



Modelado y simulación de tecnología de almacenamiento de energía hidráulica presurizada con desalinización por Osmosis inversa

Presenta:

Ing. Francisco Castellanos Balderas

Para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería

Director:

Dr. Nicolás Velázquez Limón

13 de diciembre de 2017

DEDICATORIA

A mis padres

Por su apoyo incondicional, sus consejos, sus valores, por enseñarme a ser perseverante y responsable para cumplir mis objetivos, además de sus sacrificios para sacarme adelante y ser una persona de bien, pero más que nada por su amor.

A mi esposa

Por toda esa paciencia durante la culminación de mi posgrado, por su apoyo y motivación constante en todo momento para lograr mis objetivos, pero sobre todo por su amor, cariño y sacrificios.

A mi hija y esposa

Que son la fuente de motivación para lograr mis objetivos.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Nicolás Velázquez Limón por aceptarme como parte de su equipo, por compartir su valioso conocimiento, explotar mi potencial, forjarme como investigador y desarrollar mi sentido crítico. Al Dr. Anibal Luna por sus conocimientos brindados, asesorías y apoyo en a herramienta de TRNSYS. Al Dr. Pedro Rosales por la invitación a asistir a su clase como oyente, fue muy útil para el desarrollo de mi modelo matemático. Al Dr. Luis González por el apoyo con material didáctico y asesorías en el tema de la desalinización. A mis profesores Dra. Gisela Montero, Dr. Marcos Coronado, Dr. Conrado García, Dr. Rogelio Ramos y Dr. Pérez Tello por su conocimiento brindado. A mis compañeros del CEENER Ing. Jeronimo Alvarez, M.I. Ricardo López, M.C. Saúl Islas, M.I. Edgar González, M.I. Rodrigo Cota, Ing. Armando Aguilar y M.C. Lorena Ramirez por su apoyo moral y técnico, por tomarse su tiempo para aclarar mis dudas y sobre todo por las críticas constructivas que beneficiaron mi proyecto. Finalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada ya que sin ella no habría sido posible esta investigación.

RESUMEN

El crecimiento desmesurado de la humanidad está provocando la explotación excesiva de los recursos con un ritmo que pronto terminará por agotarlos. Los servicios básicos para el desarrollo de la humanidad como son el agua y la energía se están viendo afectados por el incremento en su demanda, debido a que se necesitan uno del otro para su producción. Esto vuelve prácticamente imposible un consumo sustentable de los recursos. Las energías renovables juegan un papel muy importante en la desalinización de agua de mar y generación de energía, con su aplicación se puede romper el círculo vicioso entre estos servicios básicos. Sin embargo el uso de energías renovables requiere de sistemas de almacenamiento que muevan la energía a través del tiempo. Actualmente las baterías de plomo ácido son la tecnología de almacenamiento más utilizada en el área de las energías renovables, pese a sus altos costos de reemplazo en la vida útil del proyecto, sin mencionar el impacto ambiental que generan al ser desechadas. La comunidad científica esta prestando atención a los sistemas de almacenamiento híbridos de bombeo hidráulico-aire comprimido para mitigar el impacto ambiental, sin embargo generalmente son sistemas cerrados que utilizan fluidos especiales en su ciclo de trabajo y dificulta su reparación si estos se encuentran en localidades remotas, en el mejor de los casos utilizan agua potable, la cual es crucial para el consumo humano. En esta investigación se presenta una propuesta tecnológica capaz de suministrar los servicios de almacenamiento de energía y desalinización de agua de mar al mismo tiempo de una forma sustentable utilizando recursos abundantes en la región (agua de mar y aire). Se realizó un estudio teórico de la propuesta planteando un modelo matemático el cual se solucionó por medio del vínculo entre la plataforma TRNSYS y EES. La simulación sirvió de base para estudiar las dinámicas de operación a nivel horario con intervalos de 15 minutos y fijar estrategias de control que optimicen el almacenamiento de energía y desalinización. Los resultados de la simulación en las plataformas TRNSYS y EES demuestran que la propuesta puede suministrar energía a la demanda y además proveer de agua potable sin la necesidad de un banco de baterías. La densidad energética máxima fue de 1.02 kWh/m^3 con una eficiencia del 65 %. Se realizó una evaluación económica de la propuesta incorporada a una microrred y se

comparó contra una microrred convencional a base de baterías con una unidad de ósmosis inversa. La propuesta resultó ser la mejor opción a 30 años de operación con una inversión de $3.90 \text{ US\$}/\text{Watt}$, un costo nivelado de la energía de $40.80 \text{ US¢}/\text{kWh}$, valor presente neto de $\$1,975.09$ US dólar y una tasa interna de retorno del 10 %.

ABSTRACT

The disproportionate growth of humanity is causing the excessive exploitation of resources with a pace that will soon end up exhausting them. The basic services for the development of humanity such as water and energy are being affected by the increase in demand, because they need each other for their production. This makes a sustainable consumption of resources practically impossible. Renewable energy plays a very important role in the desalination of seawater and power generation, with its application we can break the vicious circle between these basic services. However, the use of renewable energy requires storage systems that move energy over time. Currently, lead acid batteries are the most used storage technology in the area of renewable energies, despite their high replacement costs over the life of the project, not to mention the environmental impact they generate when discarded. The scientific community is paying attention to the hybrid storage systems of hydraulic pumped compressed air to mitigate the environmental impact, however they are usually closed systems that use special fluids in their work cycle and make their repair difficult if they are in remote locations, in the best case they use potable water, which is crucial for human consumption. This research presents a technological proposal capable of providing the services of energy storage and seawater desalination at the same time in a sustainable way using abundant resources in the region (seawater and air). A theoretical study of the proposal was made, proposing a mathematical model which was solved through the link between the TRNSYS platform and EES. The simulation served as a basis to study the dynamics of operation at the hourly level with 15 minute intervals and to establish control strategies that optimize energy storage and desalination. The results of the simulation on the TRNSYS and EES platforms show that the proposal can supply energy to the demand and also provide drinking water without the need for a battery bank. The maximum energy density was 1.02 kWh/m^3 with an efficiency of 65 %. An economic evaluation of the proposal incorporated into a microgrid was made and compared against a conventional microgrid based on batteries with a reverse osmosis unit. The proposal turned out to be the best option after 30 years of operation with an investment of $3.90 \text{ US\$}/\text{Watt}$, a level energy cost of $40.80 \text{ US\$/kWh}$, net present

value of \$ 1,975.09 US dollar and an internal rate of return of 10 %.

ÍNDICE

RESUMEN	VII
ABSTRACT	IX
LISTA DE TABLAS	XV
LISTA DE FIGURAS	XVII
NOMENCLATURA	XXI
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación	3
1.3. Antecedentes	3
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo General	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
1.5. Organización de la tesis	7
2. Energías renovables y almacenamiento hidráulico presurizado	9
2.1. Tecnologías para el aprovechamiento de las energías renovables	9
2.1.1. Microgeneración	11
2.1.2. Almacenamiento de energía	13
2.1.3. Microrredes	17
2.2. Almacenamiento hidráulico presurizado	19
2.2.1. Bombeo hidráulico reversible	19

2.2.2. Aire comprimido	22
2.2.3. Tecnologías de almacenamiento hidráulico presurizado	23
3. Desalinización	27
3.1. Los procesos de separación	27
3.2. Tecnologías para desalinización de agua de mar	29
3.3. Osmosis inversa	30
3.3.1. Características del agua de alimentación	30
3.3.2. Pretratamiento	32
3.3.3. Proceso de osmosis inversa	33
4. Microrred aislada de Puertecitos B.C.	35
4.1. Descripción de la comunidad	35
4.2. Estudio de los recursos energéticos	35
4.3. Perfiles de demanda eléctrica e hídrica	37
4.4. Descripción de componentes de microrred	40
4.5. Método de simulación	41
4.5.1. Situación actual de la microrred	43
4.5.2. Microrred con desalinización por osmosis inversa	53
5. Propuesta del sistema de almacenamiento-desalinización (ALENDE)	57
5.1. Estudio comparativo de diferentes configuraciones y selección de propuesta	58
5.2. Descripción del sistema de almacenamiento hidráulico presurizado-desalación	59
5.2.1. Descripción de componentes	59
5.2.2. Funcionamiento de propuesta tecnológica	62
5.3. Modelo matemático de propuesta tecnológica	65
5.3.1. Consideraciones del modelo matemático	66
5.3.2. Bomba hidráulica	66
5.3.3. Tanque de almacenamiento presurizado	67
5.3.4. Turbina hidráulica	68
5.3.5. Ósmosis inversa	69
5.3.6. Válvula de mezcla	70
5.3.7. Propiedades del agua de mar	70
5.3.8. Metodología de solución y desarrollo de simulador	70
5.4. Estudio de sensibilidad del sistema propuesto	73
5.5. Aplicación de propuesta tecnológica en microrred de Puertecitos B.C.	74

5.5.1. Metodología de dimensionamiento de propuesta	74
5.5.2. Metodología de simulación vinculando TRNSYS y EES.	77
5.5.3. Simulación con perfil urbano de Puertecitos B.C.	77
5.6. Estudio de implementación de propuesta a mayor escala.	85
5.6.1. Simulación para una comunidad con un mayor número de viviendas.	85
6. Evaluación tecno-económica	89
6.1. Resultados de la ingeniería de la propuesta tecnológica a mayor escala.	89
6.2. Estudio de viabilidad económica	91
6.2.1. Estimación de costos	91
6.2.2. Indicadores económicos de los escenarios	94
7. Conclusiones y recomendaciones	97
7.1. Conclusiones	97
7.2. Recomendaciones	98
Referencias	99
A. Modelo matemático en EES	103
B. Modelo matemático en TRNSYS	109
B.1. Ecuaciones de control en TRNSYS	120
B.2. Diagrama de conexiones	123

LISTA DE TABLAS

2.1. Variciones en presión de entrada en turbinas hidráulicas (<i>Elaboración propia</i>)	22
3.1. Tamaño de los compuestos existentes en el agua. (<i>Medina,2000</i>)	28
3.2. Selectividad de los procesos de filtración (<i>Medina,2000</i>)	28
3.3. Espectro de salinidades del agua (<i>Medina,2000</i>)	29
3.4. Clasificación de tecnologías de desalinización (<i>Elaboración propia</i>)	30
3.5. Comparación de tecnologías de desaliniación	31
4.1. Radiación global en superficies inclinadas para Puertecitos (<i>SSE,2017</i>)	36
4.2. Componentes utilizados para simulación de microrred	43
5.1. Variables involucradas en modelo matemático	72
5.2. Comparación entre diferentes autores	74
5.3. Factores de diseño recomendados por fabricantes	76
6.1. Costo principales componentes de microrred con ALENDE.	92
6.2. Costos de operación y mantenimiento de microrred con ALENDE.	92
6.3. Costo de principales componentes de microrred con baterías y ósmosis inversa.	93
6.4. Costos de operación y mantenimiento de microrred con baterías y ósmosis inversa	93
6.5. Indicadores económicos de los escenarios.	96

LISTA DE FIGURAS

2.1. Principales energías renovables y su aprovechamiento. (<i>Elaboración propia</i>)	12
2.2. Microgeneración diaria de fuentes renovables a)Energía eólica y solar fotovoltaica, b)Energía geotérmica, biomasa, mini hidráulica y solar térmica (<i>Fuente:CAISO,2017</i>)	14
2.3. Estructura de una red eléctrica convencional. (<i>Fuente: Meza, 2016</i>)	15
2.4. Demanda y generación eléctrica horaria, con aplicación de sistemas de almacenamiento. (<i>Elaboración propia</i>)	16
2.5. Distribución de tecnologías de almacenamiento en función de su aplicación. (<i>Fuente: H. Ibrahim, 2008</i>)	17
2.6. Esquema típico de una microrred. (<i>Elaboración propia</i>)	18
2.7. Central de bombeo hidráulico reversible (<i>Fuente:(Ahumada,2012)</i>)	20
2.8. Bombas de desplazamiento positivo (<i>por cortesía de G.U.N.T.</i>)	21
2.9. Almacenamiento por aire comprimido (<i>Ridge Energy Storage and Grid Services</i>)	23
2.10. Diagrama de proceso isotérmico. (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	24
2.11. Proceso isotérmico reversible. (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	24
2.12. Diagrama de proceso adiabático. (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	25
2.13. Proceso adiabático reversible. (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	25
2.14. Configuración de máquinas hidráulicas. a) Conjunto bomba-turbina, b) Bomba reversible. (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	26
2.15. Agrupación de tecnologías híbridas de almacenamiento de energía bombeo hidráulico con aire comprimido. (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	26
3.1. Proceso de desalinización por osmosis inversa. (<i>Elaboración propia</i>)	33

4.1. Localización de Puertecitos en el mapa (Izquierda), Poblado de Puertecitos (Derecha) (Fuente: Google maps)	36
4.2. Perfil de demanda de comunidad de Puertecitos en Verano (Fuente: Elaboración propia)	38
4.3. Perfil de demanda de comunidad de Puertecitos en Invierno (Fuente: Elaboración propia)	39
4.4. Jerarquía de requerimientos de agua (Adaptado de WHO,2011)	40
4.6. Fotografía aérea de microrred de Puertecitos (Cortesía de CEENER)	41
4.5. Diagrama unifilar de microrred	42
4.7. Diagrama de conexiones de componentes en plataforma TRNSYS 17	44
4.8. Diagrama de flujo para simular microrred en TRNSYS 17	45
4.9. Generación, almacenamiento y demanda para días típicos de Verano	47
4.10. SOC y generador diesel para días típicos de Verano	48
4.11. Comportamiento mensual del SOC y G. diésel en Verano	49
4.12. Generación, almacenamiento y demanda para días típicos de Invierno	50
4.13. SOC y generador diésel para días típicos de Invierno	51
4.14. Comportamiento mensual del SOC y G. diésel en Invierno	52
4.15. Consumo de diésel y uso de baterías en Abril con hábitos de consumo rural	54
4.16. Consumo de diésel y uso de baterías para Abril con hábitos de consumo urbano	55
5.1. Diagrama a bloques de propuesta almacenamiento-desalinización	58
5.2. Esquema de configuración bomba de émbolos y turbina pelton	59
5.3. Esquema de configuración bomba reversible	60
5.4. Esquema de configuración bomba émbolos-bomba reversible	60
5.5. Diagrama de tuberías e instrumentación de propuesta tecnológica	62
5.6. Curvas características de turbina Multitec 50-4.1/14	68
5.7. Diagrama de flujo de metodología de solución de plataforma EES	71
5.8. Densidad energética en función de la presión inicial y relación aire-agua dentro del tanque de almacenamiento	73
5.9. Diagrama de flujo para afinar dimensionamiento	78
5.10. Diagrama de flujo para simular vinculando TRNSYS y EES	79
5.11. Comportamiento de microgeneradores en Verano	82
5.12. Comportamiento de cargas y exceso de energía en Verano	83
5.13. Comportamiento del estado de carga, eficiencia de turbina y consumo de combustible en Verano	84
5.14. Comportamiento de ALENDE en verano	86
5.15. Comportamiento del estado de carga, eficiencia de la turbina y desalinización	87

6.1. Plano constructivo de módulo de almacenamiento	90
6.2. 40 Contenedores con los módulos de almacenamiento como referencia de dimensiones del sistema de almacenamiento.	91

NOMENCLATURA

Símbolo	Definición	Unidades
qv	Flujo volumétrico	m^3/s
V	Volumen	m^3
rpm	Revoluciones por minuto	r/min
η	Eficiencia volumétrica	—
F_{prop}	Factor de proporción para escalamiento	—
P	Potencia eléctrica	kW
ρ	Densidad	kg/m^3
H	Altura de columna de agua	m
Δp	Presión manométrica	MPa
C_{ctrl}	Señal de control	—
$\dot{m}$	Flujo másico	kg/s
$\dot{Q}$	Flujo volumétrico	m^3/h
m	Masa	kg
R	Constante universal de los gases	$kJ/kg \cdot K$
T	Temperatura	K
Z	Factor de compresibilidad	—
$\bar{v}$	Volumen específico	m^3/kg
C	Coefficiente adimensional	—
ω	Velocidad angular	rad/s
r	Diámetro de rodete de turbina	m
S	Salinidad	g/kg

Símbolo	Definición	Unidades
<i>Rec</i>	Factor de recuperación de ósmosis inversa	—
<i>RS</i>	Factor de rechazo de ósmosis inversa	—
<i>Val</i>	Posición de válvula de mezcla	—
<i>E</i>	Energía eléctrica	<i>kWh</i>
ρE	Densidad energética	<i>kWh/m³</i>
α	Relación agua-aire	—
<i>tc</i>	Tiempo de carga del sistema de almacenamiento	<i>horas</i>
<i>N</i>	Número de elementos	<i>Piezas</i>
<i>AP</i>	Producción de agua potable estimada	<i>litros/h</i>
Φ	Caudal de permeado por unidad de superficie de membrana	<i>l/m² · h</i>
<i>A</i>	Área	<i>m²</i>

Subíndice	Definición
<i>B</i>	Bomba hidráulica
<i>Cil</i>	Cilindro
<i>Vol</i>	Volumétrica
<i>elec</i>	Eléctrica
<i>mec</i>	Mecánica
1	A la entrada de la bomba hidráulica
2	A la salida de la bomba hidráulica
3	A la salida del tanque de almacenamiento
4	A la entrada de a válvula de mezcla
6	A la entrada de membranas semipermeables
7	A la salida de membranas semipermeables (rechazo)
8	A la salida de membranas semipermeables (producto)
<i>bom</i>	Sistema de bombeo
<i>a</i>	Agua
<i>t</i>	Tanque de almacenamiento
<i>c</i>	Constante
<i>i</i>	Inicial
<i>g</i>	gas
<i>acum</i>	Acumulado
<i>T</i>	Turbina hidráulica
<i>h</i>	Presión
<i>q</i>	Caudal
<i>p</i>	Potencia mecánica
<i>gen</i>	Generador eléctrico
<i>sw</i>	Agua de mar
<i>nom</i>	Nominal
<i>A</i>	Almacenamiento
<i>C</i>	Demanda
<i>min</i>	Mínima
<i>SWRO</i>	Sistema de ósmosis inversa
<i>m</i>	Membranas semipermeables
<i>v</i>	Tubos de presión para membranas semipermeables

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

El agua y electricidad son esenciales para la vida, para el crecimiento económico y para el progreso humano. El acceso a servicios básicos de agua y energía eléctrica es aún hoy el componente clave para reducir la pobreza. La falta de disponibilidad y de acceso a estos servicios básicos impide a los individuos y a las comunidades alcanzar mayores niveles de bienestar y beneficiarse de las oportunidades de desarrollo social y económico. El crecimiento económico exige movilizar el potencial de los ecosistemas para satisfacer las demandas insatisfechas y crecientes de los servicios básicos, los cuales se encuentran inmersos en un ciclo donde la explotación está aumentando constantemente debido a la dependencia mutua del agua y la energía al ponerse a la disposición de la población, donde el crecimiento población es nuestra variable independiente. La dependencia mutua es debido a que el agua requiere de energía para su extracción, almacenamiento y transporte, por otro lado la energía proveniente de fuentes fósiles requiere de agua para el enfriamiento de sus procesos, extracción, refinado y producción de combustibles. Expertos pronostican un aumento del 35 % en el consumo de energía a nivel mundial, lo que incrementará el consumo de agua en un 85 %, y con ello el aumento en la presión social por la escases del vital líquido (*Thirsty Energy: Asegurar la provisión de energía en un mundo donde la disponibilidad de agua es limitada*, 2013)

Es cierto que el agua ocupa cerca del 75 % de la superficie terrestre, pero solo el 2.5 % corresponde a agua dulce, de este porcentaje solo el 0.3 % se puede extraer de forma fácil al estar presente de forma superficial y el 30 % corresponde al agua subterránea la cual requiere un 30 % más de energía que el agua superficial para ser extraída (ONU,2015). El problema radica en la sobreexplotación de esta agua subterránea, ya que los niveles del manto freático están disminuyendo en todo el Mundo. La disminución del manto freático provoca que se utilice más energía para extraerla, y peor aun cuando se llega a

niveles críticos se presenta el proceso de cuña salina que consiste en la intrusión de agua salina a los mantos de agua dulce contaminándolos. Algunos países están apostando por la desalación de agua de mar al tener escasez de agua dulce. Pero las tecnologías de desalación de mayor capacidad instalada en el mundo pertenecen a procesos térmicos y utilizan combustibles fósiles. Este tipo de tecnologías tienen un consumo energético muy alto y el combustible utilizado actualmente requiere de agua potable para su extracción y refinado, entonces volvemos de nuevo a círculo vicioso de la dependencia mutua del agua y la energía. La desalación de agua de mar por destilación térmica en sus tres modalidades de mayor uso requiere de una cantidad considerable de energía primaria por volumen de agua destilada. Por ejemplo, la tecnología de destilación súbita multi etapa (MSF por sus siglas en inglés) típicamente consume 37.9 kWh/m^3 de agua destilada, la destilación múltiple efecto (MED por sus siglas en inglés) presenta una mejora al utilizar el calor latente de condensación, evaporación y con ello reducir la temperatura de la fuente de calor, su consumo típico es de 30.5 kWh/m^3 de agua destilada. La destilación comercial que presenta menor consumo es por compresión mecánica de vapor (CV por sus siglas en inglés) y requiere de 29.2 kWh/m^3 de agua destilada. A pesar de su bajo consumo, la limitante es su capacidad por utilizar un compresor mecánico, el cual encarece esta tecnología en aplicaciones a gran escala. La desalación de agua de mar mediante membranas presenta consumos energéticos inferiores a la destilación térmica. Una planta de osmosis inversa para agua de mar (SWRO por sus siglas en inglés) requiere de 21.5 kWh/m^3 de agua potable.

Algunos autores (IEA-ETSAP & IRENA, 2012; Al-Karaghoulí y Kazmerski, 2011; Charcosset, Falconet, y Combe, 2009) han propuesto el uso de energías renovables para la desalación de agua de mar, y de esta forma eliminar el círculo vicioso de la dependencia mutua. Sin embargo los costos de desalación mediante energías renovables son altos, sí se comparan con la desalación convencional basada en combustibles fósiles como su fuente de energía, a excepción de aplicaciones en regiones remotas, donde la desalación por energías renovables puede competir con los sistemas fósiles convencionales debido al elevado costo de la transmisión y distribución de energía. A este tipo de aplicaciones en regiones remotas se le llama generación distribuida, que en conjunto con una serie de cargas y un administrador del uso de la energía conforman una micro red aislada. El uso de sistemas de desalación de agua mediante fuentes de energía renovables en áreas remotas resulta una opción viable que rompe el círculo vicioso de la dependencia mutua del agua y la energía además de proveer del vital líquido a comunidades aisladas según estudios (IEA-ETSAP & IRENA, 2012; Al-Karaghoulí y Kazmerski, 2011; Charcosset y cols., 2009). No obstante la intermitencia de las fuentes renovables trae consigo un nuevo reto para las micro redes aisladas, el cual se ha vencido parcialmente con el uso de sistemas de almacenamiento convencionales, sin embargo ha dado cavidad a un nuevo problema que afecta la sustentabilidad en la desalación por energías renovables. Las baterías son utilizadas comúnmente como sistemas de almacenamiento de energía, se sabe que varios de sus componentes usados en su fabricación son tóxicos y por tanto la con-

taminación ambiental y los riesgos de afectar la salud y los ecosistemas dependen de la forma, lugar y volumen en que se ha dispuesto o tratado este tipo de residuos. El problema no termina aquí, expertos (Castro y Díaz, 2004) calculan que en los últimos 43 años, en el territorio Mexicano se han desechado aproximadamente 635 mil toneladas de pilas y baterías, y continuará en aumento, consecuencia de la disminución de costos y fácil adquisición de estos productos.

1.2. Justificación

Las energías renovables juegan un rol muy importante en la sustentabilidad de la desalación de agua de mar. Las energías renovables adecuadas para desalación incluyen solar térmico, solar fotovoltaico, eólica, y geotérmica. La energía fotovoltaica y eólica son utilizadas frecuentemente con unidades de desalación por membranas (SWRO), mientras que la energía solar térmica y geotérmica se utilizan normalmente con la desalación por destilación térmica (MSF, MED y CV). Se ha demostrado que la desalación de agua de mar y el almacenamiento de energía sigue siendo un problema abierto. En esta investigación se demuestra la viabilidad técnica de una tecnología de bajo impacto ambiental y larga vida útil que por sus características utiliza agua y aire en forma de presión para almacenar energía, además de proveer de agua potable a una comunidad aislada. El objetivo de la aplicación de la tecnología antes mencionada es sustituir de manera gradual el sistema de almacenamiento mediante baterías, que aunque es una tecnología madura, presenta una serie de desventajas entre ellas el tiempo de vida relativamente corto que va en función del número de ciclos de descarga y el estado de carga (Kaldellis, Zafirakis, y Kavadias, 2009), además de contaminar el medio ambiente al ser desechadas. El caso de estudio donde se sustenta la presente tesis es una comunidad pesquera aislada de la red eléctrica que cuenta con una micro red utilizando baterías de plomo ácido como sistema de almacenamiento que se estima tendrá 5 años de vida útil. El agua potable actualmente se extrae de un pozo a 30 km de la comunidad, se transporta hacia la comunidad, y se almacena en tinacos. Los resultados de la presente investigación sirven como base para el desarrollo de la ingeniería de detalle de un prototipo. Esta tecnología se puede extrapolar a otras regiones con necesidades de almacenamiento de energía y escasez de agua con acceso al mar.

1.3. Antecedentes

Las tecnologías CAES requieren funcionar en un rango de presiones cercanas a las condiciones de diseño del compresor y turbina de gas, esto para lograr la máxima eficiencia en el proceso de compresión y expansión. Para lograr esto se controla la presión de entrada y salida estrangulando el aire, lo cual genera pérdidas de energía. Debido a que los rangos de operación son generalmente de 55-103 bars se

requiere gran volumen de almacenamiento de aire para mantener ese rango de presión por un mayor. Por lo anterior el inventor (Heidenreich, 2007) patentó un sistema CAES a presión constante compensado por una columna de agua. El sistema tiene la misma capacidad de generación de energía eléctrica utilizando solamente el 23 % del volumen de almacenamiento utilizado por CAES a volumen constante con presión variable (Kim, Shin, y Favrat, 2011). Esto se logra utilizando una columna de agua que ejerce presión sobre el aire comprimido, el uso de cuevas profundas logra esta diferencia de alturas en el agua, permitiendo tener el sistema subterráneo, la desventaja es la difícil construcción de cuevas profundas. El inventor (Bollinger, 2010) en su patente describe un sistema y método para una expansión rápida e isotérmica de un gas en un cilindro. El cilindro está incluido en un sistema de conversión de energía hidráulico-neumático que incluye una cámara de gas(lado neumático), una cámara de fluido (lado hidráulico) y un mecanismo que separa ambas cámaras pero permitiendo un desplazamiento para el intercambio de presión entre ambas cámaras y restringiendo el intercambio de masa entre ellas. El gas contenido en el cilindro se hace circular por un intercambiador de calor y cede su energía térmica a un fluido de trabajo de flujo variable a temperatura ambiente. En esta patente se busca disminuir los costos del sistema de almacenamiento utilizando componentes comerciales, además de mejorar la potencia de expansión del gas aumentando la transferencia de calor variando el flujo del fluido de trabajo y el área del intercambiador de calor.

Como mejora a CAES a presión constante los autores (Kim, Lee, Kim, y Favrat, 2012) evalúan la sustitución del uso de cuevas y una columna de agua mediante la implementación de dos tanques presurizados que contienen agua y aire. La corrección consta de dos tanques de almacenamiento de aire conectados entre sí mediante una tubería y una bomba reversible colocados en la parte inferior de ambos tanques. El primer tanque está conectado al compresor y turbina de gas por su parte superior, el segundo actúa como almacenamiento. Ambos tanques contienen agua y aire. Durante el proceso de compresión se ingresa aire al primer tanque y empuja al agua al segundo tanque. La bomba ayuda en el desplazamiento del agua para mantener una presión constante en el proceso de compresión. Durante la descarga, el aire presurizado en el primer tanque se expande en la turbina de gas, el aire presurizado en el segundo tanque empuja el agua hacia el primer tanque para mantener la presión constante en el proceso de expansión. En el desplazamiento del agua se acciona la turbina hidráulica (bomba reversible) y se genera electricidad.

En la propuesta anterior no se le da importancia al calor generado durante el proceso de compresión, lo cual aumenta la temperatura y provoca un mayor trabajo en el compresor, ni tampoco se considera que el aire al enfriarse perderá presión. Es por ello que los autores (Wang, Wang, Wang, y Yao, 2013) sugieren realizar el proceso de compresión cuasi-isotérmico utilizando un pistón líquido y rociado de agua para lograr la transferencia de calor del aire al agua. Además el sistema de almacenamiento es mayormente PHES ya que no se utiliza la turbina de gas, en su lugar la turbina hidráulica genera todo el trabajo. La

estructura es más simple, solo se utiliza un tanque, un compresor, una bomba y una turbina hidráulica. El tanque es precargado con aire mediante el compresor. Durante el proceso de carga la bomba inyecta agua al tanque elevando la presión interna, al mismo tiempo se rocía agua por la parte superior del tanque para estabilizar la temperatura del aire. Al inicio de la descarga, el aire presurizado empuja el agua fuera del tanque, al mismo tiempo se rocía agua del fondo del tanque sobre el aire, debido a que el agua tiene mayor temperatura, cede su calor al aire y ayuda en el proceso de expansión. El agua fluye a través de una turbina hidráulica y se genera energía eléctrica. La eficiencia es alta y los costos de construcción bajos comparado con CAES convencional, no se requieren de condiciones geográficas especiales y la densidad energética aumenta al elevar la presión inicial de carga. Con esto se da solución a los problemas de PHES y CAES planteados al inicio de este trabajo, sin embargo nuevamente se tiene la desventaja de que la bomba y la turbina hidráulica no trabajan en condiciones de diseño, lo que disminuye su eficiencia. Es por ello que (Yao, Wang, Liu, y Xi, 2014) perfecciona la propuesta anterior. Este nuevo desarrollo incluye un segundo tanque donde se almacena el aire a alta presión. Al inicio los dos tanques se precargan mediante un compresor, una vez terminada la precarga el compresor deja de funcionar. Durante la carga, la bomba inyecta agua al primer tanque, los dos tanques se encuentran conectados por un segundo compresor que mantiene constante la presión durante el proceso de carga en el primer tanque, y aumenta la presión en el segundo tanque. Al transcurrir el proceso de descarga el segundo tanque cede su presión al primer tanque manteniendo este último una presión constante durante la descarga del agua a través de la turbina hidráulica.

En la Universidad de Ecole Polytechnique Federale de Lausanna en Suiza, se tiene un prototipo experimental de un sistema de almacenamiento de energía hidroneumático inventado por (Rufer y cols., 2013) que utiliza dos pares de cilindros trabajando de forma alternada para realizar la compresión-expansión del aire. Cada par está compuesto por un cilindro de baja presión, y uno de alta presión. La compresión se realiza por dos etapas en cada par de cilindros mediante el principio de pistón líquido. En cada par, el aire del exterior es succionado por el pistón de baja presión al mismo tiempo que el pistón de alta presión comprime el aire que contenía inicialmente y lo deposita en el tanque de almacenamiento. El aire que ingresó previamente al cilindro de baja presión es comprimido y se deposita en el pistón de alta presión. El agua que ingresa a los cilindros es dispersada en forma de gota para lograr un proceso cuasi-isotérmico. El movimiento del agua es provocado por un cilindro horizontal con 6 cámaras, una para cada pistón de compresión/expansión, y las dos restantes que se encuentran en los extremos derecho e izquierdo son utilizadas para desplazar un pistón axial al llenarse y vaciarse de un fluido (agua o aceite) en repetidas ocasiones, este último fluido es movido por una bomba y una válvula de 4 vías 3 posiciones que permite cambiar la dirección del flujo. Un intercambiador de calor es utilizado para retirar la energía térmica del agua, que adquirió durante el proceso de compresión. La energía térmica retirada se disipa en el ambiente. Durante el proceso de expansión del aire ocurre lo mismo, pero en esta ocasión la bomba se

convierte en turbina y el motor en generador eléctrico. La dispersión de agua dentro de los cilindros de compresión/expansión se lleva a cabo mediante bombas re circulatorias. En esta tecnología no se cuenta con un sub sistema de almacenamiento térmico, en su lugar, la energía térmica se dispersa al ambiente durante el proceso de compresión, para después tomarla nuevamente del ambiente durante el proceso de expansión. Sí bien es cierto que el medio ambiente es un gran sumidero y fuente de calor al mismo tiempo, esta tecnología debe ser lo suficientemente robusta para funcionar en regiones con clima muy variante y extremo a lo largo del año.

Los inventores (Lebas, FR, Rojey, y FR, 2015), proponen utilizar un sistema en donde el medio de almacenamiento de energía térmica es el mismo fluido utilizado para comprimir el gas mediante una bomba hidráulica usando el principio de pistón líquido, y posteriormente recuperar la energía mecánica en la expansión del gas mediante una turbina hidráulica. El intercambiador de calor tubular en espiral es utilizado como medio de almacenamiento del aire presurizado, para tener una mayor área de contacto logrando cambios de presión en el gas aún con pequeños deltas de temperatura, similar a un proceso isotérmico. Un colector solar puede funcionar como auxiliar en el proceso de expansión del gas, proporcionando energía al medio de almacenamiento de energía térmica.

Paralelo a lo anterior en el Laboratorio Nacional Oak Ridge está en etapa de desarrollo un sistema integral de almacenamiento de energía distribuido (GLIDES por su siglas en inglés) (Witt, Hadjerioua, Martinez, y Bishop, 2015) donde están resolviendo el problema de la combinación PHES-CAES desde otro enfoque, disolución del aire en el agua. La disolución del aire en el agua depende de la presión y temperatura a la que estén sometidos, y cuando mayor es la disolución del aire en el agua, mayor son las pérdidas de presión en el tanque de almacenamiento. Es por ello que GLIDES utiliza una capa aislante flotante para dividir el aire del agua y así prescindir del uso de un compresor de aire. Utilizan una bomba para cargar el sistema, introduciendo el agua a la cámara cargada previamente con aire elevando su presión. Durante el proceso de carga la bomba es accionada con energía solar fotovoltaica, un colector de energía solar térmica recolecta calor durante el día y lo almacena en un material con cambio de fase. Durante el proceso de descarga el agua bajo presión circula por una turbina hidráulica al mismo tiempo que el calor almacenado durante el día se utiliza para elevar la temperatura del aire almacenado y con ello elevar su presión. El proceso de compresión es adiabático y por tanto ineficiente ya que se requiere de mayor energía para comprimir el aire.

Los inventores (Samara-Rubio, Samara-Rubio, Ackler, y Moffat, 2016) desarrollaron un sistema que consta de 3 etapas de compresión-expansión de aire para mejorar la eficiencia termodinámica. El aire es almacenado en tanques, dependiendo de la etapa de compresión-expansión, en su respectivo tanque de baja, media y alta presión. Los dispositivos de compresión se realizan mediante pistones hidráulicos frustoconico para reducir el volumen muerto. Se realiza un intercambio de calor en cada etapa del proceso (tanques de almacenamiento de aire, de líquido y en los dispositivos compresores/expansores) , para

lograr un proceso cuasi isotérmico. Un mezclador en tanques de almacenamiento de aire y del líquido ayuda a promover la transferencia de calor. Se utiliza un arreglo de contenedores hexagonales agrupados de tal forma que se asemejan a un panal de abejas. La geometría del contenedor hexagonal permite una mayor área de contacto entre el aire y la superficie, además aumenta la turbulencia y velocidad del mismo para mejorar la transferencia de calor. Se utiliza una membrana elástica con agua en su interior para comprimir el aire que se encuentra en la parte externa de la membrana. En los contenedores hexagonales se almacena el aire presurizado, unos conductos internos en las paredes transportan un líquido calo transportador para intercambiar calor con el aire de manera indirecta.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Simular, dimensionar y establecer las especificaciones técnicas de un sistema de almacenamiento de energía por bombeo hidráulico combinado con aire comprimido y desalinización por ósmosis inversa para micro redes aislada de Puertecitos B.C.

1.4.2. Objetivos específicos

- Estudiar estado del arte de las tecnologías de desalación y almacenamiento hidráulico.
- Generar propuesta tecnológica.
- Desarrollar modelo matemático de propuesta tecnológica.
- Simular y realizar estudio paramétrico de propuesta.
- Dimensionar componentes de propuesta tecnológica

1.5. Organización de la tesis

La secuencia del contenido de esta tesis se describe de forma breve a continuación. En el capítulo 2 se hace una revisión de las principales fuentes de energías renovables así como las tecnologías para el aprovechamiento de ellas, se hace una introducción a los diferentes tipos de almacenamiento de energía y las tecnologías de almacenamiento de energía utilizadas actualmente, enseguida se explica el concepto de microrredes y las partes que lo componen.

En el capítulo 3 se abordan nociones básicas de la desalinización, los métodos de separación y las tecnologías de mayor aplicación para desalinización de agua de mar.

Enseguida, en el capítulo 4 se presenta el caso de estudio, que consiste en comunidad aislada en Puertecitos B.C.. Se muestran los resultados del estudio de clima y recursos energéticos de esta misma así como el perfil de demanda eléctrica e hídrica . Se detallan los componentes que conforman la microrred existente, y mediante simulación en la plataforma TRNSYS se estudia el comportamiento actual de la microrred. Para finalizar este capítulo se evalúa la posibilidad de integrar un sistema de ósmosis inversa a la microrred.

El estudio de la propuesta tecnológica se detalla en el capítulo 5. Comienza con un análisis comparativo de las distintas configuraciones de la propuesta y se elige la mejor. Por consiguiente se describen los componentes de la propuesta tecnológica y su funcionamiento. Posterior a ello se muestra el modelo matemático así como el método de solución en la plataforma EES, siguiendo con el estudio de sensibilidad para encontrar los parámetros de operación que arrojen una mayor densidad energética. En la siguiente sección se estudia el comportamiento de la propuesta en la microrred de Puertecitos, para culminar con un estudio de implementación a mayor escala.

En el capítulo 6 se muestran los resultados de la ingeniería básica del estudio de implementación a mayor escala así como la evaluación tecno-económica comparando la propuesta contra una microrred con baterías incluyendo un sistema de ósmosis inversa.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones en el capítulo 7.

Energías renovables y almacenamiento hidráulico presurizado

2.1. Tecnologías para el aprovechamiento de las energías renovables

Una lista de las principales fuentes de energías renovables y su aprovechamiento es presentada en la figura 2.1. Las energías renovables son aquellas que se encuentran en la naturaleza y se consideran inagotables debido a que el ciclo de regeneración es relativamente corto en comparación con los combustibles fósiles que requieren de millones de años. En general, la mayoría de las energías renovables provienen del sol de forma directa e indirecta, a excepción de la energía geotérmica que proviene del magma de la tierra, y la energía mareomotriz que es provocada por la interacción gravitatoria tierra-luna. La energía solar, como su nombre lo indica aprovecha de forma directa la energía del sol mediante dos efectos; el efecto fotovoltaico y el efecto fototérmico. La energía eólica y del oleaje (energía marina) son generadas de forma indirecta por el sol, al calentar esta la superficie terrestre calienta también el aire y por ende el movimiento por diferencia de densidades causa el viento, y el viento mueve las olas. A diferencia la energía de gradiente térmico del mar, energía hidráulica y energía de gradiente salino (marina) son iniciadas por el calentamiento del océano creando una diferencia de temperaturas entre el lecho marino y la superficie, además del conocido ciclo del agua, el encargado de transportar el vital líquido hacia las montañas suscitando la creación de ríos que fluyen nuevamente hacia el mar. La energía de la biomasa es un tipo de almacenamiento de energía del sol, que se crea mediante la fotosíntesis de las plantas (“CENTRALES DE ENERGÍAS RENOVABLES: GENERACIÓN ELÉCTRICA CON ENERGÍAS RENOVABLES”, 2009).

