



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DISEÑO DE SISTEMAS RESIDENCIALES DE POLIGENERACIÓN
PARA COMUNIDADES AISLADAS”**

TESIS presentada por:
I.Q. Brenda Cansino Loeza

A la División de Estudios de Posgrado de la
Facultad de Ingeniería Química como
requisito parcial para obtener el
grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA QUÍMICA**

ASESOR:
Dr. José María Ponce Ortega

Morelia, Michoacán

Febrero del 2019

ABSTRACT

“DESIGN OF RESIDENTIAL POLIGENERATION SYSTEMS APPLIED TO ISOLATED COMMUNITIES”

By

Eng. Brenda Cansino Loeza

February 2019

Master in Chemical Engineering Sciences

Supervised by Dr. José María Ponce Ortega

This work presents a general mathematical programming model for satisfying water, energy and food needs in isolated and low-income communities involving different process integration approaches. The problem consists in determining the optimal and sustainable configuration to satisfy the energy, water and food demands of the inhabitants. Also, the use of waste-to-energy technologies is proposed aiming to handle the municipal solid waste correctly and obtain valued products from wastes to reduce the environmental impact. A multi-objective analysis is presented considering the consumption of fresh water, the greenhouse gas emissions and the cost of the integrated system as objective functions. A case study, for the community with the lowest index of poverty and marginalization from the State of Guerrero in Mexico is presented. The results show that it is possible to satisfy the water, energy and food needs in isolated communities accounting for integrated processes. Besides, it is possible to obtain trade-off solutions considering contradicting objectives.

Keywords: Water-Energy-Food Nexus; Isolated community; Polygeneration; Optimization; Multi-stakeholder approach; Process integration.

RESUMEN

“DISEÑO DE SISTEMAS RESIDENCIALES DE POLIGENERACIÓN PARA COMUNIDADES AISLADAS”

Por

I.Q. Brenda Cansino Loeza

Febrero del 2019

Maestría en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigido por Dr. José María Ponce Ortega

Este trabajo presenta un modelo de programación matemática para satisfacer las necesidades de agua, energía y alimentos en comunidades aisladas y de bajos ingresos que involucran diferentes enfoques de integración de procesos. El problema consiste en determinar la configuración óptima y sostenible que permita satisfacer las demandas de energía, agua y alimentos de los habitantes. Además, se propone el uso de tecnologías de conversión de residuos sólidos a energía con el objetivo de manejar correctamente los residuos sólidos municipales y obtener productos de valor agregado con el fin de reducir el impacto ambiental. Se presenta un análisis multiobjetivo considerando el consumo de agua fresca, las emisiones de gases de efecto invernadero y el costo del sistema integrado como funciones objetivo. Como caso de estudio se presenta la comunidad con el índice más bajo de pobreza y marginación del estado de Guerrero en México. Los resultados muestran que es posible satisfacer las necesidades de agua, energía y alimentos en comunidades aisladas mediante procesos integrados. Además, es posible obtener soluciones donde se compensan los objetivos evaluados.

Palabras clave: Nexo Energía-Agua-Alimentos; Comunidad Aislada; Poligeneración; Optimización; Múltiples tomadores de decisiones; Integración de Procesos.

ÍNDICE

ABSTRACT	ii
RESUMEN	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	vii
NOMENCLATURA	viii
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2. Antecedentes	3
1.3. Justificación	6
1.4. Hipótesis	6
1.5. Objetivo General	6
1.5.1. Objetivos Particulares	6
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Nexo Energía-Agua-Alimentos	8
2.2. Generación Centralizada	9
2.3. Generación Distribuida.....	11
2.3.1. Cogeneración	12
2.3.2. Trigeneración	12
2.3.3. Poligeneración.....	13
2.4. Optimización	14
2.4.1. Programación matemática	15
CAPITULO 3. METODOLOGÍA	17
3.1. Planteamiento del Problema.....	17
3.2. Superestructura.....	19
3.3. Modelo Matemático	20
3.4. Multistakeholder	39
CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO	40
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	42

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Alcance de los Sistemas de Poligeneración en una comunidad aislada.	2
Figura 2	Interacciones entre el Nexo Energía-Agua-Alimentos.	8
Figura 3	Comparación de eficiencia del proceso convencional y el sistema CHP.	12
Figura 4	Comparación entre un sistema convencional y un sistema de Trigeneración.	13
Figura 5	Interacciones de un sistema de Poligeneración.	14
Figura 6	Representación del problema de estudio.	17
Figura 7	Superestructura general	19
Figura 8	Representación del caso de estudio.	40
Figura 9	Solución de los escenarios Mínimo consumo de agua, Mínimo Costo y Mínimas emisiones.	42
Figura 10	Solución correspondiente al escenario de Mínimo consumo de agua fresca.	45
Figura 11	Solución correspondiente al escenario de Mínima generación de emisiones de gases de efecto invernadero.	46
Figura 12	Solución correspondiente al escenario de Mínimo costo.	47
Figura 13	Representación de la solución compromiso (CS), Punto Utópico (PU), Punto Nadir (PN), y soluciones factibles.	49
Figura 14	Solución correspondiente a la Solución Compromiso.	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados de los flujos principales en los escenarios evaluados.	43
Tabla 2 Resultados de la producción de combustibles, animales y cultivos en los escenarios.	48
Tabla 3 Porcentaje de insatisfacción para cada uno de las soluciones factibles.	51

NOMENCLATURA

Índices

a	Conjunto referente a los diferentes tipos de animales
c	Conjunto referente a los diferentes cultivos
r	Conjunto referente a los tipos de residuos sólidos
t	Periodo de tiempo
u	Conjunto referente a las unidades CHP
ww	Conjunto referente a los pozos disponibles para bombeo eólico
pw	Conjunto referente a los pozos disponibles para bombeo fotovoltaico

Parámetros

α_i	Factor de radiación solar
α^{AC}	Factor de refrigeración
α^{BW}	Factor de conversión de agua negra generada
α^{BWT}	Factor de agua negra tratada en la planta de tratamiento de agua negra
α^{GW}	Factor de conversión de agua gris generada
α^{GWT}	Factor de agua gris tratada en la planta de tratamiento de agua gris
ΔT	Diferencia de temperatura
δ^{AD}	Factor de producción en la planta de digestión anaeróbica
δ^{IN}	Factor de producción en la planta de incineración
δ^{GAS}	Factor de producción en la planta de gasificación
δ^{PEL}	Factor de producción en la planta de peletización
δ^{PYROIL}	Factor de producción de aceite de pirólisis en la planta de pirólisis.
$\eta_{u,t}^E$	Eficiencia eléctrica de las unidades de cogeneración
$\eta_{u,t}^Q$	Eficiencia térmica de las unidades de cogeneración
η^{SP}	Eficiencia del panel solar
τ^{HW}	Factor de calentamiento de agua fresca mediante vapor
$\theta_{c,t}^{C-MAX}$	Producción máxima de alimentos

$\theta_{c,t}^{C-MIN}$	Producción mínima de alimentos
ρ^{air}	Densidad del aire
ρ^w	Densidad del agua
$\varphi_{c,t}$	Factor de producción
ϕ_a^{wreq}	Factor de agua requerida para cada animal
ϕ_a^{growth}	Factor de crecimiento de animales
$\Phi_{c,t}$	Factor de producción por área
γ^{AD}	Factor de emisiones asociado al digestor anaeróbico
γ^{CHP}	Factor de emisiones asociado a las unidades CHP
γ^{GAS}	Factor de emisiones asociado a la planta de gasificación
γ^{IN}	Factor de emisiones asociado a la planta de incineración
γ^{PEL}	Factor de emisiones asociado a la planta de peletización
γ^{PYR}	Factor de emisiones asociado a la planta de pirólisis
λ_u	Fracción de agua proveniente de las unidades CHP enviada al tanque de almacenamiento térmico
$\lambda^{FreshIC}$	Fracción de agua fresca enviada a la comunidad
λ^{SC}	Fracción de agua proveniente del colector solar enviada al tanque de almacenamiento térmico
λ^{St}	Fracción de agua fresca enviada al tanque de almacenamiento térmico
A^{SC-MAX}	Área máxima disponible para la instalación del colector solar
A^{SP-MAX}	Área máxima disponible para la instalación del panel solar
$A^{rotor-MAX}$	Área máxima disponible para la instalación de aerogeneradores
$A^{RW-IC-MAX}$	Área máxima disponible para el colector de agua pluvial de la comunidad

A^{RW-MAX}	Área máxima disponible para el colector de agua pluvial de la ganadería, agricultura y jardinería
Cap^{AC-MAX}	Capacidad máxima disponible del sistema de refrigeración por absorción
Cap^{AD-MAX}	Capacidad máxima disponible del digestor anaeróbico
$Cap_u^{CHP-MAX}$	Capacidad máxima de las unidades de cogeneración
Cap^{BW-MAX}	Capacidad máxima de la planta de tratamiento de agua negra
$Cap^{GAS-MAX}$	Capacidad máxima disponible de la planta de gasificación
Cap^{GW-MAX}	Capacidad máxima de la planta de tratamiento de agua gris
Cap^{IN-MAX}	Capacidad máxima disponible de la unidad de incineración
Cap_{pw}^{PP-MAX}	Capacidad máxima disponible para sistemas de bombeo fotovoltaico
Cap_s^{PS-MAX}	Capacidad máxima disponible de las estufas de pellets
$Cap^{PEL-MAX}$	Capacidad máxima disponible de la unidad de peletización
$Cap^{PYR-MAX}$	Capacidad máxima disponible de la unidad de pirólisis
$Cap^{RWSS-IC-MAX}$	Capacidad máxima disponible del tanque de almacenamiento de agua pluvial para la comunidad
$Cap^{RWSS-MAX}$	Capacidad máxima disponible del tanque de almacenamiento de agua pluvial para la ganadería, agricultura y jardinería.
Cap^{ST-MAX}	Capacidad máxima del tanque de almacenamiento térmico
Cap_{ww}^{WP-MAX}	Capacidad máxima del sistema de bombeo eólico
Cap^{AD-MAX}	Capacidad máxima de la planta de digestión anaeróbica
$Cap_u^{CHP-MAX}$	Capacidad máxima de la unidad CHP
Cap^{BW-MAX}	Capacidad máxima de la planta de tratamiento de agua negra
$Cap^{GAS-MAX}$	Capacidad máxima de la planta de gasificación
Cap^{GW-MAX}	Capacidad máxima de la planta de tratamiento de agua gris
Cap^{IN-MAX}	Capacidad máxima de la planta de incineración
Cap_{pw}^{PP-MAX}	Capacidad máxima del sistema de bombeo fotovoltaico

