Análisis de Ciclo de Vida (Orozco Herrera, 2012).	57
Figura 38. Metodología del ACV según ISO 14040 (Orozco Herrera, 2012).	58
Figura 39. Etapas de desarrollo de un ACV (Romero Díaz de Ávila, 2012).	60
Figura 40. Evaluación del impacto del ciclo de vida.	66
Figura 41. Proceso del ciclo utilizado en la Central Nuclear Laguna Verde para la generación de electricidad (Lozano Laez, 1995).	68

Figura 42. Diagrama del Ciclo Rankine ideal simple (Çengel and Boles, 2012).	68
Figura 43. Diagrama T-s del ciclo Rankine ideal simple (Çengel and Boles, 2012).	69
Figura 44. Desviación real de potencia de vapor respecto del ciclo de Rankine ideal. Y efecto de las irreversibilidades de la bomba y la turbina en el ciclo Rankine ideal (Çengel and Boles, 2012).	70
Figura 45. El ciclo Rankine ideal con recalentamiento y diagrama T-s del ciclo (Çengel and Boles, 2012).	71
Figura 46. El ciclo Rankine ideal regenerativo con recalentamiento (Çengel and Boles, 2012).	72
Figura 47. Diagrama T-s del ciclo Rankine con recalentamiento.	74
Figura 48. Diagrama del proceso termodinámico analizado en la Central Nuclear Laguna Verde.	75
Figura 49. Condiciones con las que se simuló el proceso termodinámico en TermoGraf v5.7.	76
Figura 50. Condiciones de análisis para el proceso termodinámico en TermoGraf v5.7.	76
Figura 51. Simulación del Proceso 1-2 del ciclo termodinámico.	77
Figura 52. Simulación del Proceso 2-3 del ciclo termodinámico.	77
Figura 53. Simulación del Proceso 3-4 del ciclo termodinámico.	78
Figura 54. Simulación del Proceso 4-5 del ciclo termodinámico.	79
Figura 55. Simulación del Proceso 5-6 del ciclo termodinámico.	79
Figura 56. Proceso completo del ciclo termodinámico.	80
Figura 57. Condiciones del intercambiador de calor.	83
Figura 58. Diagrama del ciclo termodinámico de la Central Nuclear Laguna Verde con la configuración de cogeneración.	85
Figura 59. Condensador con dispositivos termoeléctricos acoplados.	85
Figura 60. Diagrama del fenómeno de transferencia de calor por conducción.	86
Figura 61. Geología general de los acuíferos en la Costera de Veracruz (CONAGUA, 2018a).	87
Figura 62. Distancia de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde a la región del pozo en “El Viejón” (Google Maps, 2020).	88
Figura 63. Diagrama del proceso.	97
Figura 64. Parámetros del modelo.	98
Figura 65. Condiciones con las que se generará el ACV.	98
Figura 66. Diagrama del modelo planteado.	99
Figura 67. Cálculo del Análisis.	99
Figura 68. Metodología utilizada.	100
Figura 69. Entradas y salidas de cada proceso.	100
Figura 70. Comparación en % de la contribución por categoría.	103
Figura 71. Resultados del ACV del Balance de energía.	104