Cada recurso energético cuenta con una tecnología para su aprovechamiento, como es el caso de los pa-

neles solares que mediante el efecto fotovoltaico convierten la energía electromagnética del sol en energía eléctrica. La otra forma de energía solar es captada térmica-mente mediante un colector solar, en donde se transfiere el calor a un fluido, siendo agua el más utilizado.

El aerogenerador es utilizado para el aprovechamiento del recurso eólico, convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica, dependiendo del tipo de aerogenerador el principio de operación puede ser por sustentación o arrastre, es muy común el uso de aerogeneradores acoplados a un generador eléctrico para convertir la energía mecánica en el eje del rotor, en energía eléctrica.

Las turbinas hidráulicas son empleadas en la energía hidráulica, dependiendo de las diferencias de alturas y características del cause pueden utilizarse turbinas de reacción o de impulso, las turbinas de reacción son utilizadas generalmente cuando la diferencia de alturas del cause ronda los 100 metros, para alturas mayores es preferible el uso de turbinas de impulso. La energía cinética del río es convertida a energía mecánica en el eje de la turbina, y es necesario el uso de un generador para la generación de electricidad.

Los mantos acuíferos que se encuentran en cercanía con el magma caliente elevan su temperatura y presión, este tipo de energía térmica puede ser de baja o alta capacidad según la entalpía a que se encuentre. Es necesario la perforación de pozos para su extracción y el uso de ciclos termodinámicos como el ciclo Rankine para pozos geotérmicos de alta entalpía, y el ciclo Rankine orgánico para pozos de baja entalpía. Estos tipos de ciclos convierten la energía térmica del fluido en energía eléctrica utilizando una turbina de vapor y un generador eléctrico.

Se considera Biomasa a cualquier material orgánico originado en un proceso biológico. Es una forma indirecta de energía solar dado que en algún punto de la cadena alimenticia se requirió de energía solar para el desarrollo de algún ser vivo, como la fotosíntesis para el caso de las plantas. La biomasa puede ser desde desechos forestales, desechos agrícolas, cultivos agrícolas, desechos alimenticios hasta materia fecal. La forma de aprovechamiento puede ser directa, combustionando la biomasa y obtener energía térmica que accione algún ciclo termodinámico, o transformando la biomasa en biocombustibles. Los principales biocombustibles son el biodiesel, bioetanol, biogás y Syngas, para convertir este vector energético en electricidad es necesario utilizar motores de combustión interna acoplados a un generador eléctrico.

El océano nos ofrece una vasta variedad de recursos energéticos que son generados por el movimiento del océano, calentamiento del aire y calentamiento del agua. Con ello un sin fin de tecnologías para su aprovechamiento, algunas de ellas eficaces, otras no tanto. Apesar de ser un recurso abundante pues tres cuartas partes del planeta es agua, su aplicación se encuentra limitada a zonas costeras, y su irregularidad la vuelve una tecnología difícil de implementar. Dentro de la energía generada por el movimiento del océano tenemos la energía mareomotriz, resultado de las mareas. La diferencia de altura media de los mares según la posición relativa de la tierra y la luna, puede explotarse de dos maneras;

una es mediante la construcción de estuarios y diques que almacenan el agua cuando la marea es alta y enseguida es descargada al mar cuando la marea baja, durante la descarga la energía cinética del agua es transformada en energía eléctrica mediante la implementación de turbinas hidráulicas acopladas a un generador eléctrico. La segunda forma de aprovechar la energía de las mareas es utilizando turbinas marinas acopladas a un generador eléctrico similar a las turbinas eólicas, utilizando las corrientes marinas generadas por el movimiento del océano. Como se comentó anteriormente, las olas son ondas superficiales generadas, fundamentalmente, al actuar el viento sobre el agua de los océanos, este tipo de energía renovable se le denomina energía undimotriz. Las formas de captación pueden ser dispositivos flotantes amarrados, sistemas de columnas de agua oscilantes y sistemas de superficies articuladas, que generan un movimiento oscilante y pueden generar energía eléctrica acoplándolos a un generador eléctrico. El calentamiento del océano propicia dos tipos de recursos energéticos; gradiente salino o energía osmótica, y gradiente térmico o OTEC (siglas en inglés de Ocean Thermal Energy Conversion). La energía osmótica está presente en la unión de agua dulce y agua de mar, generalmente cuando desemboca un río en el mar. Este potencial de concentración de sales es explotable utilizando membranas semipermeables que permiten el flujo natural de sales de un líquido de menor concentración a uno de mayor concentración. Este efecto de difusión provoca un aumento en el volumen del agua de mar con una presión suficiente para crear una columna de agua proporcional al gradiente salino de ambas soluciones. A este fenómeno se le conoce como ósmosis reversible o directa. La columna de agua es utilizada como energía potencial, para convertirla en energía eléctrica es necesario el uso de una turbina hidráulica acoplada a un generador eléctrico. El otro recurso energético provocado por el calentamiento del agua es la energía OTEC. La temperatura superficial del océano ronda los 26°C y 33°C, sin embargo a profundidades mayores a 1,000 metros la temperatura puede caer hasta 5°C. Es así como se tiene una diferencia de temperaturas del orden 20°C que puede ser aprovechable mediante la implementación de un ciclo termodinámico, como lo es el ciclo Rankine orgánico. Generalmente, las energías renovables son la opción más sustentable para afrontar el problema del cambio climático, pero también presentan algunas ventajas, como son la abundancia de recurso energético y su dispersión geográfica. Como tal han sido un beneficio económico y de seguridad energética para aquellos países importadores de energía, exhortándolos a consumir recursos energéticos locales (Khalilpour y Vassallo, 2016).

2.1.1. Microgeneración

Para explotar los recursos energéticos locales es necesario utilizar fuentes de generación descentralizada o distribuida, con esto nos referimos a que la energía debe de generarse cerca del lugar donde será utilizada, de esta manera el tamaño de los generadores va desde nivel vivienda, hasta comunidad o

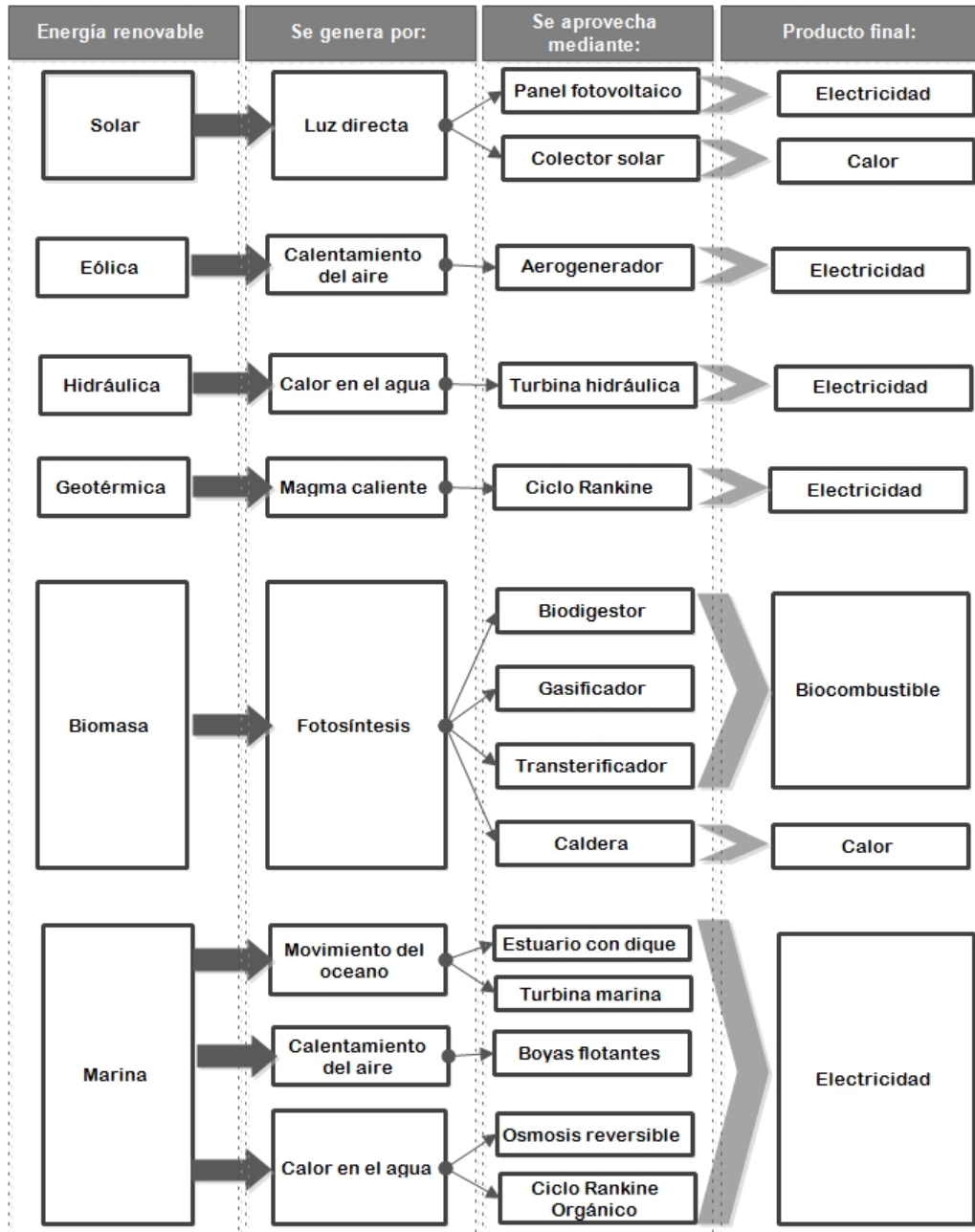


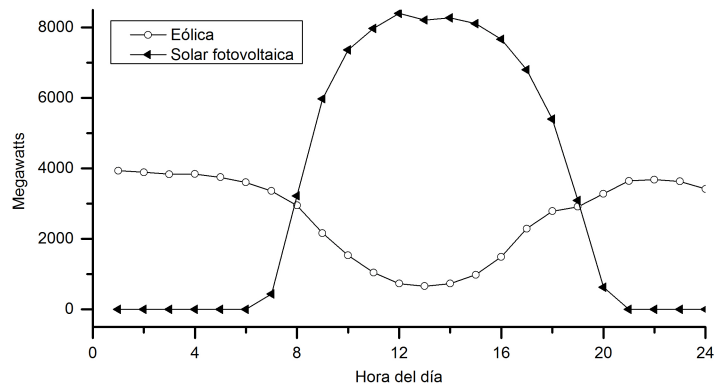
Figura 2.1: Principales energías renovables y su aprovechamiento. (Elaboración propia)

distrito. La microgeneración es un término utilizado para referirse a la generación de energía local a pequeña escala, y tiene diferentes definiciones según el país. La característica que tienen en común todas las definiciones es que la microgeneración ocurre a nivel local, y la cantidad de energía que genera es muy pequeña comparada con las grandes centrales eléctricas (Juntunen y Hyysalo, 2015). La microgeneración puede ser de energía eléctrica, térmica o ambas a la vez e incluye todas las tecnologías para el aprovechamiento de las energías renovables. Por su naturaleza algunos microgeneradores de energías renovables no tienen una producción de energía constante, contrario a esto, presentan variación e intermitencia a lo largo del día. En la figura 2.2 se muestra un ejemplo de la variación típica de los microgeneradores en el estado de California, EUA, (CAISO, 2017) para el día 7 de Agosto del 2017. Generalmente las energía eólica y fotovoltaica son complementarias (figura 2.2 inciso a), es decir el recurso eólico es mayor por las noches. Observamos que la energía solar térmica (figura 2.2 inciso b) y fotovoltaica son la que mayor variación presenta a nivel diario, inclusive a lo largo del año, esto debido al movimiento de rotación y traslación de la tierra. Por el contrario la energía de la biomasa, es gestionable, puede utilizarse cuando se requiera debido a que es considerada energía solar almacenada, basta con tener un inventario suficiente de ella para utilizarla en algún proceso termodinámico cuando se requiera.

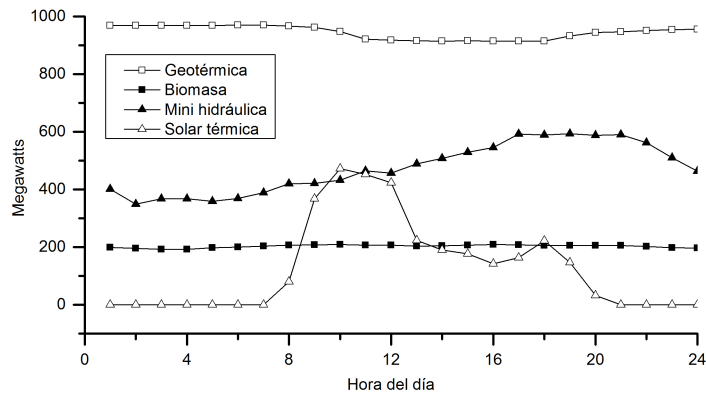
Las variaciones en los recursos renovables (a excepción de la energía geotérmica y biomasa) provoca una baja eficiencia en su generación y consumo, debido a que no se genera cuando se requiere, y no se consume cuando hay excesos. Este desfase entre generación y consumo es el principal reto de las energías renovables. Los sistemas de almacenamiento juegan un papel importante en la gestionabilidad de los recursos renovables, mueven la energía en el tiempo a manera de que esté disponible cuando se necesite.

2.1.2. Almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía permite la interacción entre una fuente variable de energía y cargas variables, sin almacenamiento, la generación tendría que ser equivalente al consumo. Imaginemos la red eléctrica convencional como se muestra en la figura 2.3 (Benavides, 2016), en ella actúan en conjunto centrales eléctricas conocidas como potencia base como lo son plantas nucleares y geotérmicas funcionando siempre a plena carga (pues es difícil controlar su potencia de salida), y otro grupo de centrales termoelectricas de carbón, combustóleo y gas. Es muy común que éste último grupo, a los más eficientes se les hace trabajar en continuo, la mayor cantidad de días posibles al año, y en su potencia nominal, debido a que algunas tecnologías, como las turbinas de vapor, la regulación de potencia no es sencilla ni tan rápida como es preciso en muchos casos. Las tecnologías menos eficientes y más adaptables a variaciones de potencia, como las turbinas de gas, se hacen funcionar ocasionalmente, para cubrir los picos de demanda. Debido a que una turbina requiere de varios minutos para arrancar y alcanzar su máxima



a)



b)

Figura 2.2: Microgeneración diaria de fuentes renovables a)Energía eólica y solar fotovoltaica, b)Energía geotérmica, biomasa, mini hidráulica y solar térmica (Fuente:CAISO,2017)

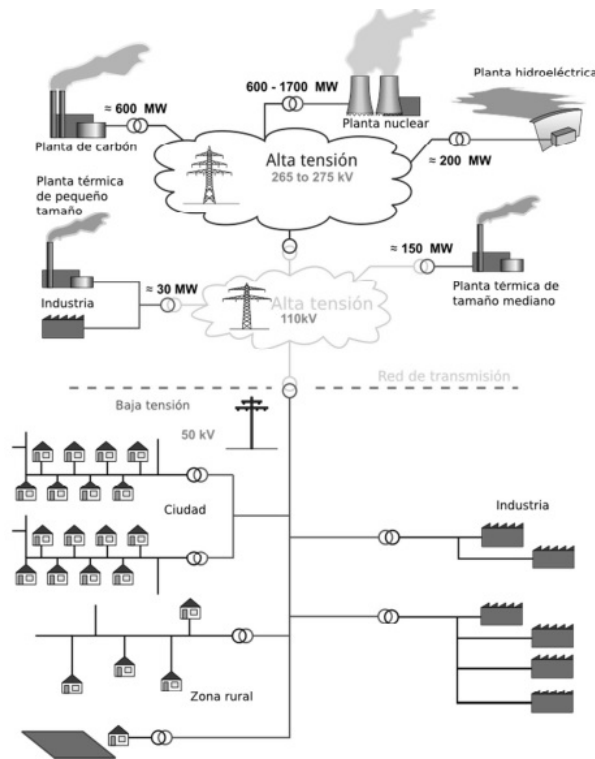


Figura 2.3: Estructura de una red eléctrica convencional. (Fuente: Meza, 2016)

potencia se requiere dejar operando las turbinas en vacío (sin carga) para que estén listas en el momento que se les necesita, a esto se le conoce como potencia rodante. Como podemos observar la potencia rodante además de traer consigo ineficiencias, también son tecnologías con un factor de planta bajo. Como podemos observar en la figura 2.4, el uso de sistemas de almacenamiento de energía permite aumentar la capacidad de las plantas de potencia base y prescindir de las plantas de potencia rodante, inclusive evitar importar energía de otro mercado energético. La aplicación en redes eléctricas permite reducir el uso de combustibles fósiles y con ello la contaminación, dar estabilidad a las pequeñas variaciones de la demanda y además permite una mayor penetración de energías renovables al sistema eléctrico nacional.

Ahora pensemos en el caso de una comunidad aislada de la red eléctrica nacional, la forma convencional de suministrar energía a estas localidades es mediante el uso de generadores diésel, lo cual trae consigo altos costos de operación y mantenimiento a mediano plazo, la implementación de fuentes de energías renovables reduce estos costos además de contribuir al medio ambiente. Como se mencionó anteriormente, las energías renovables por naturaleza son intermitentes, lo cual hace casi imposible satisfacer una demanda que también es variable, en estos casos es imprescindible el uso de sistemas de almacenamiento de energía.

Existen diversos métodos para almacenar energía, dentro de los cuales destacan los siguientes;

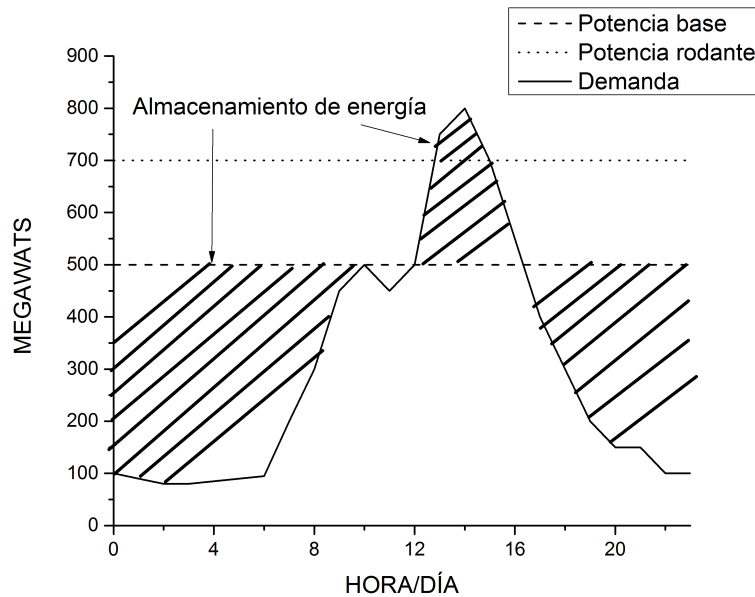


Figura 2.4: Demanda y generación eléctrica horaria, con aplicación de sistemas de almacenamiento. (Elaboración propia)

- **Almacenamiento en forma de energía mecánica:** En este grupo se encuentran las tecnologías de bombeo hidráulico reversible y aire comprimido que almacenan energía potencial. El volante de inercia también está inmerso en esta clasificación almacenando energía cinética.
- **Almacenamiento en forma de energía química:** Aquí figuran las baterías electroquímicas en todas sus modalidades (plomo-ácido, ion litio, de flujo, níquel cadmio y metal-aire).
- **Almacenamiento en forma de energía térmica:** Este tipo de energía puede ser almacenada en forma de calor sensible (energía que provoca un cambio de temperatura) aprovechando el alto calor específico de algunos materiales como por ejemplo el agua, concreto, ladrillo, piedras y arena. Otra variante es almacenando energía en forma de calor latente (energía que provoca cambio de fase) en donde se calienta un sólido hasta fundirlo y llevarlo a su fase líquida, el uso de sales es muy común en esta tecnología.
- **Almacenamiento en forma de energía electromagnética:** Los supercapacitores son utilizados para separar cargas eléctricas negativas y cargas eléctricas positivas entre sus dos placas metálicas separadas por un material dieléctrico.

El sistema de almacenamiento a utilizar depende de su aplicación y duración de descarga, siendo la batería la tecnología más utilizada para regulación de variaciones de demanda y sistemas de respaldo.

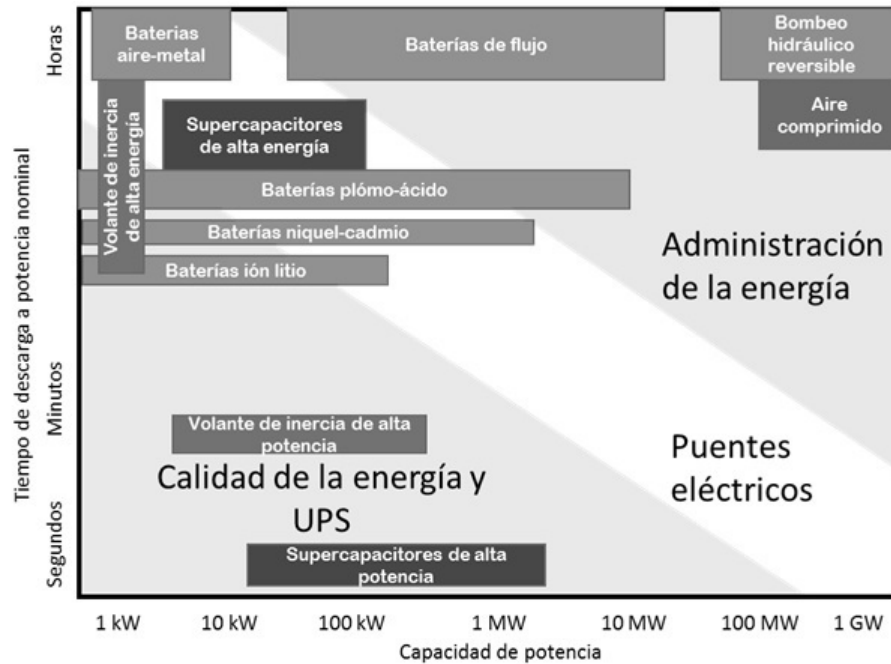


Figura 2.5: Distribución de tecnologías de almacenamiento en función de su aplicación. (Fuente: H. Ibrahim, 2008)

de pequeña a mediana escala, pueden utilizarse en la generación punta debido a su mínimo tiempo de respuesta. El bombeo hidráulico reversible y aire comprimido se usan generalmente en aplicaciones de gran escala y pueden durar horas descargándose, pueden utilizarse en la generación de energía base. Lo anterior se puede observar en la figura 2.5 según (Ibrahim, Ilinca, y Perron, 2008).

2.1.3. Microrredes

DEFINICIÓN

Una microrred, como su nombre lo indica, es una red eléctrica distribuida a menor escala, generalmente menor a 50 MW la cual puede operar en sincronía con el sistema eléctrico nacional (interconectada) o independiente (aislada). Al igual que el sistema eléctrico nacional, las microrredes están conformadas por grupos de generadores, almacenamiento de energía, cargas, distribución y un centro de gestión y control que trabajan en conjunto como un sistema único y flexible (Bordons, García-Torres, y Valverde, 2015). Estos grupos o subsistemas se describen a continuación en la siguiente lista (ver figura 2.6):

- Subsistema de generación: Contiene micro-generadores de energía que pueden ser convencionales o de recursos renovables (solar, eólico, hidráulica, biomasa, oceánica, geotérmica, etc.).
- Subsistema de almacenamiento: Está compuesto por una o varias tecnologías que almacenan energía

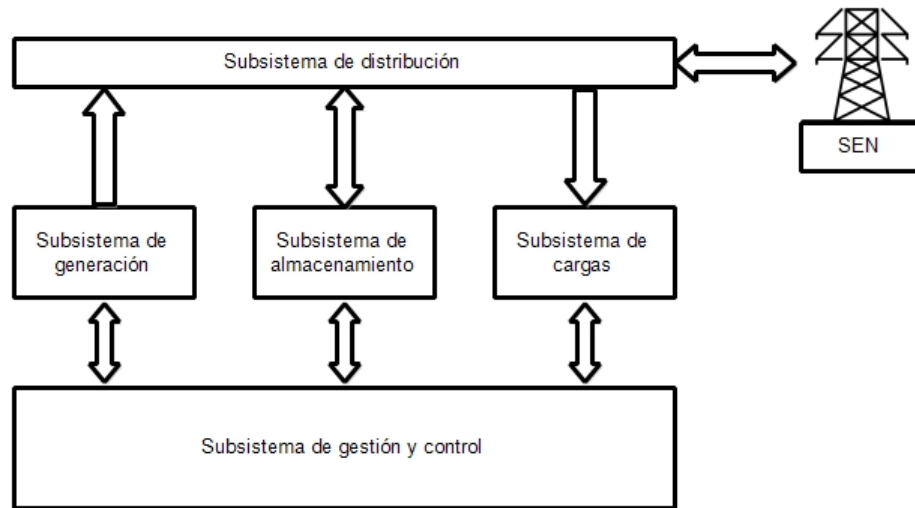


Figura 2.6: Esquema típico de una microrred. (Elaboración propia)

química, eléctrica, potencial, cinética o térmica para dar estabilidad y gestionabilidad a la red eléctrica.

- Subsistema de cargas: Aquí se encuentran los usuarios de energía que pueden ser residenciales, comerciales e industriales.
- Subsistema de distribución: Es la red eléctrica local que está compuesta transformadores elevadores/reductores, seccionadores, punto de conexión con sistema eléctrico nacional (SEL), conductores y acometidas aéreas o subterráneas.
- Subsistema de gestión y control: Establece las dinámicas de operación y coordina los subsistemas ofreciendo un equilibrio en la generación y consumo de energía eléctrica.

Las microrredes se pueden clasificar según su topología, ya sea que los subsistemas se encuentre conectados entre ellos mediante corriente alterna, directa o mixtos. En el acoplamiento de corriente alterna todos los elementos se conectan a un mismo bus para llevar a cabo el intercambio de energía entre ellos, es necesario sincronizar con la red aquellas tecnologías dentro del subsistema de generación que por su naturaleza requieren de un motor-generador como es el caso de las turbinas hidráulicas o de vapor, motores de combustión interna o externa, entre otros, o en su defecto rectificar su onda senoidal y posterior a ello invertir la señal nuevamente mediante un inversor para interconexión a red. Este bus se conecta en un punto único con la red eléctrica lo que permite la interacción con la misma. En el acoplamiento en corriente directa, a diferencia con el acoplamiento en corriente alterna, los generadores eléctricos que operan en corriente alterna se deberán rectificar antes de acoplarlos al bus general. Este bus se conecta a la red eléctrica a través de un convertidor DC/AC. Las cargas de corriente alterna se alimentarían a

través de un inversor. En el acoplamiento mixto coexisten dos buses; el de corriente directa unido a la red eléctrica con un convertidor AC/DC y el de corriente alterna que sería la propia red eléctrica. Los diferentes subsistemas se pueden conectar en función de sus características al bus de corriente alterna o directa.

2.2. Almacenamiento hidráulico presurizado

En la comunidad científica se están haciendo esfuerzos por desarrollar tecnologías de almacenamiento de energía con bajo costo de operación y mantenimiento y de larga duración, además de ser amigable con el medio ambiente. La combinación de las tecnologías de bombeo hidráulico reversible y aire comprimido reúne estas características debido a que utiliza recursos abundantes en el medio ambiente, agua y aire.

2.2.1. Bombeo hidráulico reversible

La potencia del agua está definida por la carga hidráulica y el flujo. Imaginemos un sistema hidroeléctrico típico, el agua de un río es dirigida a una tubería, donde es enviada colina abajo y a través de una turbina (Flujo). La altura vertical (carga hidráulica) crea una presión en la parte más baja de la tubería. El agua presurizada emergiendo al final de la tubería crea la fuerza impulsora de la turbina. Mayor flujo, o mayor carga hidráulica genera más potencia.

- Carga hidráulica: es la presión hidráulica causada por una diferencia de elevación entre la toma de agua y la turbina. Puede expresarse como distancia vertical (metros), o como presión (psi).
- Carga hidráulica neta: Es la presión disponible en la turbina cuando el agua está fluyendo, que siempre será menor a la presión del agua sin flujo. El diámetro de la tubería causa el mayor efecto sobre esta.
- Flujo: Es la cantidad de agua en movimiento, y es expresada en volumen por segundo o minuto (gpm,cfs,lpm)

En la figura 2.7 se muestra claramente los componentes de una central de bombeo hidráulico reversible (PHES por sus siglas en inglés). Esta es una tecnología de almacenamiento a gran escala, madura, comercial y la más utilizada alrededor del mundo, por sus características, su único límite de capacidad es el tamaño de los embalses con diferencia de alturas disponibles. La presa es necesaria para crear una columna de agua mediante el embalse, esta columna de agua ejerce presión en el conjunto de grupos de bombas reversibles. Cuando la central se encuentra en modo generación, la presión que ejerce la columna de agua y el flujo a través de la tubería reforzada producirán trabajo mecánico en el eje de la bomba

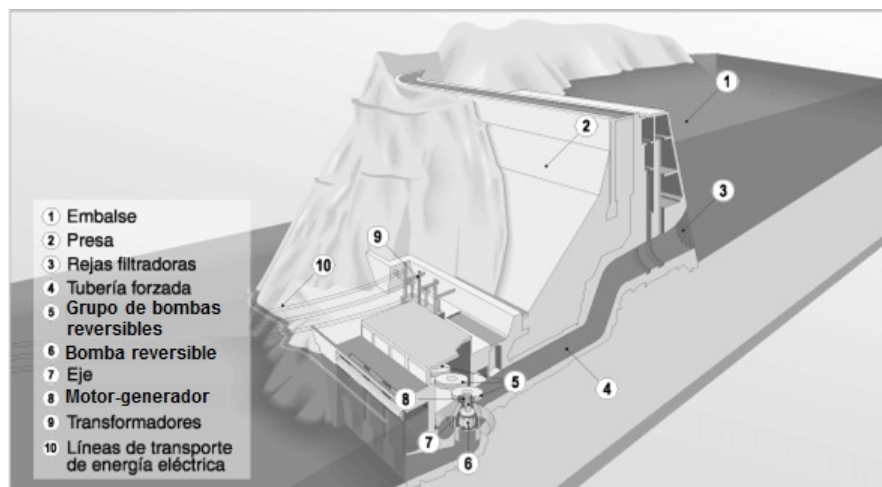


Figura 2.7: Central de bombeo hidráulico reversible (Fuente:(Ahumada,2012))

reversible actuando como turbina, mismo trabajo será convertido en energía eléctrica mediante un generador eléctrico, y posterior a ello se eleva su tensión mediante un transformador para su transmisión. Al existir excedentes de energía en la red eléctrica, la central cambia a modo almacenamiento y ahora las bombas reversibles bombean agua del embalse de menor altura, al de mayor altura. De esta forma tenemos energía almacenada en forma de energía potencial que se cuantifica por la masa de agua en el embalse y la altura de la columna de agua. La eficiencia típica se encuentra en el intervalo de 75 % a 85 % dependiendo del diseño y las máquinas hidráulicas utilizadas.

Maquinas hidráulicas

Una maquina hidráulica es aquella que absorbe energía de un fluido, y la convierte en energía mecánica, o la energía mecánica la transfiere a un fluido en forma de energía de flujo. En una máquina hidráulica el fluido que intercambia energía permanece con densidad contante en todo el proceso. Aunque existen diversas máquinas hidráulicas dependiendo del tipo de fluido (combustible, aire, agua) en esta sección nos enfocaremos a las utilizadas en las centrales de bombeo hidráulico reversible; bombas y turbinas.

Bombas hidráulicas

Una bomba es una máquina que absorbe energía mecánica y la transfiere al líquido que la atraviesa (energía hidráulica). Se emplean para poner en movimiento líquidos, y se clasifican de la siguiente forma:

1. Bombas rotodinámicas o centrífugas: Su elemento principal es un rotor giratorio conocido como rodete a través del cual pasa un fluido de forma continua, cambiando éste su cantidad de movimiento por acción de la máquina. Estas a su vez se clasifican según;



Figura 2.8: Bombas de desplazamiento positivo (por cortesía de G.U.N.T.)

- Dirección de flujo (radial, axial y radioaxial)
 - Posición del eje (vertical, horizontal e inclinado)
 - Presión de salida (baja, media y alta)
 - Número de flujos (simple, doble, un flujo y dos flujos)
 - Número de rodets (una etapa y multietapa)
2. Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas: La transferencia de energía al fluido es hidrostática. Su elemento principal es una cámara que varía su volumen de trabajo y aumenta la presión del fluido expulsándolo del volumen de control disminuyendo el volumen de la cámara, cuando el volumen de la cámara aumenta, ingresa nuevo fluido a esta. Se distinguen por sus altas presiones de operación, y capacidad para trabajar con bajas revoluciones, además de que el flujo no depende de las revoluciones. Existen subdivisiones dentro de esta categoría según su construcción (ver figura 2.8):
- Bombas oscilantes
 - Bombas rotativas

Tabla 2.1: Variciones en presión de entrada en turbinas hidráulicas (*Elaboración propia*)

Tipo de turbina	Rango de presión en m.c.a.
Kaplan	2 a 40
Francis	25 a 250
Turgo	50 a 500
Pelton	50 a 1,000

Turbinas hidráulicas

Una turbina hidráulica absorbe energía del fluido y la convierte en energía mecánica, y es prácticamente una bomba centrífuga funcionando a la inversa. Se clasifican en:

1. Turbinas de reacción: la presión del agua aplica una fuerza sobre las alabes del rodete. La presión decrece conforme atraviesa la turbina. El rodete se encuentra inmerso en agua, y debe ser lo suficientemente resistente para soportar la presión de operación. Las turbinas francis y kaplan entran en esta categoría.
2. Turbinas de impulso: la presión del agua es convertida en energía cinética antes de entrar al rodete. El chorro de alta velocidad golpea las palas que se encuentran en el perímetro del rodete. Las turbinas pelton y turgo entran en esta categoría

La aplicación de las diferentes turbinas depende de las condiciones del lugar (elevación) y la cantidad de recurso (flujo de agua). Vemos claramente en la tabla 2.1 que para situaciones entre 2 y 4 metros de columna de agua (m.c.a) se debe elegir la turbina Kaplan, claro estos rango son aproximados y varían dependiendo del fabricante. La turbina Kaplan y Francis son conocidas porque requieren grandes flujos de agua para operar, además algunas son capaces de funcionar en forma inversa para aplicaciones de bombeo reversible, una turbina Francis es similar en construcción a una bomba centrífuga de una etapa. Las turbinas turgo y Pelton son utilizadas cuando se tienen columnas de agua de mayor magnitud, esto favorece de cierto modo ya que se requiere un menor caudal para operar.

2.2.2. Aire comprimido

El sistema de almacenamiento de energía por aire comprimido (CAES por sus siglas en inglés) utiliza los excedentes de energía para comprimir aire y almacenar dentro de un contenedor, el cual puede ser una caverna de sal subterránea, tuberías o tanques, en la figura 2.9 se muestra un ejemplo de esta tecnología con contenedor subterráneo. Cuando se requiere de energía eléctrica, el aire comprimido es calentado, lo cual aumenta el trabajo de expansión, este aire expandido pasa a través de una turbina de gas conectada a un generador eléctrico para producir electricidad, se utiliza un combustible auxiliar

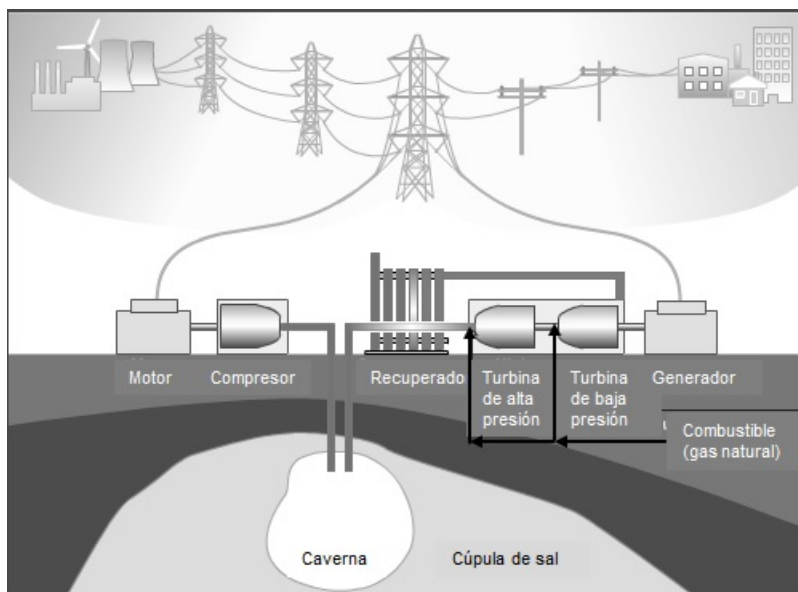


Figura 2.9: Almacenamiento por aire comprimido (*Ridge Energy Storage and Grid Services*)

en las turbinas de gas para adicionar energía con la combustión. Además de la tecnología de bombeo hidráulico reversible, el aire comprimido es el único utilizado actualmente como almacenamiento de energía a gran escala, y se vuelve más rentable cuando se utilizan contenedores subterráneos como cavernas de sal aprovechando formaciones geológicas.