Cap_s^{PS-MAX}	Capacidad máxima de las estufas de pellets
$Cap^{PEL-MAX}$	Capacidad máxima de la planta de peletización
$Cap^{PYR-MAX}$	Capacidad máxima de la planta de pirólisis
$Cap^{RWSS-IC-MAX}$	Capacidad máxima del colector de agua pluvial de la comunidad
$Cap^{RWSS-MAX}$	Capacidad máxima del colector de agua pluvial de la ganadería, agricultura y jardinería
Cap^{ST-MAX}	Capacidad máxima del tanque de almacenamiento térmico
Cap_{ww}^{WP-MAX}	Capacidad máxima del sistema de bombo eólico
CP^{max}	Coefficiente de máxima potencia
Cp	Capacidad calorífica
$E_t^{CHP-agriculture}$	Demanda de electricidad en la agricultura
$E_t^{CHP-cattle}$	Demanda de electricidad en la ganadería
$E_t^{Total-IC}$	Electricidad total suministrada a la comunidad
$FCost_u$	Costo fijo de cada una de las unidades de cogeneración
$FCost^{AC}$	Costo fijo del sistema de refrigeración por absorción
$FCost^{AD}$	Costo fijo del digestor anaeróbico
$FCost^{AG}$	Costo fijo del aerogenerador
$FCost^{BW}$	Costo fijo de la planta de tratamiento de agua negra
$FCost^{IN}$	Costo fijo de la unidad de incineración
$FCost^{GAS}$	Costo fijo del gasificador
$FCost^{GW}$	Costo fijo de la planta de tratamiento de agua gris
$FCost^{PP}$	Costo fijo del sistema de bombeo fotovoltaico
$FCost^{PS}$	Costo fijo de las estufas de pellets
$FCost^{PEL}$	Costo fijo de la unidad de peletización
$FCost^{PYR}$	Costo fijo de la unidad de pirólisis
$FCost^{SC}$	Costo fijo del colector solar
$FCost^{SP}$	Costo fijo del panel solar

$FCost^{ST}$	Costo fijo del tanque de almacenamiento térmico
$FCost^{RW}$	Costo fijo del sistema de captación de agua pluvial para la ganadería, agricultura y jardinería
$FCost^{RW-IC}$	Costo fijo del sistema de captación de agua pluvial de la comunidad
$FCost^{WP}$	Costo fijo del sistema de bombeo eólico
$MSW_{r,t}^{agriculture}$	Cantidad de residuos sólidos generados en la agricultura
$MSW_{r,t}^{cattle}$	Cantidad de residuos sólidos generados en la ganadería
$MSW_{r,t}^{IC}$	Cantidad de residuos sólidos generados en la comunidad
$MSW_{r,t}^{garden}$	Cantidad de residuos sólidos generados en la jardinería
$MSW_{r,t}^{Total}$	Cantidad de residuos sólidos totales generados
$MSW_{r=1,t}^{Total}$	Cantidad de residuos sólidos no reciclables
PR	Coefficiente de desempeño
$Speed_t$	Velocidad del viento
UC^{FreshW}	Costo de agua fresca
UC^{NG}	Costo de gas natural
$UCOM_u$	Costo de operación y mantenimiento de cada una de las unidades de cogeneración
$UCOM^{AC}$	Costo de operación y mantenimiento del sistema de refrigeración por absorción
$UCOM^{AD}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de digestión anaeróbica
$UCOM^{GAS}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de gasificación
$UCOM^{IN}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de incineración
$UCOM_{pw}^{PP}$	Costo de operación y mantenimiento del sistema de bombeo fotovoltaico
$UCOM^{PEL}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de peletización
$UCOM^{PYR}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de pirólisis
$UCOM^{SC}$	Costo de operación y mantenimiento del colector solar

$UCOM_{uw}^{WP}$	Costo de operación y mantenimiento del sistema de bombeo eólico
USC_a^A	Costo de venta de cada uno de los animales
USC_c^C	Costo de venta para cada uno de los cultivos
USC_r^{MSW}	Costo de venta para cada uno de los tipos de residuos sólidos
USC^{AD}	Costo de venta del biogás generado en la planta de gasificación
USC^{GAS}	Costo de venta del gas natural generado en la planta de gasificación
USC^{PEL}	Costo de venta de los pellets generados en la planta de peletización
$USC^{PYR-OIL}$	Costo de venta del aceite de pirólisis generado en la planta de peletización
$VCost_u$	Costo variable de cada una de las unidades de cogeneración
$VCost^{AC}$	Costo variable del sistema de refrigeración por absorción
$VCost^{AD}$	Costo variable del digestor anaeróbico
$VCost^{AG}$	Costo variable del aerogenerador
$VCost^{BW}$	Costo variable de la planta de tratamiento de agua negra
$VCost^{GAS}$	Costo variable de la unidad de gasificación
$VCost^{GW}$	Costo variable de la planta de tratamiento de agua gris
$VCost^{IN}$	Costo variable de la unidad de incineración
$VCost_{pw}^{PP}$	Costo variable del sistema de bombeo fotovoltaico
$VCost^{PS}$	Costo variable de las estufas de pellets
$VCost^{PEL}$	Costo variable de la unidad de peletización
$VCost^{PYR}$	Costo variable de la unidad de pirólisis
$VCost^{RWSS-IC}$	Costo variable del sistema de captación de agua pluvial de la comunidad
$VCost^{RWSS}$	Costo variable del sistema de captación de agua pluvial de la ganadería, agricultura y jardinería
$VCost^{RW}$	Costo variable del sistema de almacenamiento de agua pluvial de la ganadería, agricultura y jardinería

$V_{\text{Cost}}^{\text{RW-IC}}$	Costo variable del sistema de almacenamiento de agua pluvial de la comunidad
$V_{\text{Cost}}^{\text{SC}}$	Costo variable del colector solar
$V_{\text{Cost}}^{\text{SP}}$	Costo variable del panel solar
$V_{\text{Cost}}^{\text{ST}}$	Costo variable del tanque de almacenamiento térmico
$V_{\text{Cost}}^{\text{WP}_{\text{ww}}}$	Costo variable del sistema de bombeo eólico
W_t^{CL}	Demanda de aire acondicionado para la comunidad
W_t^{garden}	Demanda de agua en la jardinería
$W_t^{\text{Total-IC}}$	Demanda de agua en la comunidad

Variables

$a_{a,t}$	Animales producidos en la ganadería
A_c	Área de cultivo
A^{AG}	Área disponible para aerogeneradores
A^{rotor}	Área del rotor del aerogenerador
$A^{\text{RW-IC}}$	Área del colector de agua de lluvia de la comunidad
A^{RW}	Área del colector de agua de lluvia para la agricultura, ganadería y jardinería.
A^{SC}	Área del colector solar
A^{SP}	Área disponible para el panel solar
$c_{c,t}$	Cultivos producidos en la agricultura
Cap^{AC}	Capacidad del sistema de refrigeración por absorción
Cap^{AD}	Capacidad del digestor anaeróbico
Cap^{BW}	Capacidad de la planta de tratamiento de agua negra
Cap_u^{CHP}	Capacidad de las unidades de cogeneración
Cap^{GAS}	Capacidad de la unidad de gasificación
Cap^{GW}	Capacidad de la planta de tratamiento de agua gris
Cap^{IN}	Capacidad de la planta de incineración

Cap_{pw}^{PP}	Capacidad del sistema de bombeo fotovoltaico
Cap_s^{PS}	Capacidad de las estufas de pellets
Cap^{PEL}	Capacidad de la planta de peletización
Cap^{PYR}	Capacidad de la planta de pirólisis
$Cap^{RWSS-IC}$	Capacidad del sistema almacenamiento de agua pluvial de la comunidad
Cap^{RWSS}	Capacidad del sistema almacenamiento de agua pluvial de la agricultura, ganadería y jardinería
Cap^{ST}	Capacidad del sistema de almacenamiento térmico
Cap_{ww}^{WP}	Capacidad del sistema de bombeo eólico
$CapCost_u$	Costo de capital de las unidades de cogeneración
$CapCost^{AC}$	Costo de capital del sistema de refrigeración por absorción
$CapCost^{AD}$	Costo de capital del digestor anaeróbico
$CapCost^{AG}$	Costo de capital del aerogenerador
$CapCost^{BW}$	Costo de capital de la planta de tratamiento de agua negra
$CapCost^{GAS}$	Costo de capital del gasificador
$CapCost^{GW}$	Costo de capital de la planta de tratamiento de agua gris
$CapCost^{IN}$	Costo de capital de la unidad de incineración
$CapCost^{SC}$	Costo de capital del colector solar
$CapCost^{SP}$	Costo de capital del panel solar
$CapCost^{PP}$	Costo de capital del sistema de bombeo fotovoltaico
$CapCost^{PS}$	Costo de capital de las estufas de pellets
$CapCost^{PEL}$	Costo de capital de la unidad de peletización
$CapCost^{PYR}$	Costo de capital de la unidad de pirólisis
$CapCost^{RW}$	Costo de capital del sistema de captación de agua pluvial
$CapCost^{ST}$	Costo de capital del tanque de almacenamiento térmico

$CapCost^{WP}$	Costo de capital del sistema de bombeo eólico
$E_{u,t}$	Electricidad generada por cada unidad de cogeneración
E_t^{AG}	Electricidad producida en los aerogeneradores
E_t^{CHP}	Electricidad total producida por las unidades de cogeneración
E_t^{CHP-RE}	Electricidad generada por las unidades de cogeneración enviada a la comunidad
E_t^{RE}	Electricidad producida por las energías renovables
E_t^{SP}	Electricidad producida en los paneles solares
$F_{u,t}$	Combustible requerido para cada unidad de cogeneración
F_t^{ad}	Flujo de biogás proveniente del proceso de digestión anaeróbica
F_t^{BF}	Biocombustible total generado
$F_t^{gasification}$	Flujo de gas natural proveniente del proceso de gasificación
F_t^{NG}	Flujo de gas natural
$F_t^{pyrolysis-oil}$	Flujo de aceite de pirólisis proveniente del proceso de pirólisis
$fooda_{a,t}$	Cantidad de alimentos necesarios para los animales
$GHGE^{AD}$	Emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la planta de digestión anaeróbica
$GHGE^{CHP}$	Emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a las unidades CHP
$GHGE^{GAS}$	Emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la planta de peletización
$GHGE^{IN}$	Emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la planta de incineración
$GHGE^{PEL}$	Emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la planta de peletización
$GHGE^{PYR}$	Emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la planta de pirólisis
h_t	Factor de radiación solar del panel solar