Tablas

<i>Tabla 1. Estado de la energía nuclear para el 2019 (IAEA, 2019c).</i>	13
<i>Tabla 2. Consumo final total por tipo de combustible en Petajoules (SENER, 2018a).</i>	15
<i>Tabla 3. Consumo final de energía en el 2017 y el 2018 en México (Petajoules) (SENER, 2018a).</i>	15
<i>Tabla 4. Datos específicos de la turbina de alta presión en la Central Nuclear Laguna Verde (Lozano Laez, 1995).</i>	19
<i>Tabla 5. Datos específicos de la turbina de baja presión en la Central Nuclear Laguna Verde (Lozano Laez, 1995).</i>	19
<i>Tabla 6. Datos específicos del generador de la Central Nuclear Laguna Verde (Lozano Laez, 1995).</i>	19
<i>Tabla 7. Datos técnicos del reactor nuclear BWR-5, que se encuentra en la Central Nuclear Laguna Verde (Lozano Laez, 1995).</i>	25
<i>Tabla 8. Ensamblajes de combustible en reactor BWR-5 en Central Nuclear Laguna Verde (Lozano Laez, 1995).</i>	27
<i>Tabla 9. Cogeneración en gran escala.</i>	36
<i>Tabla 10. Países con mayor extracción de agua y porcentaje de uso agrícola, industrial y abastecimiento público (CONAGUA, 2018m).</i>	39
<i>Tabla 11. Tipos de Salinidad (Dévora Isiordia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012c).</i>	43
<i>Tabla 12. Características de los diferentes tipos de aguas susceptibles a desalinizar (Flores Espinosa, Perusquía del Cueto and Ortiz Oliveros, 2004b).</i>	44
<i>Tabla 13. Calidad del agua (CONAGUA, 2018b).</i>	45
<i>Tabla 14. Salinidad y composición química del agua de mar (Pontes, 1996).</i>	45
<i>Tabla 15. Calidad de agua obtenida por desalinización (Flores Espinosa, Perusquía del Cueto and Ortiz Oliveros, 2004a).</i>	46
<i>Tabla 16. Clasificación de los procesos de desalinización (Dévora Isiordia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012a).</i>	47
<i>Tabla 17. Plantas desalinizadoras de agua instaladas en México, por entidad federativa. Nomenclatura: OI- Ósmosis Inversa, MCV-Compresión Mecánica de Vapor, MSF-Flash Multietapa, S-Solar, D-Destilación (Dévora Isiordia, González Enríquez and Ponce Fernández, 2012d).</i>	53
<i>Tabla 18. Resumen histórico del Análisis de Ciclo de Vida (Orozco Herrera, 2012).</i>	55
<i>Tabla 19. Categorías de impacto y etapas del proceso (Orozco Herrera, 2012).</i>	66
<i>Tabla 20. Resultados de la simulación de cada Estado en el ciclo termodinámico.</i>	80
<i>Tabla 21. Resultados de la simulación de cada Proceso en el ciclo termodinámico.</i>	80
<i>Tabla 22. Parámetros físico-químicos recomendados, límites y seguimiento de frecuencias para el agua en la pérdida de combustible (decaimiento radiactivo) y pilas de almacenamiento (IAEA, 2011)</i>	89
<i>Tabla 23. Parámetros de operación y diseño de distintos procesos de desalinización.</i>	90
<i>Tabla 24. Calidad de agua obtenida por desalinización (Flores Espinosa, Perusquía del Cueto and Ortiz Oliveros, 2004a).</i>	92
<i>Tabla 25. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para generación eléctrica sin Cogeneración, para generar 810 MW.</i>	94
<i>Tabla 26. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para generación eléctrica sin Cogeneración, para generar 1 MW.</i>	94
<i>Tabla 27. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para generación eléctrica con Cogeneración, para generar 810 MW.</i>	95
<i>Tabla 28. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para generación eléctrica con Cogeneración, para generar 1 MW.</i>	95
<i>Tabla 29. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para proceso de cogeneración, para generar 810 MW.</i>	95
<i>Tabla 30. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para proceso de cogeneración, para generar 1 MW.</i>	95
<i>Tabla 31. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para tratamiento de agua, para generar 810 MW.</i>	96
<i>Tabla 32. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida para tratamiento de agua, para generar 1 MW.</i>	96
<i>Tabla 33. Datos para Generación de electricidad sin cogeneración.</i>	101
<i>Tabla 34. Datos para Generación de electricidad con cogeneración.</i>	101
<i>Tabla 35. Resultados obtenidos.</i>	102

Bibliografía

AEDyR (2019a) *Mejora de la eficiencia energética en la desalación, Asociación Española de Desalación y Reutilización*. Available at: <https://aedyr.com/mejora-eficiencia-energetica-desalacion/>.

AEDyR (2019b) *Principales técnicas de desalación: cuáles son, en qué consisten, Asociación Española de Desalación y Reutilización*. Available at: <https://aedyr.com/principales-tecnicas-desalacion-cuales/>.

Aguirre Sánchez, D. P. (2015) 'Análisis de la Descarga Térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, Veracruz, México'. Available at: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7507/TESISDANIE LAAGUIRREanalisisdelaDescargatermicaCNLV.pdf?sequence=1>.