2.2.3. Tecnologías de almacenamiento hidráulico presurizado

La yuxtaposición de las tecnologías de bombeo hidráulico reversible y aire comprimido permite reemplazar la columna de agua de las hidroeléctricas reversibles, por aire presurizado logrando el mismo objetivo, almacenar energía potencial. De este modo se evita inundar grandes áreas para crear represas. La caverna de sal es reemplazada por un pistón líquido, y el compresor por una bomba hidráulica de esta forma se comprime el aire contenido en un cilindro con el líquido que será bombeado, en este caso el fluido de trabajo es el agua, por lo que se reemplaza la turbina de gas por una turbina hidráulica, durante la compresión el aire elevará su energía térmica, misma que debe ser retirada si se trata de un proceso isotérmico, o permitir el aumento de temperatura si se trata de un proceso adiabático. En la figura 2.10 se describe un proceso isotérmico, en donde el agua es un pistón líquido. Durante la compresión ingresa energía mecánica al sistema misma que se convierte en energía térmica la cual se debe de retirar del aire para mantener la temperatura constante del aire y facilitar su compresión. Una vez que se a comprimido el aire, tenemos energía potencial almacenada en nuestro contendedor con la misma temperatura al inicio de la compresión. Ahora para recuperar dicha energía el aire debe expandirse, y durante la expansión

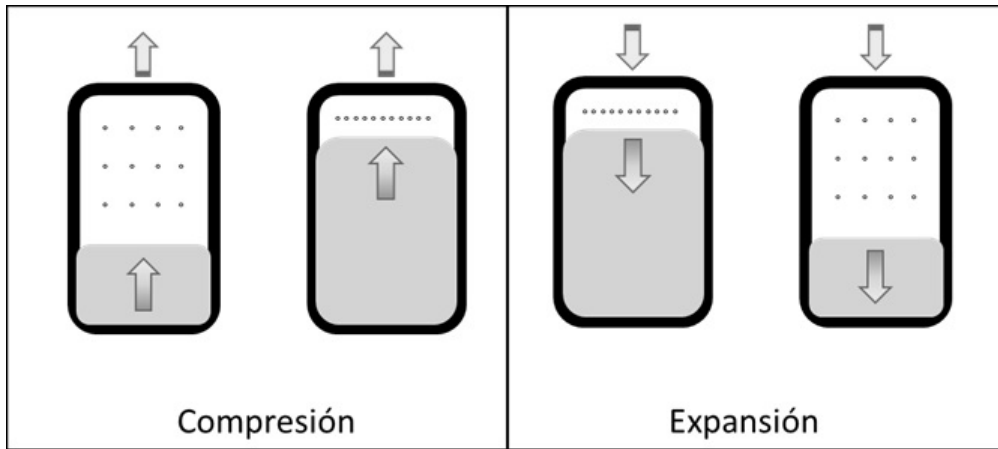


Figura 2.10: Diagrama de proceso isotérmico. (Fuente: Elaboración propia)

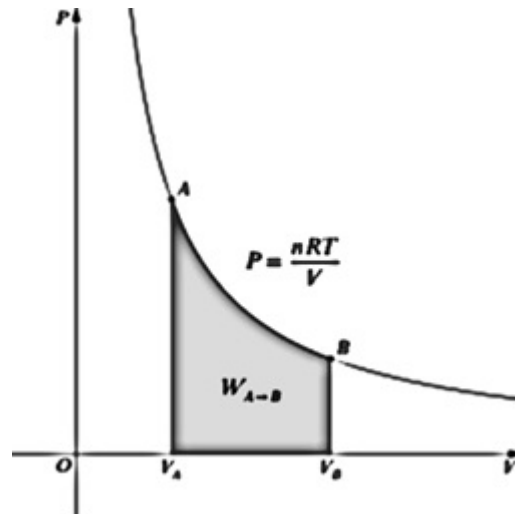


Figura 2.11: Proceso isotérmico reversible. (Fuente: Elaboración propia)

el aire tenderá a disminuir su temperatura, por lo cual es necesario ingresar energía térmica al sistema y así mantener la temperatura del aire constante. En un proceso isotérmico ideal, toda la energía mecánica se convierte en calor y viceversa. El área bajo la curva de la figura 2.11 muestra la energía requerida para comprimir o expandir el aire en un proceso reversible.

En la figura 2.12 se describe un proceso adiabático ideal en el cual la energía mecánica que entra al sistema se convierte en energía interna del aire, elevando su temperatura, esto debido a que no existe intercambio de calor con la frontera del sistema. Durante la expansión del gas, la energía interna se convierte en trabajo mecánico. Como podemos observar en la figura 2.13, en los procesos adiabáticos es menor la energía que se puede almacenar comparado con un proceso isotérmico bajo las mismas condiciones de volumen y presión, además de requerir una potencia mecánica similar para lograr la compresión. Es por

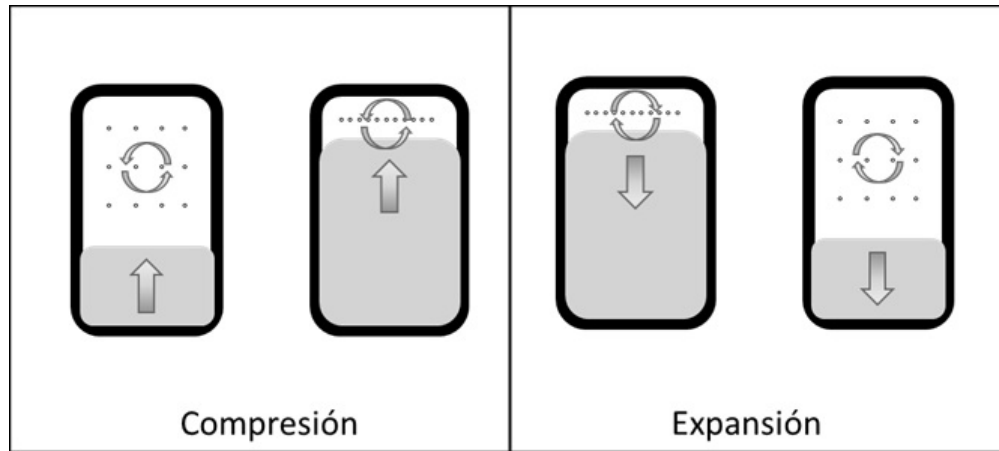


Figura 2.12: Diagrama de proceso adiabático. (Fuente: Elaboración propia)

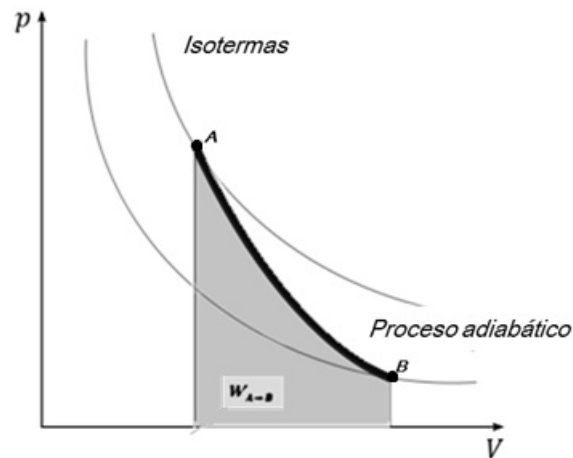


Figura 2.13: Proceso adiabático reversible. (Fuente: Elaboración propia)

ello que la tendencia tecnológica se dirige hacia la implementación procesos isotérmicos en sistemas de almacenamiento de energía. Para aprovechar la energía mecánica de este tipo de tecnología se utilizan maquinas hidráulicas como bomba y turbina, las cuales pueden estar separadas o en un mismo equipo reversible (ver figura 2.14) .

En la figura 2.15 se muestran distintas configuraciones de tecnologías de almacenamiento híbridas hidráulico con aire comprimido. Se tratan de procesos cuasi-isotérmicos que se diferencian en la forma en que aprovechan la energía de compresión-expansión. La configuración con integración energética interna utiliza el calor del aire en compresión mediante un intercambiador de calor para transferirlo a un fluido caloportador que almacenará la energía térmica. Durante la etapa de expansión del aire, el fluido caloportador cede su energía térmica al aire para mantener la temperatura del aire y de esta forma disminuir las pérdidas de energía durante la expansión. Estas tecnologías cuentan con un sistema de al-

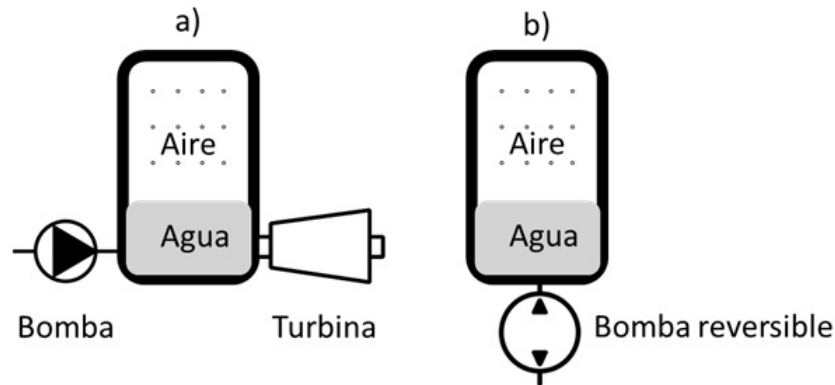


Figura 2.14: Configuración de máquinas hidráulicas. a) Conjunto bomba-turbina, b) Bomba reversible. (Fuente: Elaboración propia)

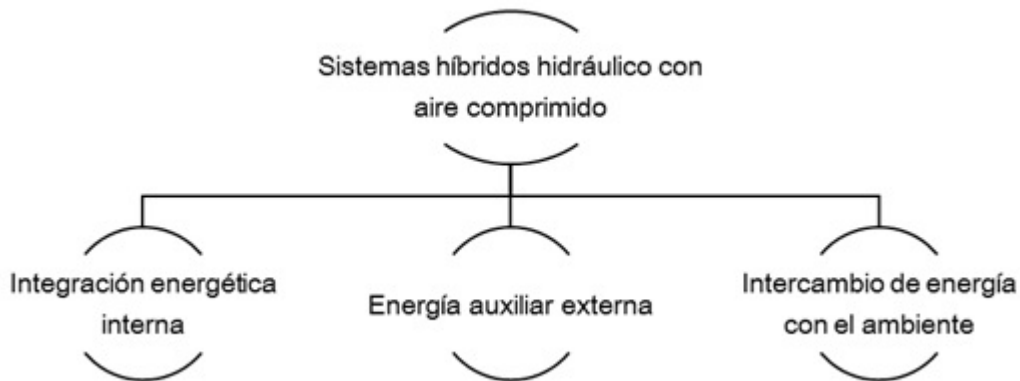


Figura 2.15: Agrupación de tecnologías híbridas de almacenamiento de energía bombeo hidráulico con aire comprimido. (Fuente: Elaboración propia)

macenamiento de energía térmico. Existe una configuración que además del sistema de almacenamiento de energía térmico, cuenta con una fuente de energía auxiliar externa, utilizando colectores solares para suministrar el calor durante el proceso de expansión y con esto maximizar el trabajo mecánico en la turbina hidráulica. Una configuración más sencilla es la que no cuenta con sistemas de almacenamiento de energía ni fuentes auxiliares de energía, en su lugar solo intercambia energía con el medio ambiente, el fundamento de esto es que el medio ambiente es un gran fuente y sumidero de energía.

Capítulo 3

Desalinización

3.1. Los procesos de separación

Hablar de desalación es hablar de los procesos de separación que buscan la eliminación de los elementos que contiene un agua, sea de naturaleza física o química, y que plantean dificultades para su utilización con unos u otros fines. De acuerdo con estos sistemas, para producir la separación de sales es necesario que exista algún elemento que actúe de barrera. Estas barreras físicas son las que constituyen la base de la mayoría de los procesos de separación que se realizan en la actualidad. El elemento separador se conoce en unos casos como filtro y en otros como membrana, en función del tamaño de la partícula que es capaz de separar. Cuando se trata de desalar, es decir separar los componentes químicos o iones del agua, su tamaño es tan pequeño que bajo esta perspectiva que hemos descrito son necesarias las membranas, en la tabla 3.1 se observa el tamaño de las partículas existentes en el agua. La desalinización no sólo se logra mediante la interposición de una barrera que obstaculice el paso de sales, otros procesos existentes no utilizan un elemento físico separador y sin embargo también realizan la separación de sales. Dichos procesos como la evaporación del agua y la posterior condensación del vapor formado producen la separación de sales, nosotros nos enfocaremos en la separación por membranas.

Tabla 3.1: Tamaño de los compuestos existentes en el agua. (*Medina,2000*)

Componentes	Dimensión en micras	Tamaño
Algas	700 - 1	Particular
Arenas	2,000 - 100	Particular
Limos	100 - 20	Particular
Arcillas	10 - 0.1	Particular
Polen	60 - 20	Particular
Acidos húmicos	0.005 - 1	Macromoleclar
Negro de humo	0.02 - 0.08	Molecular
Bacterias	0.7 - 80	Macromolecular
Virus	0.003 - 0.03	Molecular
Sales disueltas	0.0008 - 0.004	Iónico
Iones metálicos	< 0.0006	Iónico

La separación por membranas, incluye todos aquellos procesos que se han desarrollado a lo largo de los años y cuyo objetivo es la separación de algún componente de una solución, sea éste sólido en suspensión, elementos en solución o iones. Cuando se habla de procesos de separación se piensa fundamentalmente en la eliminación de los elementos sólidos, de tamaño muy reducido, pero que no superan el nivel macromolecular. En la tabla 3.2 a continuación, se puede ver claramente el grado de separación que se cubre con las diferentes tecnologías y por consiguiente se deduce la aplicación de cada una de ellas

Tabla 3.2: Selectividad de los procesos de filtración (*Medina,2000*)

Proceso	Grado de separación
Filtración multicapa	> 100
Filtración cartuchos	> 1
Filtración sobre precapa	> 0.5
Microfiltración	> 0.1
Ultrafiltración	> 0.01
Nanofiltración	0.001 - 0.01
Osmosis inversa	< 0.04
Electrodialisis	< 0.03

En unos casos la totalidad o casi la totalidad del agua que se pasa por la membrana es recuperada como producto, respondiendo así al tipo que se considera tradicionalmente como filtración directa. La membrana deja pasar el líquido, pero no los elementos que lleva. A este tipo responden la filtración, micro filtración y ultrafiltración. En otros casos el agua al llegar a la membrana incide en ella transversalmente (cross flow filtration) y se divide en dos flujos o corrientes, una que atraviesa la membrana y otra que circula sobre la superficie de la misma. La separación que realiza la membrana no es en este caso de elementos sólidos sino de iones. Nos referimos a los procesos de ósmosis inversa y su variante de nano filtración. Por último, tenemos electrodiálisis, un proceso también de membranas que permite el paso de iones con una determinada carga pero no los de carga contraria.

Salinidad del agua

La salinidad de un agua es el contenido total de sales del mismo. Se expresa como residuo seco a 105 °C o TDS y se mide normalmente en *mg/l* o ppm, debido a que este procedimiento requiere de un análisis en laboratorio, lo cual lleva tiempo, en los procesos industriales en que se precisa conocer de forma inmediata este valor se utiliza la conductividad eléctrica, dado que este parámetro puede verificarse en sitio de forma rápida y precisa. La conductividad eléctrica es, al contrario de la resistencia eléctrica, la facilidad que tiene una sustancia para conducir la corriente eléctrica. En la tabla 3.3 se presenta un espectro de las diferentes salinidades que puede tener el agua, para dar una idea al lector de las variaciones que se pueden presentar.

Tabla 3.3: Espectro de salinidades del agua (*Medina,2000*)

Salmuera	300,000	ppm
Agua e mar	30,000	ppm
Agua salobre	3,000	ppm
Agua potable	300	ppm
Agua industrial	30	ppm
Agua desionizada	3	ppm
Agua pura de calderas	0.3	ppm
Agua ultrapura	0.03	ppm

3.2. Tecnologías para desalinización de agua de mar

En la actualidad la desalinización se puede realizar bajo diversos sistemas, tales sistemas se pueden clasificar de acuerdo a la clase de separación, por el tipo de energía utilizada para llevar a cabo la desalinización y por procesos. Dentro de las clases de separación se indica si el agua es separada de las sales, o

son las sales las que se separan del agua y estas dependen de la energía utilizada para realizar la separación, que puede ser mediante energía térmica, mecánica o eléctrica. Los procesos de separación indican que ocasiona la separación, ya sea mediante evaporación, cristalización o membranas semi permeables. Los sistemas que separan el agua de las sales son: destilación Solar, destilación súbita múltiple etapa, destilación múltiple efecto, congelación, compresión mecánica de vapor y osmosis inversa. El sistema que separa las sales del agua es electrodiálisis. En la Tabla 3.4 se muestra la clasificación de tecnologías de desalinización más utilizados y en la tabla 3.5 una comparación de los diferentes procesos.

Tabla 3.4: Clasificación de tecnologías de desalinización (*Elaboración propia*)

Clase de separación	Energía utilizada	Proceso	Sistema
Separación agua de sales	Térmica	Evaporación	Destilación súbita multietapa Destilación múltiple efecto
	Mecánica/térmica	Evaporación	Compresión mecánica de vapor
	Mecánica	Membrana	Osmosis inversa
Separación sales del agua	Eléctrica	Membrana	Electrodiálisis

3.3. Osmosis inversa

El proceso de osmosis inversa para agua de mar (SWRO por su siglas en inglés) es uno de los más importantes. Cada vez es más común este tipo de instalaciones debido a que el costo de las membranas ha ido disminuyendo considerablemente desde 1980. Por ejemplo el costo de las membranas en espiral ha disminuido un 60 % en los últimos 25 años (Semiat, 2000). Sin embargo esta tecnología requiere de ciertas características del agua de alimentación, así como un pretratamiento previo al proceso, esto para alargar la vida útil del sistema.

3.3.1. Características del agua de alimentación

Las características físico-química del agua a desalar varían en función de su origen. Es importante tener en cuenta estos aspectos para el diseño de plantas de osmosis inversa y tomar debidas precauciones para lograr un funcionamiento continuo y sin alteraciones de las instalaciones. Son cuatro las características básicas que definen un agua desde el punto de vista químico:

- Conductividad eléctrica o salinidad

Tabla 3.5: Comparación de tecnologías de desalinización

Tecnología	Ventaja	Desventaja
Osmosis Inversa	Menor consumo energético Costo de inversión menor Aplicaciones de agua de mar Aplicaciones de agua salobre Tiene aplicaciones de desinfección Alta tasa de producción Mínimo impacto ambiental De fácil escalamiento Área de instalación pequeña Aplicación a pequeña escala Fiable y de mayor utilización Menores problemas por corrosión	Afectación por mala calidad del agua Afectación por bacterias Costos de mantemiento altos Costos de químicos altos
Electrodialisis	Menor pretratamiento químico Menor consumo de reactivos Manejo sencillo Independiente del pH del agua Funcionamiento continuo Operación estable	Agua producto de baja calidad No elimina microorganismos Requiere pretatamiento físico Mayor inversión que Osmosis inversa Ocupa más área que osmosis inversa Costos de operación altos
Destilación subita multietapa	Independiente de calidad del agua Agua producto casi pura Aplicación a gran escala Bajo pretratamiento físico No hay contaminación por bacterias Aplicación para aguas muy salinas	Mayor consumo energético No es viable a pequeña escala Grandes áreas de instalación Temperatura de operación mayor Mayor impacto ambiental Costos de operación altos Residuos requieren manejo especial Presenta corrosión e incrustaciones
Destilación multiefecto	Independiente de calidad del agua Agua producto casi pura Se activa con baja temperatura Aplicación a gran escala Bajo pretratamiento físico No hay contaminación por bacterias Aplicación para aguas muy salinas Menor consumo energético que MSF Menor costo de mantenimiento	No es viable a pequeña escala Mayor impacto ambiental Residuos requieren manejo especial Grandes áreas de instalación Costo de inversión mayor

- Dureza
- pH (importante controlar para evitar precipitación)
- Anhídrido carbónico libre

Aunque las cuatro características están relacionadas con la composición química del agua, la primera es una característica más general que proporciona una idea de conjunto, mientras que las otras tres recogen aspectos más concretos que, en relación con la desalinización, deben tenerse en cuenta en el diseño y operación de las instalaciones desaladoras.

3.3.2. Pretratamiento

El pretratamiento se requiere en la ósmosis inversa por tres razones de prevención totalmente diferentes, para evitar la incrustación, para evitar el ensuciamiento y para evitar el ataque a las membranas. El sistema de ósmosis inversa utiliza presión para dirigir las moléculas de agua a través de una membrana semi-permeable la cual no permite el paso de partículas en suspensión o iones disueltos y materia orgánica. La configuración de las membranas de ósmosis inversa la hace susceptible a ensuciamiento por una amplia variedad de materia orgánica e inorgánica. Para mitigar el ensuciamiento de las membranas se requiere de un pretratamiento fiable para obtener un agua de calidad superior a la entrada de estas y asegurar un desempeño estable y duradero del sistema de desalinización independientemente de la variación de la turbidez del agua a desalar. Un pretratamiento inefectivo trae consigo problemas como ensuciamiento excesivo de membranas y con ello una limpieza frecuente, bajo porcentaje de recuperación, presiones de operación altas, agua producto de baja calidad, reducción de la vida de la membrana y reducción de producción de la planta. Básicamente son seis los factores que perjudican a las membranas:

1. Incrustación
2. Ensuciamiento
3. Ataque bacteriano o químico
4. Hidrólisis
5. Turbidez
6. Oxidación

El pretratamiento puede ser físico o químico. El pretratamiento físico es responsable del filtrado por decantación, filtros de cartuchos, filtros de arena o por membranas de ultrafiltración. El pretratamiento químico incluye anti incrustantes, coagulantes y desinfectantes.

3.3.3. Proceso de osmosis inversa

En la figura 3.1 se muestra un diagrama esquemático de un sistema de osmosis inversa. El agua de alimentación se pasa a través de una bomba de alta presión (800-1000 psi) para poder superar la presión osmótica del agua de mar cuando atraviesa la membrana semipermeable, en la membrana semipermeable se lleva a cabo la separación del agua de las sales debido al proceso de ósmosis permitiendo el paso al agua con una menor concentración llamada agua producto, y dejando atrás agua con mayor concentración llamada salmuera. Debido a que la salmuera aún está a una alta presión se hace pasar por una turbina para recuperar parte de la energía potencial, y posterior a eso se desecha al mar. El agua producto tiene una calidad alrededor de 500 ppm. Las capacidades típicas de estas plantas son de 24,000 m³/ día, pero con los avances en las membranas y su reducción de costos se estima que esta capacidad aumente.

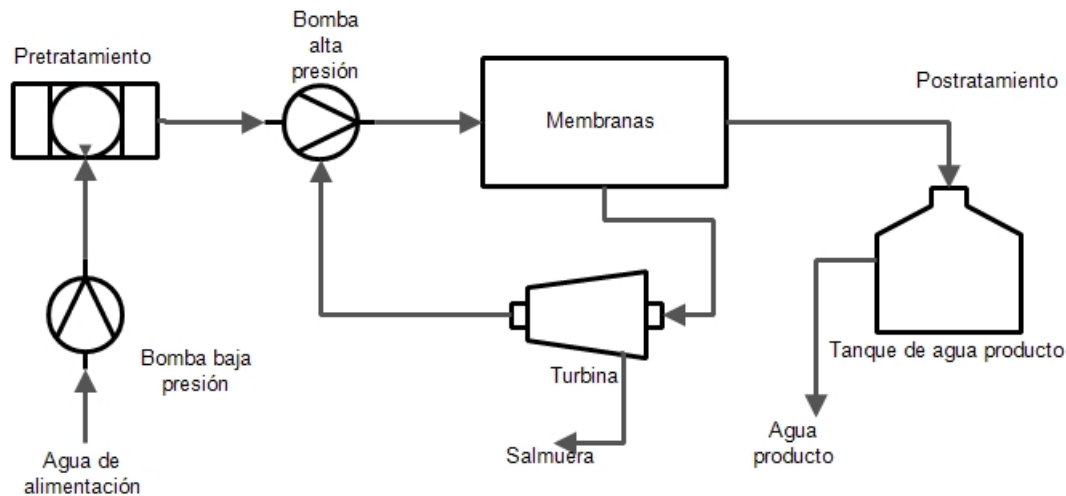


Figura 3.1: Proceso de desalinización por osmosis inversa. (Elaboración propia)

El elemento clave es la membrana semipermeable, las membranas disponibles comercialmente son; membrana fibra hueca inmersa, membrana plana inmersa, membrana tubular por presión y membrana de arrollamiento en espiral por presión. El como se lleva a cabo la separación se explica bajo diversas teorías, a continuación se explican dos de las teorías más aceptadas (San Juan, San, y cols., 2000).

Según Sourirajan, existe un flujo convectivo de agua a través de los poros de las membranas, que se produce en dos etapas; la primera el agua es absorbida preferencialmente sobre la superficie de la membrana. En la segunda, esta capa con el agua absorbida es drenada a través de los poros de la membrana. La teoría alternativa y más utilizada propuesta por Merten parte de que la membrana no tiene poros. En su lugar el agua se disuelve en la capa superficial de la membrana y después se difunde a través de una capa sin poros de la misma.

Microrred aislada de Puertecitos B.C.

4.1. Descripción de la comunidad

Puertecitos es una comunidad ubicada en el municipio de Ensenada en el estado de Baja California, México. El poblado es reconocido por sus aguas termales que emanan de las rocas de la playa. Es un punto turístico que atrae principalmente a pescadores deportivos, que es una de las principales actividades económicas de la comunidad. Se localiza a 86 km. al sur de San Felipe, el Puerto más cercano. En la Figura 4.1 se observa del lado izquierdo la localización de Puertecitos en el estado de Baja California y del lado derecho se encuentra una vista aérea del poblado.

La comunidad de Puertecitos está conformada por 20 familias aproximadamente, dispersas en 43 viviendas de las cuales 19 son habitadas permanentemente, 14 son temporales y 10 se encuentran completamente inhabitadas (Soto, 2017). En la localidad se cuenta con tienda local, escuela primaria, centro de salud, iglesia, centro de acopio de pescado, taller mecánico y llantera, gasolinera, restaurant, hotel y un área recreativa para turistas. Anteriormente la comunidad manejaba un generador diesel compartido el cual les suministraba de 2 a 4 horas de servicio diarios.

4.2. Estudio de los recursos energéticos

Se recabó información del sitio web de la NASA del Centro de investigación Langley del Centro de Datos de Ciencias Atmosféricas del Sistema Meteorológico de la Tierra y de la Energía Solar (SSE), apoyado por el Proyecto NASA LaRC POWER. Como resultado podemos observar en la tabla 4.1 el potencial solar de Puertecitos con un promedio anual de $5.4 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{día}$ para una superficie horizontal, mientras que para una superficie inclinada 30° la radiación global aumenta, esto es debido a que la inclinación de la superficie es igual a la latitud del lugar teniendo la máxima captación de energía anual. Cabe resaltar

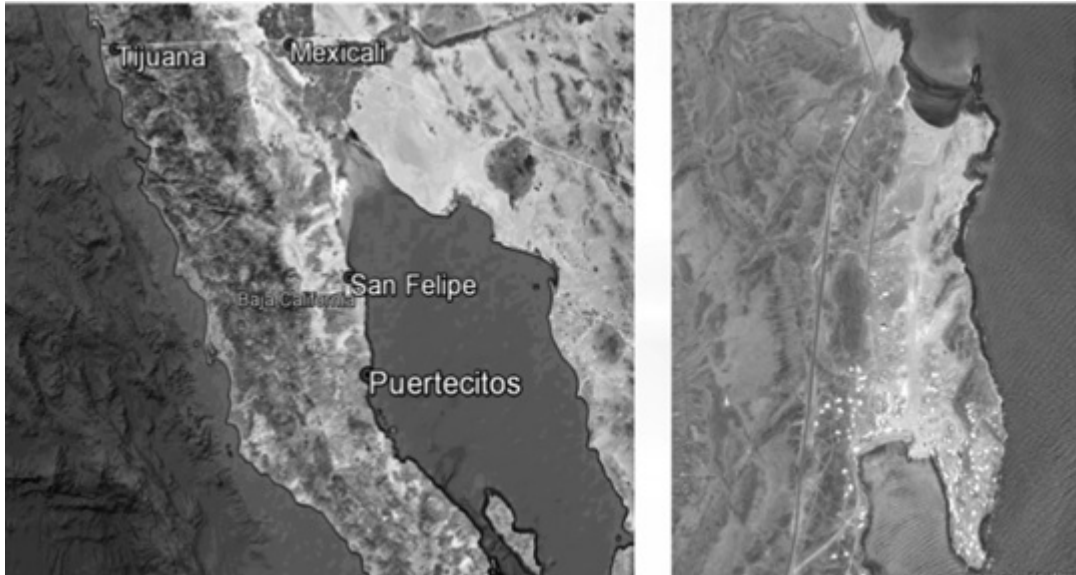


Figura 4.1: Localización de Puertecitos en el mapa (Izquierda), Poblado de Puertecitos (Derecha) (Fuente: Google maps)

Tabla 4.1: Radiación global en superficies inclinadas para Puertecitos (SSE,2017)

Inclinación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio Anual
0°	3.22	4.10	5.49	6.64	7.43	7.59	7.01	6.36	5.65	4.68	3.57	3.01	5.40
15°	3.98	4.80	6.04	6.88	7.29	7.31	6.81	6.40	6.04	5.39	4.37	3.80	5.76
30°	4.53	5.24	6.27	6.74	6.77	6.64	6.27	6.12	6.12	5.81	4.93	4.38	5.82
45°	4.82	5.40	6.16	6.25	5.91	5.64	5.42	5.53	5.88	5.91	5.21	4.71	5.57

como la radiación promedio diaria es casi constante la mayor parte del año para una superficie incliada 45°, es importante tener esto en cuenta para el diseño de sistemas fotovoltaicos aislados, esto nos permite distribuir la energía a lo largo del año.

El recurso eólico no es muy favorable para la región, teniendo velocidades de viento promedio anual de 3.5 m/s el 47 % del tiempo. Esta velocidad es apenas superior a la velocidad de arranque de pequeños aerogeneradores. Dicha información se recabó de una estación meteorológica instalada en la zona a 6 metros de altura. Esto se debe posiblemente a la región montañosa que se encuentra al oeste de la comunidad.

En la playa de Puertecitos se cuenta manantiales con actividad hidrotermal con temperaturas entre 55° a 65°C. La recarga del sistema hidrotermal es principalmente por intrusión marina. Un sondeo realizado demuestra temperaturas del yacimiento mínimas de 110°C a 200 metros de profundidad y alcanzando los 160°C a 800 metros de profundidad, esto ha permitido inferir que dentro la zona prevalece un sistema meramente de baja entalpía, no se puede aprovechar con algún ciclo térmico convencional,

sin embargo es técnicamente viable la explotación con algún ciclo orgánico o uso directo. Se estima un potencial en la zona de 1 MW con una desviación estandar de 0.3 MW durante 25 años de explotación (Mendoza, 2011).

La región se caracteriza por un clima cálido-húmedo con temperaturas de medias a la sombra de 46°C en Verano, y un clima templado-seco en invierno, con temperaturas nocturnas de 4°C

4.3. Perfiles de demanda eléctrica e hídrica

Debido a las altas temperaturas en Verano, el aire acondicionado es una necesidad más que un superfluo para soportar los estragos del inclemente clima. Esto ocasiona un elevado consumo de energía eléctrica de la comunidad en Verano. Para corroborarlo se realizaron mediciones en sitio con un analizador de energía marca Fluke modelo 1730. Cabe mencionar que al momento de la medición solo el 75 % de la comunidad presentó consumo, el resto de la comunidad no se encontraba en sus domicilios, fue necesario proyectar el consumo al 100 %, distribuyendo la energía de los usuarios comerciales a los usuarios residenciales y aumentando el número de viviendas a 20. Esto aumentó un 25 % el consumo proyectado respecto a la medición original. El perfil registrado corresponde a usuarios comerciales, este tipo de usuario fue el consumidor dominante en el periodo de la medición. En la figura 4.2 se ve claramente el perfil de demanda eléctrica de la comunidad para Verano, se registró un consumo promedio diario de 316 kWh con picos de demanda diurnos de 18 kW. Como es de esperarse, la demanda disminuye por las noches teniendo un consumo nocturno de 134 kWh. El consumo de energía comienza a aumentar a partir de las 6:00 am por la actividad pesquera que inicia en ese horario.

Durante el diseño de la microrred se trabajó con un perfil de demanda medido de un usuario residencial localizado el fraccionamiento Villa del Roble en Mexicali con la finalidad de brindar a la comunidad las comodidades que se tienen en la zona urbana. Este perfil de consumo es más del doble al registrado por la comunidad, con picos de demanda de hasta 50 kW en Julio, con un máximo de 60 kW en Agosto. Más adelante se presentará un análisis de simulación con ambos perfiles de demanda.

Siguiendo con el análisis de consumo de la comunidad en invierno, los picos de demanda se reducen cerca de la mitad y con ello el consumo diario. En la figura 4.3 se muestra el perfil de demanda invernal en donde el consumo promedio diario registrado es de 130 kWh a comparación con los hábitos de consumo en Villa de Roble en donde el consumo diario promedio diarios es de 90 kWh.

La variación anual en el consumo genera una gráfica tipo campana, un consumo alto en verano (al centro de la gráfica) y consumos bajos en Invierno (laterales de la gráfica). El perfil de demanda tipo campana trae problemas al momento de seleccionar los microgeneradores ya que en Verano se requiere de una capacidad de generación mayor, que estará sin uso en Invierno, reduciendo su factor de planta.

El requerimiento de agua potable se estableció en base a las recomendaciones de la Organización

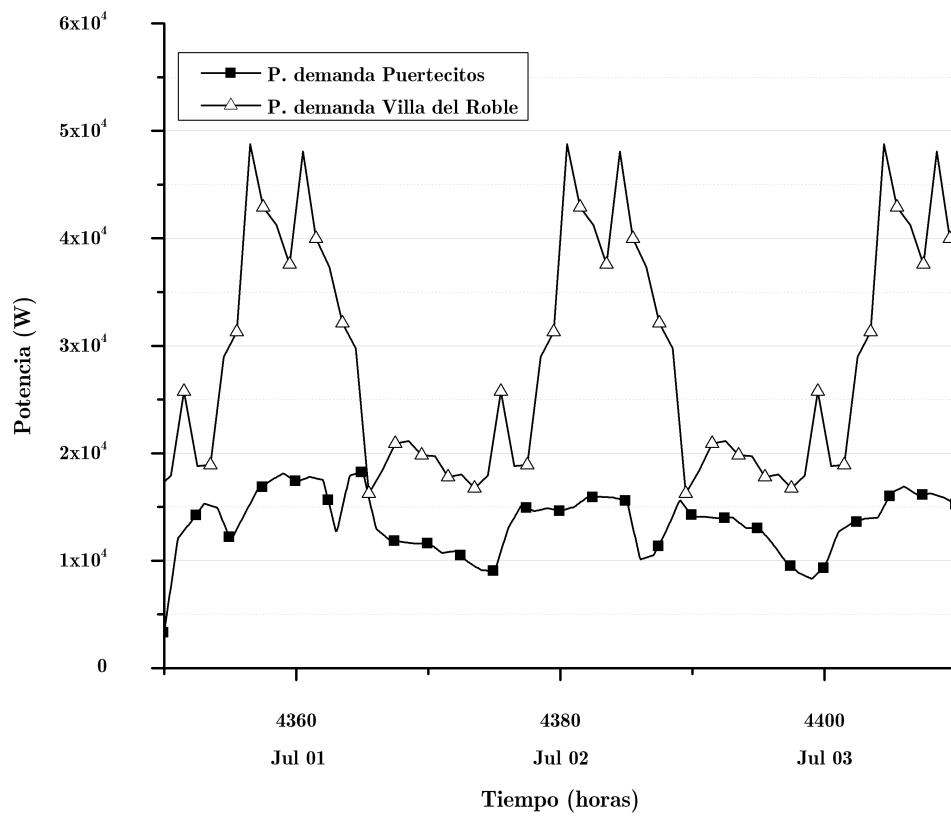


Figura 4.2: Perfil de demanda de comunidad de Puertecitos en Verano (Fuente: Elaboración propia)

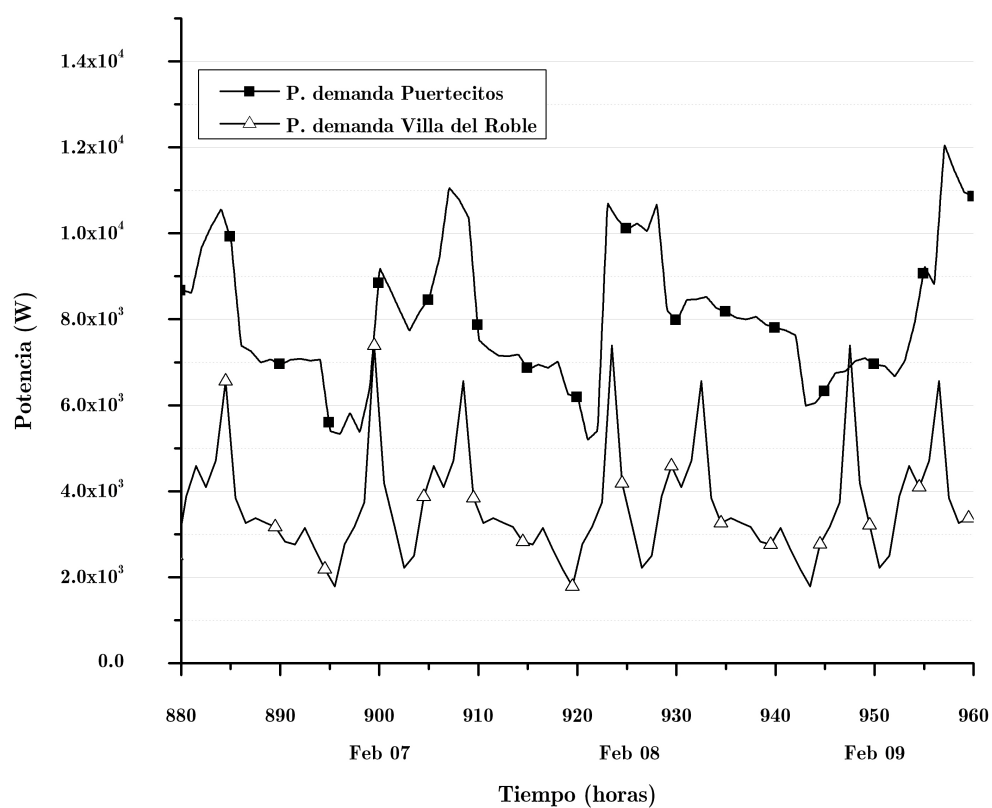


Figura 4.3: Perfil de demanda de comunidad de Puertecitos en Invierno (Fuente: Elaboración propia)



Figura 4.4: Jerarquía de requerimientos de agua (Adaptado de WHO, 2011)

mundial de la salud (OMS por sus siglas) (Reed y Reed, 2011), estas se resumen en la figura 4.4, la necesidad mínima de agua para un individuo es de 70 litros, esto incluye desde su consumo hasta saneamiento y disposición de residuos, sin embargo en base a la heurística de algunos diseñadores de sistemas de desalinización, se recomienda estimar 150 litros de agua potable per cápita. De esta forma estamos seguros que estamos diseñando con un factor de seguridad del doble de las recomendaciones de la OMS. La población actual en Puertecitos es de 77 habitantes con una estimación de llegar a los 100 habitantes, con esto fijamos una necesidad diaria de 15 m^3 de agua potable para la comunidad.

4.4. Descripción de componentes de microrred

En la comunidad de Puertecitos se cuenta con una microrred aislada desarrollada previamente por el Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER por sus siglas) del instituto de ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. Su objetivo fue llevar energía eléctrica 24/7 a la comunidad mediante fuentes renovables y así prescindir del uso de generadores de combustión interna a base de combustibles fósiles. En la figura 4.5 presentamos un diagrama unifilar de la microrred. La capacidad actual de la microrred es de 55 kW. Su principal microgenerador son módulos fotovoltaicos monocristalinos de 300 W de la marca Solartec. Cuenta con la infraestructura para un aerogenerador de 5 kW con acoplamiento en el bus de corriente alterna. Se tiene un generador diesel de respaldo de 75 KVA. El sistema de almacenamiento tiene una capacidad de 500 kWh y está conformado por 174 baterías de plomo ácido tipo AGM-Gel de 2 Volts a 1500 Ah conectadas en serie para suministrar el voltaje de alimentación del inversor. Dos controladores de carga son responsables de cargar las baterías con energía solar,

son del tipo MPPT y entre los dos suman una corriente de carga de 150 A. El inversor es el responsable de suministrar la energía al poblado, tiene una capacidad de 100 kW con salida trifásica 270 Volts línea neutro. En la figura 4.6 se aprecia la microrred ubicada en Puertecitos con vista aérea, del lado izquierdo de la fotografía tenemos el cuarto de control donde se resguarda el gestor de la energía, controlador de carga, controlador eólico con su inversor, y las baterías. A un costado del cuarto de control se localiza el generador diesel bajo un techo de lámina.