MSW_t^{AD}	Cantidad de residuos sólidos no reciclables enviados a la planta de digestión anaeróbica
MSW_t^{GAS}	Cantidad de residuos sólidos no reciclables enviados a la planta de gasificación
MSW_t^{IN}	Cantidad de residuos sólidos no reciclables enviados a la planta de incineración
MSW_t^{PEL}	Cantidad de residuos sólidos no reciclables enviados a la planta de peletización
MSW_t^{PYR}	Cantidad de residuos sólidos no reciclables enviados a la planta de pirólisis
$OCost^{FreshW}$	Costo de operación de agua fresca
$OCost^{NG}$	Costo de operación de gas natural
$OMCost_u$	Costo de operación y mantenimiento de las unidades de cogeneración
$OMCost^{AC}$	Costo de operación y mantenimiento del sistema de refrigeración por absorción
$OMCost^{AD}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de digestión anaeróbica
$OMCost^{BWT}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de agua negra
$OMCost^{GAS}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de gasificación
$OMCost^{GWT}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de agua gris
$OMCost^{IN}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de incineración
$OMCost^{PP}$	Costo de operación y mantenimiento del sistema de bombeo fotovoltaico
$OMCost^{PEL}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de peletización
$OMCost^{PYR}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de pirólisis
$OMCost^{SC}$	Costo de operación y mantenimiento del colector solar

$OMCost^{WP}$	Costo de operación y mantenimiento del sistema de bombeo fotovoltaico
P_t^{PEL}	Cantidad de pellets generados a partir de los residuos sólidos
$P_{s,t}^{IC}$	Cantidad de pellets utilizados en la comunidad en las estufas de pellets
Q_t^{SC}	Calor transferido en el colector solar
$SalesA$	Venta de animales
$SalesAd$	Venta de biogás de la planta de digestión anaeróbica
$SalesC$	Venta de cultivos
$SalesGas$	Venta de gas natural de la planta de gasificación
$SalesOil$	Venta de aceite de pirólisis
$SalesPellets$	Venta de pellets generados en la planta de peletización
$SalesRP$	Venta de residuos sólidos
St_t	Flujo de vapor enviado al motor de combustión interna
V_t^{ST}	Agua almacenada en el tanque de almacenamiento térmico
$W_{u,t}$	Flujo de agua de cada una de las unidades de cogeneración enviado al tanque de almacenamiento térmico
W_t^{SC}	Agua caliente que sale del colector solar
$W_{a,t}^{cattle-req}$	Flujo de agua requerida en la agricultura
W_t^{Fresh}	Flujo de agua fresca total
$W_t^{Fresh-IC}$	Flujo de agua fresca enviada a la comunidad
$W_t^{Fresh-St}$	Flujo de agua fresca calentada con vapor proveniente de la planta de incineración
$W_t^{Fresh-T}$	Flujo de agua fresca enviada al tanque de almacenamiento térmico
W_t^{IC}	Flujo de agua suministrada a la comunidad
W_t^{IC-BW}	Flujo de agua negra generada en la comunidad enviada a la planta de tratamiento de agua negra
W_t^{IC-GW}	Flujo de agua gris generada en la comunidad enviada a la planta de tratamiento de agua gris

$W_t^{GW-agriculture}$	Flujo de agua gris tratada enviada a la agricultura
$W_t^{GW-cattle}$	Flujo de agua gris tratada enviada a la ganadería
$W_t^{GW-garden}$	Flujo de agua gris tratada enviada a la jardinería
W_t^{GWT}	Flujo de agua gris tratada que sale de la planta de tratamiento de agua gris
$W_{pw,t}^{PPump}$	Flujo de agua bombeada por el sistema de bombeo fotovoltaico
$W_{pw,t}^{PPump-agriculture}$	Flujo de agua del sistema de bombeo fotovoltaico a la agricultura
$W_{pw,t}^{PPump-cattle}$	Flujo de agua del sistema de bombeo fotovoltaico a la ganadería
$W_{ww,t}^{WPump-agriculture}$	Flujo de agua del sistema de bombeo eólico a la agricultura
$W_{ww,t}^{WPump-cattle}$	Flujo de agua del sistema de bombeo eólico a la ganadería
$W_t^{RW-agriculture}$	Flujo de agua del sistema de captación de agua de lluvia enviada a la agricultura
W_t^{RW}	Flujo de agua colectado en el colector de agua pluvial
W_t^{RW-IC}	Flujo de agua enviada del sistema captación de agua lluvia a la comunidad
W_t^{SC}	Flujo de agua enviada al colector solar
W_t^{ST-AC}	Flujo de agua enviada del tanque de almacenamiento térmico al sistema de refrigeración por absorción
$W_t^{TFresh-IC}$	Flujo de agua fresca enviado a la comunidad
$WCrop_{c,t}$	Agua necesaria para cada cultivo

Variables binarias

y^{AD}	Variable binaria para la existencia del digestor anaeróbico
y^{AC}	Variable binaria para la existencia del sistema de refrigeración por absorción
y^{AG}	Variable binaria para la existencia del aerogenerador

y^{BW}	Variable binaria para la existencia de la planta de tratamiento de agua negra
y^{GW}	Variable binaria para la existencia de la planta de tratamiento de agua gris
y^{GAS}	Variable binaria para la existencia del gasificador
y^{IN}	Variable binaria para la existencia de la unidad de incineración
y_{pw}^{PP}	Variable binaria para la existencia de pozos para bombeo fotovoltaico
y^{PEL}	Variable binaria para la existencia de la unidad de peletización
y_s^{PES}	Variable binaria para la existencia de estufas de pellets
y^{PYR}	Variable binaria para la existencia de la unidad de pirólisis
y^{RW-IC}	Variable binaria para la existencia del colector de agua pluvial de la comunidad
y^{RW}	Variable binaria para la existencia del colector de agua pluvial de la agricultura, ganadería y jardinería
$y^{RWSS-IC}$	Variable binaria para la existencia del tanque de almacenamiento de agua pluvial de la comunidad
y^{RWSS}	Variable binaria para la existencia del tanque de almacenamiento de agua pluvial de la agricultura, ganadería y jardinería
y^{SC}	Variable binaria para la existencia del colector solar
y^{SP}	Variable binaria para la existencia del panel solar
y^{ST}	Variable binaria para la existencia del tanque de almacenamiento térmico
y_u	Variable binaria para la existencia de cada una de las unidades de cogeneración
y_{ww}^{WP}	Variable binaria para la existencia de pozos para bombeo fotovoltaico

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

La producción de alimentos, así como el suministro de agua y energía son algunos de los problemas socioeconómicos y ambientales urgentes en algunas regiones de México. Las sinergias que existen entre estos recursos están representadas por varios campos y son identificados como el Nexo Energía-Agua-Alimentos. La energía es necesaria para el suministro del agua, mientras que el agua y la energía son recursos esenciales en la agricultura y mediante ella proveer los alimentos. Sin embargo, el desarrollo económico y el crecimiento de la población ha ocasionado que la demanda de estos recursos aumente considerablemente y para lograr satisfacer tales demandas se ha optado por crear soluciones a corto plazo donde se ha asignado una prioridad económica en lugar de llevar a cabo soluciones más sostenibles a largo plazo. Por lo tanto, el uso inadecuado de los recursos pone en riesgo la seguridad del agua, la energía y los alimentos.

Tradicionalmente, los procesos energéticos requieren de recursos no renovables como materia prima, tal es el caso de los combustibles fósiles cuyas reservas se concentran en áreas geográficas determinadas. Además, la gran variación en los costos de los combustibles, así como el agotamiento de las fuentes de energía convencionales ha conducido a la utilización de fuentes de energía alternativas. Actualmente, se usan dos modelos para generación, distribución y consumo de energía: la generación centralizada y la generación distribuida. La generación centralizada es el esquema preponderante en México, por lo que en el sector residencial las viviendas se encuentran conectadas a la red local de suministro eléctrico para satisfacer sus necesidades. Sin embargo, la generación distribuida permite desarrollar pequeñas fuentes de generación ubicadas cerca del centro de consumo utilizando esquemas de micro, pequeña o mediana escala. Además, la generación distribuida puede implementarse en sistemas aislados donde aún no hay acceso al servicio de energía convencional. Los sistemas de generación distribuida más utilizados incluyen sistemas de cogeneración, trigeneración y poligeneración.

En este contexto, los sistemas de poligeneración han resultado ser una opción atractiva para la generación de varios tipos de energía, logrando mayores eficiencias que los procesos convencionales y produciendo una menor cantidad de gases de efecto invernadero (López y col., 2009).

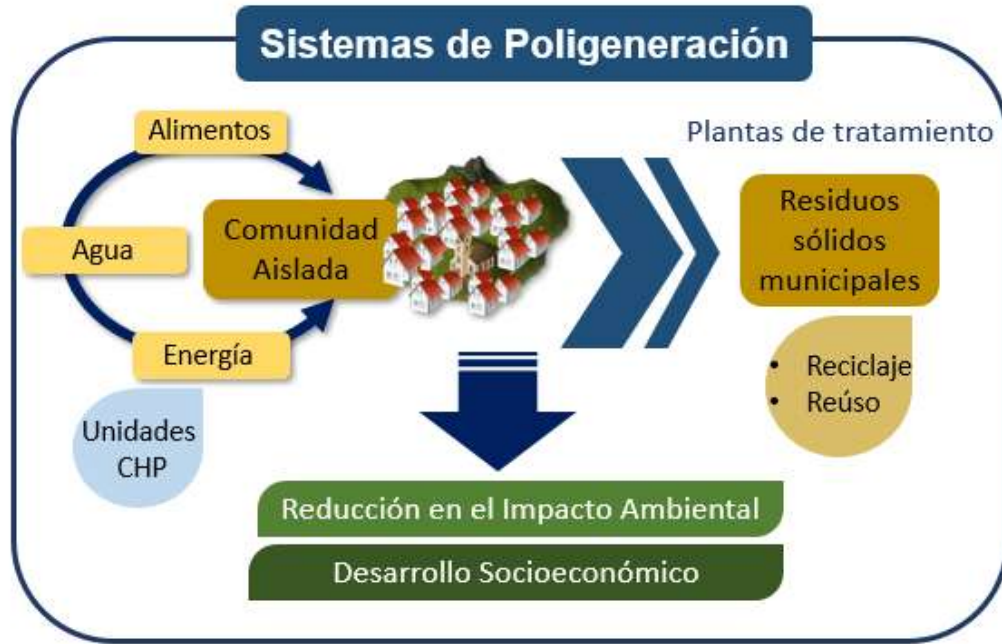


Figura 1 Alcance de los Sistemas de Poligeneración en una comunidad aislada.

Sin embargo, en México el uso de la generación distribuida es prácticamente nulo y la mayoría de las poblaciones en situación de pobreza carecen de acceso a la electricidad y a instalaciones para cocinar sus alimentos y satisfacer sus necesidades básicas (Herington y van de Fliert, 2017). Además, el tener un acceso limitado a la energía pone en riesgo el suministro de agua y, por lo tanto, que la producción de alimentos se vea afectada. De igual manera, la carencia de estos recursos es un indicativo del bajo desarrollo económico de las comunidades por lo que es importante la implementación de procesos que permitan aprovechar al máximo los recursos disponibles (**Figura 1**) creando soluciones sustentables que a su vez permitan incrementar el nivel de vida de la sociedad.