Alstom (2011) 'Planta de cogeneración en la isla de Grain, Kent, Reino Unido.'

Arreguín Cortés, F. I. and López Pérez, M. (2015) *Baja California y Quintana Roo: Pioneros de la desalación en México., iagua, IMTA*. Available at: <https://www.iagua.es/blogs/felipe-arreguin/baja-california-y-quintana-roo-pioneros-desalacion-mexico>.

Arreguín Cortés, F. I. and Martín Domínguez, A. (2000) 'Desalinización del agua.', *Ingeniería Hidráulica en México - Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, Vol. XV, N, pp. 27–49. Available at: <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/720/0206.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

Banco Mundial (2018a) *Población, total, Población, total*. Available at: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL?view=chart> (Accessed: 20 September 2010).

Banco Mundial (2018b) *Población total - México, Población total - México*. Available at: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL?locations=MX&view=chart>.

Barnet, H., Krett, V. and Kupitz, J. (1991) 'Energía nuclear para producir calor', *Boletín de*, pp. 21–24. Available at: https://www.iaea.org/sites/default/files/33104782124_es.pdf.

Çengel, Y. A. and Boles, M. A. (2012) *Termodinámica*. 7°. Mc Graw Hill.

Cetenma (2008) *Diagrama de proceso de destilación multiefecto (MED)*. Available at: <https://www.cetenma.es/>.

CFE (2005) 'Nucleoeléctrica LV.pdf'.

Cifuentes Lemus, J. L., Torres-García, M. del P. and Frías Mondragón, M. (2002) *El océano y sus recursos, XII. El futuro de los océanos*. 3rd edn. Edited by Fondo de Cultura Económica, Secretaría de Educación Pública, and Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. La ciencia para todos.

CMM (2009a) 'Esquema de ejemplo de sistema combinado con cogeneración.', in *La ruta de México hacia una economía sustentable de baja intensidad de carbono*. México: Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre energía y Medio Ambiente A.C., p. p.26. Available at: https://transparencia.energia.gob.mx/estudios_opiniones/archivos/CAP I-III.pdf.

CMM (2009b) 'Esquema de un sistema inferior de cogeneración.', in *La ruta de México hacia una economía sustentable de baja intensidad de carbono*. México: Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre energía y Medio Ambiente A.C., p. p.26. Available at: https://transparencia.energia.gob.mx/estudios_opiniones/archivos/CAP I-III.pdf.

CMM (2009c) 'Esquema de un sistema superior de cogeneración.', in *La ruta de México hacia una economía sustentable de baja intensidad de carbono*. Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre energía y Medio Ambiente A.C., p. p.26. Available at: https://transparencia.energia.gob.mx/estudios_opiniones/archivos/CAP I-III.pdf.

CMM (2010) 'La ruta de México hacia una economía sustentable de baja intensidad de carbono', *Centro Mario Molina*, Cap. 1 Vol(001), pp. 1–178. Available at: https://transparencia.energia.gob.mx/estudios_opiniones/archivos/CAP I-III.pdf.

Cogenera México (2012a) *Cogenera México. - Guía práctica de trámites y permisos para proyectos de Cogeneración de Energía eléctrica en México*. Available at: <http://www.cogeneramexico.org.mx/menu.php?m=73>.

Cogenera México (2012b) *Diagrama de sistema de generación de electricidad, con cogeneración.*, CONUEE, CRE. Available at: <http://www.cogeneramexico.org.mx/menu.php?m=73> (Accessed: 20 September 2010).

Cogenera México (2012c) *Diagrama de sistema de generación de electricidad.*, CONUEE, CRE. Available at: <http://www.cogeneramexico.org.mx/menu.php?m=73> (Accessed: 20 September 2010).

Cogenera México (2012d) *Proceso de generación de energía eléctrica con cogeneración de energía.*, *Cogeneración*. Available at: <http://www.cogeneramexico.org.mx/menu.php?m=73>.

Cogenera México (2012e) *Proceso de generación de energía eléctrica sin cogeneración de energía.*, *Cogeneración*. Available at: <http://www.cogeneramexico.org.mx/menu.php?m=73>.

CONAGUA (2011) 'Usos del agua.', in *Estadística del Agua en México, 2011*. 2011th edn. México: CONAGUA, SEMARNAT.