Figura 4.6: Fotografía aérea de microrred de Puertecitos (Cortesía de CEENER)

4.5. Método de simulación

La simulación es el hecho de representar matemáticamente algún fenómeno físico o químico asignando variables de entrada y parámetros a un modelo para obtener variables de salida. Esta herramienta es muy útil para estudiar el comportamiento de sistemas de una forma rápida, segura y económica, el riesgo de fallo se queda en escritorio, en lugar de la obra. De esta forma se evita incurrir en pérdidas monetarias inclusive vidas humanas.

Para estudiar el comportamiento operativo de la microrred bajo distintos escenarios fue necesario programar y simular el conjunto de componentes de la microrred en la plataforma TRNSYS 17. Este software de simulación dispone de un entorno gráfico para su programación y se utiliza para simular sistemas transcientes. La mayoría de las simulaciones se enfocan en evaluar sistemas térmicos y eléctricos, más no se limita a ello. Dispone de una amplia librería de diversos modelos matemáticos.

En la figura 4.7 se muestra el diagrama de conexiones del conjunto de componentes para simular la

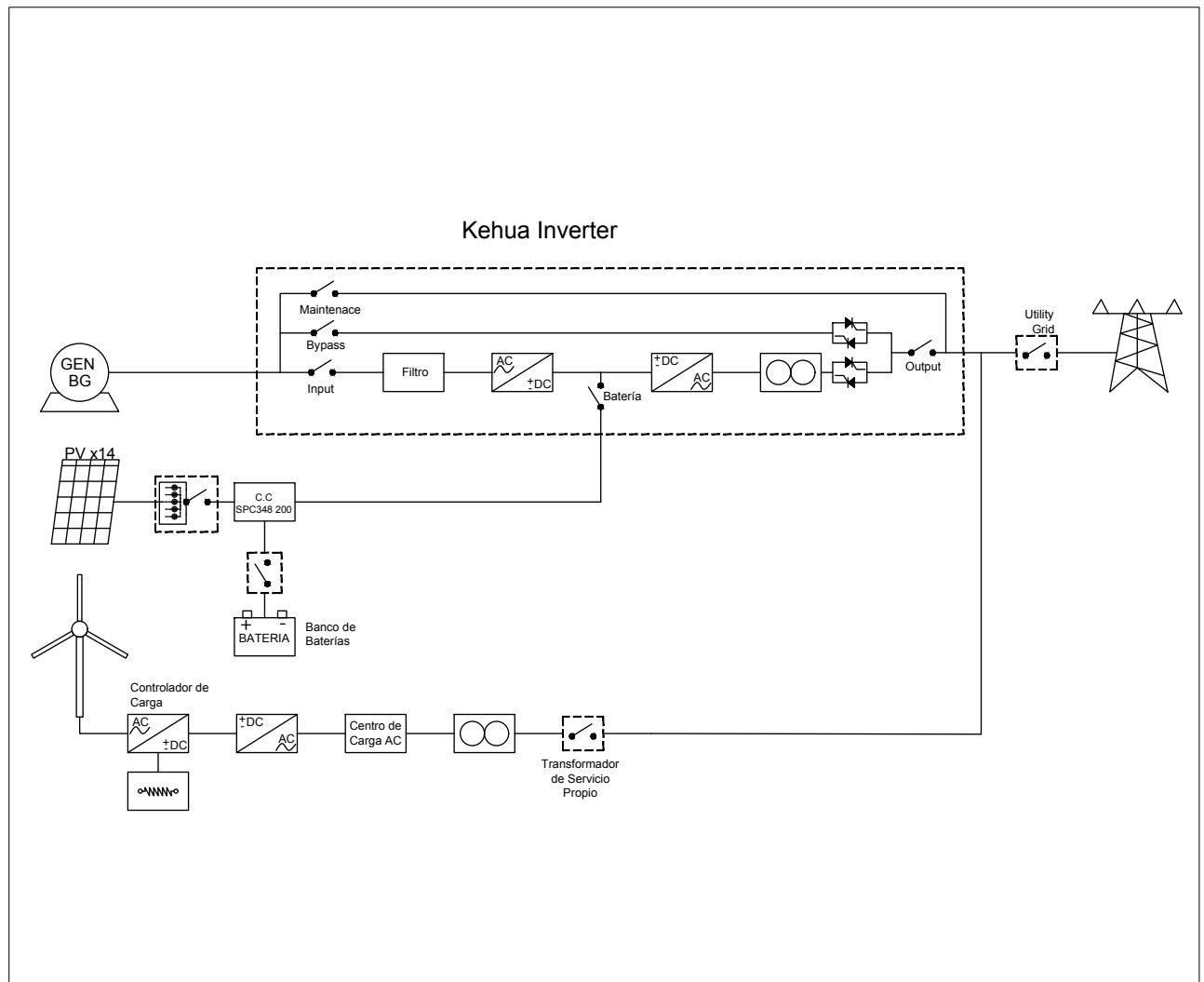


Figura 4.5: Diagrama unifilar de microrred

microrred en la plataforma TRNSYS 17 y en la tabla 4.3 se resumen los componentes utilizados con su respectivo número de identificación en TRNSYS 17. Los archivos climáticos se obtuvieron del software Meteonorm para el poblado de Puertecitos en formato .TM2, el cual es un formato que contiene datos de un año típico meteorológico. El perfil de demanda eléctrica que se describió en la sección anterior, es utilizado en la simulación.

La metodología para simular la microrred se describe en la figura 4.8, para comenzar es necesario elegir los componentes descritos al inicio de esta sección. Un vez conectados los componentes procedemos a asignar parámetros a los diferentes componentes dependiendo de las dimensiones del sistema. Es importante cargar a la plataforma TRNSYS 17 el archivo climático, ya que este contiene el recurso energético de la zona. Del perfil de demanda depende el consumo de los recursos energéticos, así que este da la singularidad al sistema. La simulación está relacionada con la dinámica de operación de la microrred. Las figuras 4.9 y 4.10 sirven de referencia para comprender la dinámica que se describe a continuación; primeramente es necesario conocer el estado de la microrred, es decir si la generación de los microgeneradores es mayor a la demanda eléctrica de la comunidad, de esto depende si el gestor de la energía cargará el banco de baterías. Caso contrario la comunidad requiere un ingreso extra de energía, si las baterías se encuentran por encima del 20 % SOC (siglas en inglés de state of charge) podrán suministrar energía para satisfacer la demanda, de no ser así, el generador diesel actuará como sistema de respaldo para abastecer la demanda y cargar el banco de baterías. El generador diesel permanecerá encendido hasta que los microgeneradores nuevamente puedan soportar la demanda eléctrica con el fin de aprovechar al máximo el recurso energético.

Tabla 4.2: Componentes utilizados para simulación de microrred

Componente	No. indentificación
Procesador de datos climáticos	15-2
Convertidor de unidades	57
Modulos fotovoltaico	194
Aerogenerador	90
Inversor con baterías	48c
Baterías	47c
Lector archivos de datos	9c
Control diferencial	2d
Motogenerador de combustión interna	120a
Ecuaciones	-

4.5.1. Situación actual de la microrred

En la figura 4.9 y 4.10 se muestran los resultados de la simulación del estado actual de la microrred en verano utilizando el perfil de demanda registrado en la comunidad con algunas adecuaciones. Debido

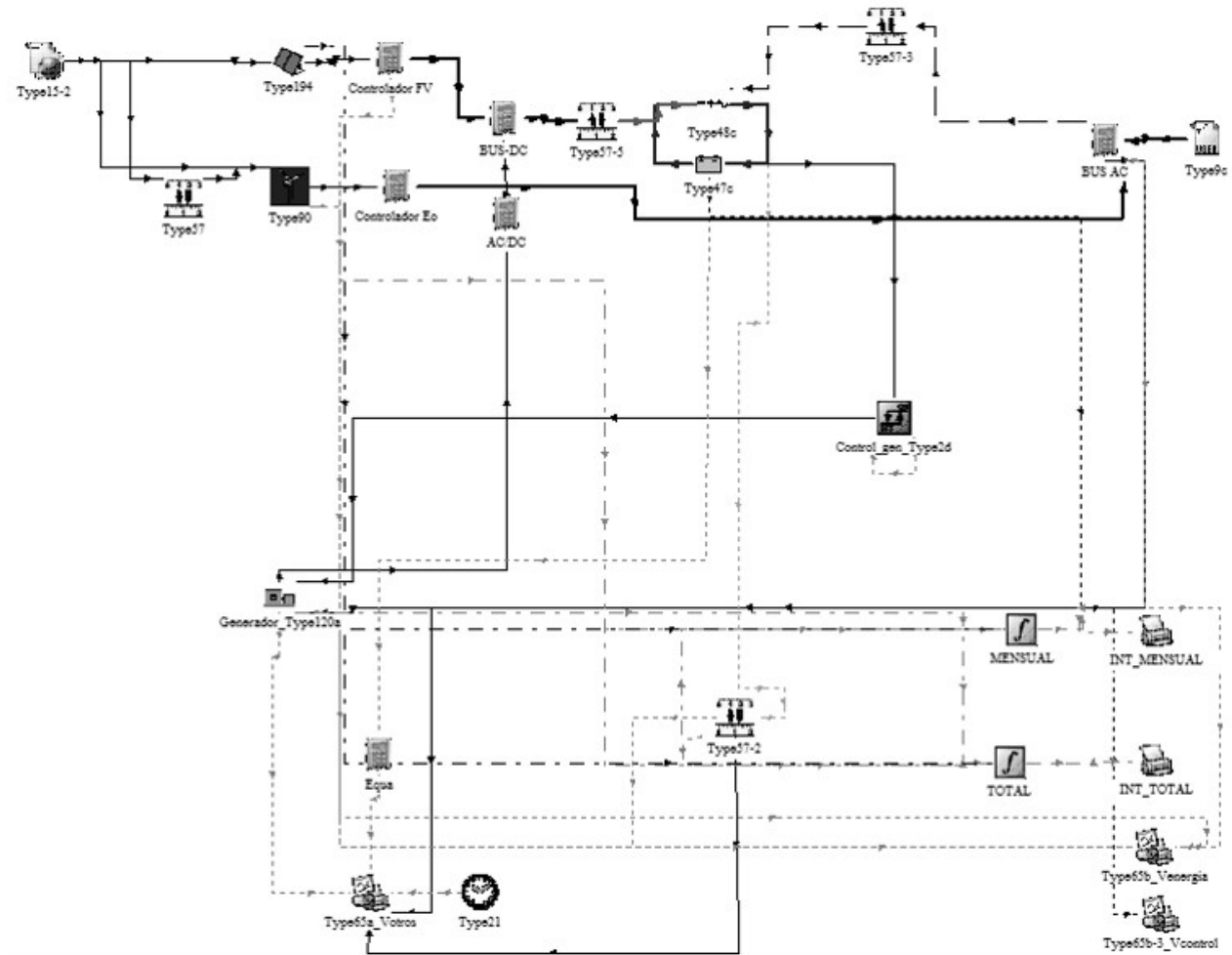


Figura 4.7: Diagrama de conexiones de componentes en plataforma TRNSYS 17

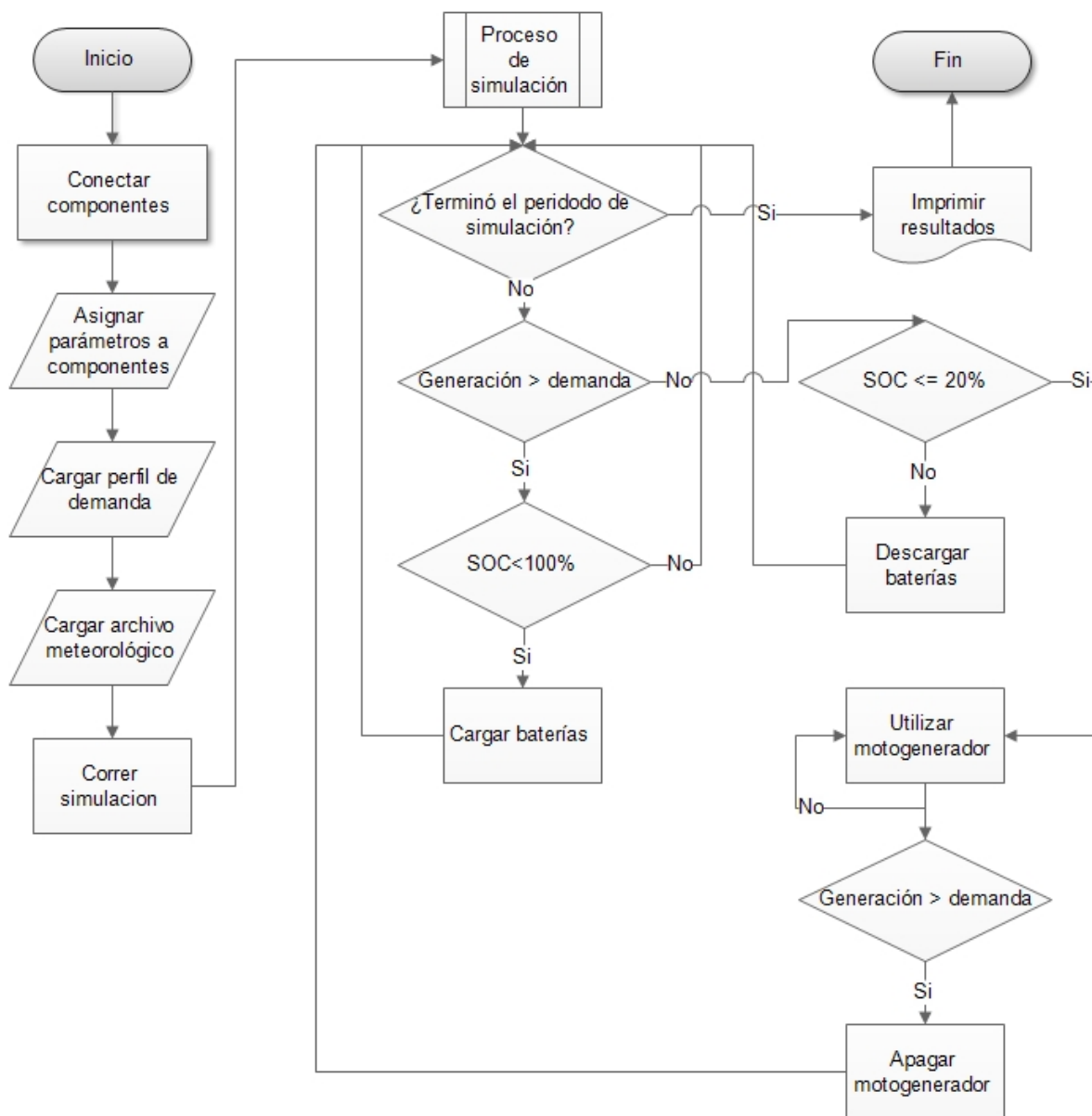


Figura 4.8: Diagrama de flujo para simular microrred en TRNSYS 17

al poco recurso eólico de la zona decidimos omitir este recuso energético para el análisis por simplificación. Los días que se representan en el análisis son del 1 al 3 de Julio, estos días consecutivos se eligieron porque dan una idea clara del comportamiento del sistema en un día con buen recurso solar, un día con nublados, y un día después del día nublado. De esta manera podemos observar las variaciones a las que está sometido el sistema, y como es que se adapta a las circunstancias. Comenzando con el análisis, vemos como el primer día a pesar de que el banco de baterías se encuentra al 23 %, el sistema fotovoltaico no es capaz de cargar al 100 % las baterías, solamente le agrega un 26 % de energía para almacenar, sin embargo el banco de baterías se descarga un 31 % diario, esto significa que existe un faltante del 5 % de energía, el cual es suministrado por el generador diésel. Para los días de baja irradiación (se consideran días de baja irradiación a aquellos en el cual el SFVI tiene un rendimiento inferior al 80 %) la situación es menos favorable, dado que el faltante de energía aumenta un 30 %. Bajo estas condiciones de trabajo, el generador diésel tiene un rendimiento de 2.8 kWh/litro lo que conlleva un consumo de 10.6 litros por hora, con esto deducimos que el consumo de diésel es de aproximadamente 32 litros, elevando su consumo los días de baja radiación solar a 53 litros. Cabe resaltar que el generador diésel no funcionará todos los días, en este análisis se se activó el generador diésel debido a que al inicio el SOC del banco de baterías es de 23 %. Con un banco de baterías cargado al 100 %, le tomaría alrededor de 16 días de buena irradiación llegar al 20 % SOC y encender el generador diésel, por otro lado solamente es necesario 2.5 días de baja irradiación para descargar el banco de baterías al 20 % SOC. La cuestión es que en Verano no existen más de 5 días consecutivos con buena irradiación, y los días de baja irradiación aparecen periódicamente totalizando 11 en el periodo del 15 de Junio al 15 de Julio (ver figura 4.11), con esto tenemos una clara idea del consumo mensual de diésel en Verano, siendo 553 litros el resultado de la simulación.

El comportamiento en invierno se muestra en las figuras 4.12 y 4.13 , en este caso se eligió los días 7 al 9 de Febrero, la razón es que Diciembre no es representativo de los días de invierno por el hecho de ser épocas festivas. Además en estos días coincide que el primer día es un día con buen recurso solar, el segundo es un día con nublados y el tercero es nuevamente un día con buen recurso solar. A diferencia de Verano, en Invierno la tasa de carga del banco de baterías es igual a la tasa de descarga, por lo cual se mantiene el SOC en el transcurso de los días, no obstante en los días de baja irradiación el porcentaje de descarga ronda el 27 %, esto se traduce en 3 días de autonomía de la microrred, antes que se active el generador diésel. Esto es suficiente como para prescindir del generador diésel (ver figura 4.14) el porcentaje más bajo de SOC fue del 50 % en el periodo del 15 de Enero al 19 de Febrero. En la gráfica observamos la pronta recuperación del SOC al día siguiente del día nublado, debido al bajo consumo energético en esa fecha.

Ahora evaluemos el caso de la comunidad con los hábitos de consumo de una vivienda en la zona

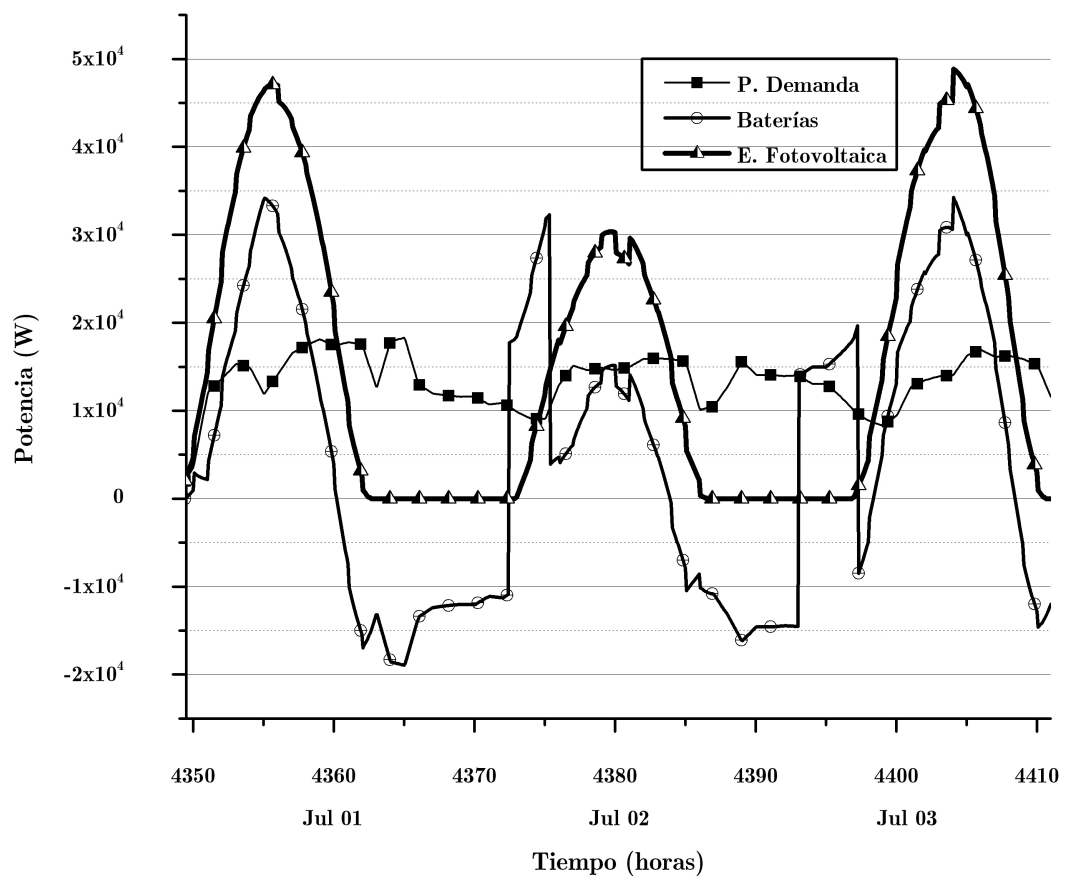


Figura 4.9: Generación, almacenamiento y demanda para días típicos de Verano

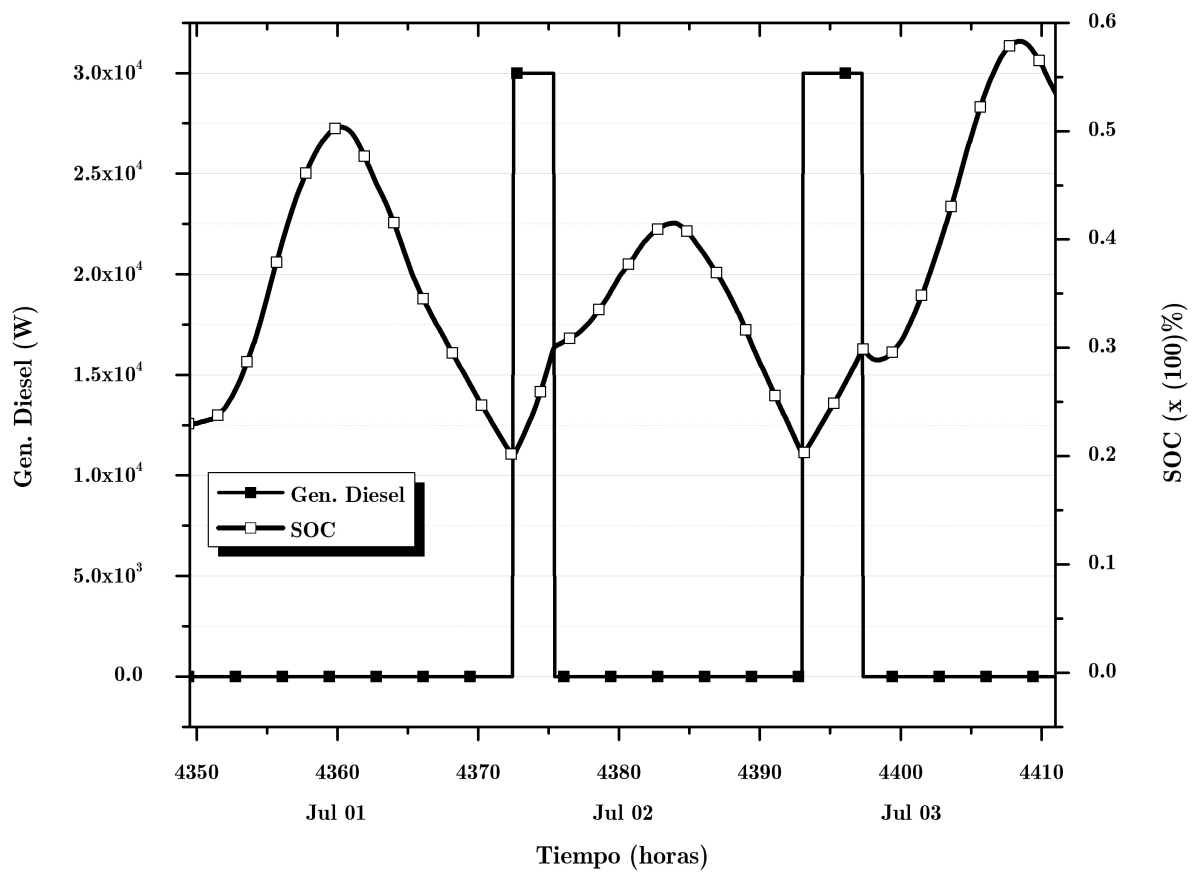


Figura 4.10: SOC y generador diesel para días típicos de Verano

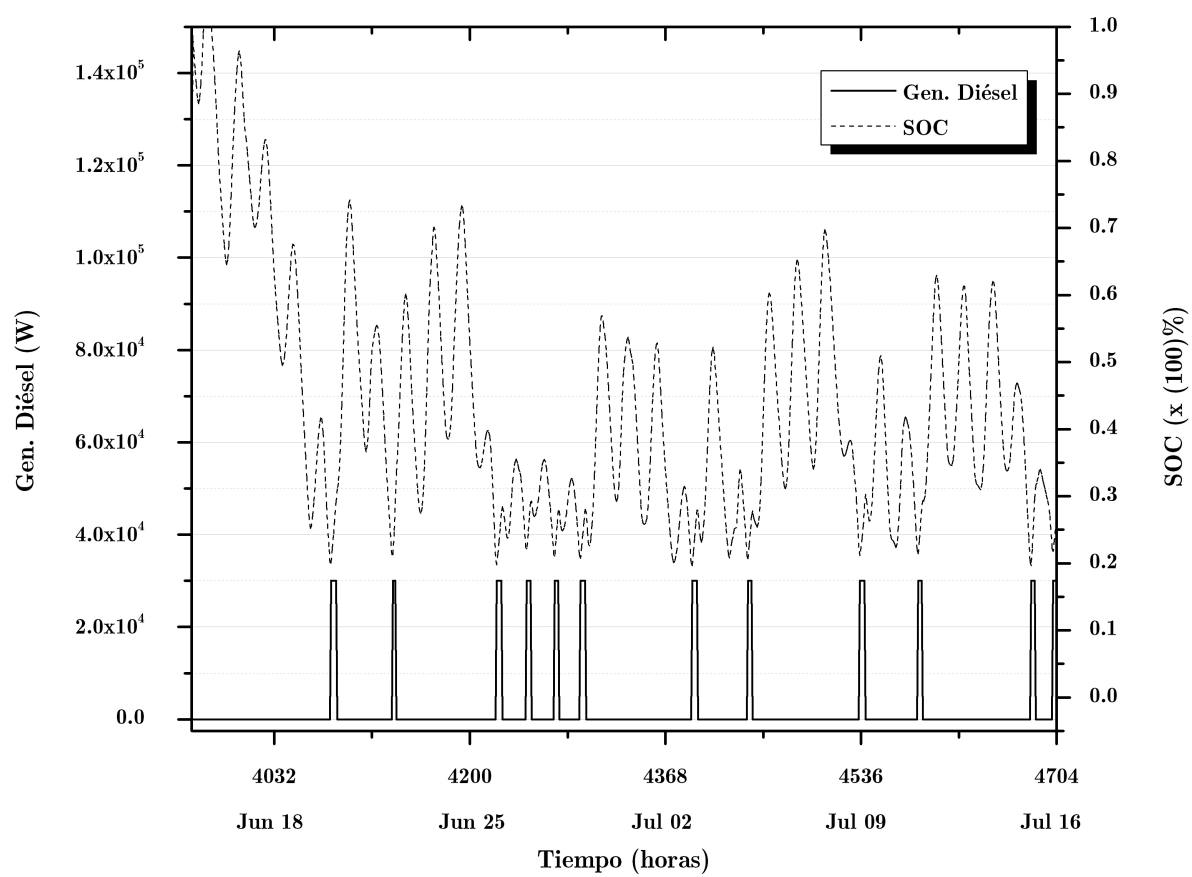


Figura 4.11: Comportamiento mensual del SOC y G. diésel en Verano

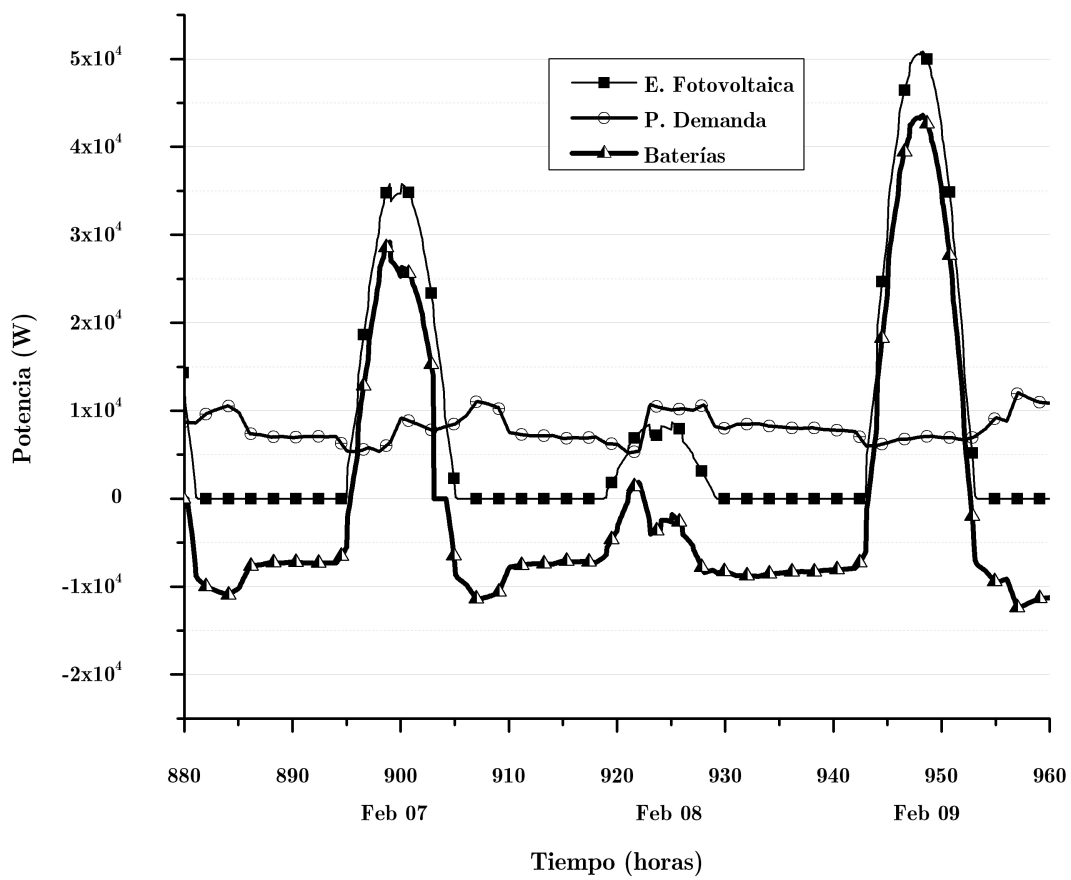


Figura 4.12: Generación, almacenamiento y demanda para días típicos de Invierno

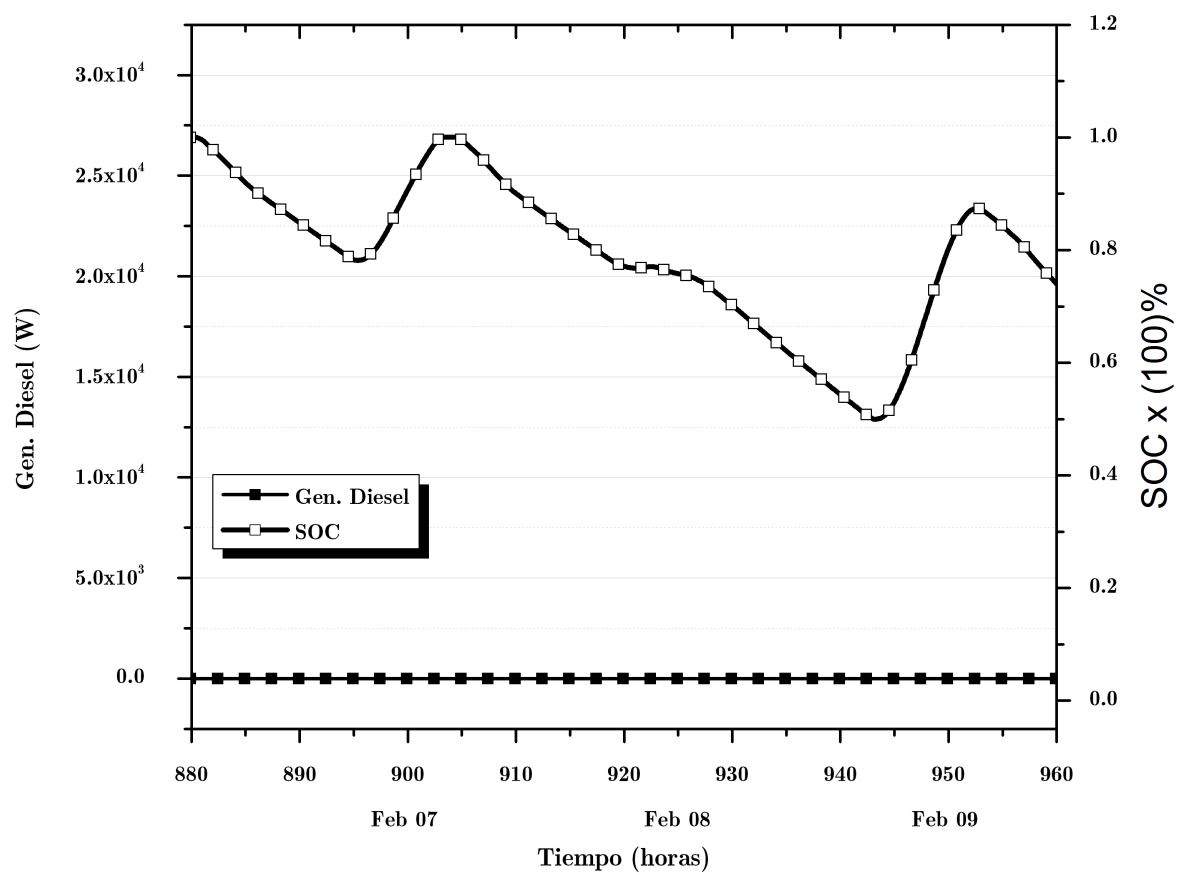


Figura 4.13: SOC y generador diésel para días típicos de Invierno

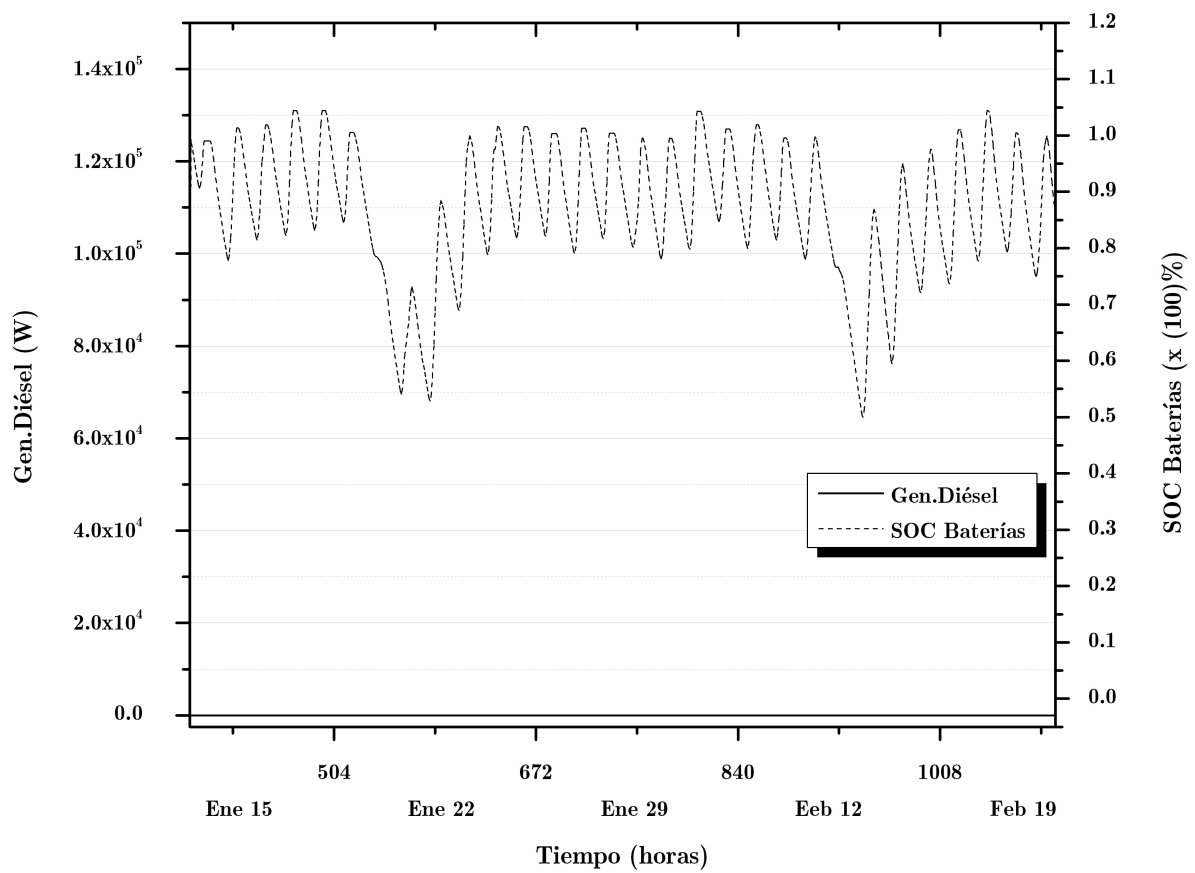


Figura 4.14: Comportamiento mensual del SOC y G. diésel en Invierno

urbana. Como mencionamos anteriormente el consumo medido en Villa del Roble es más del doble del registrado en la comunidad de Puertecitos, esto ocasiona que en Junio el generador fotovoltaico solo aporte un 20 % de energía al banco de baterías en contraste con el 50 % de descarga diaria al banco de baterías. En Julio la generación fotovoltaica es similar al perfil de demanda diurno, lo que impide una carga de baterías adecuada, y durante las noche, la tasa de descarga del banco de baterías es del 70 %. Bajo este perfil de consumo el consumo de diésel aumenta a 3,000 litros mensuales, casi 6 veces más que utilizando el perfil de la comunidad. En el mes de Agosto cuando se presentan consumos más elevados la situación es menos favorable, en este caso se requirió modificar el parámetro de paro del generador diésel debido al encendido y apagado constante a lo largo del día. La nueva configuración permite al generador diésel cargar las baterías al 95 % a la vez que satisface la demanda. Con esto el generador diésel permanece encendido alrededor de 12 horas diarias. El resultado de consumo de diésel en Agosto fue de 5,527 litros. Por otro lado, el perfil urbano presenta excedentes en invierno promedio diario de 200 kWh. Bastan 4 horas aproximadamente para carga el banco de baterías al 100 %, partiendo de un estado de carga del 90 % correspondiente al día anterior.