1.2. Antecedentes

El agua, la energía y los alimentos son recursos críticos para satisfacer las demandas sociales y promover el desarrollo socioeconómico de las comunidades (Fuentes-Cortés y Ponce-Ortega, 2017a). Sin embargo, existen muchas comunidades que no tienen acceso a la energía y como consecuencia, hay un difícil acceso al agua y los alimentos (Macedo y col., 2016). Muchas comunidades rurales todavía no tienen acceso a estos recursos, debido principalmente a su ubicación geográfica que dificulta la interconexión con la red eléctrica (Sánchez y col., 2015). Satisfacer las necesidades básicas de los habitantes en comunidades aisladas es un problema que está relacionado con el Nexo Energía-Agua-Alimentos debido a que los habitantes consumen una cantidad considerable de recursos para satisfacer sus necesidades (Martínez-Guido y col., 2017).

El agua, la energía y los alimentos están fuertemente interrelacionados y cada uno de ellos dependen del otro (Zhang y Vesselinov, 2017). Este nexo permite mantener la seguridad de los recursos y promover el desarrollo económico de manera sustentable (Biggs y col., 2014). En los últimos años, muchas investigaciones se han centrado en estudiar el Nexo Energía-Agua-Alimentos para gestionar procesos de producción, consumo y distribución más sostenibles (García y You, 2017). En este contexto, Biggs y col. (2015) estudiaron el Nexo Energía-Agua-Alimentos para proponer una gestión de los recursos donde se tenga un equilibrio entre el suministro de recursos naturales y las demandas básicas de los habitantes considerando la seguridad ambiental. Rasul y Sharma (2016) desarrollaron estrategias para administrar el Nexo Energía-Agua-Alimentos en los países del sur de Asia debido a que estos han sufrido un rápido crecimiento de la población que a su vez ha causado la sobreexplotación de los recursos naturales. Hang y col. (2016) introdujeron un modelo para el diseño óptimo de sistemas de producción local para satisfacer las demandas en una ciudad ecológica ubicada en Inglaterra. López-Díaz y col. (2018) propusieron un modelo de optimización para producir biocombustibles involucrando el Nexo Energía-Agua-Alimentos. Wa'el y col. (2017) presentaron un modelo integrado que considera las interacciones entre el Nexo Energía-Agua-Alimentos a escala doméstica, contemplando la variabilidad estacional de los

recursos y el comportamiento de los habitantes. Zhang y Vesselinov (2017) propusieron un modelo para integrar las interacciones del Nexo Energía-Agua-Alimentos para su seguridad. Karan y col. (2018) estudiaron las influencias entre el agua, la energía y los alimentos en un sistema sostenible que permite satisfacer las demandas de una familia.

La gestión inadecuada de estos recursos ha producido impactos ambientales significativos. Actualmente, se han utilizado fuentes de energía alternativas como la geotérmica (Gupta y Roy, 2006), la solar (Bala y Siddique, 2009) y la eólica (Shezan y col., 2016) para disminuir el impacto ambiental (Ahadi y col., 2016). Además, se han reportado varios estudios relacionados con el uso de energías renovables implementadas en comunidades aisladas para generar energía eléctrica (Sandwell y col., 2016) mientras que otras investigaciones se han centrado en la generación distribuida (Fuentes-Cortés y Ponce-Ortega, 2017b) para producir electricidad en lugares remotos mediante sistemas aislados, ejemplos de este tipo de generación son los sistemas de poligeneración. Recientemente, se han introducido sistemas de poligeneración para lograr sistemas cada vez más eficientes y sostenibles. En este contexto, Kabalina y col. (2017) desarrollaron un sistema de poligeneración que incluye un proceso de gasificación para producir gas de síntesis, carbón, hidrógeno y gas natural y realizaron un análisis exergoeconómico del sistema. Se ha demostrado que los sistemas de poligeneración reducen el consumo de combustible (Fuentes-Cortés y col., 2015), los costos operativos (Unterwurzacher, 1992) y, por consiguiente, reducen el impacto ambiental (Blok y Turkenbur, 1994) que se asocia a las emisiones de gases de efecto invernadero (Lund, 2007). Hay muchos estudios que proponen el uso de diferentes esquemas de generación distribuida (Barbieri y col., 2012) para satisfacer las demandas de energía (Fubara y col., 2014). Otras investigaciones se han enfocado en integrar diferentes procesos (Fuentes-Cortés y col., 2016) para aprovechar al máximo los recursos disponibles en complejos residenciales (Núñez-López y col., 2018). Sin embargo, ninguno de los estudios mencionados anteriormente ha considerado el Nexo Agua-Energía-Alimentos involucrando un sistema de poligeneración en una comunidad aislada de manera sostenible.

Otro desafío importante para disminuir el impacto ambiental es la planificación de los residuos sólidos en las comunidades. El reciclaje es considerado como una de las mejores opciones en la gestión de residuos sólidos para reducir el impacto ambiental (Mwanza y Mbohwa, 2017); por lo tanto, es importante gestionar correctamente los residuos sólidos municipales. En este contexto, Santibañez-Aguilar y col. (2011) propusieron un modelo de optimización multiobjetivo para la planificación de una biorrefinería tomando en cuenta objetivos económicos y ambientales. Díaz-Barriga-Fernández y col. (2017) propusieron un enfoque de optimización multiobjetivo para la planificación de un sistema de gestión de residuos sólidos municipales considerando el reciclaje, la reutilización, el transporte, la separación y la distribución de residuos sólidos.

La gestión de los residuos sólidos municipales ha sido identificada como uno de los desafíos globales que deben afrontarse con cuidado para alcanzar objetivos sostenibles. Las investigaciones recientes se han centrado en proponer procesos que conviertan los residuos en energía o productos de valor agregado. Fernández-González y col. (2017) evaluaron los aspectos económicos y ambientales de los sistemas de conversión de residuos en energía en pequeños municipios mediante el Análisis del Ciclo de Vida, teniendo como resultado beneficios ambientales cuando se utiliza este tipo de tecnologías. Matsakas y col. (2017) investigaron la conversión de residuos sólidos municipales en energía y productos químicos mediante tratamientos biológicos y termoquímicos. La digestión anaeróbica es uno de los tratamientos biológicos más utilizados debido a que aproximadamente el 90% de la energía disponible de la biomasa se convierte en metano (Elango y col., 2007). Los tratamientos termoquímicos engloban la incineración (Somorin y col., 2017) y otras tecnologías recientes como pirólisis (Yang y col., 2018) y gasificación (Couto y col., 2016) que presentan mayores eficiencias y una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Arena, 2012).

Sin embargo, ninguna de las investigaciones anteriores se ha centrado en estudiar diferentes tipos de tratamientos de desechos sólidos en un municipio de bajos ingresos con el objetivo de impulsarlo en convertirse en una comunidad en la que

sus necesidades puedan satisfacerse mediante el manejo adecuado de sus recursos. Además, no se han realizado investigaciones para abordar la integración del Nexo Energía-Agua-Alimentos y el manejo de desechos sólidos en comunidades aisladas, lo que puede ayudar a reducir el impacto ambiental y mejorar las condiciones de vida de los habitantes. Ante este problema, es necesario implementar un sistema capaz de integrar el Nexo Energía-Agua-Alimentos para que puedan satisfacerse las necesidades de los habitantes de la comunidad aislada. En este contexto, un sistema de poligeneración es una opción atractiva para proporcionar energía y hacer un manejo adecuado del agua que a su vez facilitarán la producción y el acceso de los alimentos.

1.3. Justificación

Los esquemas de generación y distribución eléctrica que se utilizan actualmente en el país son poco eficientes. Los esfuerzos que realizan las compañías eléctricas para llevar el servicio hasta donde se requiere, resultan cada vez más costosos y menos efectivos. Aunado a ello, los sistemas de poligeneración son una buena opción de generación de energía para comunidades aisladas donde debido a la falta de energía eléctrica se tiene un difícil acceso a la alimentación y al agua.

1.4. Hipótesis

La metodología propuesta para el diseño de un sistema residencial de poligeneración aplicado a comunidades aisladas permitirá satisfacer las necesidades de agua, energía y alimentos en comunidades aisladas de manera sustentable.

1.5. Objetivo General

Diseñar un sistema residencial de poligeneración para comunidades aisladas optimizando aspectos económicos y ambientales, satisfaciendo necesidades de alimentos, energía y agua de manera simultánea.

1.5.1. Objetivos Particulares

- Implementar un método de optimización que permita la integración sustentable de energía, agua y alimentos en comunidades aisladas.

- Aplicar el modelo propuesto a uno de los municipios con mayor índice de pobreza de México para obtener potenciales soluciones atractivas.
- Implementar una estrategia de optimización modelo que considere los múltiples interesados en el problema para tener soluciones sostenibles.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Nexo Energía-Agua-Alimentos

El nexos entre la Energía, Agua y Alimentos (**Figura 2**) significa que los tres sectores (seguridad de los recursos hídricos, seguridad energética y seguridad alimentaria) están íntimamente relacionados y que la mayoría de las veces la intervención en una de estas áreas tiene un impacto en alguna de las otras o en ambas.

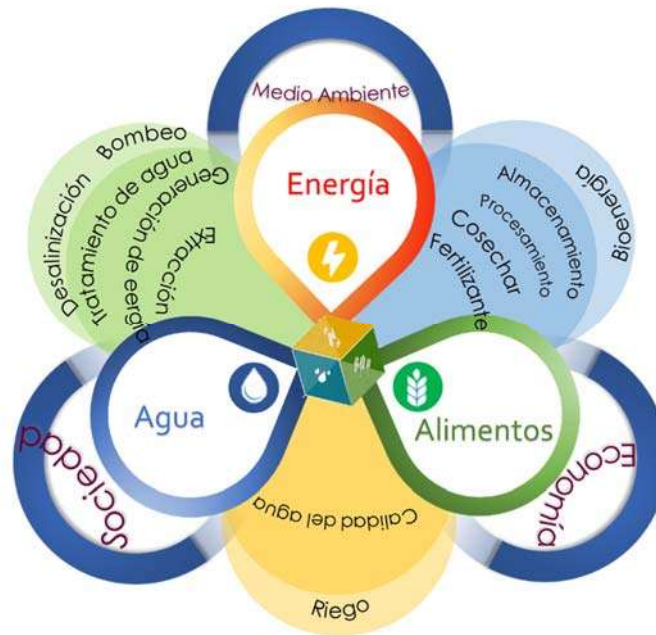


Figura 2 Interacciones entre el Nexo Energía-Agua-Alimentos.