CONAGUA (2018a) 'Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Costera de Veracruz, Estado de Veracruz', p. 39. Available at: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/veracruz/DR_3006.pdf.

CONAGUA (2018b) 'Calidad del agua.', in *Estadísticas del Agua en México, 2018*. 2018th edn. México: CONAGUA, SEMARNAT, p. 29. Available at: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones=1>.

CONAGUA (2018c) 'Contraste regional entre agua renovable y desarrollo.', in *Estadísticas del Agua en México, 2018*. 2018th edn. México: CONAGUA, SEMARNAT, p. p.24. Available at: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf.

CONAGUA (2018d) 'Contraste regional entre desarrollo y agua renovable (AR).', in

Estadísticas del Agua en México, 2018. 2018th edn. México: CONAGUA, SEMARNAT, p. p.24. Available at: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf.

CONAGUA (2018e) 'Datos interesantes', in *Numeragua 2018*. 2018th edn. México: SEMARNAT, CONAGUA, p. p.9. Available at: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/Numeragua2018.pdf>.

CONAGUA (2018f) 'Datos interesantes', in *Numeragua 2018*. 2018th edn. México: CONAGUA, SEMARNAT, p. 10. Available at: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/Numeragua2018.pdf>.

CONAGUA (2018g) 'Distribución del agua en el mundo.', in *Estadísticas del Agua en México, 2018*. 2018th edn. México: CONAGUA, SEMARNAT, p. p.206. Available at: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf.

CONAGUA (2018h) 'Estado de los Acuíferos en México, 2017', in *Estadísticas del Agua en México, 2018*. México: CONAGUA, SEMARNAT, p. p.56. Available at: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones=1>.

CONAGUA (2018i) 'Generación de energía.', in *Estadísticas del Agua en México, 2018*. 2018th edn. México: CONAGUA, SEMARNAT, p. p.215. Available at: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones=1>.

CONAGUA (2018j) 'Las cuencas y acuíferos del país.', in *Estadísticas del Agua en México, 2018*. 2018th edn. México: CONAGUA, SEMARNAT, p. 30. Available at: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf.

CONAGUA (2018k) 'Mapa de regiones hidrológicas en México.', in *Estadísticas del Agua en México, 2018*. 2018th edn. México: CONAGUA, SEMARNAT, p. p.30. Available at: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf.

CONAGUA (2018l) 'Numeragua 2018', in *Numeragua 2018*. 2018th edn. México: SEMARNAT, CONAGUA, p. 11. Available at: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/Numeragua2018.pdf>.

CONAGUA (2018m) 'Países con mayor extracción de agua y porcentaje de uso agrícola, industrial y de abastecimiento público.', in *Estadísticas del Agua en México, 2018*. 2018th edn. México: CONAGUA, SEMARNAT, pp. 212–213. Available at: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf.

CONAGUA (2018n) 'Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2017.', in *Estadísticas del Agua en México, 2018*. 2018th edn. México: CONAGUA, SEMARNAT, p. p.32. Available at: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf.

CONUEE (2009) 'Estudio sobre Cogeneración en el Sector Industrial en México.', p. 142.

D. Khawaji, A., K. Kutubkhanah, I. and Wie, J.-M. (2007) 'Avances en tecnologías de desalinización de agua de mar.', pp. 22–25. doi: 10.1016 / j.desal.2007.01.067.

Dévora Isiordia, G. E., González Enríquez, R. and Ponce Fernández, N. E. (2012a) 'Clasificación de los procesos de desalinización.', *Ra Ximhai*, vol.8, núm.2, 8, pp. 57–68. Available at: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46123333006>.

Dévora Isiordia, G. E., González Enríquez, R. and Ponce Fernández, N. E. (2012b) 'Esquema general de una planta de ósmosis inversa (RO). - Técnicas para desalinizar agua de mar y su desarrollo en México.', *Ra Ximhai*, vol.8, núm.2, pp. 57–68.

Dévora Isiordia, G. E., González Enríquez, R. and Ponce Fernández, N. E. (2012c) 'Salinidad de diferentes tipos de agua.', *Ra Ximhai*, vol.8, núm.2, pp. 57–68.