4.5.2. Microrred con desalinización por osmosis inversa

Una vez evaluada la situación actual de la microrred con el perfil de demanda rural y urbano se estudiaron tres posibles escenarios en donde se agrega un sistema de osmosis inversa como carga a la microrred para satisfacer las necesidades hídricas de la comunidad, el primer escenario se trata de un conjunto de membranas semipermeables funcionando todo el día con una capacidad de $0.6 \text{ m}^3/\text{h}$ de agua potable y un sistema de bombeo con potencia nominal de 5.4 kW para suministrar los $15 \text{ m}^3/\text{día}$, el segundo escenario consta de un conjunto de membranas semipermeables con capacidad de $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ y un sistema de bombeo con potencia nominal de 13.5 kW para satisfacer el requerimiento de agua potable en un lapso de 10 horas diurnas, el último escenario es idéntico al segundo, aunque funcionando por la noche. Para la evaluación se eligió el mes de abril, dado que la máxima generación de energía del sistema fotovoltaico se encuentra en los días posteriores al equinoccio de primavera y anteriores al solsticio de verano con mayor acentuación en Abril, esto se cumple gracias al buen clima en dichas fechas con temperatura ambiente entre 16°C y 28°C con pocos días nublados. Para el análisis de los escenarios nuevamente fue necesario cambiar el parámetro de paro del generador diésel con el fin de optimizar la carga de baterías con recurso solar, el nuevo set point se fijó en 30 % del SOC de las baterías.

Simulación con perfil rural

En la figura 4.15 se muestran los resultados a manera resumida con los hábitos de consumo rurales. Podemos observar que el peor escenario es cuando el sistema de osmosis inversa funciona por las noches,

teniendo un consumo de 1,744 litros de diésel, y una descarga total de energía de 20,523 Ah del banco de baterías, esto se debe en primer lugar a que las baterías suministran toda la energía al sistema de desalinización, y en segundo lugar, dicha energía debe ser recuperada mediante el generador diésel que, a través de un rectificador se adecua la energía para cargar el banco de baterías, lo que conlleva una pérdida de energía del 5 %, además del desperdicio en el proceso de carga de baterías del 15 %. En cambio el escenario más favorable es el sistema de ósmosis inversa funcionando solamente durante el día, resultando en un consumo de 1,095 litros de diésel y una descarga total de energía de 13,696 Ah del banco de baterías, esto se debe en primera instancia en que los excesos de energía son aprovechados por el sistema de ósmosis inversa, además de utilizarse el recurso solar de forma directa sin pasar por el banco de baterías. Por otro lado la operación todo el día del equipo de desalinización se encuentra en medio de los dos escenarios con un consumo de 1,148 litros de diésel y 17,412 Ah del banco de baterías.

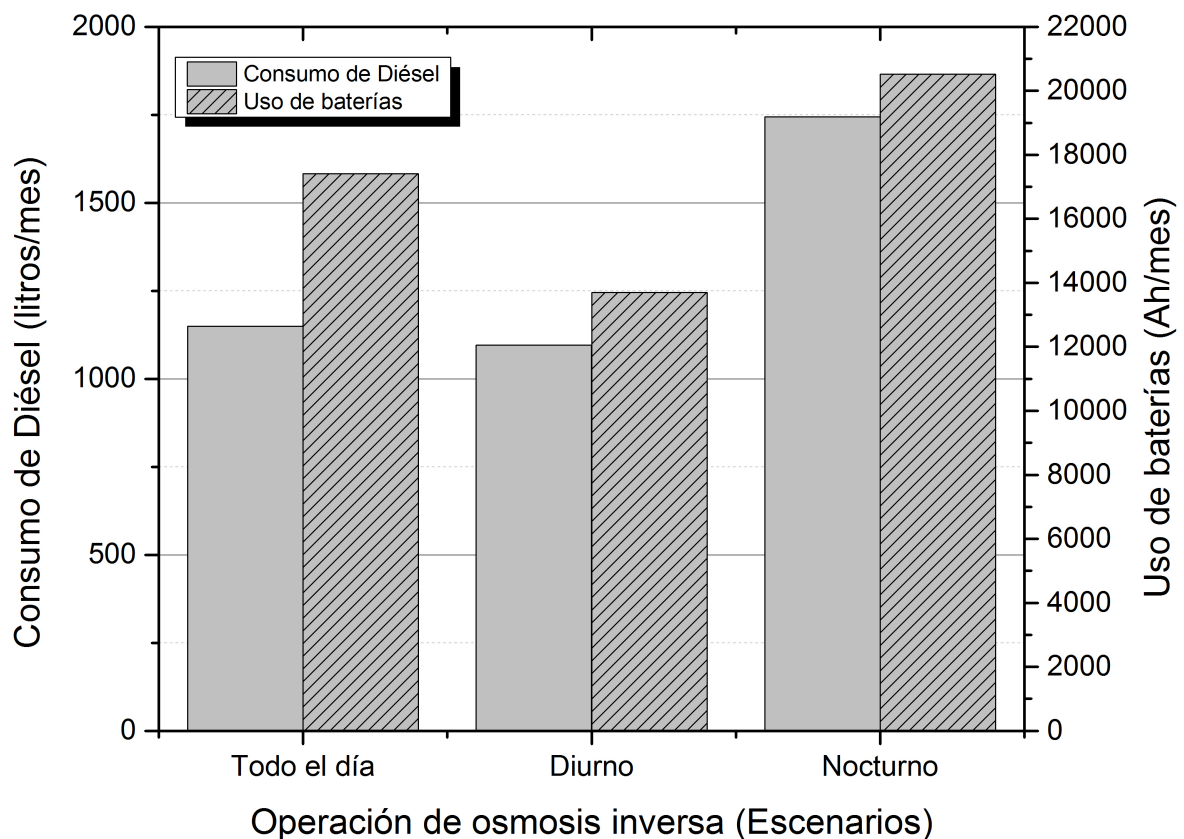


Figura 4.15: Consumo de diésel y uso de baterías en Abril con hábitos de consumo rural

Simulación con perfil urbano

En la figura 4.16 se exponen los resultados de la simulación. Definitivamente el mejor escenario es operando el equipo de desalinización solamente cuando existe recurso solar, a diferencia del perfil rural, aquí no se utiliza el generador diésel, y el uso de baterías es menor con 5950 Ah. Este comportamiento es similar con pequeñas variaciones en el periodo de Febrero a Abril y nuevamente en Diciembre.

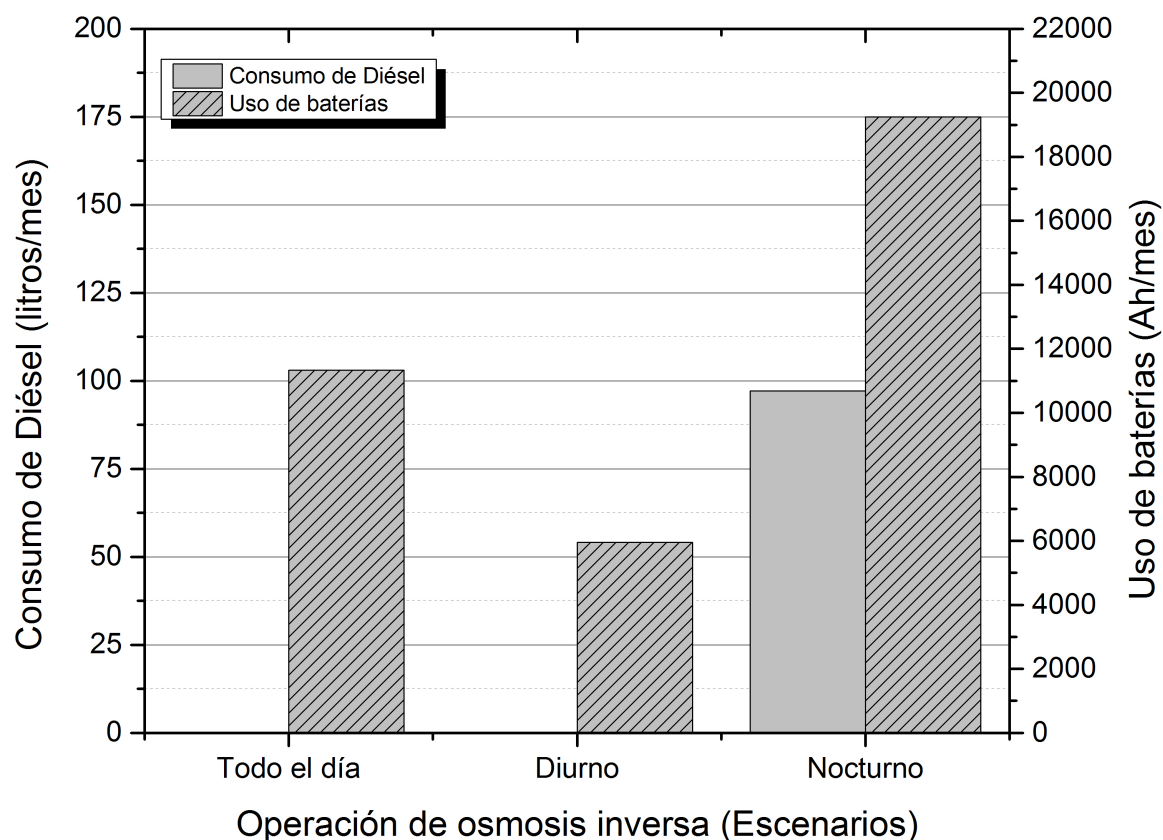


Figura 4.16: Consumo de diésel y uso de baterías para Abril con hábitos de consumo urbano

Conclusión

Después de analizar las simulaciones de la microrred con perfiles de demanda rurales y urbanos, es evidente que el perfil rural se adapta muy bien a las dinámicas de operación de la microrred sin excedentes de energía ni consumo excesivo del generador diésel. La microrred actualmente no tiene la capacidad de suministrar energía a viviendas con un perfil urbano, más adelante se discutirán las

dimensiones ideales de la microrred para soportar la carga de viviendas con perfil urbano.

El uso de sistemas de osmosis inversa acoplados a la microrred son viables activandolos solamente de día cuando existen excedentes de energía, ante la insuficiencia de energía es preferible su uso continuo a lo largo del día. Para caso del perfil rural, el equipo de desalinización se puede operar todo el año con un costo de operación casi constante, similar al escenario de Abril. No obstante el caso del perfil urbano solamente es viable operarlo durante los 4 meses de menor demanda eléctrica en donde no es necesario el uso del generador diésel. Operarlo por más de 4 meses traería costos de operación del generador diésel equivalente a la demanda del sistema de desalinización, en otras palabras 130 kWh al día adicionales equivalentes a 47 Litros de combustible del generador diésel.

Propuesta del sistema de almacenamiento-desalinización (ALENDE)

Como se describió al inicio de este documento, es necesaria una tecnología que pueda almacenar energía y suministrar agua potable a la comunidad a fin de dar solución a la problemática de los sistemas de almacenamiento de energía y escasez de agua potable. Como se ha demostrado anteriormente, el sistema de almacenamiento de energía hidráulica presurizada y el sistema de ósmosis inversa tienen la característica de que requieren de energía potencial para llevar a cabo su proceso. Es por esta razón que son compatibles y pueden trabajar en conjunto. En la figura 5.1 se aprecia una diagrama a bloques de lo que debería ser un sistema de almacenamiento de energía hidráulica presurizada con desalinización por ósmosis inversa (en adelante ALENDE). El funcionamiento se describe a continuación; cuando se tienen excedentes de energía en la microrred una bomba se encarga de llenar un depósito que contiene aire. El agua junto con el aire presurizado contenido en el tanque puede utilizarse para activar una turbina hidráulica y generar electricidad para la comunidad, o activar un sistema de ósmosis inversa y brindar agua potable a la comunidad, debido a que el sistema de ósmosis inversa desecha cerca del 70 % del agua de mar en forma de salmuera con alta presión, esta se utiliza para activar la turbina hidráulica y generar electricidad. De este modo obtenemos energía y agua potable al mismo tiempo y en solo proceso.

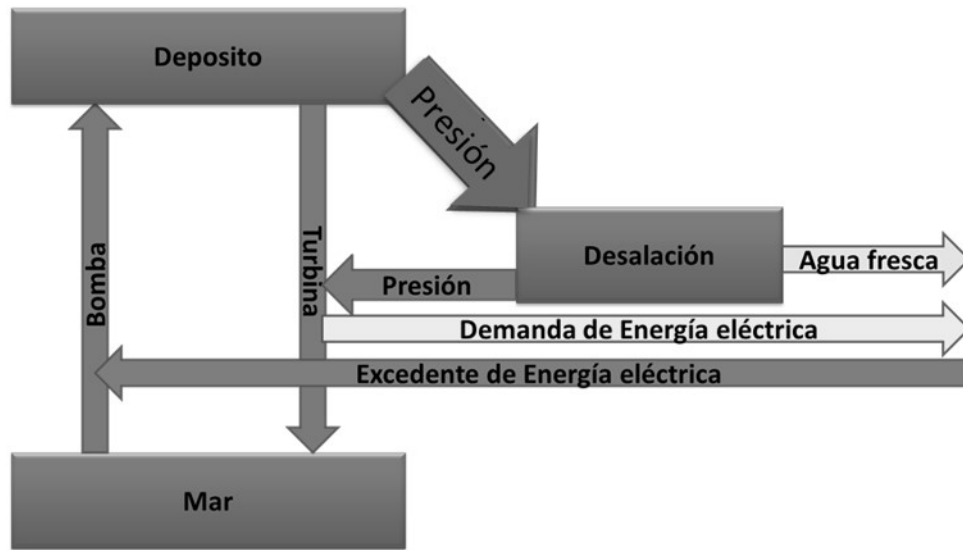


Figura 5.1: Diagrama a bloques de propuesta almacenamiento-desalinización

5.1. Estudio comparativo de diferentes configuraciones y selección de propuesta

Con la finalidad de diseñar la propuesta tecnológica con tecnologías existentes en el mercado, se realizó un estudio comparativo de las distintas configuraciones bomba-turbina que se pueden utilizar con el fin de destacar ventajas, desventajas y sus características. La configuración bomba de émbolos-turbina pelton se muestra en la figura 5.2, se puede observar que esta configuración utiliza máquinas hidráulicas de alta eficiencia (bomba 85 %, turbina 76 %), no obstante las características de operación las turbinas pelton a pequeña escala (menor a 100 kW) existentes en el mercado no satisfacen los requerimientos mínimos de presión de 6 MPa, en su lugar es común encontrar turbinas pelton con una presión de operación de 1.6 MPa, solamente existen turbinas con aplicaciones a gran escala (mayor a 1 MW) cumplen ese requerimiento. Por ende es necesario agregar un tercer elemento a la configuración que reduzca la presión del tanque de almacenamiento, y aumente el caudal a la entrada de la turbina. El eyector puede cumplir dicha tarea, convirtiendo la energía potencial del fluido motriz, en energía cinética dentro de la cámara de mezcla, lo cual crea un vacío capaz de succionar un segundo fluido que se encuentra a presión atmosférica. Utilizando un eyector con una relación de flujo M (respecto al fluido motriz) de 0.83 obtenemos una descarga a 1.6 MPa y $46.8 \text{ m}^3/\text{h}$, lo necesario para operar una turbina pelton de 16 kW. La eficiencia del 28 % del eyector reduce a 18 % la eficiencia global del sistema.

Existe la opción de utilizar equipo de bombeo reversible como se aprecia en la figura 5.3, se trata de una bomba hidráulica centrífuga multietapa que pueda funcionar como turbina simplemente utilizándola a la inversa. La bomba reversible puede operar con hasta 6.1 MPa en modo bombeo, y hasta 10 MPa

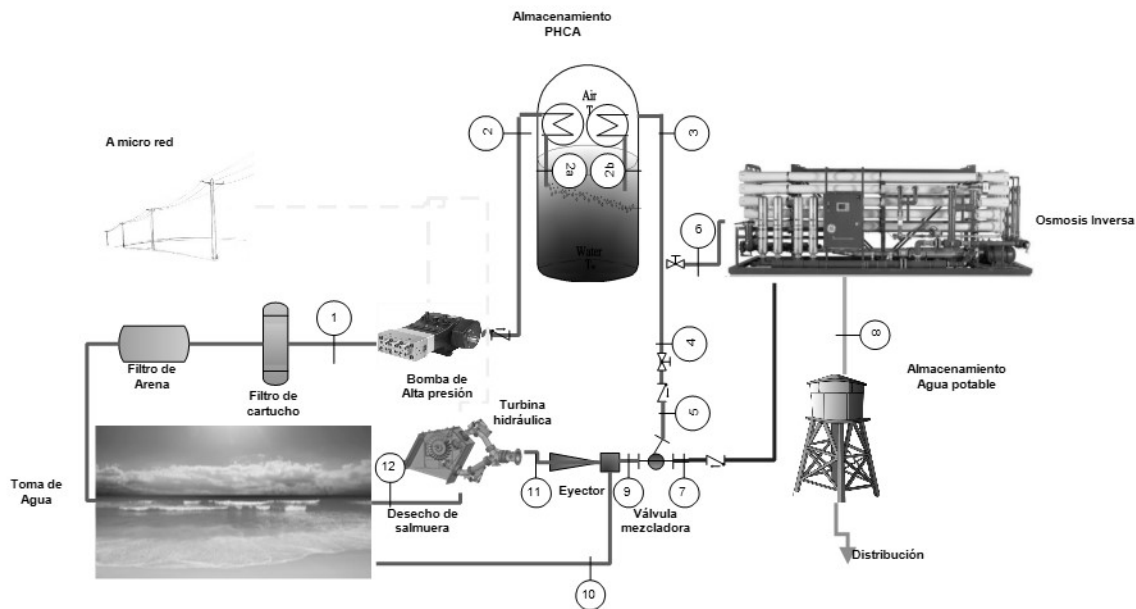


Figura 5.2: Esquema de configuración bomba de émbolos y turbina pelton

en modo turbina. La ventaja de esta configuración es su fácil modulación, además de utilizar un mismo equipo para dos fines. La limitante es la presión máxima en modo bombeo, que no permite operar a presiones mayores para aumentar la densidad energética del sistema. Una particularidad de este equipo es que su mayor eficiencia se obtiene en modo turbina con 74 %, a comparación del 67 % operando en modo bombeo. La eficiencia resultante de esta configuración es del 50 %.

La tercera configuración tiene las ventajas de las configuraciones anteriores, las cuales son equipos de alta eficiencia y límites de operación mayores. Al utilizar una bomba de émbolos nuestro límite de operación aumenta a 13.8 MPa con una eficiencia del 85 %. Una bomba reversible puede operar cerca del límite de operación de la bomba de émbolos y además con una eficiencia del orden de 74 % similar a las turbinas pelton de baja capacidad. Con esto la eficiencia global el sistema aumenta a 63 %.

5.2. Descripción del sistema de almacenamiento hidráulico presurizado-desalación

5.2.1. Descripción de componentes

A continuación se describen de forma general los componentes de la propuesta almacenamiento-desalación de la configuración bomba émbolos-bomba reversible, la figura 5.5 muestra el diagrama de tuberías e instrumentación:

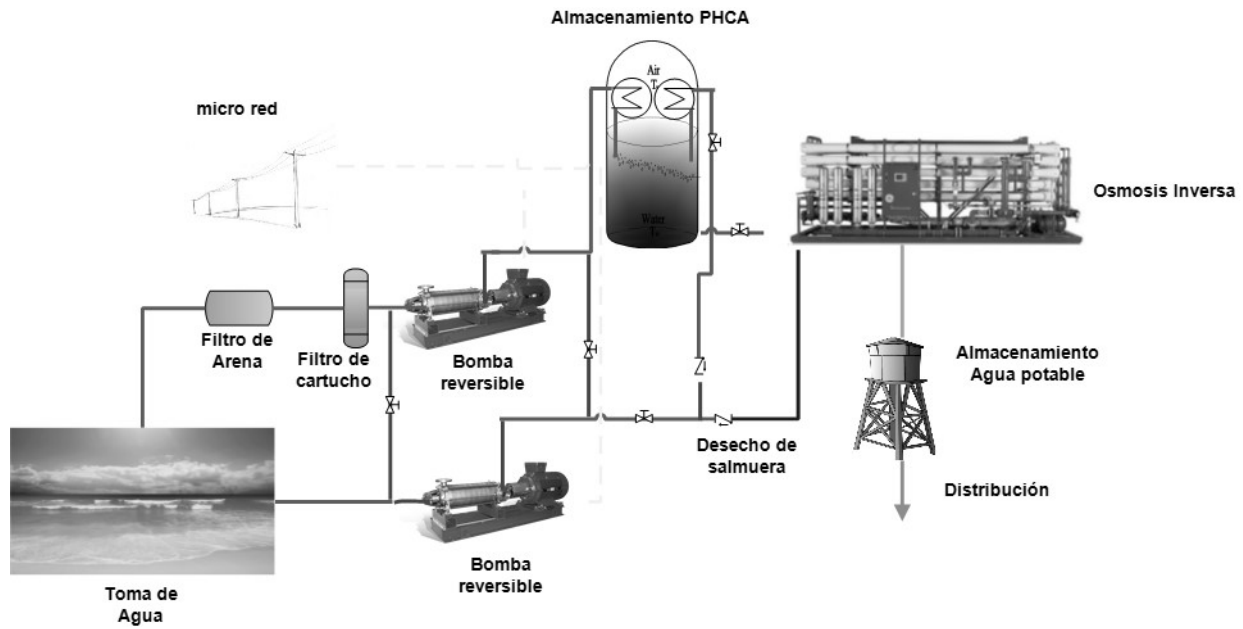


Figura 5.3: Esquema de configuración bomba reversible

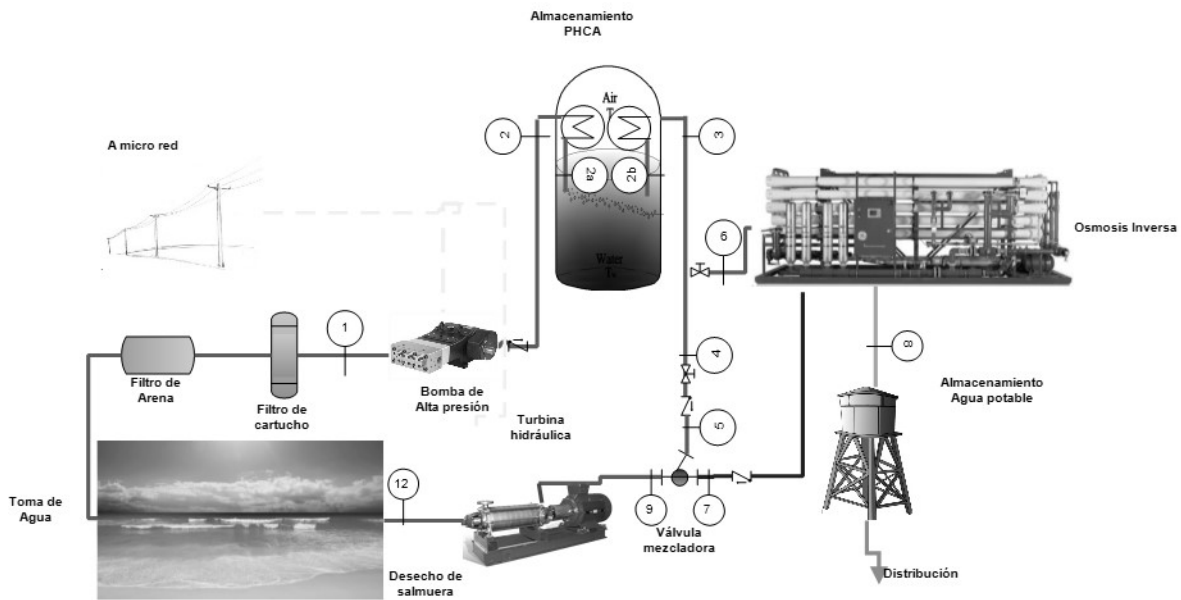


Figura 5.4: Esquema de configuración bomba émbolos-bomba reversible

5.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO HIDRÁULICO PRESURIZADO-DESALACIÓN61

pretratamiento físico-químico : Componente 2 y 3. Este elemento es utilizado para filtrar el agua de mar de partículas suspendidas de hasta veinte micras de tamaño. Las partículas en suspensión que lleva el agua son retenidas durante su paso a través de un lecho filtrante de arena. Una vez que el filtro se haya cargado de impurezas, alcanzando una pérdida de carga prefijada, puede ser regenerado por lavado a contra corriente. Una segunda etapa de filtrado utiliza filtros de cartucho que retienen el paso de sedimentos de hasta 1 micra de tamaño que pudieran llegar a la membrana semipermeable y taparla. Una vez filtrada el agua de mar se deben eliminar los microorganismos presentes en ella mediante un agente químico para evitar el acumulamiento bacteriano y degradación de la membrana semipermeable.

Bomba de alta presión : Componentes 5 y 4. Su función principal es cargar el tanque de almacenamiento con agua de mar. Se trata de una bomba de émbolos que puede operar en el rango de 0.1 MPa hasta 13.8 MPa.

Válvula de 4 vías, 3 posiciones : Componente 6-8. Este mecanismo permite redireccionar el flujo de la bomba durante la etapa de precarga y carga a sus respectivos tanques de compresión.

Pistones líquidos : Componentes 10 y 17. Dentro de estos tanques se lleva al cabo el proceso de precarga de aire al sistema de almacenamiento. Para lograrlo se utiliza el principio de pistón líquido, en donde aprovechando el transporte del agua de un cilindro a otro se succiona aire hacia el interior del cilindro y después se comprime para almacenarse. Cuenta con intercambiadores de calor agua-aire para lograr una transferencia de calor cuasi-isotérmica (componentes 11 y 16).

Tanques de almacenamiento : Componentes 18-23. Es la unidad que almacena la energía en forma potencial. Contiene aire en su interior que actúa como un resorte al comprimirse/expanderse con el agua de mar.

Válvula de mezcla : Componente 31. Es una válvula que se encarga de regular el flujo de agua de los tanques de almacenamiento hacia la turbina hidráulica en función de la demanda y el flujo de salmuera del sistema de ósmosis inversa.

Sistema de ósmosis inversa : Componente 32. Contiene el arreglo de membranas semipermeables, tubos de presión y dosificador de químicos para pre-tratamiento/pos-tratamiento para desalinizar el agua de mar.

Turbina hidráulica : Componentes 36 y 37. Convierte la energía potencial almacenada en los tanques en energía mecánica que tras accionar un generador eléctrico inyecta electricidad a la microrred. Se trata

de una bomba centrífuga multietapa funcionando a la inversa.

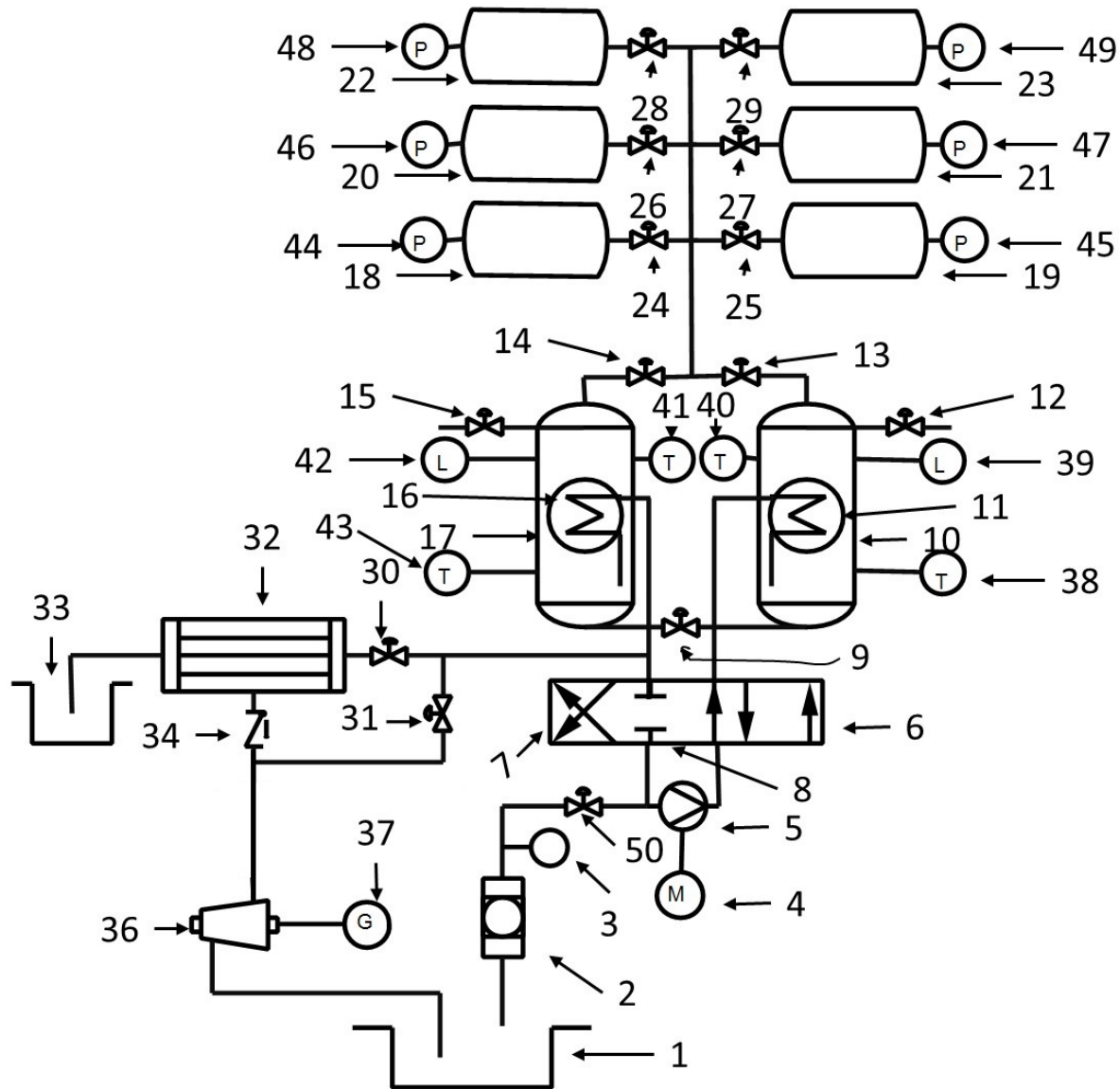


Figura 5.5: Diagrama de tuberías e instrumentación de propuesta tecnológica

5.2.2. Funcionamiento de propuesta tecnológica

El proceso de almacenamiento-desalación se lleva a cabo mediante tres etapas, las cuales se enlistan a continuación:

- Etapa de precarga: En el proceso es necesario realizar una precarga de aire dentro de los tanques

5.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO HIDRÁULICO PRESURIZADO-DESALACIÓN63

de almacenamiento de aire comprimido (18-23) ingresando aire en ellos hasta alcanzar una presión de 5.6 MPa. La densidad energética y la capacidad de almacenamiento de energía depende de las condiciones iniciales a las que se encuentren los tanques de almacenamiento de aire comprimido (18-23).

- Etapa de carga: Durante este proceso se aprovecha la energía excedente de alguna fuente externa mediante el motor eléctrico y bomba hidráulica (4)(5) para elevar la presión dentro de los tanques de almacenamiento de aire comprimido (18-23) hasta 13.8 MPa y guardar en forma de energía potencial.
- Etapa de descarga: El aire comprimido dentro de los tanques (18-23) ejerce una presión sobre el agua que se contiene en los tanques de compresión (10)(17), de esta manera el agua circula hacia una membrana de osmosis inversa (32) para ser desalada y posterior a esto a una turbina hidráulica (36) para generar energía eléctrica mediante un generador eléctrico (37). Las etapas de carga y descarga pueden funcionar de forma simultánea.

Antes de iniciar la etapa de precarga, es necesario que el tanque de compresión (10) se encuentre lleno de agua y todas las válvulas cerradas excepto las válvula de admisión de aire (12)(15) y la válvula de alimentación de agua (50), para ello el motor eléctrico (4) activa la circulación del agua mediante la bomba hidráulica (5). El agua es tomada de una pileta llena de agua de mar (1) y pasa por un pretratamiento físico (2) y químico (3) para removerle partículas suspendidas y microorganismos. La válvula de 4 vías 3 posiciones debe estar en la posición de flujo unidireccional (8) para permitir llenar el tanque de compresión (10). El sensor de nivel (39) enviará una señal al mecanismo de control para indicar que alcanzó su nivel máximo de agua. Una vez alcanzado el nivel máximo de agua el sistema está listo para entrar a la etapa de precarga. Hasta este punto se tiene agua en el tanque de compresión (10) y aire en el tanque de compresión (17) ambos a una presión 1 atm. La etapa de precarga está conformada por un ciclo de compresión y succión de aire que alterna entre los dos tanques de compresión. El ciclo de compresión inicia cuando la válvula de admisión de aire (15) es cerrada por el sistema de control y las válvulas de aislamiento (14)(24) son abiertas por el mismo mecanismo de control. La válvula de 4 vías 3 posiciones cambia a la posición de flujo cruzado (7) para permitir que el agua del tanque de compresión (10) emigre al tanque de compresión (17). La válvula de alimentación (50) se cerrará para impedir el ingreso de agua adicional a los tanques de compresión (10)(17). El agua pasa primero por un intercambiador de calor agua-aire (16) para retirar energía térmica al aire, el cual se genera durante el proceso de compresión, con esto se facilita el trabajo del motor eléctrico (4). El agua continua ingresando al tanque de compresión (17) y comprimiendo el aire hasta alcanzar su nivel máximo de agua. El sensor de nivel (42) enviará una señal al mecanismo de control para indicar que se ha alcanzado el nivel máximo de agua y la válvula de 4 vías 3 posiciones cambiará a la posición de flujo paralelo (6). La válvula de aislamiento (14) se cerrará

y en su lugar se abrirá la válvula de aislamiento (13). La válvula de admisión de aire (12) se cerrará y en su lugar se abrirá la válvula de admisión de aire (15). En esta ocasión el agua emigrará del tanque de compresión (17) al tanque de compresión (10). Circulará primeramente por el intercambiador de calor agua-aire (11), para retirar energía térmica al aire, el cual se genera durante el proceso de compresión. El agua continua ingresando al tanque de compresión (10) y comprimiendo el aire hasta alcanzar su nivel máximo de agua. El sensor de nivel (39) enviará una señal al mecanismo de control para indicar que se ha alcanzado el nivel máximo de agua y la válvula de 4 vías 3 posiciones cambiará a la posición de flujo cruzado (7). La válvula de aislamiento (13) es cerrada y en su lugar se abre la válvula de aislamiento (14). La válvula de admisión de aire (12) es abierta, y en su lugar es cerrada la válvula de admisión de aire (15). Hasta este punto se termina el ciclo de compresión de aire. El ciclo de succión de aire ocurre paralelo al ciclo de compresión de aire, en el tanque de compresión contrario al que se realiza la compresión de aire en un tiempo determinado. El ciclo de succión inicia en el tanque de compresión (10) al mismo tiempo que inicia el ciclo de compresión de aire en el tanque de compresión (17). Mientras el agua emigra del tanque de compresión de aire (10) al (17) crea una succión que permite el ingreso de aire a través de la válvula de admisión de aire (12). Lo mismo ocurre cuando el agua emigra del tanque de compresión de aire (17) al (10), la succión que se crea permite el ingreso de aire a través de la válvula de admisión de aire (15). Hasta este punto termina el ciclo de succión de aire. El ciclo de compresión-succión de aire provoca un aumento de presión en el tanque de almacenamiento de aire (18). El sensor de presión (44) monitorea la presión y envía una señal al mecanismo de control cuando se alcance la presión límite establecida, en este caso 5.6 MPa. El mecanismo de control accionará la válvula de aislamiento (24) para restringir el ingreso de aire al tanque de almacenamiento de aire comprimido (18), a la vez que accionará la válvula de aislamiento (25) para permitir el ingreso de aire al tanque de almacenamiento de aire comprimido (19). De mismo modo se accionará la válvula de aislamiento (27) para restringir el ingreso de aire al tanque de almacenamiento de aire comprimido (19), a la vez que se accionará la válvula de aislamiento (28) para permitir el ingreso de aire al tanque de almacenamiento de aire comprimido (20) una vez que el sensor de presión (45) detecte que se ha alcanzado la presión límite de 5.6 MPa. Así sucesivamente continua el ciclo de compresión-succión hasta alcanzar la presión límite en cada uno de los tanques de almacenamiento de aire comprimido (18-23). Al final el sensor de presión (49) detectará que se ha alcanzado el límite de presión en el tanque de almacenamiento de aire comprimido (23) y el mecanismo de control accionará la válvula de aislamiento (29) para restringir el ingreso de aire a este tanque de almacenamiento de aire comprimido. Hasta este punto termina la etapa de precarga. La etapa de carga inicia inmediatamente después de la etapa de precarga. Son accionadas las válvulas de aislamiento (13-14)(24-29) en la posición abierta y a la vez las válvulas de admisión de aire (12)(15) a la posición cerrada. La válvula de by pass (9) cambia a la posición abierta. La válvula de 4 vías 3 posiciones cambia a la posición de alimentación de agua (8) y la válvula de alimentación de agua (50) cambia a la posición abierta. De esta manera llena-

remos ambos tanques de compresión de aire (10)(17) a la vez y se continuará aumentando la presión en los tanques de almacenamiento de aire comprimido hasta que los sensores de nivel (39)(42) detecten el nivel máximo permitido de llenado, siempre y cuando la presión registrada por los sensores de presión (44-49) no rebasen el máximo permitido de 13.8 MPa por cuestión de seguridad. Durante esta compresión de aire, los intercambiadores de calor agua-aire (11)(16) seguirán retirando energía térmica del aire. Los sensores de temperatura (38)(43) controlan la velocidad de llenado de los tanques de compresión de aire (10)(17), es decir, una compresión súbita eleva la temperatura del aire comprimido de forma rápida dado que los intercambiadores de calor (11)(17) no tienen la capacidad para dicha transferencia de calor. Una vez alcanzado el nivel máximo de agua en los tanques de compresión de aire (10)(17), se cerrarán las válvulas de aislamiento (13-14) y el motor eléctrico (4) dejará de funcionar. Hasta este punto termina la etapa de carga. El proceso de desalación y generación de energía eléctrica ocurren en la etapa de descarga, la cual puede ocurrir simultánea a la etapa de carga. En la etapa de descarga son accionadas las válvulas de aislamiento (13-14) y de alimentación a la desaladora (30) en la posición abierta. De esta manera el aire presurizado contenido en los tanques de almacenamiento de aire comprimido (18-23) empuja el agua contenida en los tanques de compresión (10)(17) hacia la unidad de osmosis inversa (32). Tras la separación del agua de las sales se obtiene un permeado a la salida de la unidad de osmosis inversa (33) con una concentración de sales alrededor de 500 ppm. La salmuera a la salida de la desaladora (30) entra a una turbina hidráulica (36) en donde mediante un generador eléctrico (37) se aprovecha la energía de flujo. Si fuese necesario una mayor cantidad de energía en el generador eléctrico (37), la válvula de by pass (31) es accionada a la posición abierta para aumentar el caudal entrante a la turbina hidráulica (36) y con ello tener una mayor energía de flujo aprovechable. El proceso continuará hasta que los sensores de nivel (39)(42) detecten el mínimo permisible, en este momento se acciona la válvula de alimentación a la desaladora (30) y de by pass (31) a la posición cerrada. Hasta este punto termina la etapa de descarga.