El agua, la energía y los alimentos son recursos fundamentales para satisfacer las demandas socioeconómicas y el desarrollo económico mundial sostenible. El agua juega un papel importante en casi todas las etapas del desarrollo energético, incluyendo la extracción, producción y procesamiento de combustibles fósiles, la generación de electricidad (González-Bravo et al., 2016) y el tratamiento de los residuos de las actividades relacionadas con los procesos energéticos (Pereira-Cardenal y col., 2016). Por otra parte, el agua es necesaria para la producción de alimentos, principalmente para el riego y procesamiento de cultivos. La producción

agrícola es el mayor consumidor de agua a nivel mundial (Arredondo-Ramírez y col., 2015), representando aproximadamente el 90% del consumo mundial de agua dulce en el siglo pasado. Por otra parte, se estima que cerca del 30% de la energía consumida en el mundo se debe al sector agroalimentario y de manera contraria, actualmente una cifra importante de usuarios utiliza la biomasa para la generación energética.

El Nexo Energía-Agua-Alimentos es un enfoque que puede apoyar a los responsables de la toma de decisiones en la evaluación de compensaciones de los recursos en los diferentes sectores económicos, reconociendo las interdependencias entre los sistemas energéticos, hídricos y alimentarios.

2.2. Generación Centralizada

La Generación centralizada se refiere a la generación de electricidad a gran escala en instalaciones centralizadas. Estas instalaciones generalmente están ubicadas lejos de los usuarios finales y conectadas a una red de líneas de transmisión de alto voltaje. La electricidad generada por la generación centralizada se distribuye a través de la red de energía eléctrica a múltiples usuarios finales. Las instalaciones de generación centralizada incluyen centrales eléctricas que funcionan con combustibles fósiles, centrales nucleares, represas hidroeléctricas y parques eólicos.

El impacto ambiental de la generación de electricidad centralizada involucra todos aquellos impactos asociados con la extracción, producción y transporte de ciertos combustibles como el carbón y el gas natural. En general, las centrales eléctricas centralizadas pueden afectar el medio ambiente de las siguientes maneras:

Emisiones contaminantes del aire

- La cantidad y el tipo de emisiones variarán según el combustible quemado y las características de la planta.

- La contaminación del aire por la quema de combustible a menudo incluye dióxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, mercurio y partículas.

Uso y descarga de agua:

- El agua utilizada para la producción de vapor o enfriamiento puede devolverse a temperaturas más cálidas en cuerpos de agua y puede contener contaminantes. Además, puede perderse algo de agua por evaporación.

Generación de residuos

- La quema de ciertos combustibles da como resultado desechos sólidos como la ceniza, que deben almacenarse y, finalmente, eliminarse de manera adecuada.
- Algunos desechos contienen sustancias peligrosas. Por ejemplo, la generación de energía nuclear produce residuos radiactivos, mientras que las cenizas de carbón pueden contener metales pesados como el mercurio.

Uso del suelo

- Las grandes centrales eléctricas requieren espacio para sus operaciones.
- La generación centralizada requiere líneas de transmisión, que también utilizan tierra y las cuales requieren el desmonte.

Además de estos impactos ambientales, gran parte de la energía primaria de los combustibles fósiles quemados en las centrales eléctricas se desperdicia durante la generación y la entrega a los usuarios finales.

Actualmente, la mayor parte de la producción energética se realiza en instalaciones centralizadas, pese a la baja calidad en el suministro, el alto nivel de emisiones y el consumo de recursos e impacto en la salud en las comunidades cercanas la generación centralizada es el esquema preponderante en la actualidad, de tal forma que en el sector residencial mexicano las viviendas se encuentran conectadas a la

red local de suministro eléctrico para satisfacer sus necesidades de potencia. El suministro de calor, para agua caliente de uso sanitario, se obtiene a través del uso de calentadores a gas, solares o eléctricos (Sánchez, 2012).

2.3. Generación Distribuida

La generación distribuida se define como el desarrollo de pequeñas fuentes de generación ubicadas cerca del centro de consumo, como los paneles solares y tecnologías de calor y potencia combinados. La generación distribuida puede servir para una sola estructura, como un hogar o negocio, o puede ser parte de una microrred. Cuando se conecta a las líneas de distribución de menor voltaje de la compañía eléctrica, la generación distribuida puede ayudar a respaldar la entrega de energía limpia y confiable a clientes adicionales y reducir las pérdidas de electricidad a lo largo de las líneas de transmisión y distribución.

En el sector residencial o industrial los sistemas de generación distribuida pueden incluir:

- Paneles solares fotovoltaicos
- Pequeños aerogeneradores
- Sistemas combinados de calor y potencia
- Hidroelectricidad
- Combustión de biomasa o cofiring
- Celdas de combustible quemadas por gas natural o biomasa

El esquema de generación distribuida puede darse en dos modalidades: mediante sistemas aislados en sitios remotos, donde aún no hay acceso al servicio convencional, y con sistemas interconectados a la red eléctrica, donde esta se encuentra disponible. La generación distribuida a pequeña escala suele estar conectada a la carga del usuario y únicamente vende el excedente de generación después del consumo propio. Debido a la proximidad con el centro de consumo,

elimina las pérdidas eléctricas, las altas inversiones, costo de mantenimiento y el impacto ambiental asociado con la extensión de redes de distribución y transmisión. Los principales esquemas de generación distribuida son la cogeneración, la trigeneración y la poligeneración.

2.3.1. Cogeneración

La cogeneración hace referencia a la producción simultánea de energía eléctrica y térmica a partir de un sólo combustible. Las tecnologías de cogeneración generalmente convierten alrededor de un 75% a 80% de la energía del combustible en energía útil, aunque algunas instalaciones más modernas pueden alcanzar rendimientos alrededor de un 90 % (Rosen y col., 2005). En la **Figura 3** se compara el proceso de generación convencional y el sistema de cogeneración, donde se muestran las ventajas, en términos de eficiencia de los sistemas en aplicaciones residenciales.

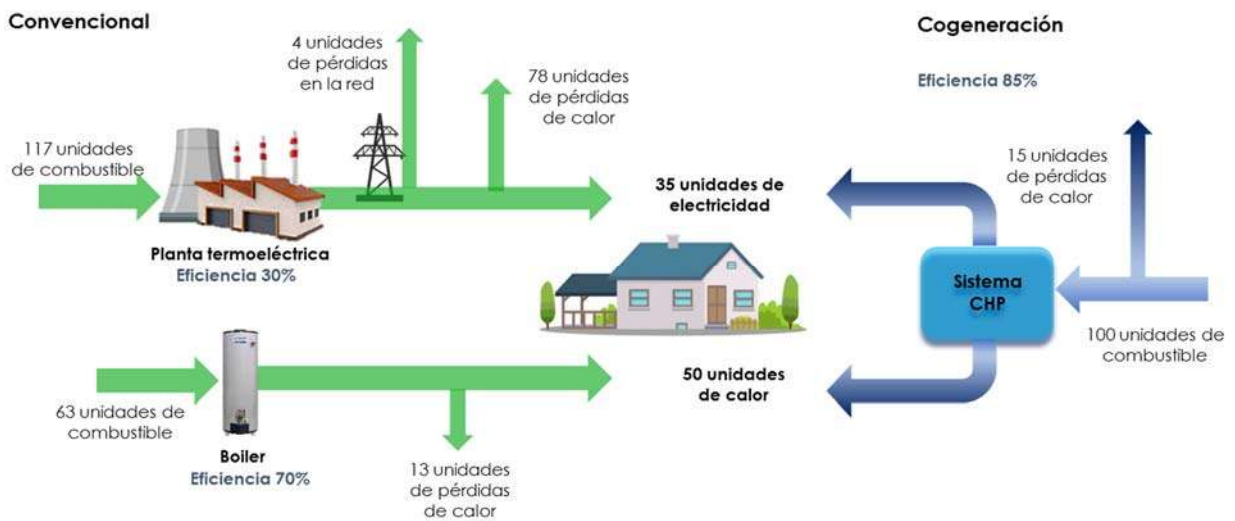


Figura 3 Comparación de eficiencia del proceso convencional y el sistema CHP.

2.3.2. Trigeneración

La trigeneración se puede definir como la producción combinada y simultánea de electricidad, calor y frío usando un sólo recurso de energía primaria (**Figura 4**), los esquemas de trigeneración alcanzan eficiencias de hasta 80% (Ebrahimi y Keshavarz, 2014). Los sistemas de trigeneración también pueden

definirse como una extensión en la producción de refrigeración, a partir de una tecnología de cogeneración (Chicco y Mancarella, 2009). Los sistemas de trigeneración engloban el uso de dos tipos de tecnologías: Cogeneración y refrigeración térmica. Con la primera es posible obtener electricidad teniendo como subproducto el calor y con la segunda, se obtiene refrigeración a partir del calor.

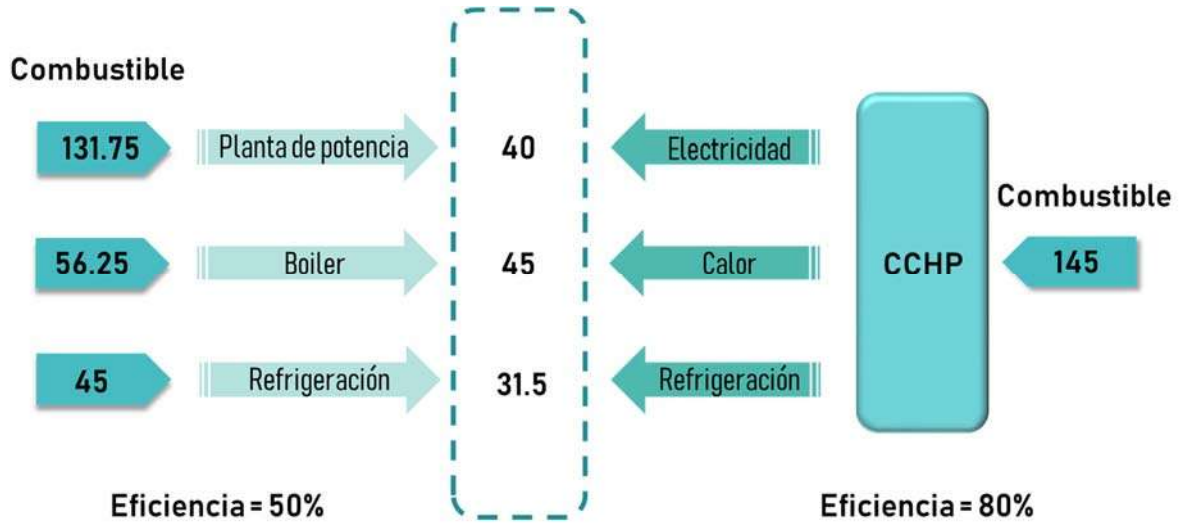


Figura 4 Comparación entre un sistema convencional y un sistema de Trigeneración.

2.3.3. Poligeneración

La poligeneración se refiere a la producción conjunta de dos o más servicios energéticos realizada de forma simultánea y buscando aprovechar al máximo el potencial termodinámico de los recursos consumidos.