Dévora Isiordia, G. E., González Enríquez, R. and Ponce Fernández, N. E. (2012d) 'Técnicas para desalinizar agua de mar y su desarrollo en México.', *Ra Ximhai*, vol.8, núm.2, pp. 57–68.

Duque Solís, M. (2013) 'Diseño de paneles generadores de electricidad por efecto Seebeck'. Available at: https://repository.eia.edu.co/bitstream/handle/11190/728/DuqueMateo_2013_DiseñoPanelesGeneradores.pdf?sequence=8&isAllowed=y.

Estevan, A. and García, M. (2007) 'El consumo de energía en la desalación de agua de mar por ósmosis inversa : situación actual y perspectivas', *Ingeniería Civil*, 148, pp. 113–121.

Flores Espinosa, R. M., Perusquía del Cueto, R. and Ortiz Oliveros, H. B. (2004a) 'Calidad del agua obtenida por desalación.', *Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares*, (Desalación de agua de mar con reactores nucleares de potencia en cogeneración), p. 14. Available at: <https://studylib.es/doc/7392718/desalación-de-agua-de-mar-con-reactores-nucleares-de>.

Flores Espinosa, R. M., Perusquía del Cueto, R. and Ortiz Oliveros, H. B. (2004b) 'Características de los diferentes tipos de aguas susceptibles a desalar.', *Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares*, (Desalación de agua de mar con reactores nucleares de potencia con cogeneración), p. 14. Available at: <https://studylib.es/doc/7392718/desalación-de-agua-de-mar-con-reactores-nucleares-de>.

Flores Espinosa, R. M., Perusquía del Cueto, R. and Ortiz Oliveros, H. B. (2004c) 'Desalación de Agua de Mar con Reactores Nucleares de Potencia en Cogeneración', in. Cancún, Q.R., México.: Congreso Internacional Conjunto Cancún 2004 / XV Congreso anual de la SNM y XXII Reunión Anual de la SMSR, pp. 11–14.

Foro Nuclear (2010) *¿Cuáles son las barreras de seguridad que impiden los escapes radiactivos de un reactor nuclear?*, *Foro de la Industria Nuclear Española*. Available at: <https://www.foronuclear.org/es/100957-faqas-sobre-energia/capitulo-12/115561-170-icuales-son-las-barreras-de-seguridad-que-impiden-los-escapes-radiactivos-de-un-reactor-nuclear>.

Foro Nuclear (2013) *Las barras de control capturan los neutrones libres., ¿Sabes qué es un reactor nuclear?* Available at: [foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/120647-isabes-que-es-un-reactor-nuclear](https://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/120647-isabes-que-es-un-reactor-nuclear).

General Electric (no date) 'Ensamble del reactor BWR-5 en una Central Nuclear.', in *Instrumentación de la Vasija del Reactor en una Central Nuclear*.

Google Maps (2020) *Google Maps*.

Hiriart (2007) 'No Title'.

IAEA (2002) 'Estatus del diseño de conceptos de plantas nucleares desalinizadoras.', *International Atomic Energy Agency - IAEA*, p. 173. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1326_web.pdf.

IAEA (2011) 'Good Practices for Water Quality Management in Research Reactors and Spent Fuel Storage Facilities - Nuclear Energy Series'. Vienna, p. 136. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1492_web.pdf.

IAEA (2019a) *IAEA - PRIS Power Reactor Information System, Nuclear Power Status 2018 Map*. Available at: <https://pris.iaea.org/pris/> (Accessed: 20 September 2012).

IAEA (2019b) *Organismo Internacional de Energía Atómica, Ciclo de vida de las centrales nucleares*. Available at: <https://www.iaea.org/es/temas/ciclo-de-vida-de-las-centrales-nucleares>.

IAEA (2019c) *Tabla del estado de la energía nuclear, 2018, Nuclear Power Status 2018 Map*. Available at: <https://pris.iaea.org/pris/>.

INEGI (2019) *Cuéntame..., Agua, ¿qué es?* Available at: <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/que.aspx?tema=T>.

K. Buross, O. (2000) 'El ABC de la Desalinización', *Asociación Internacional de Desalinización*. Available at: https://water.ca.gov/LegacyFiles/pubs/surfacewater/abcs_of_desalting/abcs_of_desalting.pdf.