5.3. Modelo matemático de propuesta tecnológica

En esta sección se describe el modelo matemático del sistema almacenamiento-desalinización y su método de solución en la plataforma Engineering Equation Solver (EES por su siglas en inglés). Este programa es un solucionador de ecuaciones implementando un método numérico, es capaz de resolver ecuaciones algebraicas no lineales, así como diferenciales entre otras cosas. Una característica importante de EES es la base de datos termodinámica y de propiedades de transporte de alta exactitud que se proporciona para cientos de sustancias de una manera que permite que se utilice en la resolución de ecuaciones.

5.3.1. Consideraciones del modelo matemático

Las siguientes consideraciones son empleadas para representar adecuadamente el modelo:

- El proceso de compresión/expansión es isotérmico.
- Opera en estado estable.
- No existe difusión del aire en el agua.
- No existen pérdidas por fricción en tuberías y válvulas.
- Nulo ensuciamiento de membranas semipermeables.
- Efecto de polarización por concentración en membranas semipermeables es despreciable.
- La temperatura del agua permanece constante a lo largo del proceso.

5.3.2. Bomba hidráulica

Las bombas reciprocantes tipo triplex se caracterizan por mantener un flujo constante independiente de la presión de salida, el caudal en $\frac{m^3}{s}$ se expresa con la siguiente ecuación 5.1;

$$qv_B = \left(\frac{V_{cil} \cdot rpm_B}{60} \cdot \eta_{vol} \cdot 3 \right) \cdot F \quad (5.1)$$

en donde;

$$V_{cil} = \frac{\pi}{4} \cdot bore^2 \cdot stroke \quad (5.2)$$

bore y stroke son términos en inglés utilizados en motores de combustión interna y representan el diámetro y carrera del pistón respectivamente, esta información se encuentra en las fichas técnicas de los fabricantes de bombas reciprocantes. La eficiencia volumetrica de estos equipos generalmente son del 99 % a menos que presente desgaste en los empaques de los pistones. F representa el factor de proporción para escalar el modelo a otras dimensiones. La potencia eléctrica de la bomba en kW se define como;

$$P_{elecB} = \frac{qv_B \cdot \rho_1 \cdot 9.81 \cdot H_B}{\eta_{mec} \cdot \eta_{elec} \cdot 1000} \quad (5.3)$$

H_B representa la columna de agua en metros a la que estará sometida la bomba, a su vez esta se relaciona con la presión en MPa con la siguiente expresión;

$$\Delta p_B = \frac{9.81 \cdot H_B}{\rho_1} \quad (5.4)$$

Una vez conociendo los valores anteriores se calcula el sistema de bombeo mediante las siguientes ecuaciones en donde $Cntrl_{bombeo}$ representa la cantidad de equipos en funcionamiento;

$$P_{elecBom} = P_{electB} \cdot Cntrl_B \quad (5.5)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_B \cdot Cntrl_B \quad (5.6)$$

$$\dot{Q}_2 = \left(\frac{\dot{m}_2}{\rho_1} \right) \cdot 3600 \quad (5.7)$$

$$(5.8)$$

5.3.3. Tanque de almacenamiento presurizado

La masa de aire inicial en kg se obtiene mediante la ecuación de gas real con el factor de compresibilidad Z como sigue;

$$m_g = \frac{V_t \cdot \Delta p_t}{R_c \cdot T_t \cdot Z_i} \quad (5.9)$$

en donde el factor de compresibilidad Z_i a $294\ K$ y $4.5\ MPa$;

$$Z_i = 0.9884 \quad (5.10)$$

conocida la masa inicial dentro del tanque, la presión interna en el proceso de compresión/expansión se calcula con la ecuación de gas real y el factor de compresión Z variable como sigue;

$$P_3 = \frac{m_g \cdot R_c \cdot T_t \cdot Z}{V_g} \quad (5.11)$$

en donde Z se obtiene con la correlación en función del volumen específico del aire;

$$Z = 1.00138949 - 2.82124650 \cdot \bar{v}_g + 1.74988967 \times 10^2 \cdot \bar{v}_g^2 - 3.27159941 \times 10^3 \cdot \bar{v}_g^3 \quad (5.12)$$

y el volumen del aire dentro del tanque;

$$V_g = V_t - V_a \quad (5.13)$$

en donde V_a es el volumen de agua dentro del tanque y se calcula mediante la siguiente expresión;

$$V_a = \frac{m_{acum}}{\rho_1} \quad (5.14)$$

la masa acumulada es la integral del flujo másico en el periodo de simulación. El balance de masa en

el tanque está definido por;

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_6 + \dot{m}_4 \quad (5.15)$$

5.3.4. Turbina hidráulica

El modelado de la turbina se realizó mediante correlaciones de las curvas características de rendimiento del fabricante las cuales se observan en la figura 5.6.

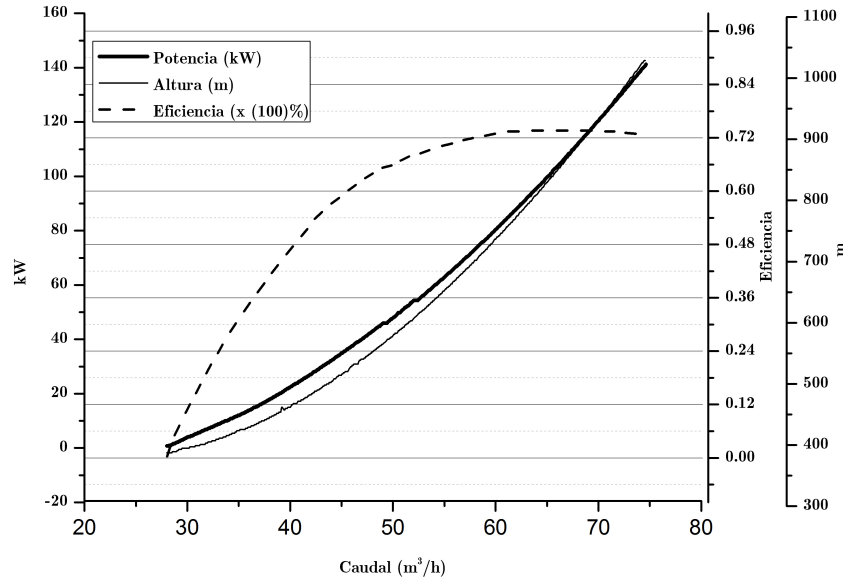


Figura 5.6: Curvas características de turbina Multitec 50-4.1/14

y se obtuvieron las expresiones para la potencia (P_{mecT}) y eficiencia (η_{mecT}) en función del caudal ($\dot{Q}$);

$$\dot{Q}_T = -2.13318050 \times 10^1 + 1.61867189 \times 10^{-1} \cdot H - 6.83729134 \times 10^{-5} \cdot H^2 \quad (5.16)$$

$$P_{mecT} = -1.16250381 \times 10^1 - 5.03020519 \times 10^{-1} \cdot \dot{Q} + 3.58962121 \times 10^{-2} \cdot \dot{Q}^2 \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} \eta_{mecT} = & -2.28374169 + 1.29651446 \times 10^{-1} \cdot \dot{Q} - 1.83547725 \times 10^{-3} \cdot \dot{Q}^2 \\ & + 8.55064442 \times 10^{-6} \cdot \dot{Q}^3 \end{aligned} \quad (5.18)$$

utilizando las leyes de afinidad para modelos geométricos similares se obtuvieron los siguientes coeficientes adimensionales;

$$Ch = 1.68304052 \times 10^0 - 1.78985142 \times 10^2 \cdot Cq + 2.50048566 \times 10^4 \cdot Cq^2 \quad (5.19)$$

$$Cp = -5.01536779 \times 10^{-6} - 1.37613114 \times 10^{-4} \cdot Cq + 2.37734417 \times 10^{-1} \cdot Cq^2 \quad (5.20)$$

$$\eta_{mecT} = -1.11866290 \times 10^0 + 3.36248514 \times 10^2 \cdot Cq - 1.51296504 \times 10^4 \cdot Cq^2 \quad (5.21)$$

los cuales deben sustituirse en las siguientes ecuaciones para obtener los resultados dimensionales;

$$Cq = \frac{qv_T}{\omega_T \cdot r_T^3} \quad (5.22)$$

$$Ch = \frac{9.81 \cdot H_T}{r_T^2 \cdot \omega_T^2} \quad (5.23)$$

$$Cp = \frac{P_{mecT}}{\rho_{Tsw} \cdot r_T^5 \cdot \omega_T^3} \quad (5.24)$$

$$P_{elecT} = P_{mecT} \cdot \eta_{gen} \quad (5.25)$$

de esta manera podemos predecir el comportamiento de la turbina al variar el radio del rodete, la velocidad de giro o la densidad del agua de mar.

5.3.5. Ósmosis inversa

El balance de masa y sales en el sistema de ósmosis inversa está expresado como;

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8 \quad (5.26)$$

$$\dot{m}_6 \cdot S_6 = \dot{m}_7 \cdot S_7 + \dot{m}_8 \cdot S_8 \quad (5.27)$$

para encontrar la concentración de sales en la salmuera S_7 se utiliza la siguiente expresión;

$$S_7 = \left(\frac{S_6}{1 - Rec} \right) \cdot RS \quad (5.28)$$

en donde el factor de recuperación Rec se calcula mediante la relación entre el agua de alimentación y el agua potable;

$$Rec = \frac{\dot{m}_8}{\dot{m}_6} \quad (5.29)$$

y el factor de rechazo RS se obtiene de la ficha técnica de las membranas semipermeables.

5.3.6. Válvula de mezcla

El flujo que atravesará la válvula de mezcla y por ende se descargará del tanque se representa con;

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_{4nom} \cdot val_4 \quad (5.30)$$

en donde el flujo nominal $\dot{m}_{4nom}$ es el flujo requerido por la turbina restando el flujo de salmuera a la salida del sistema de ósmosis inversa, val_4 es una variable de control para abrir o cerrar la válvula de mezcla;

$$\dot{m}_{4nom} = \dot{m}_T - \dot{m}_7 \quad (5.31)$$

5.3.7. Propiedades del agua de mar

La densidad del agua de mar en función de la temperatura, salinidad y presión, son dadas por la librería $SW_{Density}$ de la plataforma EES;

$$\rho_{sw} = SW_{Density}(T, S, \Delta p) \quad (5.32)$$

utilizando la misma función se puede calcular la salinidad del agua de mar fijando la densidad, temperatura y presión.

5.3.8. Metodología de solución y desarrollo de simulador

Procedemos a programar el modelo matemático en la plataforma EES. Debemos cerciorarnos que tenemos una matriz cuadrada (número de ecuaciones igual a número de variables) para que el método numérico empleado converja a la solución, es necesario seleccionar nuestras variables de diseño (aquellas que permanecen fijas durante la simulación), nuestras variables de entrada (cambian a lo largo de la simulación) y asignarles valores. Para evitar problemas iterativos en la simulación, es necesario sugerir intervalos de convergencia lógicos a cada variable, por ejemplo, sabemos que las variables que representan un flujo jamás tendrán valores negativos, y su flujo no será mayor a $200 \text{ m}^3/\text{h}$ entonces fijamos el intervalo de 0 a 200, esto se puede realizar en la sección de información de variables de EES. Corremos la simulación y después de una serie de procesos iterativos internos del simulador, se desplegará una lista con los resultados de las incógnitas. La figura 5.7 describe la metodología de solución de la plataforma EES. En la tabla 5.1 se enlistan las variables de entrada, de diseño y salida empleadas en el modelo matemático.

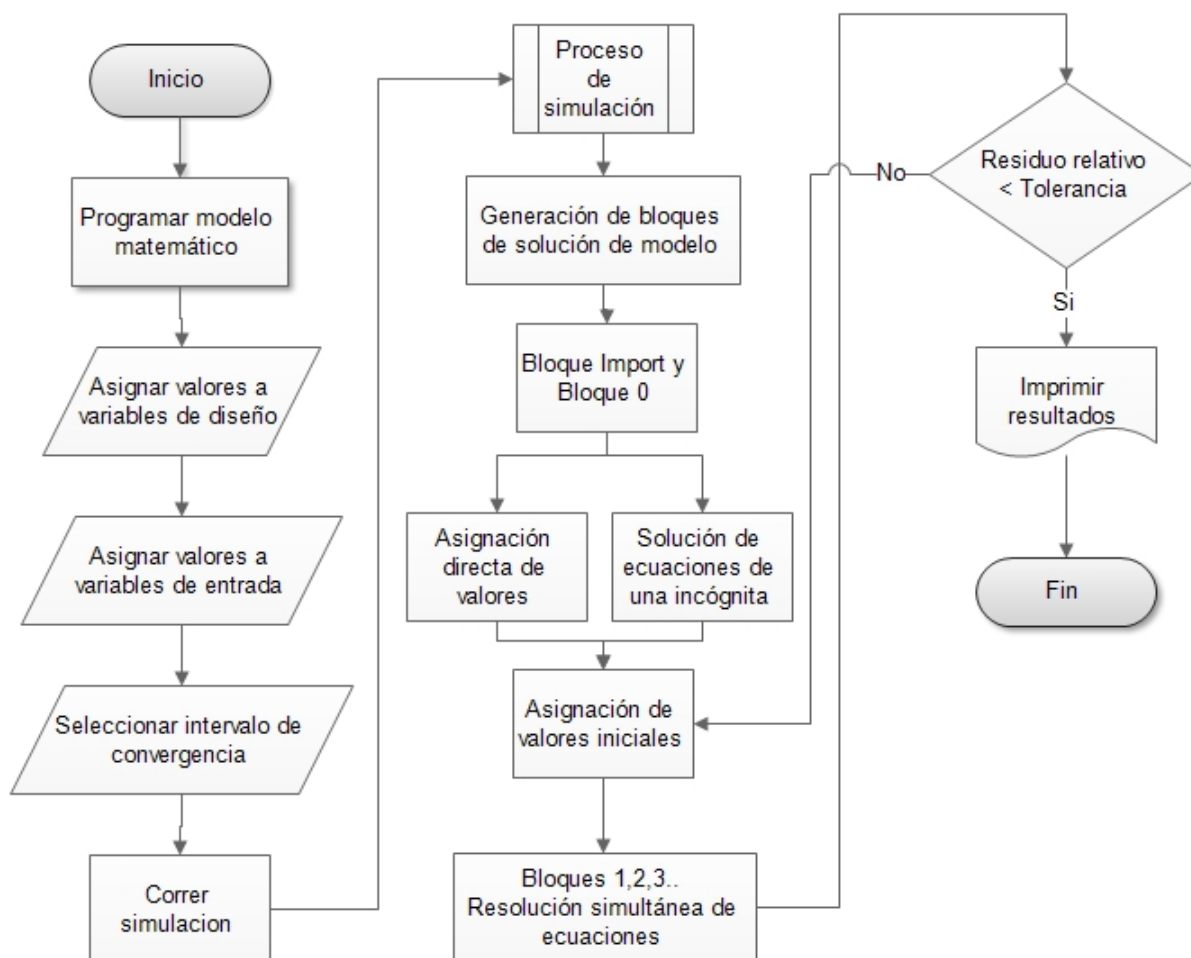


Figura 5.7: Diagrama de flujo de metodología de solución de plataforma EES

Tabla 5.1: Variables involucradas en modelo matemático

Variables de entrada	Variables de diseño	Variables de salida
rpm_T	V_t	m_dot[2]
m_acum	P_t	m_acum
val_4	T_t	P[3]
val_6	R_c	P_mecaBTotal
Cntrl_bombeo	Z_i	m_dot[3]
P_mecaT	S[1]	P_mecaT
	T[1]	m_dot_T
	P[2]=P[3]	m_dot[4]
	rpm_B	m_dot[8]
	bore	P_mecaB
	stroke	DELTAp_loss_Val_11
	V_cil	n_T
	Eff_vol	
	Eff_mec	
	F_pro	
	r_T	
	omega_T	
	f_prop2	
	RS	
	Rec	
	m_dot[6]	
	T[3]	
	T[3]=T[9]	
	P[3]=P[4]	
	P[3]=P[9]	
	P[10]	
	m4_nominal	

5.4. Estudio de sensibilidad del sistema propuesto

Se sometió el modelo a un estudio parámetro a con la finalidad de encontrar las condiciones con la mayor densidad energética, en función de la presión inicial del aire y la relación aire-agua dentro del tanque de almacenamiento. Los resultados se resumen en la figura 5.8. La presión final de compresión fue de 13.8 MPa y se mantuvo fija en todo el estudio. Cuanto menor sea la relación aire-agua mayor es la cantidad de energía disponible en el fluido de trabajo, sin embargo existe un máximo en 6.1 MPa de presión inicial, y continúa el declive hasta 3.8 MPa . Debajo de 6.1 MPa la eficiencia de la turbina comienza a disminuir, es por eso que la densidad energética lo hace también. La condición óptima de operación es a una presión inicial de 5.6 MPa , lo cual genera una densidad energética de $1.021 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$ y una relación aire-agua de 0.6848 .

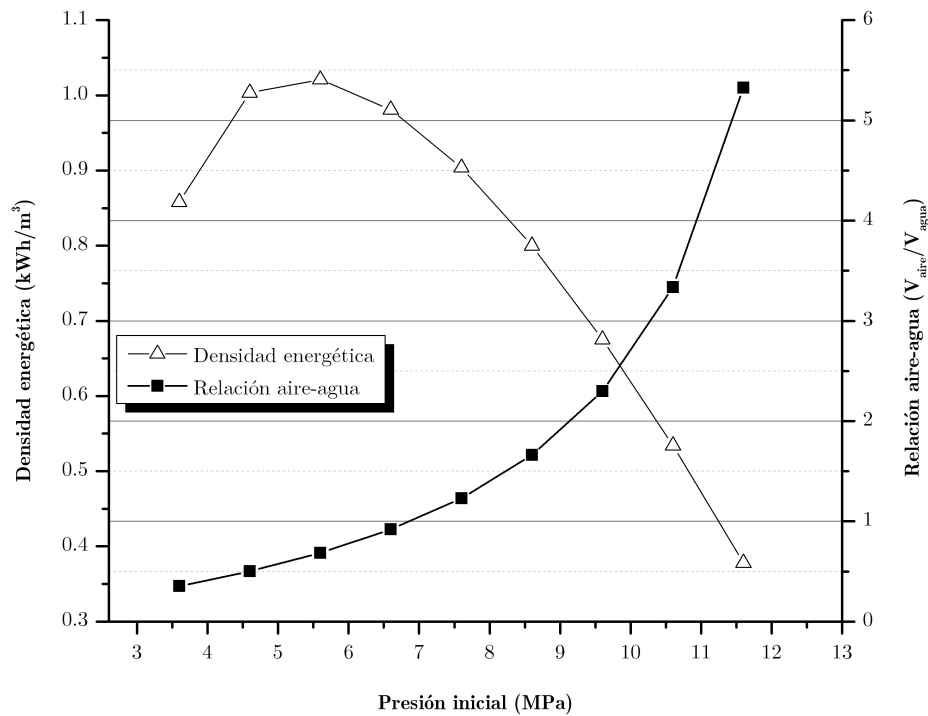


Figura 5.8: Densidad energética en función de la presión inicial y relación aire-agua dentro del tanque de almacenamiento

En la tabla 5.2 se muestran los resultados de autores afines al tema de almacenamiento hidráulico con aire comprimido. El caso de (Yin, Wang, Kim, y Lee, 2014) es una idea clara de un sistema de almacenamiento por bombeo hidráulico, donde se aprecia la baja densidad energética de $0.065 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$.

Como referencia $1\text{MPa} \approx 100\text{m.c.a}$ para una densidad del agua de $1,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Entre los estudios teóricos, ALENDE presenta la mayor densidad energética por la configuración de maquinas hidráulicas que contiene. De los estudios experimentales en etapa prototipo GLIDES del autor (Witt y cols., 2015) presentó una densidad energética de $0.9 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$ utilizando un rango de operación más amplio. (ORTEGO, DAZIN, CAIGNAERT, COLAS, y COUTIER-DELGOSHA, 2013) En su estudio experimental utiliza una bomba reversible multietapa, es por ello que el límite superior de presión es relativamente bajo respecto a los demás autores.

Tabla 5.2: Comparación entre diferentes autores

		Teórico			Experimental	
		Jun Lian Yin	Erreo Yao	ALENDE	Egoi Ortego	GLIDES
Densidad energética	kWh/m^3	0.065	0.97	1.02	0.4	0.9
Presión inicial	MPa	0.1	5	5.6	1.5	5
Presión final	MPa	1.07	10	13.8	4	15

5.5. Aplicación de propuesta tecnológica en microrred de Puertecitos B.C.

5.5.1. Metodología de dimensionamiento de propuesta

Los pasos a seguir para dimensionar la propuesta tecnológica se en listan a continuación:

1. **Estudiar la comunidad:** Antes de cualquier acción es necesario conocer de cerca a la comunidad. Indagar en sus hábitos de consumo de energía y agua además de conocer la cantidad de población fija y flotante para establecer sus necesidades de almacenamiento de energía y agua potable.
2. **Estudiar la microrred existente y sus dinámicas de operación:** Cuantificar los componentes de la microrred y sus características, estudiar su tipología y configuración de la misma. Estudiar su comportamiento diario típico mediante datos de algún sistema de monitoreo o simulación horaria en TRNSYS. Cuantificar los excesos de energía diarios o déficit según aplique además de estudiar el comportamiento de carga y descarga del banco de baterías actual.
3. **Elegir entre almacenamiento 100 % ALENDE o mixto ALENDE-baterías:** Es importante definir desde un inicio si se desea reemplazar el banco de baterías existente o cubrir parcialmente la capacidad de almacenamiento con ALENDE.

4. **Calcular capacidad del tanque de almacenamiento:** El volumen del tanque de almacenamiento está en función de la energía que debe almacenar E_A , la densidad energética de ALENDE ρ_E y la eficiencia mínima de operación de la turbina hidráulica η_{min} .

$$V_T = \frac{E_A}{\rho_E \cdot \eta_{min}} \quad (5.33)$$

en donde E_A es la fracción de la demanda energética que se desea cubrir más el consumo energético del sistema de ósmosis inversa el cual es de $4.64 \frac{kWh}{m^3}$;

$$E_A = E_C + E_{SWRO} \quad (5.34)$$

5. **Calcular capacidad del sistema de bombeo:** Conociendo el volumen del tanque V_T y utilizando la relación aire-agua α calculamos el volumen de agua dentro del tanque;

$$V_a = V_T \cdot (1 - \alpha) \quad (5.35)$$

y considerando el tiempo de carga t_c ;

$$\dot{Q}_{bom} = \frac{V_a}{t_c} \quad (5.36)$$

Se obtiene $\dot{Q}_{bom}$ que es la capacidad del sistema de bombeo en $\frac{m^3}{h}$.

El número de bombas se elige en función del caudal de diseño de la bomba Q_b ;

$$N_b = \frac{\dot{Q}_{bom}}{Q_b} \quad (5.37)$$

6. **Definir capacidad de la turbina hidráulica:** La potencia nominal de la turbina hidráulica se define en función de la demanda promedio diaria en Verano.
7. **Definir capacidad de la generador auxiliar:** El generador auxiliar debe tener la capacidad de soportar la demanda en caso de que el recurso energético renovable falte, por ello la capacidad nominal debe ser cercana a la demanda máxima esperada.
8. **Definir capacidad de las membranas semipermeables:** Se deben elegir membranas para aplicación de agua de mar del tipo arrollamiento en espiral compuestas de poliamida. La cantidad de membranas N_m está definida por la producción de agua potable estimada diaria AP , el área activa de la membrana A_m y el caudal específico de diseño Φ (flux) que tiene por unidades el GFD

(gallon foot day) o su equivalente $l/m^2 \cdot h$. Este último valor se considera un factor de diseño que los fabricantes aconsejan, no obstante el diseñador en base a su experiencia es el que elige el factor a su conveniencia que le arroje el mejor beneficio-costo. En la tabla 5.3 se muestran el GFD recomendado o su equivalente en función del SDI (índice de ensuciamiento) y el tipo de suministro de agua de mar, ya sea este superficial o de pozo. La ecuación 5.38 se utiliza para calcular el número de membranas;

Tabla 5.3: Factores de diseño recomendados por fabricantes

	SDI	GFD	$l/m^2 \cdot h$
Agua de mar superficial	2 - 4	10 - 16	17 - 27
Agua de mar de pozo	< 2	16 - 20	27 - 34

$$N_m = \frac{AP}{A_m \cdot \Phi} \quad (5.38)$$

y si se alojan en tubos de 6 membranas que es lo más común para estas aplicaciones;

$$N_v = \frac{N_m}{6} \quad (5.39)$$

obtenemos el número de tubos N_v necesarios para alojar el total de membranas.

9. **Simular:** Se debe realizar una simulación para probar el dimensionamiento preliminar.
10. **Realizar ajustes:** Aquí es un proceso iterativo hasta encontrar las condiciones favorables en la simulación variando las capacidades antes descritas y corroborando los resultados. La metodología se describe en la figura 5.9, después de la primera simulación es necesario observar si la autonomía del sistema fue la esperada. De ser negativo las razones pueden ser un tanque muy pequeño, un arreglo fotovoltaico muy pequeño o un equipo de bombeo muy pequeño o con pocas bombas. Para conocerlo se tiene que observar el estado de carga máximo que se alcanza en un día típico, si este alcanzó una carga completa y además tuvo excesos de energía entonces es necesario aumentar el número de bombas y con ello disminuir la potencia individual de ellas y volver a simular. Si no hubo excesos de energía significa que el tamaño del tanque es muy pequeño por ende es necesario aumentarlo y volver a simular. Por el contrario si observamos que el estado de carga no alcanzó una carga completa en el día típico, debemos recordar cual era la situación anterior del sistema. Si anteriormente ya se contaba con autonomía suficiente, entonces es necesario aumentar el arreglo fotovoltaico para continuar con el ajuste, caso contrario se aumenta el volumen del tanque. Esto se repetirá hasta tener una autonomía suficiente a la esperada. Una vez alcanzada la autonomía

tendremos que observar como fue la etapa de carga, si la carga fue más rápida de lo esperado significa que tenemos un equipo de bombeo muy grande y con ello el arreglo fotovoltaico, por tanto es necesario disminuir ambos (entre menor el porcentaje de disminución más fina la afinación) y volver a simular. Si en la siguiente simulación el tiempo de carga disminuyó al esperado, pero tenemos excesos de energía, entonces es necesario ahora disminuir el arreglo fotovoltaico, caso contrario significa que la generación, el equipo de bombeo y el volumen del tanque son adecuados y termina el proceso de ajuste.

11. **Elegir tecnologías disponibles en el mercado:** Si en este punto las especificaciones técnicas difieren con las tecnologías comerciales es preciso reemplazar los parámetros anteriores con los que otorga el fabricante y correr nuevamente la simulación con el fin de tener resultados más precisos.

5.5.2. Metodología de simulación vinculando TRNSYS y EES.

Para realizar la vinculación entre ambas plataformas es necesario incluir el *type 66a* en TRNSYS, este *type* es el responsable de enviar y recibir resultados de ambas plataformas además se debe incluir el *type93* para filtrar las iteraciones que realiza TRNSYS antes de encontrar la solución. En EES se debe de agregar al inicio del código el comando *Import 'CLIPBOARD'* y al final del código el comando *Export 'CLIPBOARD'* para permitir la comunicación entre ambas plataformas. El diagrama de flujo para simular vinculando TRNSYS y EES se muestra en la figura 5.10. Para antes de comenzar la simulación es necesario asignar los respectivos parámetros a cada plataforma. El proceso de simulación lo coordina TRNSYS y es en esta plataforma donde se inicia la corrida y se obtienen los resultados finales.

5.5.3. Simulación con perfil urbano de Puertecitos B.C.

En este apartado se evaluará la alternativa de integrar el sistema ALENDE a la comunidad de Puertecitos B.C. Se utilizará el perfil de demanda urbano para el análisis, estimando que la comunidad con el tiempo irá incrementando su consumo eléctrico hasta llegar a los requerimientos mínimos de confort para zonas cálidas. Se utilizará la turbina modelada en la sección 5.3 de 100 kW debido a que no se encontró una turbina de baja capacidad que soportara altas presiones, variaciones en el flujo de entrada además de mantener una eficiencia cercana al 80 %. La autonomía del sistema de almacenamiento se limitó a 12 horas para el análisis.

Como se mencionó anteriormente, la microrred en su situación actual no tiene la capacidad para cargar un banco de baterías en Verano, por esta razón el sistema ALENDE no puede integrarse ya que no existe un exceso de energía que active el sistema de bombeo durante el día. Es por esto que se realizó un re-dimensionamiento de la microrred con la metodología descrita anteriormente a fin de que pueda

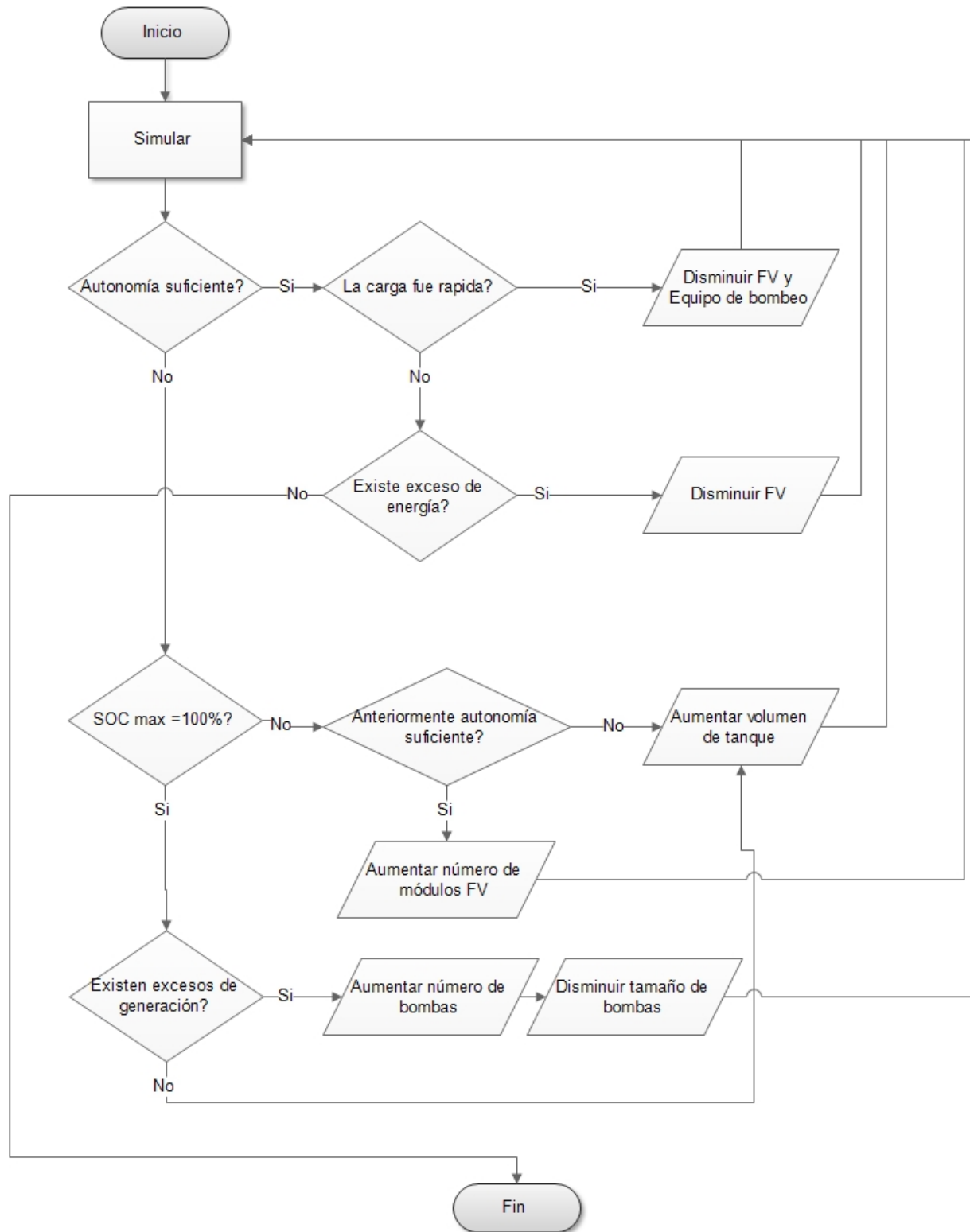


Figura 5.9: Diagrama de flujo para afinar dimensionamiento

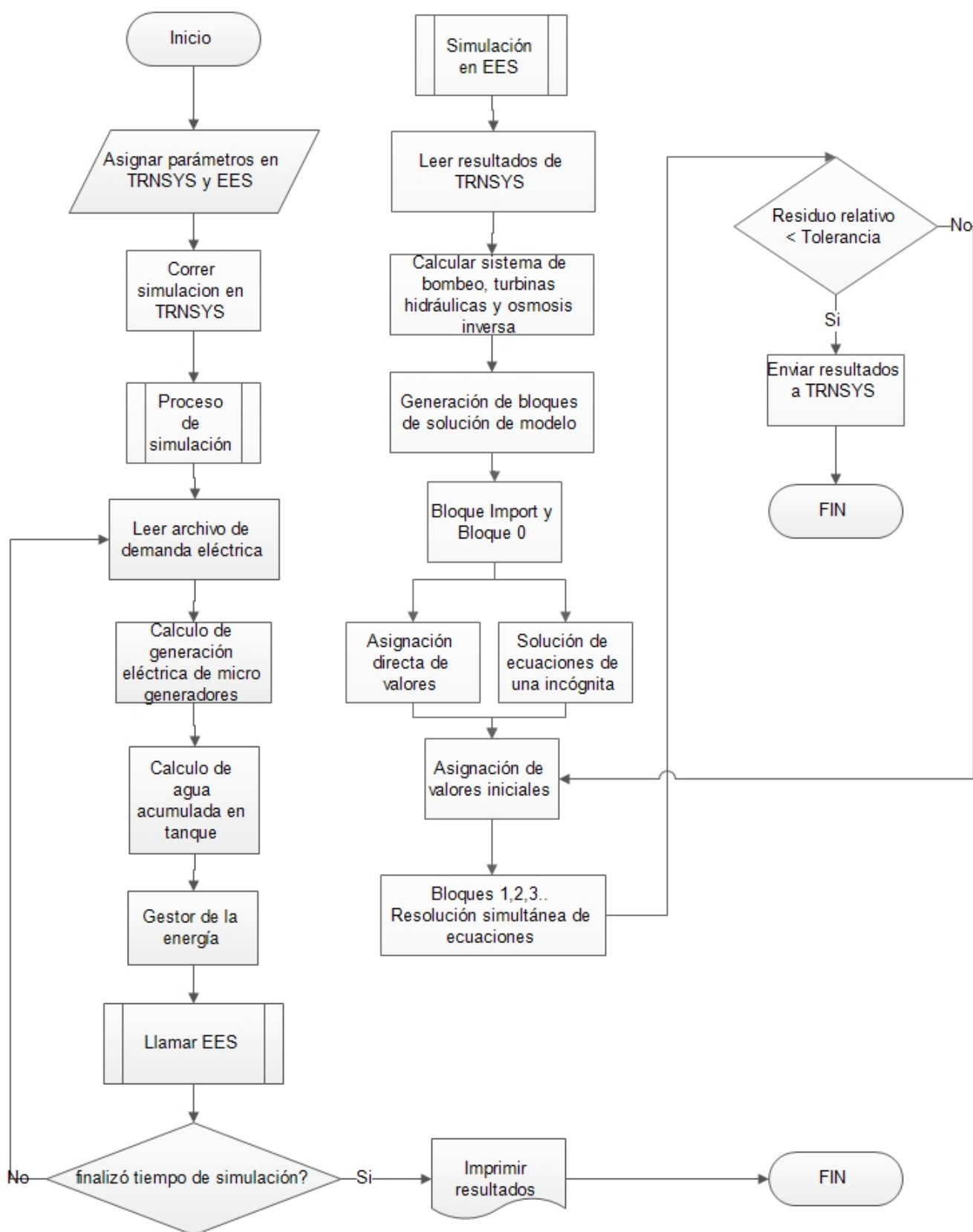


Figura 5.10: Diagrama de flujo para simular vinculando TRNSYS y EES

integrarse la alternativa ALENDE. El resultado es 421.2 kWp de energía fotovoltaica, 4 bombas con capacidad de $20.4 \frac{m^3}{h}$ cada una para una carga en 10 horas, un tanque de almacenamiento de $900 m^3$, una bomba reversible de 100 kW y un sistema de ósmosis inversa de $1.2 \frac{m^3}{h}$ de agua potable. En la figura 5.11 se muestra el comportamiento de los microgeneradores en los días típicos de verano. La turbina cubre perfectamente la demanda nocturna a excepción de los días con nublados en donde el sistema ALENDE no se carga lo suficiente para soportar la demanda nocturna, en estos casos enciende el generador diésel como soporte a la red. Cuando se tiene energía almacenada, la turbina es capaz de apoyar en la generación de energía, inclusive durante el día, cuando se presenta alguna variación en la demanda o en la irradiancia. La potencia de la turbina es el complemento de la diferencia entre la demanda eléctrica y la generación fotovoltaica, como se puede observar en la etapa de transición fotovoltaico-turbina a partir de la hora 4361 de la simulación el generador fotovoltaico comienza a disminuir su potencia siendo este incapaz de soportar la demanda eléctrica, y es ahí donde la turbina comienza su generación paulatinamente conforme disminuye la potencia del generador fotovoltaico y entre ambos generadores suministran la energía a la demanda, hasta que el sol se ha metido por completo la turbina soporta la demanda completa. Por las mañanas es el mismo proceso pero esta vez de forma inversa a partir de la hora 4373 de la simulación, la turbina comienza a disminuir su generación para dar prioridad a la generación fotovoltaica. Cuando el sistema fotovoltaico es capaz de soportar por completo la demanda, la turbina no es necesaria y deja de operar. La figura 5.12 funciona de apoyo para comprender lo antes descrito referente a la demanda eléctrica. La bomba es una carga que se suma a la demanda de las viviendas, cuando existe suficiente generación se enciende el sistema de bombeo parcialmente, dependiendo de la energía disponible es la cantidad de bombas que permanecen encendidas. Por las mañanas es cuando se tiene el mayor exceso de energía, esto se debe a que la potencia del sistema fotovoltaico no es capaz de encender la primera bomba sino hasta las 4350 horas de la simulación, en donde debido a rampa de generación fotovoltaica encienden las 4 bombas en un periodo de 2 horas y con ello disminuye el exceso de energía. Debido a la curva de potencia del sistema fotovoltaico, es difícil cubrir todos los excesos con una tecnología poco modulable como las bombas, es por ello que se presentan excesos a lo largo del día principalmente en las mañanas y las tardes, en promedio se tiene una pérdida diaria de energía de 590 kWh. El hecho de que la demanda eléctrica nocturna sea menor a la potencia mínima de salida del generador diésel provoca un exceso de energía cada vez que se enciende el sistema auxiliar. En la figura 5.13 observamos como ALENDE se carga al 100 % en días normales, las pequeñas crestas en la cumbre del estado de carga son generadas por la activación de la turbina para brindar apoyo momentáneo al sistema fotovoltaico. Estas pequeñas crestas tienen un costo energético alto por la baja eficiencia a la que opera la turbina (25 %). La eficiencia de la turbina está en función de la demanda a satisfacer, no es muy conveniente operar la turbina en casos de baja generación, el cual es este el caso en donde la turbina

está sobredimensionada para la comunidad de Puertecitos, ello obliga a la turbina a operar alrededor del 55 % la mayor parte del tiempo. La demanda nocturna también obliga al generador diésel a operar en un punto de baja eficiencia (menor al 40 % de su capacidad nominal) y se ve reflejado en un consumo de combustible de 10.6 lph.