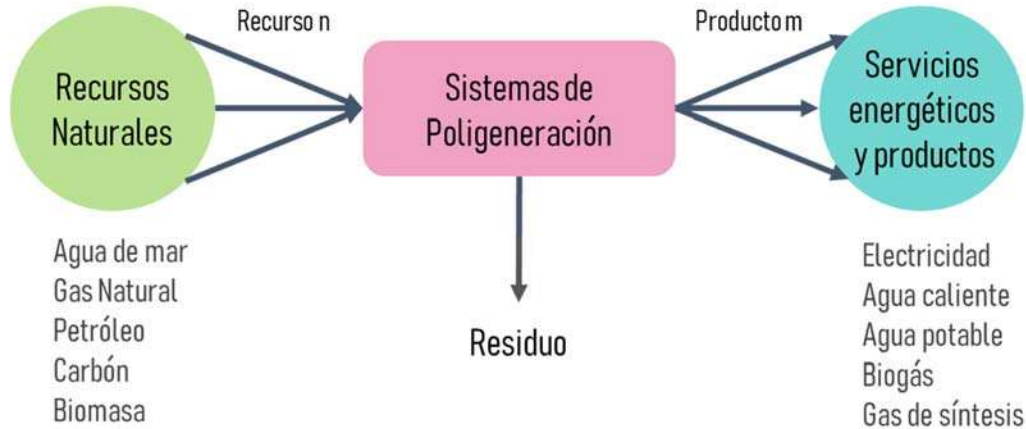


Figura 5 Interacciones de un sistema de Poligeneración.

La **Figura 5** muestra una representación de los sistemas de poligeneración que se caracterizan por ser siempre multiproducto, en ocasiones suelen ser multirecurso para evitar en lo posible la formación de residuos inútiles o inconvenientes. Algunos ejemplos de sistemas de poligeneración, son la cogeneración, la trigeneración o plantas de desalinización.

Mediante la integración de procesos se logra el diseño y mejora de los sistemas de producción efectuando el análisis termodinámico y económico desde los procesos individuales hasta sistemas completos enfatizando en el uso eficiente de los recursos consumidos.

2.4. Optimización

Optimización es el uso de métodos y técnicas específicas para determinar una solución eficiente de un problema en específico. La optimización es de primordial importancia, debido a que sirve como instrumento en la toma de decisiones. El principal objetivo de la optimización es el de seleccionar la mejor solución de un conjunto de soluciones posibles. El grado de sensibilidad de la solución es cuantificada por medio del uso de una función objetivo, la cual debe ser minimizada o maximizada. La función objetivo estará sujeta a cierto número de restricciones, las cuales pueden ser de igualdad y/o desigualdad.

2.4.1. Programación matemática

La programación matemática involucra la formulación, solución y análisis de problemas de optimización. El estudio y análisis de los problemas incluye herramientas gráficas, algebraicas y computacionales. Existen tres elementos fundamentales en los problemas de optimización y se definen a continuación:

Variables de decisión: El primer elemento clave en la formulación de problemas de optimización es la selección de las variables independientes que sean adecuadas para caracterizar los posibles diseños candidatos y las condiciones de funcionamiento del sistema. Como variables independientes se suelen elegir aquellas que tienen un impacto significativo sobre la función objetivo.

Restricciones: Una vez determinadas las variables independientes, el siguiente paso es establecer, mediante ecuaciones o inecuaciones las relaciones existentes entre las variables de decisión. Estas relaciones son debidas, entre otras razones, a limitaciones en el sistema, a leyes naturales o a limitaciones tecnológicas y son las llamadas restricciones del sistema. Podemos distinguir dos tipos de restricciones:

Restricciones de igualdad: Son ecuaciones entre las variables de la forma:

$$h(x) = h(x_1, \dots, x_n) = 0$$

donde $h(x) : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ es una función real de variables reales definida sobre un conjunto A de números reales.

Restricciones de desigualdad: Son inecuaciones entre las variables de la forma:

$$g(x) = g(x_1, \dots, x_n) \leq 0$$

donde $g(x) : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ es una función real de variables reales definida sobre un conjunto A de números reales.

Función objetivo: Finalmente, el último ingrediente de un problema de optimización es la función objetivo, también llamado índice de rendimiento o criterio de elección. Este es el elemento utilizado para decidir los valores adecuados de las variables de

decisión que resuelven el problema de optimización. La función objetivo permite determinar los mejores valores para las variables de decisión. Independientemente del criterio seleccionado, dentro del contexto de la optimización matemática el adjetivo “mejor” siempre indica los valores de las variables de decisión que producen el mínimo o máximo valor (según el criterio utilizado) de la función objetivo elegida. Algunos de estos criterios pueden ser por ejemplo de tipo económico (costo total, beneficio neto), de tipo tecnológico (energía mínima, máxima capacidad de carga, máxima tasa de producción) o de tipo temporal (tiempo de producción mínimo) entre otros.

El planteamiento general para resolver problemas de este tipo es el siguiente:

$$\textit{Función Objetivo: } \min \text{ o } \max f(x_1, \dots, x_n)$$

Sujeto a:

Restricciones de desigualdad:

$$g(x) = g(x_1, \dots, x_n) \leq 0$$

Restricciones de igualdad:

$$h(x) = h(x_1, \dots, x_n) = 0$$

En donde x_1, \dots, x_n representan variables de decisión.

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

3.1. Planteamiento del Problema

Este trabajo presenta un modelo de programación matemática para el diseño de un sistema de poligeneración en una comunidad aislada considerando el nexo Energía-Agua-Alimentos (**Figura 6**).



Figura 6 Representación del problema de estudio.

El problema consiste en determinar la configuración óptima y sostenible para satisfacer las demandas de energía, agua y alimentos de los habitantes. Para satisfacer las demandas de energía, se consideró la existencia de diferentes unidades de cogeneración y el uso de energías renovables, como colectores solares, aerogeneradores y paneles solares. La demanda de agua puede ser satisfecha por los sistemas de recolección de agua de lluvia y pozos. El agua residual generada en la comunidad se envió a las plantas de tratamiento de agua negra y agua gris. El agua gris tratada se reutilizó en jardinería, ganadería y agricultura. Se consideró la producción de diferentes tipos de cultivos y animales para satisfacer las demandas alimentarias de los habitantes. Los residuos sólidos

municipales generados se separaron en plástico, metal, papel, vidrio y materiales no reciclables; estos últimos son enviados a plantas de procesamiento como lo son peletización, incineración, gasificación, pirólisis y digestión anaeróbica para obtener pellets, vapor, gas natural y aceite de pirólisis que pueden ser utilizado como fuente de energía.

La función del objetivo económica considera la minimización del costo total anual, que incluye los costos operativos y de capital de cada proceso, así como las ganancias asociadas con la venta de animales, cultivos, aceite de pirólisis, gas natural, biogás, pellets y productos reciclables. Además, la función del objetivo ambiental implica la minimización del consumo de agua fresca y la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por las unidades de cogeneración y las plantas de procesamiento de residuos no reciclables. Para resolver este problema, en este trabajo se propone la superestructura que se muestra en la **Figura 7**.

3.2. Superestructura

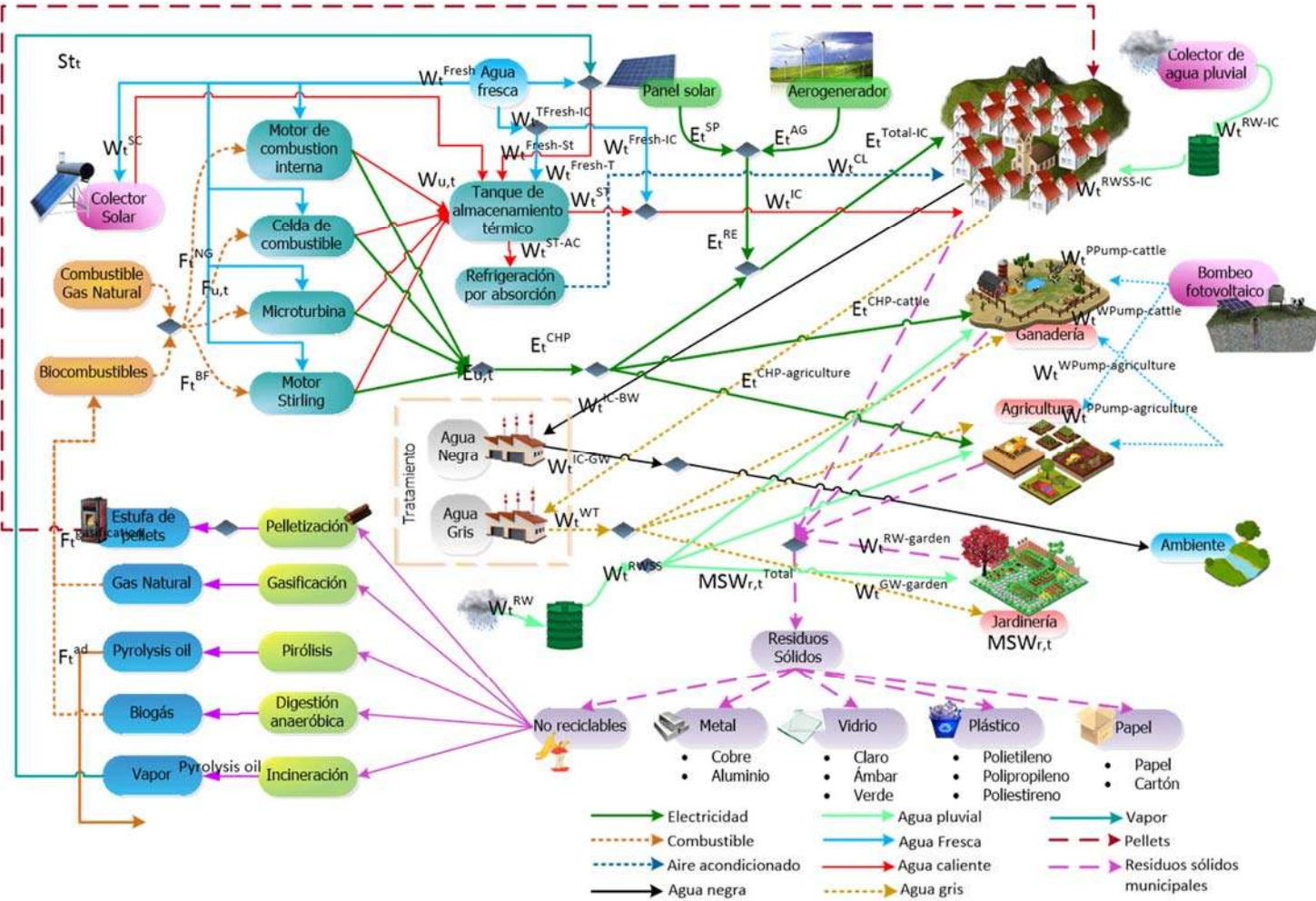


Figura 7 Superestructura general

3.3. Modelo Matemático

- **Unidades CHP**

Las unidades están representadas por el conjunto u , el cual se compone del motor de combustión interna, celda de combustible, microturbina y motor Stirling. Los parámetros más importantes en la operación de las unidades CHP son las eficiencias térmicas ($\eta_{u,t}^Q$) y eléctrica ($\eta_{u,t}^E$), las cuales indican la relación entre los productos, electricidad ($E_{u,t}$) o calor ($W_{u,t}$) y los requerimientos de combustible ($F_{u,t}$):