Lozano Laez, A. (1995) 'Libro corporativo Central Nucleoeléctrica Laguna Verde'. México: CFE, p. 116.

Mani, K. N. (1991) 'Electrodialysis water splitting technology', *Journal of Membrane Science*, 58(2), pp. 117–138. doi: 10.1016/S0376-7388(00)82450-3.

Martínez, A. (2014) *Dese, Cogeneración nuclear: mejor rendimiento para las centrales nucleares*. Available at: <https://desenchufados.net/cogeneracion-nuclear/#:~:text=Con las centrales nucleares actuales,a ríos o el mar>.

Martínez, L. M. (2015) *Young Water Professionals, Desalinización para viviendas, una opción a tener en cuenta*. Available at: <https://www.iagua.es/blogs/luis-martin-martinez/desalinizacion-viviendas-opcion-tener-cuenta>.

Merrill, E. W. (1986) 'Synthetic membrane processes: Fundamentals and water applications, a monograph on water pollution edited by Georges Belfort, Academic Press, 1984, 552 pp', *AIChE Journal*. Wiley, 32(8), pp. 1401–1401. doi: 10.1002/aic.690320821.

Mulás del Pozo, P. (2014) 'Desarrollo Energético.', in *Hacia dónde va la ciencia en México*. México: CONACYT, Academia Mexicana de Ciencias, Consejo Consultivo de Ciencias, p. 123. Available at: <http://www.cciencias.mx/libroshdvc/m/09.pdf>.

Nasa Earth Science (2012) *Nasa/Aquarius: Un año observando la salinidad de los mares*. GODDARD - Space Flight Center. Available at: <http://www.nasa.gov/goddard>.

Nava E., C. (2008) 'Agua y desalación en México: del engaño al oscurantismo jurídico', *Desalación de agua con energías renovables*, pp. 59–80. Available at: <https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/6/2524/9.pdf>.

Nextreme Thermal Solutions Inc. (2011) 'eTEG HV56 Power Generator - Data Sheet', pp. 1–2.

Norland Intl (2004) 'Esquema de desalinización por compresión mecánica de vapor.'

Estados Unidos. Available at: <https://www.norlandintl.com/>.

OECD (2019a) *Gráfica de la generación mundial de electricidad por combustible.*, IEA. Available at: iea.org/statistics/balances/index.html.

OECD (2019b) *Gráfica del suministro total de energía por fuente - Total primary energy supply (TYPES) by source.*, IEA. Available at: iea.org/statistics/balances/index.html.

OECD and NEA (2018) 'Diagrama del ciclo de vida del combustible nuclear.', in *Nuclear Energy Data 2018. Nuclear Technology Development and Economics 2018*. France, p. 102.

OIEA (2000) *Introducción a la Deslinización Nuclear - Una guía, Organismo Internacional de Energía Atómica* -. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS400_scr.pdf.

ONU DI (2008) 'Introducción a la Producción más Limpia'. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, p. 29. Available at: https://www.unido.org/sites/default/files/2008-06/1-Textbook_0.pdf.

Orozco Herrera, I. (2012) 'Análisis de Ciclo de Vida en Sistemas Energéticos', in CIEMAT (ed.) *IV Jornada de Ingeniería en Energía*. Bucaramanga, p. 86.

Ortiz, D. et al. (2017) *Hacia un México Sostenible: Asociaciones Público Privadas en Eficiencia Energética.*, Ethos. Laboratorio de Políticas Públicas. Available at: <https://ethos.org.mx/es/ethos-publications/hacia-mexico-sostenible-app-eficiencia-energetica/>.

Pahuamba, F. (2017) *Simulación del Ciclo Termodinámico de una Central Nuclear con un Reactor tipo BWR*. Tecnológico Nacional de México.

Planas, O. (2009) *Energía Nuclear Net, ¿Qué es una Central Nuclear? Utilidad y funcionamiento de una planta nuclear*. Available at: <https://energia-nuclear.net/funcionamiento-central-nuclear/central-nuclear#:~:text=Una central nuclear es una,energía se genera energía térmica.&text=La eficiencia energética total de,30%25 y el 40%25>.