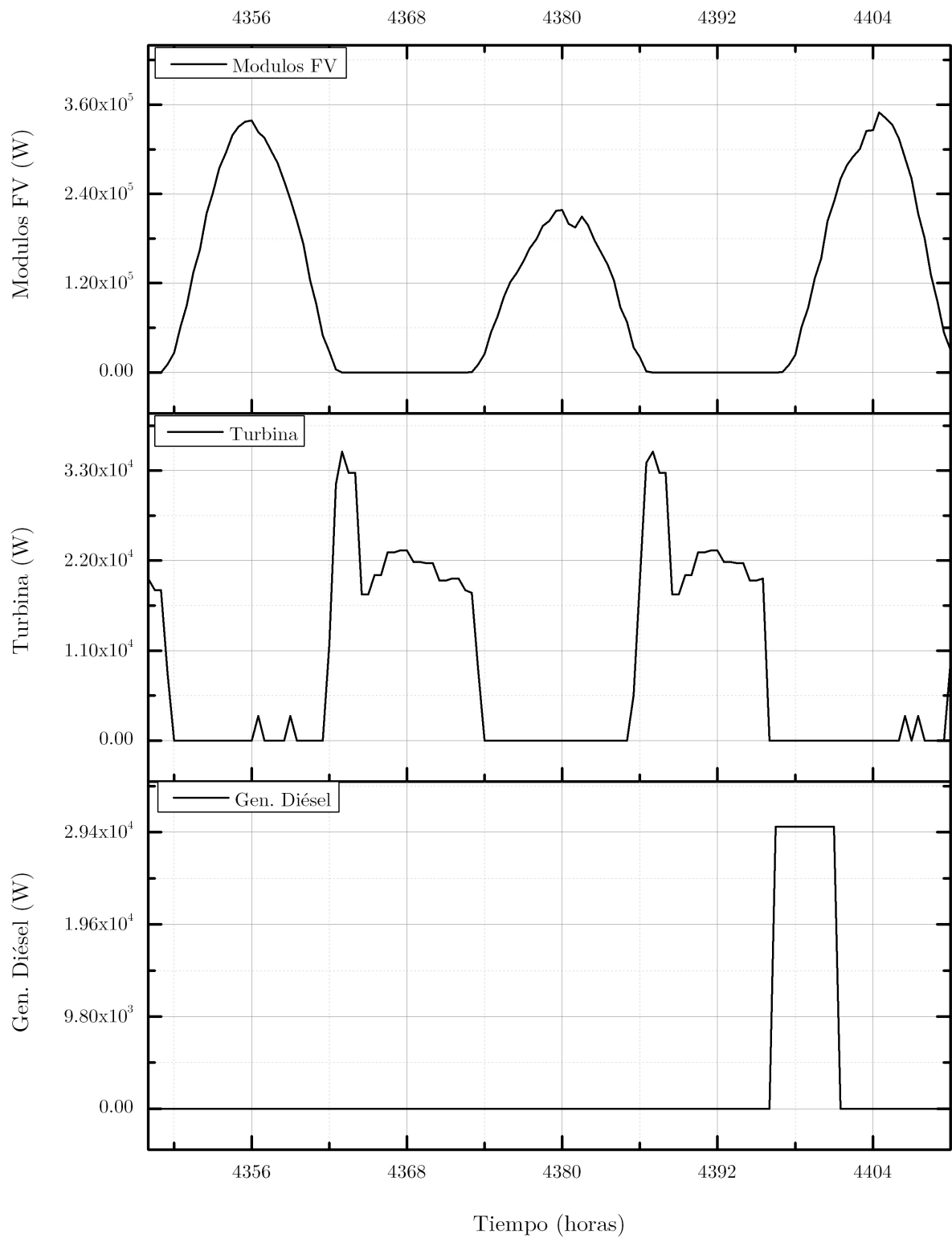


Figura 5.11: Comportamiento de microgeneradores en Verano

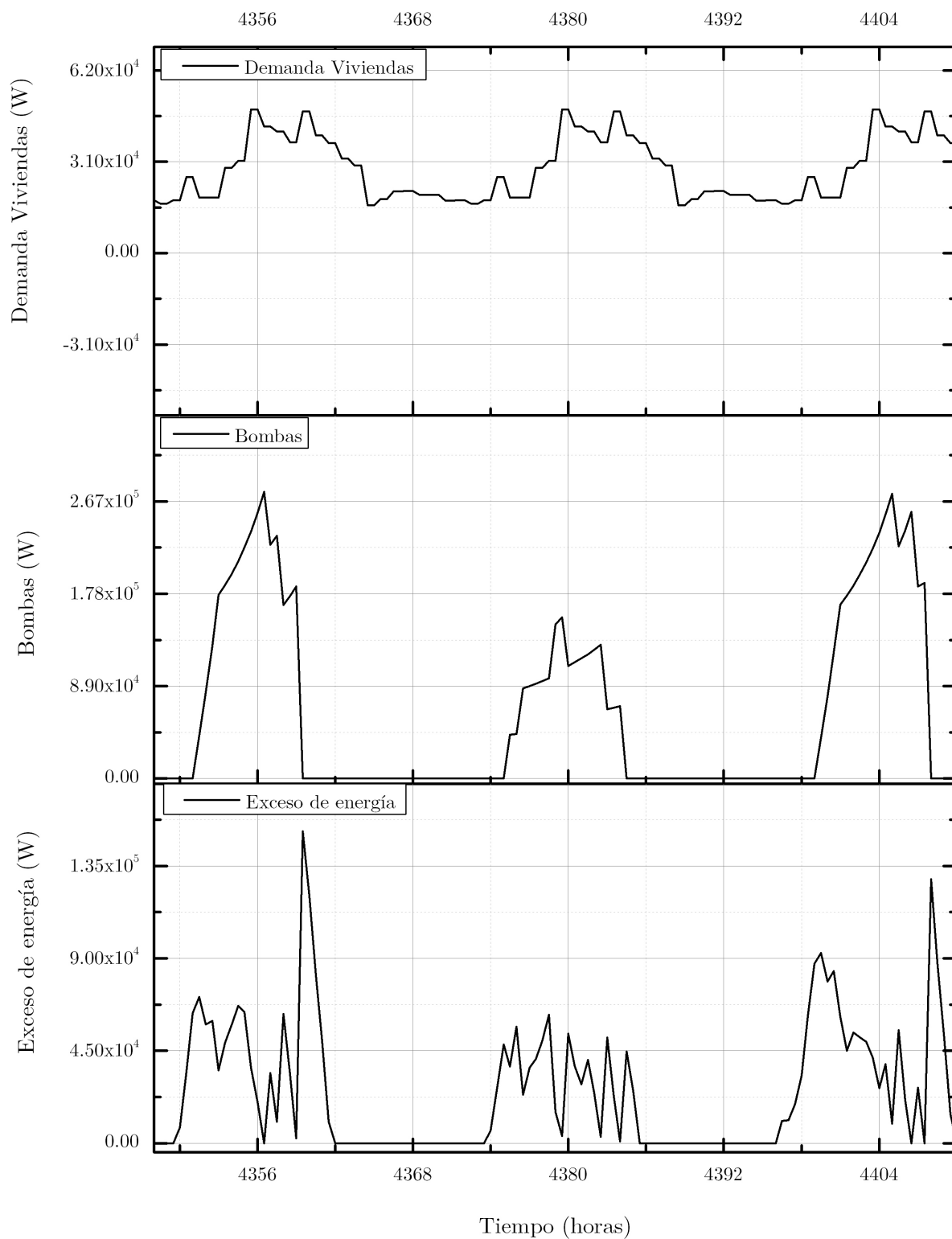


Figura 5.12: Comportamiento de cargas y exceso de energía en Verano

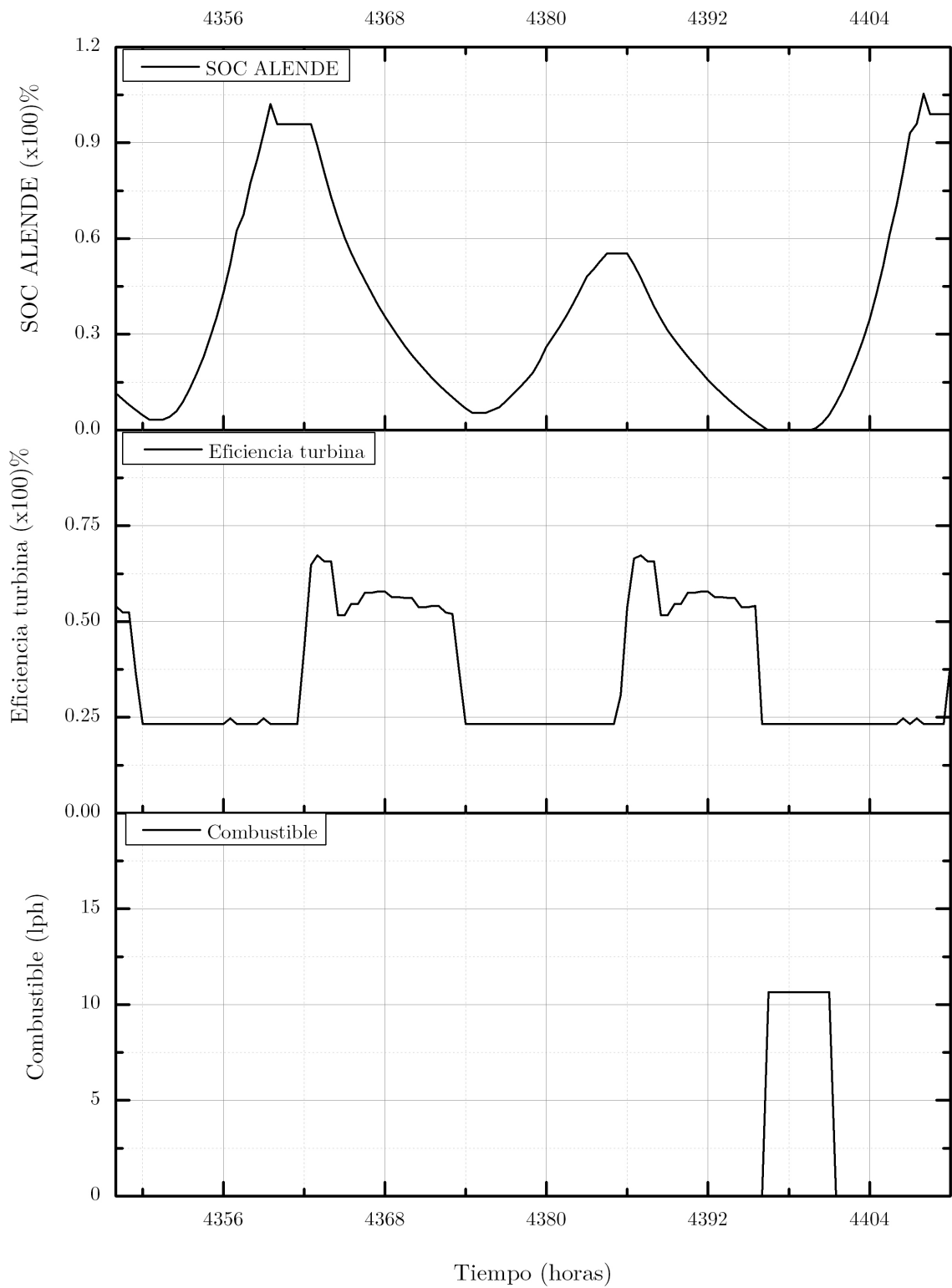


Figura 5.13: Comportamiento del estado de carga, eficiencia de turbina y consumo de combustible en Verano

5.6. Estudio de implementación de propuesta a mayor escala.

Como observamos en la sección anterior, la baja demanda en relación con la potencia nominal de la turbina, provocaba que esta última funcionara en un punto muy ineficiente, incrementando la capacidad del sistema de almacenamiento y con ello el sistema fotovoltaico. Es por ello que en esta sección se estudiará el funcionamiento del sistema ALENDE con una demanda eléctrica que se encuentre en el rango óptimo de operación de la turbina, con miras de extrapolar los resultados a una comunidad con mayor número de viviendas duplicando el número de turbinas, o a una comunidad con menor número de viviendas considerando la disponibilidad en el mercado de una turbina de menor capacidad con curvas de eficiencia y presión similares a la figura 5.6.

Para ello se elegirá el tamaño de la comunidad que su demanda diurna no supere los 150 kW, y la demanda nocturna no sea menor a 50 kW, como podemos observar en la figura 5.6 la eficiencia de la turbina permanece casi constante en ese rango de operación. Una comunidad con 50 viviendas cumple con estos requisitos, además para incrementar la eficiencia en la etapa de carga, se utilizaron 10 bombas para reducir los escalones de operación y aprovechar al máximo el recurso solar.

5.6.1. Simulación para una comunidad con un mayor número de viviendas.

En base a la metodología de dimensionamiento establecida anteriormente, se obtuvieron los parámetros para la simulación, las dimensiones de la microrred son:

- 2015 módulos fotovoltaicos con total de 604.5 kWp.
- Un generador diésel de 200 kW nominal.
- Una turbina hidráulica de 100 kW nominal.
- 10 bombas hidráulicas de 39 kW con un caudal de $12.2 \frac{m^3}{h}$ cada una.
- Un tanque de $1300 m^3$
- Un sistema de ósmosis inversa con capacidad de $3.16 \frac{m^3}{h}$ de agua potable.

En la figura 5.14 se muestra el comportamiento de ALENDE. La demanda eléctrica es la suma del consumo de las viviendas más el consumo del sistema de bombeo, podemos observar como se apega a la curva de generación fotovoltaica. Bajo este funcionamiento se tienen pérdidas por exceso de energía en la etapa de carga del orden del 5 % a lo largo del día. En la figura 5.15 se observa el comportamiento del estado de carga del sistema ALENDE, en un día normal se logra cargar el sistema al 100 %, y descargarse cerca del 4 % esta tecnología es capaz de tener descargas completas sin reducir sus ciclos de vida. La pendiente de descarga es más pronunciada ya que de forma simultanea se provee de agua al sistema de

desalinización. El generador diésel se activa cuando el estado de carga cae debajo del 2 %, y el consumo de combustible es de 26.6 lpm. El generador termina su operación cuando ALENDE alcanza el 5 % , esto con la finalidad de dejar el sistema precargado listo ante cualquier eventualidad de aumento de la demanda o sombreados parciales del generador fotovoltaico. En estas condiciones de descarga la turbina opera en tu punto de mayor eficiencia siendo este del 75 % y vemos como la eficiencia es proporcional a la potencia de salida de la turbina. Durante todo el tiempo de operación de la turbina, el sistema de desalinización está activado con un flujo de agua potable de $3.16 \frac{m^3}{h}$, lo que al día totaliza entre 30 y 44 $\frac{m^3}{dia}$ de agua potable.

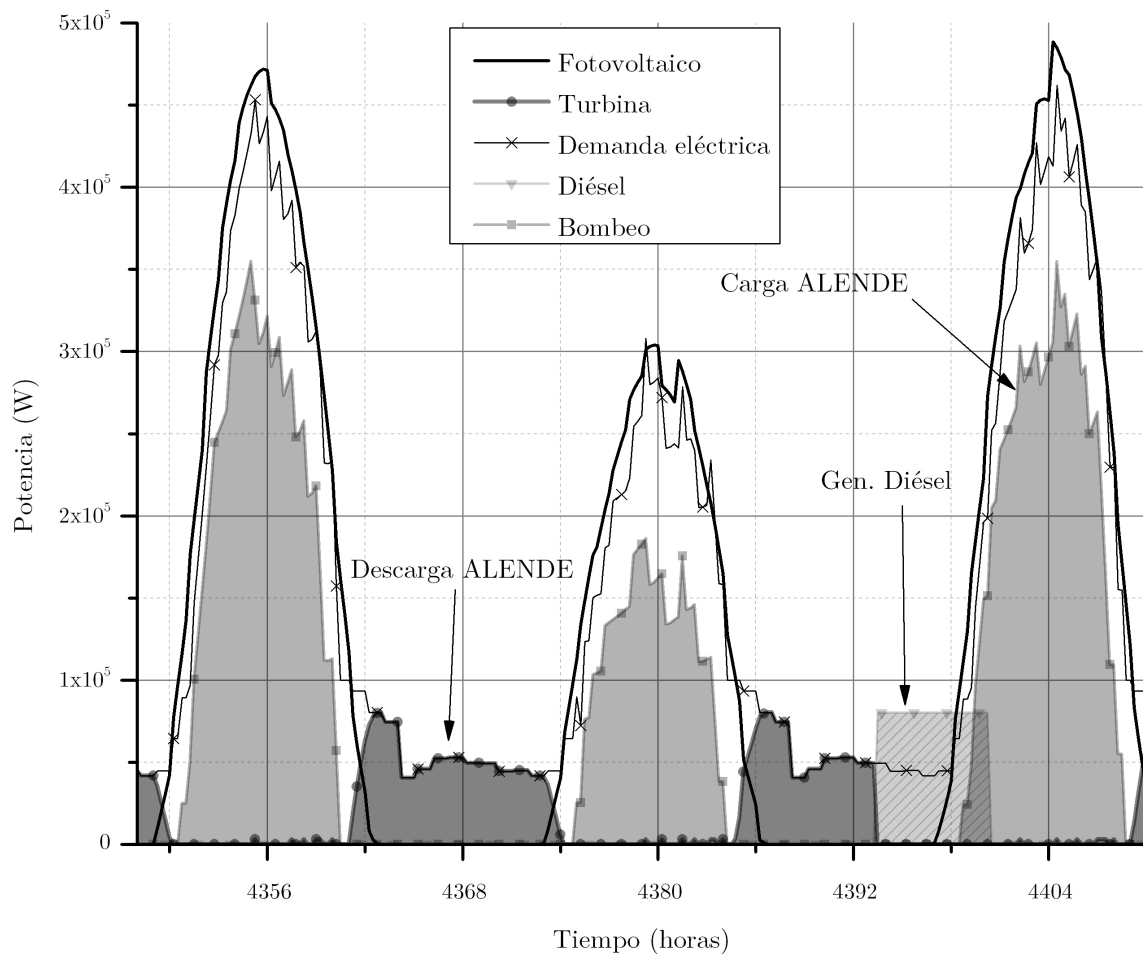


Figura 5.14: Comportamiento de ALENDE en verano

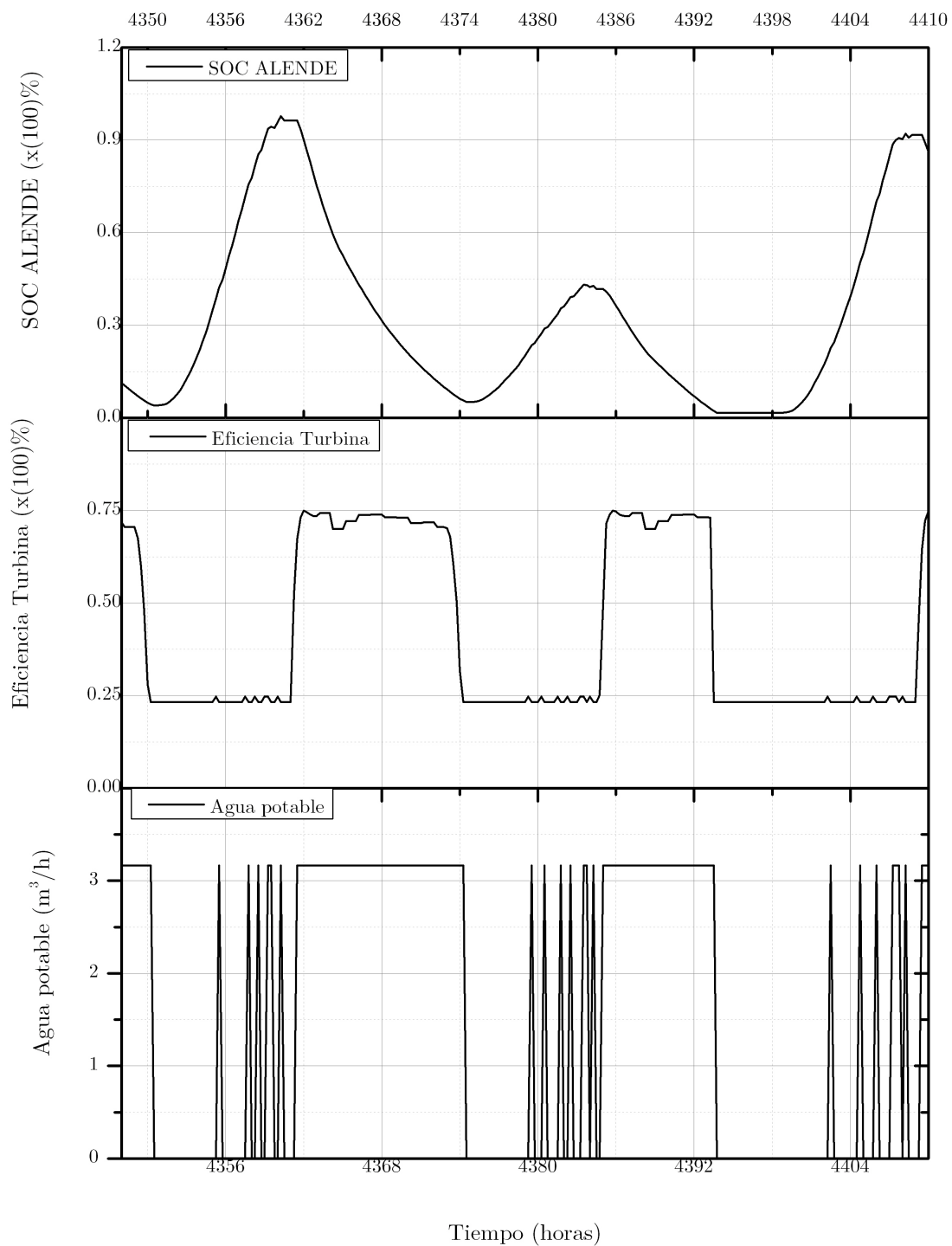


Figura 5.15: Comportamiento del estado de carga, eficiencia de la turbina y desalinización

Capítulo 6

Evaluación tecno-económica

6.1. Resultados de la ingeniería de la propuesta tecnológica a mayor escala.

A continuación se establecen los criterios y especificaciones técnicas de los componentes que será utilizados en la construcción de ALENDE.

Sistema de bombeo: Estará compuesto de 10 bombas de émbolo tipo triplex con aplicación para agua de mar. La presión máxima de trabajo debe ser de 13.8 MPa y suministrar un caudal de $12.24 \frac{m^3}{h}$.

Turbina: Bombas reversible multietapa o turbina pelton variable con aplicación para agua de mar de 100 kW nominales con rango de operación de 5.6 MPa a 10 Mpa o superior.

Sistema de desalinización: Equipo de osmosis inversa con caudal de producción de $3 \frac{m^3}{h}$ con 18 membranas de poliamida arrollamiento en espiral con $37 m^2$ de área activa, distribuidas en 9 bastidores de 8 pulgadas de diámetro.

Tanque de almacenamiento: El sistema de almacenamiento esta conformado por 40 módulos de $31.9 m^3$, cada módulo está compuesto por tuberías de acero al carbón A53 de 25.05 pulgadas de diámetro interior, con 2 pulgadas de espesor para soportar 15 MPa de presión interna. Los módulos están galvanizados en caliente para ambientes marinos con 30 años de vida útil. El acomodo de las tuberías está diseñada para colocarse dentro de un contenedor High cube de 12.19 x 2.43 x 2.89 metros de largo, ancho y alto respectivamente. La figura 6.1 muestra el plano constructivo del módulo de almacenamiento, las dimensiones están en pulgadas. Se observa que el módulo es cuadrado en su vista frontal, teniendo 3

diámetros de ancho por 3 diámetros de alto, con una profundidad de 337.5 pulgadas. Cuenta con dos orificios de 4 pulgadas en la parte superior del primer tubo donde uno es la entrada del agua proveniente del equipo de bombeo y el otro es la salida del agua hacia la turbina, el tercer orificio de 1 pulgada es la salida para el sistema de osmosis inversa. En la figura 6.2 se muestran los 40 módulos de almacenamiento que conforman el sistema de almacenamiento como referencia de las dimensiones del equipo. Cada módulo se encuentra dentro de un contenedor de embarque para facilitar el transporte.

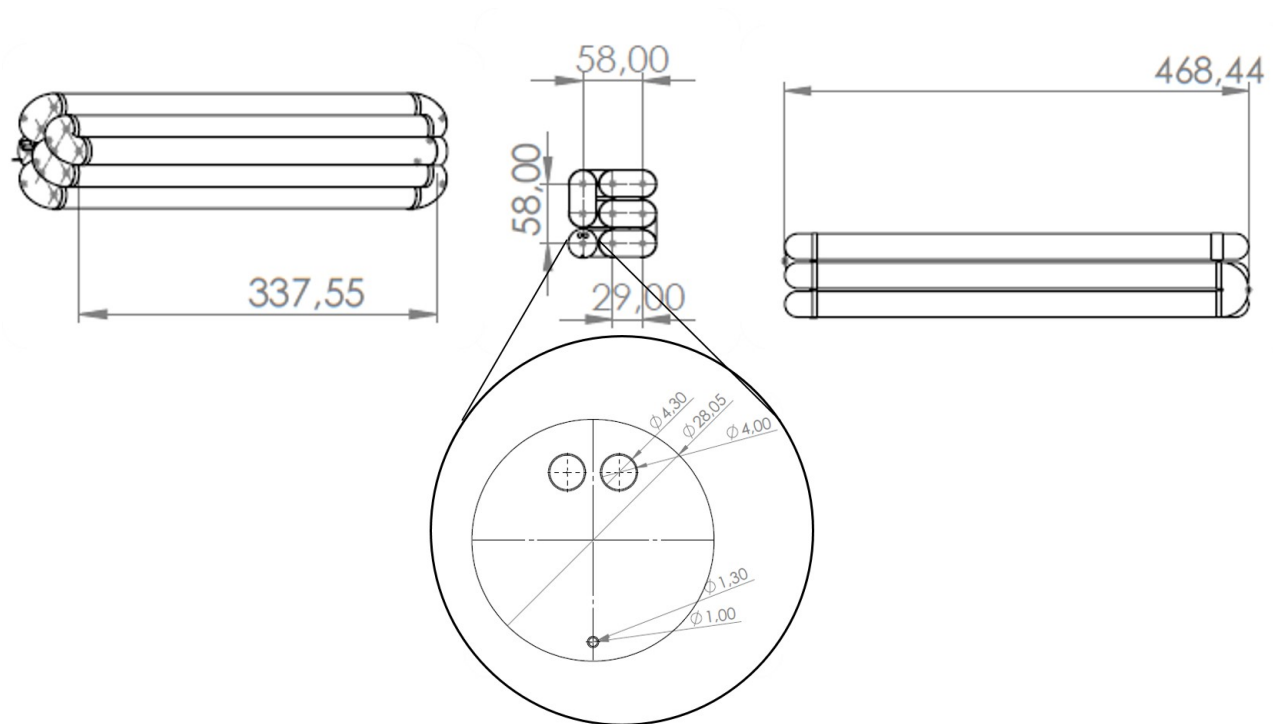


Figura 6.1: Plano constructivo de módulo de almacenamiento

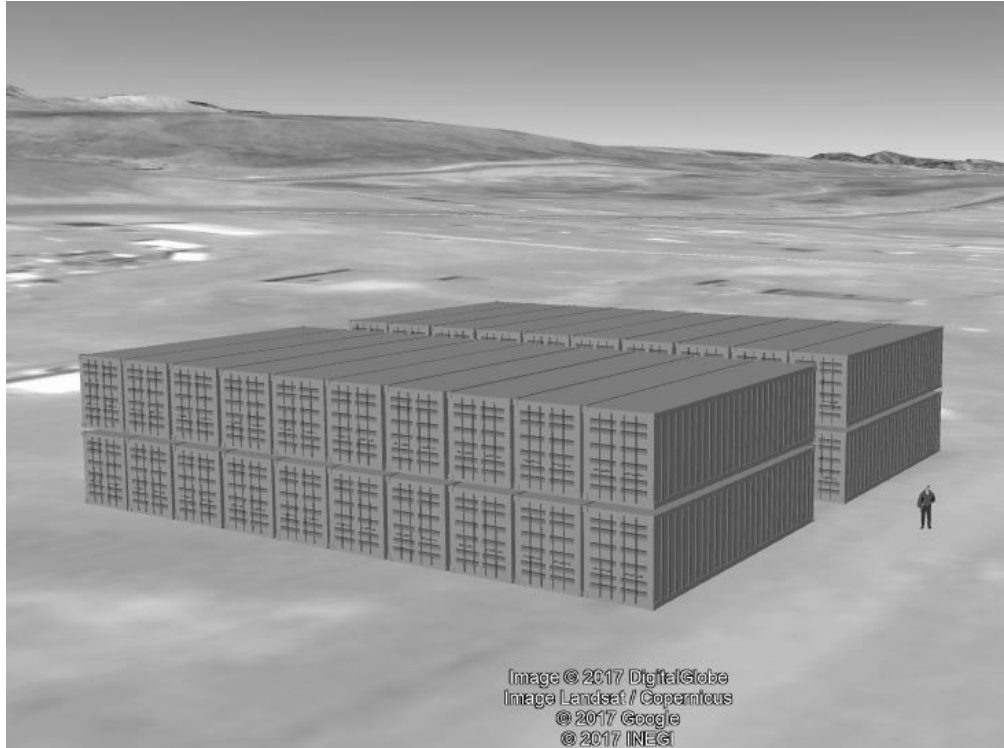


Figura 6.2: 40 Contenedores con los módulos de almacenamiento como referencia de dimensiones del sistema de almacenamiento.

6.2. Estudio de viabilidad económica

Se estudiarán dos opciones de microrredes aisladas con suministro de agua potable para el escenario de una comunidad de 50 viviendas con perfil urbano ubicadas cercas de la comunidad de Puertecitos. La primera opción consiste en una microrred con ALENDE como sistema de almacenamiento de energía y suministro de agua potable, la segunda opción trata de una microrred con un banco de baterías de plomo ácido y un sistema de osmosis inversa para el suministro de agua potable. Ambas opciones suministran $37.5 \frac{m^3}{día}$ de agua potable, cuentan con 12 horas de autonomía y un generador diésel de respaldo.

6.2.1. Estimación de costos

Opción 1- Microrred con ALENDE

Se realizó una estimación del costo de la microrred considerando los resultados del estudio de implementación de propuesta a mayor escala. La tabla 6.1 desglosa los componentes principales con sus respectivos costos en dólares. El inversor es una propuesta abierta, debido a que existen diferentes confi-

guraciones que deben explorarse a detalle. Existe la opción de utilizar un inversor para sistemas aislados funcionando sin baterías, otra opción es el acoplamiento en corriente alterna, aquí se puede utilizar un inversor para interconexión a red acoplado a un inversor para sistemas aislados, este último su función será generar la onda sinoidal para el acoplamiento. Debido a que el inversor para sistemas aislados solo debe proporcionar la señal y no la potencia, este último debe ser de menor capacidad además de tener un mínimo de baterías para su activación, el sistema fotovoltaico se conecta al inversor para interconexión. El costo del inversor a utilizar es una media entre ambas tecnologías. Se considera un costo de instalación del 20 % del costo total de los componentes.

La tabla 6.2 muestra los costos de operación y mantenimiento involucrados en la microrred. Se consideró un reemplazo del inversor cada 15 años, el costo de mantenimiento del equipo de bombeo se divide en anual, el cual consiste en cambio de aceite de la caja de engranes, cada 4 años consistiendo en el reemplazo de válvulas y sellos, y cada 10 años el reemplazo total del equipo. Las membranas semipermeables tienen un promedio de vida útil de 6 años y deberán reemplazarse, los demás componentes del sistema de osmosis inversa como bastidores, tubos de presión, etc. no requieren reemplazo. El costo de operación del generador diésel está en función del consumo de combustible, el costo se evaluó considerando un consumo anual de 2,983 litros, un costo por litro de \$16.17 pesos y el tipo de cambio de \$ 18 pesos por dólar. El tiempo de vida de los componentes es el especificado con el fabricante.

Tabla 6.1: Costo principales componentes de microrred con ALENDE.

Componente	Costo Unitario	Cantidad	Importe
Módulo fotovoltaico S72MC6-300	\$ 110	2,015	\$ 221,650
Inversor 500 kW	\$ 120,000	1	\$ 120,000
Módulo de almacenamiento	\$ 14,756	40	\$ 590,222
Bomba de alta presión Catpump 6841	\$ 76,000	10	\$ 760,000
Turbina KSB 50/14-4.1	\$ 55,985	1	\$ 55,985
Membranas semipermeables SW30XLE-400i	\$ 182,570	1	\$ 182,570
Generador diésel 200 ekVA Caterpillar C9	\$ 32,000	1	\$ 32,000
Instalación (20 %)			\$ 392,485.49
Total			\$ 2,354,912.93

Tabla 6.2: Costos de operación y mantenimiento de microrred con ALENDE.

Componente	Costo O&M	Eventualidad
Inversor 500 kW	\$ 120,000	Cada 15 años
Bomba de alta presión Catpump 6841	\$ 2,400	Anual
Bomba de alta presión Catpump 6841	\$ 36,000	Cada 4 años
Bomba de alta presión Catpump 6841	\$ 760,000	Cada 10 años
Membranas semipermeables SW30XLE-400i	\$ 6,000	Cada 6 años
Generador diésel 200 ekVA Caterpillar C9	\$ 2,680	Anual

Opción 2- Microrred con baterías y ósmosis inversa

La tabla 6.3 muestra los costos de los principales componentes de la microrred con baterías y un sistema de ósmosis inversa. A diferencia de la propuesta de la microrred con ALENDE, aquí es necesario un equipo completo de ósmosis inversa que incluye bombas centrífugas verticales con una potencia total de 33.75 kW. Se utilizó la simulación de la microrred actual con ósmosis inversa y se realizó un ajuste. El ajuste consistió en el escalamiento del perfil de demanda para una comunidad mayor y el aumento de la capacidad fotovoltaica, generador auxiliar y banco de baterías. La capacidad del banco de baterías se fijó al encontrar la autonomía deseada de 12 horas en los días del 1 al 3 de Julio para compararlo con ALENDE, en base a ello se eligió el arreglo fotovoltaico que cargara dicho banco en un día típico, con a menor cantidad de energía excedente.

El desglose de costos de operación y mantenimiento de observan en la tabla 6.4, se estima una vida útil del inversor y controlador de carga de 15 años, su principal costo de operación y mantenimiento es el reemplazo del equipo. La vida útil de las baterías se estimaron en función de la ficha técnica considerando 1800 ciclos a una profundidad de descarga diaria del 50 % . Se estima un consumo de 3,140 litros de diésel al año.

Tabla 6.3: Costo de principales componentes de microrred con baterías y ósmosis inversa.

Componente	Costo Unitario	Cantidad	Importe
<i>Módulo fotovoltaico S72MC6-300</i>	\$ 110	1,469	\$ 161,590
<i>Baterías SAGM06375</i>	\$ 488	1,056	\$ 515,328
<i>Controlador de carga Conext MPPT 80 600</i>	\$ 1,500	132	\$ 198,000
<i>Inversor Conext XW+ 6848</i>	\$ 4,500	30	\$ 135,000
<i>Ósmosis inversa Aqua-Cleer SW</i>	\$ 253,155	1	\$ 253,155
<i>Generador diésel 200 ekVA Caterpillar C9</i>	\$ 32,000	1	\$ 32,000
<i>Instalación (20 %)</i>			\$ 259,014.60
Total			\$ 1,554,087.60

Tabla 6.4: Costos de operación y mantenimiento de microrred con baterías y ósmosis inversa

Componente	O&M	Eventualidad
<i>Inversor y controlador de carga</i>	\$ 333,000	Cada 15 años
<i>Baterías SAGM06375</i>	\$ 515,328.00	Cada 5 años
<i>Ósmosis inversa Aqua-Cleer SW</i>	\$ 6,000	Cada 6 años
<i>Generador diésel 200 ekVA Caterpillar C9</i>	\$ 2,821	Anual

6.2.2. Indicadores económicos de los escenarios

Una vez que se estimaron los costos asociados a los proyectos, se calcularon los indicadores económicos con ayuda de la hoja de cálculo CREST (Cost of Renewable Energy Spreadsheet Tool) desarrollada por Sustainable Energy Advantage, LLC. El modelo CREST es una herramienta que busca determinar el costo de energía o el ingreso mínimo por unidad de producción necesaria para un proyecto de energía renovable para cumplir con la tasa de rentabilidad requerida mínima supuesta por sus inversores.

La rentabilidad del proyecto depende fuertemente de los ingresos que se obtendrán en su vida útil, para aumentar la rentabilidad del proyecto es necesario que toda la energía que se genere represente un ingreso, se deberán de crear estrategias dentro de la comunidad a fin de lograrlo. Un ejemplo es la inclusión de grandes consumidores dentro de la comunidad cuando se tiene baja demanda de energía y alta generación para reducir los excesos de energía, como pueden ser los usuarios comerciales. En las temporadas de baja demanda de energía como en invierno, se deben promover actividades productivas como el turismo, la pesca o agricultura, es importante resaltar que la producción de agua potable también representa un ingreso económico, de forma indirecta por el consumo de energía que se emplea , y de forma directa por la tarifa de agua potable y de servicios de saneamiento.

Se sabe que la capacidad de generación de energía de una planta con sistema de almacenamiento depende del tiempo y forma en que se consuma la energía, un escenario favorable es aquel en el que toda la energía que se genera se consume en el instante, sin embargo en la práctica no ocurre así, siendo necesario emplear un sistema de almacenamiento que mueva la energía a través del tiempo al momento de su consumo. En el proceso de almacenamiento ocurren ciertas pérdidas de energía que se traducen en costo energético, dicho costo debe ser compensado aumentando la capacidad de los generadores de energía, cuando más ineficiente es un proceso de almacenamiento de energía, mayor debe ser la capacidad de generación de energía. Por otro lado, si nuestro generador de energía tiene una capacidad fija, la máxima energía que puede suministrar a la demanda depende de, si la energía se consume cuando se genera, o se consume después de su generación. Para simplificar el análisis se estima que de la capacidad de energía total al año del sistema fotovoltaico, el 50 % atraviesa el sistema de almacenamiento con las pérdidas que conlleva. Con esto obtenemos que el escenario de la microrred con ALENDE tiene una capacidad de generación el primer año de 900,751 kWh, y el escenario de la microrred con baterías y ósmosis inversa una generación el primer año de 675,171 kWh esto nos da un rendimiento de 1,490 kWh/kWp y 1,531 kWh/kWp respectivamente.