$$E_{u,t} = \eta_{u,t}^E \cdot F_{u,t}, \quad \forall t, \forall u \quad (1)$$

$$W_{u,t} = \eta_{u,t}^Q \cdot F_{u,t}, \quad \forall t, \forall u \quad (2)$$

El dimensionamiento de las unidades está determinado por la capacidad más grande disponible en el mercado ($Cap_u^{CHP-MAX}$) y la carga más alta requerida para la operación ($E_{u,t}$):

$$Cap_u^{CHP} \geq E_{u,t}, \quad \forall u, \forall t \quad (3)$$

$$Cap_u^{CHP} \leq Cap_u^{CHP-MAX} \cdot y_u, \quad \forall u \quad (4)$$

- **Sistema de refrigeración por absorción**

Las demandas de agua fría para el sistema de aire acondicionado (W_t^{CL}) se satisfacen mediante el sistema de refrigeración por absorción y se determinan por la siguiente expresión:

$$W_t^{CL} = \alpha^{AC} \cdot W_t^{ST-AC}, \quad \forall t \quad (5)$$

La capacidad del sistema de refrigeración por absorción (Cap^{AC}) debe ser más grande que la refrigeración requerida en la comunidad aislada (W_t^{CL}):

$$Cap^{AC} \geq W_t^{CL}, \quad \forall t \quad (6)$$

El dimensionamiento de la unidad de refrigeración está determinado por el máximo dimensionamiento disponible (Cap^{AC-MAX}):

$$Cap^{AC} \leq Cap^{AC-MAX} \cdot y^{AC} \quad (7)$$

- **Colector Solar**

El colector solar tiene la función de ayudar a satisfacer las demandas de energía térmica. El calor proporcionado por el colector solar está en función del factor de radiación solar (α_t) y el tamaño del colector solar (A^{SC}):

$$Q_t^{SC} = \alpha_t \cdot A^{SC}, \quad \forall t \quad (8)$$

$$W_t^{SC} = \frac{Q_t^{SC}}{C_p \cdot \Delta T}, \quad \forall t \quad (9)$$

El dimensionamiento del colector solar está delimitado por el área disponible para su instalación (A^{SC-MAX}).

$$A^{SC} \leq A^{SC-MAX} \cdot y^{SC} \quad (10)$$

- **Sistema de almacenamiento térmico**

Los sistemas CHP cumplen con la función de generar energía eléctrica y térmica simultáneamente. Sin embargo, las demandas de energía eléctrica y térmica tienen desfases entre sí, por lo cual se utiliza un sistema de almacenamiento que permita sincronizar la operación de la unidad CHP. El balance de masa en torno al sistema de almacenamiento térmico se representa de la siguiente forma:

$$\rho^w (V_t^{ST} - V_{t-1}^{ST}) = \sum_u W_{u,t} + W_t^{SC} + W_t^{Fresh-St} + W_t^{Fresh-T} - W_t^{ST-AC} - W_t^{ST}, \quad \forall t \quad (11)$$

El nivel de agua almacenado en el periodo t es el resultado de la suma de agua almacenada en el periodo $t-1$ más el agua enviada al tanque por las diferentes unidades menos el agua enviada a la comunidad y al sistema de refrigeración por absorción.

El tamaño del tanque de almacenamiento térmico (Cap^{ST}) está determinado por el nivel máximo de agua caliente almacenada (V_t^{ST}) y por la capacidad máxima del tanque disponible en el mercado (Cap^{ST-MAX}).

$$Cap^{ST} \geq V_t^{ST}, \quad \forall t \quad (12)$$

$$Cap^{ST} \leq Cap^{ST-MAX} \cdot y^{ST} \quad (13)$$

- **Suministro de agua caliente a la comunidad**

El vapor generado en la planta de incineración es utilizado para calentar agua fresca ($W_t^{Fresh-St}$) que será enviada al tanque de almacenamiento térmico:

$$W_t^{Fresh-St} = \tau^{HW} \cdot St_t, \quad \forall t \quad (14)$$

El flujo de agua fresca que entra al tanque de almacenamiento térmico ($W_t^{Fresh-T}$) permitirá fijar la temperatura del mismo, esto se determinará multiplicando cada una de las corrientes de agua caliente que entran al tanque por un factor, de manera que se logre alcanzar una temperatura de 80°C en el tanque:

$$W_t^{Fresh-T} = \sum_u \lambda_u \cdot W_{u,t} + \lambda^{SC} \cdot W_t^{SC} + \lambda^{St} \cdot W_t^{Fresh-St}, \quad \forall t \quad (15)$$

Además, el agua que será enviada a la comunidad (W_t^{IC}) deberá tener una temperatura adecuada para su uso sanitario, lo cual será determinado por la cantidad de agua fresca que será suministrada ($W_t^{Fresh-IC}$) para alcanzar una temperatura de 40°C:

$$W_t^{Fresh-IC} = \lambda^{FreshIC} \cdot W_t^{ST}, \quad \forall t \quad (16)$$

$$W_t^{IC} = W_t^{Fresh-IC} + W_t^{ST}, \quad \forall t \quad (17)$$

Por lo tanto, el flujo de agua utilizado para regular la temperatura de suministro a la comunidad, así como al tanque se calcula de la siguiente manera:

$$W_t^{TFresh-IC} = W_t^{Fresh-T} + W_t^{Fresh-IC}, \quad \forall t \quad (18)$$

- **Balance de agua en la comunidad aislada**

Para satisfacer las necesidades de agua en la comunidad ($W_t^{Total-IC}$) se hace uso de agua proveniente del tanque de almacenamiento térmico (W_t^{IC}) más el agua del sistema de captación pluvial ($W_t^{RWSS-IC}$):

$$W_t^{Total-IC} = W_t^{IC} + W_t^{RWSS-IC}, \quad \forall t \quad (19)$$

- **Electricidad generada por las energías renovables**

La electricidad producida por las energías renovables (E_t^{RE}) está conformada por la cantidad de electricidad generada en los aerogeneradores (E_t^{AG}) y en los paneles solares (E_t^{SP}):

$$E_t^{RE} = E_t^{SP} + E_t^{AG}, \quad \forall t \quad (20)$$

La electricidad producida por el panel solar se determina multiplicando el área del panel solar por su eficiencia por el factor de radiación solar (h_t) por el coeficiente de desempeño (PR):

$$E_t^{SP} = A^{SP} \cdot \eta^{SP} \cdot h_t \cdot PR, \quad \forall t \quad (21)$$

El dimensionamiento del panel solar está delimitado por el área disponible para su instalación ($A^{\text{MAX-SP}}$).

$$A^{SP} \leq A^{\text{SP-MAX}} \cdot y^{SP} \quad (22)$$

La energía generada por el aerogenerador está en función de la velocidad del viento ($Speed_t$) y está determinada por:

$$E_t^{AG} = k \cdot CP^{\text{max}} \cdot \rho^{\text{air}} \cdot A^{\text{rotor}} \cdot Speed_t^3, \quad \forall t \quad (23)$$

Donde (k) es una constante de conversión, es el coeficiente de máxima potencia (CP^{max}) y (A^{rotor}) es el área del rotor.

La instalación de los aerogeneradores está limitada por el área máxima disponible para su instalación:

$$A^{\text{rotor}} \leq A^{\text{rotor-MAX}} \cdot y^{AG} \quad (24)$$

- **Electricidad producida en el sistema de cogeneración**

La electricidad producida por el sistema de cogeneración (E_t^{CHP}) es igual a la suma de la electricidad producida por cada una de las unidades del sistema de cogeneración:

$$E_t^{CHP} = \sum_u E_{u,t}, \quad \forall t \quad (25)$$

A su vez, la electricidad producida en el sistema de cogeneración es utilizada para satisfacer las demandas de la comunidad (E_t^{CHP-RE}), de la ganadería ($E_t^{\text{CHP-cattle}}$) y de la agricultura ($E_t^{\text{CHP-agriculture}}$):

$$E_t^{CHP} = E_t^{CHP-RE} + E_t^{\text{CHP-cattle}} + E_t^{\text{CHP-agriculture}}, \quad \forall t \quad (26)$$

Electricidad suministrada a la comunidad

La electricidad enviada a la comunidad ($E_t^{\text{Total-IC}}$) es igual a la suma de la electricidad producida por las energías renovables (E_t^{RE}) más la electricidad producida por las unidades del sistema de cogeneración ($E_t^{\text{CHP-RE}}$):

$$E_t^{\text{Total-IC}} = E_t^{\text{RE}} + E_t^{\text{CHP-RE}}, \quad \forall t \quad (27)$$

- **Sistema de captación de agua pluvial**

La cantidad de agua colectada en la comunidad aislada en un periodo de tiempo t es determinada multiplicando el área del colector de agua de lluvia de la comunidad aislada ($A^{\text{RW-IC}}$) por la precipitación en ese periodo (Pcp_t):

$$W_t^{\text{RW-IC}} = A^{\text{RW-IC}} \cdot Pcp_t, \quad \forall t \quad (28)$$

De la misma manera, la cantidad de agua en el colector que suministra agua para su uso en la ganadería, agricultura y jardinería se determina como:

$$W_t^{\text{RW}} = A^{\text{RW}} \cdot Pcp_t, \quad \forall t \quad (29)$$

La existencia de los colectores de agua de lluvia está en función del área de colección (A^{RW}) y está determinada por la variable binaria (y^{RW}), ($A^{\text{RW-MAX}}$) representa el área máxima disponible para la instalación del colector:

$$A^{\text{RW-IC}} \leq A^{\text{RW-IC-MAX}} \cdot y^{\text{RW-IC}} \quad (30)$$

$$A^{\text{RW}} \leq A^{\text{RW-MAX}} \cdot y^{\text{RW}} \quad (31)$$

- **Sistema de almacenamiento de agua pluvial**

La capacidad del sistema de almacenamiento de agua de lluvia (Cap^{RWSS}) debe ser mayor que la cantidad de agua almacenada en el periodo considerado (W_t^{RW}):

$$Cap^{\text{RWSS-IC}} \geq W_t^{\text{RW-IC}}, \quad \forall t \quad (32)$$

$$Cap^{\text{RWSS}} \geq W_t^{\text{RW}}, \quad \forall t \quad (33)$$

Para determinar la existencia del tanque de almacenamiento se hace uso de la variable binaria y^{RWSS} mediante la siguiente relación:

$$Cap^{RWSS-IC} \leq Cap^{RWSS-IC-MAX} \cdot y^{RWSS-IC} \quad (34)$$

$$Cap^{RWSS} \leq Cap^{RWSS-MAX} \cdot y^{RWSS} \quad (35)$$

Donde $Cap^{RWSS-MAX}$ representa la capacidad máxima del tanque de almacenamiento instalado.