Ponnamma, D. et al. (2017) 'Piezo-and Thermoelectric Materials From Biopolymer Composites', *Biopolymer Composites in Electronics*. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809261-3.00012-7>.

Pontes, M. (1996) *La composición química del agua.*, Marenostrium. Available at: <http://marenostrium.org/curiosidades/composicion/composicion.pdf> (Accessed: 20 September 2010).

Porta (2012) 'No Title'.

Procedetecs (2018) *Proceso de Ósmosis Inversa*. Available at: <https://prodetecs.com/en-que-consiste-el-proceso-de-osmosis-inversa/>.

Rademann, K., Raghuwanshi, V. S. and Hoell, A. (2016) 'Crystallization and Growth Mechanisms of Nanostructures in Silicate Glass: From Complete Characterization Toward Applications', in *Glass Nanocomposites*. William Andrew, pp. 89–114. doi: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02375-1>.

Raisic, N. (1975) 'Desalación del agua de mar por medio de calor nuclear', 19, pp. 21–26.

Available at: https://www.iaea.org/sites/default/files/19105982126_es.pdf.

Rizzuti, L., M. Ettouney, H. and Cipollina, A. (2007) *Desalinización solar para el siglo 21*. Berlin: Heidelberg: Springer Verlag.

Romero Díaz de Ávila, M. T. (2012) 'Análisis de ciclo de vida (ACV) Herramienta de Gestión ambiental', *eoi Escuela de negocios*, 3, p. 16.

Saidur, R. *et al.* (2012) 'Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), pp. 5649–5659. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.018>.

Santillan, A., Valle, J. and Alberto, J. (2015) 'Estudio Termodinámico del Calor Residual de un Reactor Nuclear de Alta Temperatura Para Analizar su Viabilidad en Procesos de Cogeneración.', pp. 1–9. Available at: http://www.olade.org/realc/docs/doc_76419_20160822083055.pdf.

SENER (2018a) 'Balance Nacional de Energía, 2018'.

SENER (2018b) 'Infraestructura actual del Sistema Eléctrico Nacional - Generación - Tecnologías limpias', in *PRODESEN - Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032*. México, p. 318. Available at: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>.

SETAC (1993) 'Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"'. Brussels.

Sindelar, R.L. Chandler, G.T. Mickalonis, J. I. (2010) 'Water Quality and Corrosion: Considerations for Nuclear Reactor Systems', *Journal of the South Carolina Academy of Science*, p. 4. Available at: <https://scholarcommons.sc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1049&context=jscas>.

Sociedad Nuclear Española (2020) *Funcionamiento de las centrales nucleares, ¿Por qué algunas centrales nucleares tienen torres de refrigeración y otras no?* Available at: <https://www.sne.es/preguntas-y-respuestas/funcionamiento-centrales-nucleares/por-que-centrales-nucleares-torres-refrigeracion/>.

Subramanian, T. M. (2006) 'Thermoelectrics materials, phenomena and applications: A bird's eye view.', *MRS bulletin*, pp. 188–194.

Universidad de Nevada (2000) 'Ingeniería Mecánica. Lucha contra la termodinámica, límites teóricos de las plantas de desalinización.' USA. Available at: <https://studylib.es/doc/7392718/desalación-de-agua-de-mar-con-reactores-nucleares-de>.

Valdés, J. F. (2011) *Cogeneración, energía renovable y eficiencia energética: una oportunidad de desarrollo de infraestructura, Panorama energético de México Reflexiones académicas independientes*.

Veolia (2009) 'Diagrama de los procesos de desalinización mediante destilación flash multietapa (MSF). - Técnicas para desalinizar agua de mar y su desarrollo en México.', *Ra Ximhai*, vol.8, núm.2, Vol. 8, pp. 57–68.

Villarreal, J. (2010) 'Energía nuclear en México. La nucleoelectricidad en el mundo. - CFE', *Foro consultivo*, pp. 1–4. Available at: http://www.foroconsultivo.org.mx/eventos_realizados/6o_innovacion/ponencias/fernandez_de_la_garza.pdf.

WHO (2007) 'Desalinización para el suministro de agua potable segura.' Ginebra.: Guía de los Aspectos Ambientales y de Salud Aplicables a la Desalinización.