Para el análisis se consideró una degradación anual en la generación del 0.5 % correspondiente a la degradación de los módulos fotovoltaicos. Los proyectos se evaluaron a 30 años de operación, con una tasa de descuento del 10 % y una inflación del 4 %. La tasa de descuento, desde el punto de vista de un inversionista indica que tan rápido recuperará su inversión, entre más alta, más atractiva para

los inversionistas, por otro lado, la tasa también representa el riesgo de la inversión, para proyectos con un alto riesgo la tasa de descuento debe ser mayor. En la literatura (Campos, 2016),(Short, Packey, y Holt, 1995) se indica que esta tasa varía en función del sector de aplicación, por ejemplo, la tasa de descuento *real* (tasa considerando la inflación) para el sector gobierno es del 3 %, mientras que para el sector industrial es del 10 %. Existe controversias sobre la utilización de una tasa social de descuento, entorno a si debe ser esta menor o igual a las tasas del sector privado, además de como calcularla de forma correcta. Generalmente en la práctica se utilizan tasas *nominales* en el orden del 10 % al 12 %, los países desarrollados tienden a aplicar tasas más bajas (en el rango del 3 % al 7 %) que los países en desarrollo (entre el 8 % y el 15 %), aunque en muchos casos estas tasas se han reducido notablemente en los últimos años, reforzándose al mismo tiempo ciertos procesos institucionales de decisión. En México hasta enero de 2014 la tasa social de descuento utilizada era constante e igual al 12 %, a partir de dicha fecha se consideró reducirla al 10 %. El valor de la inflación se consideró en base al promedio anual de los últimos 12 años según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En la tabla 6.5 se muestra el resumen del análisis económico en dólares americanos, podemos observar que ALENDE requiere de un capital de 3.90 \$/Watt instalado, el cual es mayor que la microrred con baterías y ósmosis inversa, sin embargo debido al menor costo de operación y mantenimiento a lo largo de su vida útil (2.56 ¢/kWh) permite fijar una tarifa eléctrica de 40.8 ¢/kWh, esta tarifa representa el costo nivelado de la energía (LCOE por sus siglas en inglés). Además de la tarifa eléctrica, la tarifa de agua representa otro ingreso constante a lo largo de la vida útil para la microrred. La tarifa de agua se fijó a \$1.00 US dólar/ m^3 de agua potable y es similar al costo por metrocúbico esperado de la planta desaladora en Ensenada siendo de \$18.47 pesos moneda nacional mexicana en enero de 2017.

El valor presente neto (VPN) del proyecto ALENDE resultó de \$ 1,975.09 dólares, cabe resaltar que puede reducirse la tarifa eléctrica a 40.78 ¢/kWh, aunque ya no sería muy atractivo para los inversionistas debido a la poca rentabilidad del proyecto con un valor presente neto (VPN) de \$ 492.00 dólares. Por otro lado tenemos la opción de la microrred con baterías y ósmosis inversa con una tarifa eléctrica mayor que su contraparte (53.85 ¢/kWh) provocada por los altos costos de operación y mantenimiento, esto arroja un VPN negativo poco atractivo para los inversionistas. Generalmente el criterio para elegir un proyecto de inversión es que el VPN sea positivo y la tasa interna de retorno (TIR) sea mayor o igual a la tasa de descuento, de aquí entre más alta sea la TIR mejor será la rentabilidad del proyecto, otro factor a considerar la relación beneficio-costos (RBC) es la relación del valor de todos los beneficios llevados al VPN, dividido entre el valor de todos los gastos llevados al VPN. Con estos criterios observamos obvia la elección de ALENDE por su VPN positivo, y una TIR Y RBC mayor que su contraparte.

Tabla 6.5: Indicadores económicos de los escenarios.

Indicador	Unidad	Microrred con ALENDE	Microrred con Baterías + SWRO
<i>Inversión</i>	\$/Watt	3.90	3.53
<i>O&M</i>	¢/kWh	2.56	19.13
<i>LCOE</i>	¢/kWh	40.8	53.85
<i>VPN</i>	\$	1,975.09	(2,695.39)
<i>TIR</i>	%	10.01	9.96
<i>RBC</i>	-	1.00	0.99

Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

El agua y la energía son servicios básicos necesarios para el desarrollo de asentamiento humanos. La co-dependencia de ambos servicios los sumerge en un círculo vicioso en función del aumento población que solo se puede romper mediante la desalinización de agua de mar utilizando energías renovables. No obstante estas últimas traen consigo nuevos retos por vencer.

Partiendo de los principales retos que afrontan las energías renovables se identificó al sistema de almacenamiento como un punto débil de las mismas, el cual hasta la fecha continua siendo un problema abierto debido a que durante años se han utilizado baterías de plomo ácido, las cuales tienen alrededor de 1500 ciclos de vida al 50 % de descarga, lo que conlleva a costos por reemplazo del 150 % el valor de la inversión inicial de la microrred en la vida útil del proyecto, además del impacto ambiental que generan al finalizar su vida útil. Es por ello que se eligió un sistema de almacenamiento hidráulico combinado con aire comprimido con ósmosis inversa. La propuesta presentada se caracteriza por no requerir de condiciones geológicas especiales en sitio, además de operar con recursos disponibles en la región (agua de mar y aire). El estudio teórico del sistema propuesto permitió demostrar la viabilidad técnica de almacenar energía en forma de presión con agua y aire, además de desalinizar agua de mar. Se encontró que la densidad energética de este es de $1.02 \frac{kWh}{m^3}$ en sus mejores condiciones con una eficiencia del 65 %. Existe una restricción en aplicaciones a pequeña escala (demanda promedio menor a 100 kW) debido a la falta de turbinas hidráulicas de baja capacidad que operen en el rango de 5.6 MPa a 10 MPa o superior conservando una eficiencia nominal superior a 70 %. De existir en el mercado la aplicación sería viable, no obstante no existen restricciones al replicar la aplicación a comunidades con mayor consumo. Al estudiar las dinámicas de operación se demuestra que el sistema propuesto es capaz de generar energía equivalente a la demanda controlando el caudal de la turbina y prediciendo la

demanda, inclusive puede complementar su generación con el generador foto voltaico para reducir los excesos de energía, especialmente en los periodos de amanecer y atardecer.

El acoplamiento de las membranas semipermeables a la turbina hidráulica permite reducir la salinidad de la salmuera de 56,520 ppm a 40,600 ppm a la salida de la turbina, lo cual reduce el impacto ambiental ocasionado por las plantas desalinizadoras al verter la salmuera al mar o reinyectarla al pozo.

Finalmente, al comparar la propuesta incorporada a una microrred contra una microrred con baterías que incluye un equipo de ósmosis inversa, se identificó a la propuesta como una mejor opción económica a una evaluación de 30 años. La principal razón son los elevados costos de operación y mantenimiento ocasionados por el constante reemplazo de las baterías, además del incremento energético por el sistema de ósmosis inversa que no cuenta con un recuperador de energía y utiliza bombas centrífugas horizontales con eficiencia del 50 %.

7.2. Recomendaciones

Las áreas de mejora de la propuesta tecnológica se en listan a continuación:

- **Gestor de la energía:** Es una pieza clave en lograr la viabilidad técnica, es por ello que se debe trabajar en una óptima predicción de la demanda y control de los procesos involucrados.
- **Máquinas hidráulicas:** En el presente documento se utilizaron bombas de émbolos buscando la mayor eficiencia del sistema de almacenamiento, sin embargo falta explorar las demás alternativas de bombas centrífugas con sus variantes, que reduzcan los costos de operación y mantenimiento a cambio de reducción en eficiencia. Además este tipo de bombas pueden adaptarse fácilmente a un perfil de demanda variando sus rpm mediante la implementación del algoritmo BEP (Best Efficiency Point por sus siglas en inglés). Esto permite la reducción del equipo de bombeo y con ello la inversión inicial, sin mencionar que cada unidad de bombeo tiene un costo menor que las bombas de émbolo.
- **Intercambiador de calor:** Dentro de las consideraciones del modelado matemático se encuentra el proceso isotérmico en la compresión del aire, en el cual todo el trabajo que se realiza para comprimir el gas debe ser retirado para mantener la temperatura constante, para ello es necesario el desarrollo de intercambiadores de calor agua-aire o mediante el intercambio de calor directo con aspersión de agua dentro del tanque de aire.

Referencias

- Ahumada, C. (2012, Septiembre). *Hidroeléctricas*. Página web. (Accesado el 27 de Agosto del 2017)
- Al-Karaghoul, A. A., y Kazmerski, L. L. (2011). Renewable Energy Opportunities in Water Desalination. Descargado 2017-02-02, de <http://www.intechopen.com/books/desalination-trends-and-technologies/renewable-energy-opportunities-in-water-desalination> doi: 10.5772/14779
- Benavides, C. M. (2016). *¿qué es la microrred?* Curso.
- Bollinger, B. R. (2010). *System and method for rapid isothermal gas expansion and compression for energy storage* (n.º US7802426B2). Descargado 2016-07-13, de <http://www.google.com/patents/US7802426> (Clasificación de EE.UU. 60/508, 60/682, 60/398, 91/4.00R, 91/4.00A; Clasificación internacional F02G1/04, F01K25/02, B66F7/18, F15B11/072, F02C1/04, F16D31/02; Clasificación cooperativa B60K6/12, B60Y2400/14, F01K27/00, F15B11/0725, Y02T10/6208, F15B2201/42, Y02E60/15, H02J15/006; Clasificación europea H02J15/00D)
- Bordons, C., García-Torres, F., y Valverde, L. (2015). Gestión Óptima de la energía en microrredes con generación renovable. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*.
- CAISO. (2017, aug). *Today's Renewables*. Descargado 2017-08-02, de <http://www.caiso.com/Pages/default.aspx>
- Campos, J. (2016). *Tasa de descuento social y evaluación de proyectos: algunas reflexiones prácticas para américa latina y el caribe* (Inf. Téc.). Banco Interamericano de Desarrollo.
- Castro, J., y Díaz, M. L. (2004). La contaminación por pilas y baterías en México. *Gaceta Ecológica*, 72, 53–74. Descargado 2015-12-29, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53907205>
- Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables. (2009). En (cap. Aspectos básicos generales sobre los recursos energéticos). PEARSON EDUCACIÓN, S.A.,.
- Charcosset, C., Falconet, C., y Combe, M. (2009, diciembre). Hydrostatic pressure plants for desalination via reverse osmosis. *Renewable Energy*, 34(12), 2878–2882. Descargado 2017-02-02, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109000986> doi: 10.1016/j.renene.2009.02.026
- Heidenreich, D. C. (2007, octubre). *Compressed air pumped hydro energy storage and distribution system* (n.º US 7,281,371 B1). United States. Descargado 2015-12-22, de <http://www.google.com/patents/US7281371> (Clasificación de EE.UU. 60/398; Clasificación internacional F16D31/02; Clasificación cooperativa F03B13/00; Clasificación europea F03B13/06)
- Ibrahim, H., Ilinca, A., y Perron, J. (2008, junio). Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 1221–1250. Descargado 2016-04-19, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107000238> doi:

10.1016/j.rser.2007.01.023

IEA-ETSAP & IRENA. (2012). *Water Desalination Using Renewable Energy Technology Brief* (Inf. Téc. n.º 112). Descargado 2015-01-06, de <https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%20I12%20Water-Desalination.pdf>

Juntunen, J. K., y Hyysalo, S. (2015). Renewable micro-generation of heat and electricity—review on common and missing socio-technical configurations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 857 - 870. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211500310X> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.040>

Kaldellis, J. K., Zafirakis, D., y Kavadias, K. (2009, febrero). Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 378–392. Descargado 2015-12-29, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107001475> doi: 10.1016/j.rser.2007.11.002

Khalilpour, K. R., y Vassallo, A. (2016). Grid revolution with distributed generation and storage. En *Community energy networks with storage: Modeling frameworks for distributed generation* (pp. 19–40). Singapore: Springer Singapore. Descargado de https://doi.org/10.1007/978-981-287-652-2_2 doi: 10.1007/978-981-287-652-2_2

Kim, Y.-M., Lee, J.-H., Kim, S.-J., y Favrat, D. (2012, agosto). Potential and Evolution of Compressed Air Energy Storage: Energy and Exergy Analyses. *Entropy*, 14(8), 1501–1521. Descargado 2015-12-18, de <http://www.mdpi.com/1099-4300/14/8/1501> doi: 10.3390/e14081501

Kim, Y. M., Shin, D. G., y Favrat, D. (2011, octubre). Operating characteristics of constant-pressure compressed air energy storage (CAES) system combined with pumped hydro storage based on energy and exergy analysis. *Energy*, 36(10), 6220–6233. Descargado 2015-12-22, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544211004889> doi: 10.1016/j.energy.2011.07.040

Klein, A., Beckman, A., Mitchell, W., Duffie, A., Duffie, N., y Freeman, T. (2011). Trnsys 17—a transient system simulation program. madison. *Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin*.

Lebas, E., FR, Rojey, A., y FR. (2015, julio). *United States Patent: 9080574 - Method and apparatus for storing mechanical energy by quasi-isothermal expansion and compression of a gas* (n.º 9080574). Descargado 2016-03-15, de <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect2=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahtml/PTO/search-bool.html&r=1&f=G&l=50&d=PALL&RefSrch=yes&Query=PN/9080574>

Mendoza, M. (2011). *Evaluación de los recursos geotérmicos de baja entalía de la península de baja california, méxico* (Inf. Téc.). Universidad Politécnica de Baja California.

ORTEGO, E., DAZIN, A., CAIGNAERT, G., COLAS, F., y COUTIER-DELGOSHA, O. (2013, febrero). Modeling of hydropneumatic energy storage using pump turbines. *Pumped storage Powerplants*.

10.3390/en8010154

Yin, J. I., Wang, D. z., Kim, Y.-T., y Lee, Y.-H. (2014, mayo). A hybrid energy storage system using pump compressed air and micro-hydro turbine. *Renewable Energy*, 65, 117–122. Descargado 2016-03-03, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113003947> (bib-tex: yin_2014) doi: 10.1016/j.renene.2013.07.039

Apéndice **A**

Modelo matemático en EES

```

$UnitSystem SI K kPa
$Import 'CLIPBOARD' rpm_T,m_acum,val_4,val_6,Cntrl_bombeo,P_mecaT

{2500,10000,1,1,1,0
Input-1> rpm_T
Input-2> m_acum
Input-3> val_4
Input-4> val_6
Input-5> Cntrl_bombeo
Input-6> P_mecaT
}

"*****"
"Tanque de almacenamiento"
  "Parametros de diseño"
  V_t=1300 [m^3]                                "Volumen de tanque de almacenamiento"
  P_t= 5600 [kPa]                                "Presion inicial en el tanque de almacenamiento"
  T_t= 294 [K]                                    "Tempertura inicial del aire dentro del tanque"
  R_c= 0.2870 [kJ/kg*K]                          "Constante del Gas"
  r_aa=V_g/V_a
  Z_i=0.9884                                     {CompressibilityFactor(Air_ha,T=T_t,P=P_t)}      "Factor de
  compresibilidad Z, temp en °C, Presión en kPa"

  "Variables de entrada"
  "m_acum=5000"                                  "Masa acumulada de agua en el tanque de almacenamiento"

  "Simulación"

  m_a=(V_t*DELTA p_t)/(R_c*T_t*Z_i)              "Masa de aire dentro del tanque"
  V_a=(m_acum+1e-10)/RHO[1]
  V_g=V_t-V_a
  v_bar_g=V_g/m_a
  {W_t=Q_b                                        "Balance de energia"
  W_b=Q_a}
  Z=1.00138949E+00-2.82124650E+00*v_bar_g+1.74988967E+02*v_bar_g^2-3.27159941E+03*v_bar_g^3  {Z=
  CompressibilityFactor(Air_ha,T=T_t,v=v_bar_g), correlación en función de volumen específico}
  P[3]=(m_a*R_c*T_t*Z)/V_g                      "Presión final dentro del tanque"
  m_dot[3]=m_dot[6]+m_dot[4]
  Q_dot[3]=(m_dot[3]/RHO[1])*3600

  "Variables de salida"
  {P[3],m_dot[3]}

"*****"
"Bomba hidraulica Catpump 1051"
"34 lpm // 2.04 m^3/h, 4.9 HP - 12.4 HP // 3.6 kW - 9.3 kW"
  "Parametros de diseño"
  S[1]=36.3
  T[1]=34
  P[2]=P[3]
  rpm_B=836                                     "Revoluciones por minuto de la bomba"
  bore=24/1000                                 "diametro cilindro en m"
  stroke=30/1000                              "carrera de piston en m"
  V_cil=(pi#/4)*bore^2*stroke                 "Volumen del cilindro en m^3"
  Eff_vol=0.999                                "Eficiencia volumetrica"
  Eff_mec=0.845                                "Eficiencia mecanica"
  F_pro=6                                      "Factor de proporción de caudal"

  "Variables de entrada"
  "Cntrl_bombeo=1"
  DELTA p_B=P[3]*Convert(kPa,Mpa)             "Presión a salida de la bomba en MPa."

```

```

"Simulación"

qv_B=((((V_cil*rpm_B)/60)*Eff_vol)*3)*F_pro          "Caudal bomba triplex en m^3/s"
RHO[1]=SW_Density(T[1], S[1], 0.101)
DELTAp_B=(9.81*H_B)/RHO[1]
P_mecaB=((qv_B*RHO[1]*9.81*H_B)/Eff_mec)/1000
m_dot_bomba=qv_B*RHO[1]

"Sistema de bombeo"
P_mecaBTotal=P_mecaB*Cntrl_bombeo
m_dot[2]=m_dot_bomba*Cntrl_bombeo
Q_dot[2]=(m_dot[2]/RHO[1])*3600

"Variables de salida"
{n_B,P_mecaBTotal,qv_B,m_dot[2]}

"*****"

"Turbina"
"Parametros de diseño"
r_T=(0.173)          "Diámetro del rodete de turbina en metros (0.170)"
{rpm_T=2500}
omega_T=(2*pi*rpm_T)/60          "Velocidad angular"
f_prop2=1

"Variables de entrada"
{P_mecaT=50}
DELTAp_T=P[11]*Convert(kPa,Mpa)          "Presión a la entrada de turbina en MPa"
"RHO[1]"          "Densidad del agua"

"Simulación"
Ch_T=1.68304052E+00-1.78985142E+02*Cq_T+2.50048566E+04*Cq_T^2
Cp_T=-5.01536779E-06-1.37613114E-04*Cq_T+2.37734417E-01*Cq_T^2
n_T=-1.11866290E+00+3.36248514E+02*Cq_T-1.51296504E+04*Cq_T^2

qv_T=Q_T/3600
Cq_T*f_prop2=qv_T/(omega_T*r_T^3)
Ch_T=(9.81*H_T)/(r_T^2*omega_T^2)
Cp_T*f_prop2=P_mecaT/(RHO[1]*r_T^5*omega_T^3)
DELTAp_T=(9.81*H_T)/RHO[1]
m_dot_T=qv_T*RHO[1]
DELTAp_loss_Val_11=P[3]-P[11]

"Variables de salida"
{n_T,P_mecaT,qv_T}

"*****"

"Osmosis inversa"
"Parametros de diseño"
RS=0.9965          "Rechazo de sales"
Rec=0.36          "Factor de recuperacion"
m_dot[6]=(2.43*val_6)+0.1e-10          "flujo masico nominal (1 m3/h =0.28 kg/s)"
H_o=521          "Presión de diseño RO en metros"

"Variables de entrada"
S[6]=S[1]          "Salinidad del agua"

"Simulación"
m_dot[6]=m_dot[7]+m_dot[8]          "Balance de masa"
m_dot[6]*S[6]=m_dot[7]*S[7]+m_dot[8]*S[8]          "Balance de sales"
S[7]=(S[6]/(1-Rec))*RS          "Concentracion de sales"
Rec=m_dot[8]/m_dot[6]
Q_dot[6]=(m_dot[6]/RHO[1])*3600

```

```

RHO[6] = SW_Density(T[9], S[6], 5200*Convert(kPa, Mpa))
Q_dot[8] = (m_dot[8]/RHO[8])*3600
P_RO = (((Q_dot[6]/3600)*RHO[1]*9.81*H_o)/Eff_mec)/1000

RHO[8] = SW_Density(T[9], S[8], 0.101)

"Variables de salida"
{m_dot[7], Q_dot[8], S[7], S[8], P_RO}

"*****"
"Válvula mezcladora"
"Parametros de diseño"
T[3] = 34
T[3] = T[9]
P[3] = P[4]
P[3] = P[9]
P[10] = 0.101
m4_nominal = m_dot_T - m_dot[7]                                "flujo nominal en corriente 4 [kg/s]"

"Variables de entrada"
"val_4 = 1"                                                    "Apertura de valvula 4, varia de 0 a 1"

"Simulación"
m_dot[4] = m4_nominal*val_4
m_dot[7] + m_dot[4] = m_dot[9]
m_dot[7]*S[7] + m_dot[4]*S[1] = m_dot[9]*S[9]
RHO[7] = SW_Density(T[9], S[7], 5200*Convert(kPa, Mpa))
RHO[9] = SW_Density(T[9], S[9], 5200*Convert(kPa, Mpa))
Q_dot[9] = (m_dot[9]/RHO[9])*3600
Q_dot[4] = (m_dot[4]/RHO[1])*3600
Q_dot[7] = (m_dot[7]/RHO[7])*3600
{cp[9] = SW_SpcHeat(T[9], S[9], P[9]*Convert(kPa, Mpa))
cp[10] = SW_SpcHeat(T[9], S[1], P[10])}

"Variables de salida"
{m[9], RHO[9]}

"*****"
"Eyector (no se utiliza)"
"Parametros de diseño"
T[11] = T[9]
m_dot[10] = 0*m_dot[9]
{P[11] = P[9]}                                                "caida de presion en eyector [KPa]"

"Variables de entrada"

"Simulación"
m_dot[11] = m_dot[9] + m_dot[10]
m_dot[11]*S[11] = m_dot[9]*S[9] + m_dot[10]*S[1]
RHO[11] = SW_Density(T[11], S[11], P[11]*Convert(kPa, Mpa))
{cp[11] = SW_SpcHeat(T[11], S[11], P[11]*Convert(kPa, Mpa))}
Q_dot[11] = (m_dot[11]/RHO[11])*3600
Q_dot[10] = (m_dot[10]/RHO[1])*3600

"Variables de salida"

"*****"

$Export 'CLIPBOARD' m_dot[2], m_acum, P[3], P_mecaBTotal, m_dot[3], P_mecaT, m_dot_T, m_dot[4], Q_dot[8], P_mecaB,
DELTAp_loss_Val_11, n_T, P_RO

{
Ouput-1 > m_dot[2]

```

```
Output-2> m_acum
Output-3> P[3]
Output-4> P_mecaBTotal
Output-5> m_dot[3]
Output-6> P_mecaT
Output-7> m_dot_T
Output-8> m_dot[4]
Output-9> Q_dot[8]
Output-10> P_mecaB
Output-11> DELTAp_loss_Val_11
Output-12> n_T
Output-13> P_RO
}
```


Apéndice **B**

Modelo matemático en TRNSYS


```

Micro red con Sistema de Almacenamiento_Desalación V
TrnsysStudio project: C:\Users\Francisco\Google Drive\Posgrado\Modelo
matematico\Micro red\Resultados\Puertecitos\Turbina sin baterías\Micro red con
Sistema de Almacenamiento_Desalación V.5 (Turbina_baterías).tpf
Report written on Tuesday, November 21, 2017 at 11:44
*****
*** Control cards
*****
TOLERANCES   Integration 0.001   Convergence 0.001
LIMITS
  Max iterations: 5000
  Max warnings: 5000
  Trace limit: 50
TRNSYS numerical integration solver method: DFQ 1
TRNSYS output file width, number of characters:
WIDTH 80
NOLIST statement: LIST
MAP statement: none
Solver statement: SOLVER 0
START=5544
STOP=5616
STEP=0.5
Write TRNEDIT commands : OFF

* User defined CONSTANTS

*****
*** Simulation order
*****

1. Model: CONTROL CARD
2. Model: Type9c
3. Model: Type15-2
4. Model: Type194
5. Model: Type57
6. Model: Type90
7. Model: BUS AC
8. Model: Type65b_Venergia
9. Model: BUS-DC
10. Model: Type57-3
11. Model: Type57-5
12. Model: Type57-2
13. Model: Type47c
14. Model: Type48c
15. Model: Generador_Type120a
16. Model: TOTAL
17. Model: INT_MENSUAL
18. Model: MENSUAL

```

Micro red con Sistema de Almacenamiento_Desalación V

19. Model: INT_TOTAL
 20. Model: Controlador FV
 21. Model: Controlador Eo
 22. Model: Gestor de energía
 23. Model: turbomaquinas_Deslacion_Type66a
 24. Model: Tanque_almacenamiento
 25. Model: Type93
 26. Model: Interruptor de tranferencia
 27. Model: AC/DC
 28. Model: Turbina
 29. Model: Control_gen_Type2d
 30. Model: Gestor R0
 31. Model: Type65b-3_Vcontrol
 32. Model: Type21
 33. Model: Type65a_Votros
 34. Model: Equa
 35. Model: Type93-2
 36. Model: exceso

*** Macro structure

Type194
 Type15-2
 Type57
 Type57-5
 Type47c
 Type90
 Type9c
 BUS AC
 BUS-DC
 Type57-3
 Type57-2
 Type65b_Venergia
 Type48c
 Generador_Type120a
 TOTAL
 INT_MENSUAL
 MENSUAL
 INT_TOTAL
 Controlador FV
 Controlador Eo
 turbomaquinas_Deslacion_Type66a
 Tanque_almacenamiento
 Gestor de energía
 Type93

```

Micro red con Sistema de Almacenamiento_Desalación V
Interruptor de tranferencia
AC/DC
Turbina
Control_gen_Type2d
Gestor RO
Type65b-3_Vcontrol
Type21
Type65a_Votros
Equa
Type93-2
exceso

```

```

*****

```

```

*** Unconnected inputs

```

```

*****

```

```

CONTROL CARD (Unit 1, Type 0)
-----

```

```

Type9c (Unit 13, Type 9)
-----

```

```

Type15-2 (Unit 3, Type 15)
-----

```

```

Type194 (Unit 2, Type 194)
Load voltage - constant value is 474.5 [V]
-----

```

```

Type57 (Unit 4, Type 57)
-----

```

```

Type90 (Unit 10, Type 90)
Control signal - constant value is 1 [-]
Site shear exponent - constant value is 0.14 [-]
-----

```

```

Type65b_Venergia (Unit 20, Type 65)
-----

```

```

Type57-3 (Unit 18, Type 57)
-----

```

```

Type57-5 (Unit 6, Type 57)
-----

```

```

Type57-2 (Unit 19, Type 57)
-----

```

Micro red con Sistema de Almacenamiento_Desalación V

Type47c (Unit 7, Type 47)

Type48c (Unit 15, Type 48)

Start time for grid battery charging - constant value is 0 [hr]

Stop time for grid battery charging - constant value is 1 [hr]

Generador_Type120a (Unit 21, Type 120)

NUNITS - constant value is 1 [-]

TOTAL (Unit 24, Type 24)

Input to be integrated-3 - constant value is 0 [any]

Input to be integrated-4 - constant value is 0 [any]

INT_MENSUAL (Unit 26, Type 25)

MENSUAL (Unit 27, Type 24)

Input to be integrated-3 - constant value is 0 [any]

Input to be integrated-4 - constant value is 0 [any]

INT_TOTAL (Unit 28, Type 25)

Input to be printed-8 - constant value is PV [any]

turbomaquinas_Deslacion_Type66a (Unit 30, Type 66)

Type93 (Unit 34, Type 93)

Control_gen_Type2d (Unit 39, Type 2)

Upper input value - constant value is .05 [any]

Upper dead band - constant value is 0.025 [any]

Lower dead band - constant value is 0 [any]

Type65b-3_Vcontrol (Unit 36, Type 65)

Type21 (Unit 41, Type 21)

```

Micro red con Sistema de Almacenamiento_Desalación V
Type65a_Votros (Unit 35, Type 65)
-----

Type93-2 (Unit 43, Type 93)
-----

*****
*** All connections
*****
CONTROL CARD (Unit 1, Type 0)
-----

Type9c (Unit 13, Type 9)
                                Output 6 -> Ccasa (BUS AC)
-----

Type15-2 (Unit 3, Type 15)
    Dry bulb temperature -> Ambient temperature (Type90)
    Dry bulb temperature -> Ambient temperature (Type194)
    Wind velocity -> Wind velocity (Type90)
    Wind velocity -> Wind speed (Type194)
    Atmospheric pressure -> Input (Type57)
    Solar zenith angle -> Solar zenith angle (Type194)
    Total tilted surface radiation for surface -> Total incident radiation on
    tilted surface (Type194)
    Beam radiation for surface -> Beam radiation on tilted
    surface (Type194)
    Sky diffuse radiation for surface -> Sky diffuse radiation on
    tilted surface (Type194)
    Ground reflected diffuse radiation for surface -> Ground diffuse radiation on
    tilted surface (Type194)
    Angle of incidence for surface -> Incidence angle on tilted
    surface (Type194)
    Slope of surface -> Array slope (Type194)
-----

Type194 (Unit 2, Type 194)
    Array power -> Gross_PV_Power (Controlador
    FV)
    Power at maximum power point -> Input to be integrated-1
    (MENSUAL)
    Power at maximum power point -> Input to be integrated-1
    (TOTAL)
    Power at maximum power point -> Gross_PV_MPPT (Controlador FV)
-----

```

```

Micro red con Sistema de Almacenamiento_Desalación V
Type57 (Unit 4, Type 57)
Output -> Barometric pressure (Type90)
-----

Type90 (Unit 10, Type 90)
(MENSUAL)          Power Output -> Input to be integrated-2
(TOTAL)           Power Output -> Input to be integrated-2
Eo)              Power Output -> Gross_Eo_Power (Controlador
-----

Type65b_Venergia (Unit 20, Type 65)
-----

Type57-3 (Unit 18, Type 57)
Output -> Load power (Type48c)
-----

Type57-5 (Unit 6, Type 57)
Output -> Input power (Type48c)
-----

Type57-2 (Unit 19, Type 57)
(Type65b_Venergia) Output-1 -> Left axis variable-9
                   Output-1 -> P_batt_W (Gestor de energia)
                   Output-2 -> Left axis variable-4
(Type65b_Venergia) Output-2 -> Input to be integrated-7
(MENSUAL)          Output-2 -> Input to be integrated-7
(TOTAL)           Output-3 -> Input to be integrated-5
(MENSUAL)          Output-3 -> Input to be integrated-5
(TOTAL)           Output-3 -> Left axis variable-10
(Type65b_Venergia) Output-3 -> Dumped_energy_W (Gestor de
energia)          Output-4 -> Right axis variable-6
(Type65a_Votros)  Output-4 -> P_grid_W (Gestor de energia)
-----

Type47c (Unit 7, Type 47)

```

```

Micro red con Sistema de Almacenamiento_Desalación V
Fractional state of charge -> Battery fractional state of
charge (Type48c)
Fractional state of charge -> Bat_SOC (Gestor de energía)
Fractional state of charge -> Left axis variable-4
(Type65b-3_Vcontrol)
Total current -> I_bateria (Equa)
Total current -> Batt_Current_Sensor (Gestor de
energía)
Total voltage -> Battery voltage (BV) (Type48c)
Total voltage -> Battery_voltage_sensor (Gestor
de energía)
Total voltage -> V_bateria (Equa)
Max. Power for charge -> Max battery input (Type48c)
Max. Power for discharge -> Min. battery output (Type48c)
Discharge cutoff voltage (DCV) -> lower limit on battery voltage
(Type48c)
Power corresponding to DCV -> Power corresponding to BV
(Type48c)
Charge cutoff voltage (CCV) -> High limit on BV (Type48c)
Power corresponding to CCV -> Power corresponding to high
limit on BV (Type48c)
-----
Type48c (Unit 15, Type 48)
Power in from generation -> P_gen (exceso)
Power to or from battery -> Power to or from battery
(Type47c)
Power to or from battery -> Input-1 (Type57-2)
Power to load -> Input-2 (Type57-2)
Power to load -> P_dem (exceso)
Power from grid -> Input-4 (Type57-2)
-----
Generador_Type120a (Unit 21, Type 120)
PTOTAL -> Left axis variable-5
(Type65b_Venergia)
PTOTAL -> Input to be integrated-6
(MENSUAL)
PTOTAL -> Input to be integrated-6
(TOTAL)
PTOTAL -> Gen_in (Interruptor de
tranferencia)
PTOTAL -> Gen_W (Gestor de energía)
V_LIQ -> Input to be integrated-8
(MENSUAL)
V_LIQ -> Right axis variable-3
(Type65a_Votros)
-----

```

Micro red con Sistema de Almacenamiento_Desalación V

```

TOTAL (Unit 24, Type 24)
  (INT_TOTAL)      Result of integration-1 -> Input to be printed-1
  (INT_TOTAL)      Result of integration-2 -> Input to be printed-2
  (INT_TOTAL)      Result of integration-3 -> Input to be printed-3
  (INT_TOTAL)      Result of integration-4 -> Input to be printed-4
  (INT_TOTAL)      Result of integration-5 -> Input to be printed-5
  (INT_TOTAL)      Result of integration-6 -> Input to be printed-6
  (INT_TOTAL)      Result of integration-7 -> Input to be printed-7
  -----
INT_MENSUAL (Unit 26, Type 25)
  -----
MENSUAL (Unit 27, Type 24)
  (INT_MENSUAL)    Result of integration-1 -> Input to be printed-1
  (INT_MENSUAL)    Result of integration-2 -> Input to be printed-2
  (INT_MENSUAL)    Result of integration-3 -> Input to be printed-3
  (INT_MENSUAL)    Result of integration-4 -> Input to be printed-4
  (INT_MENSUAL)    Result of integration-5 -> Input to be printed-5
  (INT_MENSUAL)    Result of integration-6 -> Input to be printed-6
  (INT_MENSUAL)    Result of integration-7 -> Input to be printed-7
  (INT_MENSUAL)    Result of integration-8 -> Input to be printed-8
  -----
INT_TOTAL (Unit 28, Type 25)
  -----
turbomaquinas_Deslacion_Type66a (Unit 30, Type 66)
  Output-1 -> Input value-1 (Type93)
  Output-2 -> Input value-2 (Type93)
  Output-3 -> Input value-4 (Type93)
  Output-4 -> Input value-5 (Type93)

```



```

Micro red con Sistema de Almacenamiento_Desalación V
    Output-5 -> Input value-3 (Type93)
    Output-6 -> Input value-6 (Type93)
    Output-7 -> Input value-7 (Type93)
    Output-8 -> Input value-8 (Type93)
    Output-9 -> Input value-9 (Type93)
    Output-10 -> Input value-10 (Type93)
    Output-11 -> Input value-1 (Type93-2)
    Output-12 -> Input value-2 (Type93-2)
    Output-13 -> Input value-3 (Type93-2)
-----

Type93 (Unit 34, Type 93)
    Inp-Step-1-2 -> m2 (Tanque_almacenamiento)
    Inp-Step-2-2 -> m_acum (Tanque_almacenamiento)
    Inp-Step-3-2 -> m3 (Tanque_almacenamiento)
    Inp-Step-4-2 -> Tanque_presion_sensor (Gestor
de energia)
    Inp-Step-5-2 -> Consumo_bomba_kW (Gestor de
energia)
    Inp-Step-9-2 -> Right axis variable-2
(Type65a_Votros)
    Inp-Step-10-1 -> P_bomba_ref_kW (Gestor de
energia)
-----

Control_gen_Type2d (Unit 39, Type 2)
    Output control function -> Input control function
(Control_gen_Type2d)
    Output control function -> OnOff_gen (Gestor de energia)
-----

Type65b-3_Vcontrol (Unit 36, Type 65)
-----

Type21 (Unit 41, Type 21)
    Calendar month -> Left axis variable-3
(Type65a_Votros)
    Day of the month -> Left axis variable-2
(Type65a_Votros)
    Hour of the day -> Left axis variable-1
(Type65a_Votros)
-----

Type65a_Votros (Unit 35, Type 65)
-----

Type93-2 (Unit 43, Type 93)
    Inp-Step-1-2 -> p_loss_val11 (Gestor de
    Page 9

```

Micro red con Sistema de Almacenamiento_Desalación V
energía)
(Type65a_Votros) Inp-Step-1-2 -> Right axis variable-7
(Type65a_Votros) Inp-Step-2-1 -> Right axis variable-8
(Type65a_Votros) Inp-Step-3-1 -> Right axis variable-9

End of report.

B.1. Ecuaciones de control en TRNSYS

Gestor de la energía

T_RPM = 2500

Tanque_presion_max = 13800

Control_bomba_out = lt(Tanque_presion_sensor,Tanque_presion_max)*gt(Balance_W,P_bomba_ref_kW*1000)

Tanque_Nivel_min = 7000

Control_turbina_out =
gt(Tanque_nivel_sensor,Tanque_Nivel_min)*Control_ATS*le((P_FV_W)*0.95, Dem_elect_W)

Bateria_LVD = 350

Bateria_HVD = 378

Control_ATS = not(Control_gen)

Control_gen = (OnOff_gen)

Bateria_I_sensor = Batt_Current_Sensor

Bateria_V = Battery_voltage_sensor

H_SOC = .85

L_SOC = .2

Batt_SOC = Bat_SOC

W_bomba = (Consumo_bomba_kW*1000)*Control_bomba_out

Control_Valvula_4 = Control_turbina_out

T_N_S = Tanque_nivel_sensor

T_P_S = Tanque_presion_sensor

Tank_SOC = ((1/8200)*Tanque_presion_sensor)-(28/41)

Cntrl_bombeo =
(Control_bomba_out)+gt(Balance_W,P_bomba_ref_kW*1000*2)+gt(Balance_W,P_bomba_ref_kW*1000*3)+gt(
Balance_W,P_bomba_ref_kW*1000*4)+gt(Balance_W,P_bomba_ref_kW*1000*5)+gt(Balance_W,P_bomba_ref_
kW*1000*6)+gt(Balance_W,P_bomba_ref_kW*1000*7)+gt(Balance_W,P_bomba_ref_kW*1000*8)+gt(Balance_
W,P_bomba_ref_kW*1000*9)+gt(Balance_W,P_bomba_ref_kW*1000*10)

Balance_W = (0.96*P_FV_W+Gen_W)-Dem_viviendas_W

Balanceinv_W = Dem_viviendas_W-(0.96*P_FV_W)

P_set_gen = Dem_viviendas_W

P2_set_T = 150

P1_set_T = 3

```

P_T_kW =
gt(p_loss_val11,0)*(((le(Balanceinv_W/1000,P2_set_T)*ge(Balanceinv_W/1000,P1_set_T))*Balanceinv_W*1/100
0)+(gt(Balanceinv_W/1000,P2_set_T)*P2_set_T)+(lt(Balanceinv_W/1000,P1_set_T)*P1_set_T))

```

Ósmosis inversa

```

Control_valvula_6 =
((gt(Sensor_presion_tanque,L_Presion_KPa))*(lt(Sensor_presion_tanque,H_Presion_KPa)))*(gt(Sensor_nivel_tan
que,L_nivel_kg))*cntrl_turbina

```

```

H_Presion_KPa = 13800

```

```

L_Presion_KPa = 5600

```

Interruptor de transferencia automática

```

Fuente_AC = (Control_ATS_in*(Turbina_in))+(not(Control_ATS_in)*Gen_in)

```

B.2. Diagrama de conexiones