- **Balance en el sistema de captación de agua pluvial**

El flujo de agua del sistema de captación pluvial enviado a la comunidad es igual al agua almacenada en el periodo anterior más el agua proveniente del sistema de captación pluvial:

$$W_t^{RWSS-IC} = W_{t-1}^{RWSS-IC} + W_t^{RW-IC}, \quad \forall t \quad (36)$$

El flujo de agua que sale del sistema de almacenamiento de agua pluvial es igual al agua almacenada en el periodo anterior más el agua proveniente del sistema de captación pluvial y es distribuido a la ganadería, la agricultura y la jardinería:

$$W_t^{RWSS} = W_{t-1}^{RWSS} + W_t^{RW} - W_t^{RW-cattle} - W_t^{RW-agriculture} - W_t^{RW-garden}, \quad \forall t \quad (37)$$

- **Balance de agua en la jardinería**

Para satisfacer las necesidades de agua en la jardinería, se hace uso de agua proveniente del sistema de captación pluvial y de la planta de tratamiento de agua gris:

$$W_t^{garden} = W_t^{RW-garden} + W_t^{GW-garden}, \quad \forall t \quad (38)$$

- **Balance de Agua fresca**

El agua fresca consumida (W_t^{Fresh}) se determina sumando el agua enviada al tanque de almacenamiento térmico, al colector solar, a la comunidad, al sistema de refrigeración por absorción y el agua enviada a cada una de las unidades del sistema de cogeneración. Además, se considera el agua extraída en los pozos de los sistemas de bombeo eólico y fotovoltaico:

$$W_t^{Fresh} = W_t^{Fresh-St} + W_t^{SC} + W_t^{TFresh-IC} + \sum_u W_{u,t} + \sum_{pw} W_{pw,t}^{PPump} + \sum_{ww} W_{ww,t}^{WPump}, \quad \forall t \quad (39)$$

- **Planta de Tratamiento de Agua Gris**

El agua gris generada en la comunidad aislada (W_t^{IC-GW}) es calculada haciendo uso de un factor de conversión de agua gris generada (α^{GW}) multiplicado por la cantidad de agua que entra a la comunidad:

$$W_t^{IC-GW} = \alpha^{GW} \cdot W_t^{Total-IC}, \quad \forall t \quad (40)$$

Por lo tanto, el agua tratada en la planta (W_t^{GWT}) es igual al agua que entra a la planta de tratamiento de agua multiplicado por el factor de la unidad de tratamiento (α^{GWT}):

$$W_t^{GWT} = \alpha^{GWT} \cdot W_t^{IC-GW}, \quad \forall t \quad (41)$$

El agua que sale de la planta de tratamiento (W_t^{GWT}) es enviada para su uso a la agricultura, la ganadería y jardinería:

$$W_t^{GWT} = W_t^{GW-cattle} + W_t^{GW-agriculture} + W_t^{GW-garden}, \quad \forall t \quad (42)$$

La capacidad de la unidad de tratamiento (Cap^{GW}) debe ser mayor que la cantidad de agua que entra a la unidad (W_t^{IC-GW}):

$$Cap^{GW} \geq W_t^{IC-GW}, \quad \forall t \quad (43)$$

Además, la capacidad de la unidad de tratamiento de agua gris debe ser menor que la máxima cantidad de agua que puede ser enviada al sistema (Cap^{GW-MAX}) multiplicado por su variable binaria (y^{GW}):

$$Cap^{GW} \leq Cap^{GW-MAX} \cdot y^{GW} \quad (44)$$

- **Planta de Tratamiento de Agua Negra**

El agua negra generada en la comunidad aislada (W_t^{IC-BW}) es igual al agua que entra a la comunidad multiplicada por un factor de conversión de agua negra generada (α^{BW}):

$$W_t^{IC-BW} = \alpha^{BW} \cdot W_t^{Total-IC}, \quad \forall t \quad (45)$$

El agua tratada en la planta (W_t^{BWT}) es calculada como el agua que entra a la planta de tratamiento por el factor asociado a la unidad de tratamiento (α^{BWT}):

$$W_t^{BWT} = \alpha^{BWT} \cdot W_t^{IC-BW}, \quad \forall t \quad (46)$$

La capacidad de la unidad de tratamiento (Cap^{BW}) debe ser mayor que la cantidad de agua que entra a la unidad (W_t^{IC-BW}). Además, la capacidad de la unidad de tratamiento de agua negra debe ser menor que la cantidad máxima de agua que puede ser enviada al sistema (Cap^{BW-MAX}) multiplicado por su variable binaria (y^{BW}):

$$Cap^{BW} \geq W_t^{IC-BW}, \quad \forall t \quad (47)$$

$$Cap^{BW} \leq Cap^{BW-MAX} \cdot y^{BW} \quad (48)$$

- **Bombeo fotovoltaico**

La cantidad de agua bombeada mediante el sistema de bombeo fotovoltaico (W_t^{PPump}) puede ser distribuida ya sea a la agricultura o a la ganadería en los pozos (p_w) donde adecuado instalar un sistema de bombeo fotovoltaico:

$$\sum_{p_w} W_{p_w,t}^{PPump} = \sum_{p_w} W_{p_w,t}^{PPump-agriculture} + \sum_{p_w} W_{p_w,t}^{PPump-cattle}, \quad \forall t, \forall p_w \quad (49)$$

$$Cap_{p_w}^{PPP} \geq W_{p_w,t}^{PPump}, \quad \forall t, \forall p_w \quad (50)$$

$$Cap_{p_w}^{PP} \leq Cap^{PP-MAX} \cdot y_{p_w}^{PP}, \quad \forall p_w \quad (51)$$

- **Bombeo eólico**

La cantidad de agua bombeada mediante el sistema de bombeo eólico (W_t^{WPump}) permitirá satisfacer las demandas de agua en la agricultura y ganadería mediante su instalación en pozos ww donde es conveniente instalar este tipo de sistemas:

$$\sum_{ww} W_{ww,t}^{WPump} = \sum_{ww} W_{ww,t}^{WPump-agriculture} + \sum_{ww} W_{ww,t}^{WPump-cattle}, \quad \forall t, \forall ww \quad (52)$$

$$Cap_{ww}^{WP} \geq W_{ww,t}^{WPump}, \quad \forall t, \forall ww \quad (53)$$

$$Cap_{ww}^{WP} \leq Cap^{WP-MAX} \cdot y_{ww}^{WP}, \quad \forall ww \quad (54)$$

- **Agua requerida en la agricultura**

El agua requerida para las actividades agrícolas está determinada del agua necesaria para cada cultivo ($W_{c,t}^{crop}$):

$$(W_t^{GW-agriculture} + W_t^{RW-agriculture} + \sum_{pw} W_{pw,t}^{PPump-agriculture} + \sum_{ww} W_{ww,t}^{WPump-agriculture}) = \sum_c W_{c,t}^{crop}, \quad \forall t \quad (55)$$

El agua requerida para cada cultivo se calcula multiplicando la cantidad de cultivos producidos por área multiplicado por un factor de producción de cultivos (φ_c):

$$W_{c,t}^{crop} = crop_{c,t} \cdot \varphi_c, \quad \forall c, \forall t \quad (56)$$

La producción de cultivos es igual a los cultivos producidos por área multiplicado por el área de cultivo:

$$crop_{c,t} = c_{c,t} \cdot A_c, \quad \forall c, \forall t \quad (57)$$

Donde la producción de cada cultivo está limitada por la producción mínima y máxima las cuales dependen de la demanda de alimentos:

$$\theta_{c,t}^{C-MIN} \leq c_{c,t} \leq \theta_{c,t}^{C-MAX}, \quad \forall c, \forall t \quad (58)$$

- **Agua requerida en la Ganadería**

El agua requerida en la ganadería se conforma por el agua proveniente de la planta de tratamiento de agua gris, el agua proveniente del sistema de captación pluvial y el bombeo fotovoltaico y eólico:

$$(W_t^{GW-cattle} + W_t^{RW-cattle} + \sum_{pw} W_{pw,t}^{PPump-cattle} + \sum_{ww} W_{ww,t}^{WPump-cattle}) = \sum_a W_{a,t}^{cattle-req}, \quad \forall a, \forall t \quad (59)$$

El agua necesaria en la ganadería se calcula como el producto de un factor que representa el agua que requiere cada tipo de animal multiplicado por la cantidad de animales:

$$W_{a,t}^{cattle-req} = a_{a,t} \cdot \phi_a^{wreq}, \quad \forall a, \forall t \quad (60)$$

La producción de cada tipo de animales está determinada por la siguiente ecuación:

$$a_{a,t} = fooda_{a,t} \cdot \phi_a^{growth}, \quad \forall a, \forall t \quad (61)$$

Donde la producción de animales ($a_{a,t}$) está determinada por la cantidad de alimento que necesitan ($fooda_{a,t}$) multiplicado por un factor de crecimiento (ϕ_a^{growth}).

La cantidad de alimento requerida por cada animal está limitada por un mínimo y un máximo determinadas de acuerdo al peso de los animales:

$$fooda_{a,t}^{MIN} \leq fooda_{a,t} \leq fooda_{a,t}^{MAX} \quad (62)$$

- **Balance de residuos sólidos**

La cantidad de residuos sólidos generados de acuerdo a su tipo ($MSW_{r,t}^{Total}$) es igual a la suma de los residuos sólidos provenientes de la comunidad ($MSW_{r,t}^{IC}$), la ganadería ($MSW_{r,t}^{cattle}$), la agricultura ($MSW_{r,t}^{agriculture}$) y el jardín ($MSW_{r,t}^{garden}$):

$$MSW_{r,t}^{Total} = MSW_{r,t}^{IC} + MSW_{r,t}^{cattle} + MSW_{r,t}^{agriculture} + MSW_{r,t}^{garden}, \quad \forall r, \forall t \quad (63)$$

- **Distribución de residuos a las plantas de procesamiento**

Los residuos sólidos son clasificados de acuerdo a su tipo (r) en no reciclables, metales, vidrio, plástico y papel, donde los no reciclables son aquellos en los cuales $r = 1$, de manera que los residuos sólidos no reciclables ($MSW_{r=1,t}^{Total}$) son enviados a diferentes procesos como lo son las unidades de peletización, gasificación, pirólisis, incineración y digestión anaeróbica para obtener productos de valor agregado:

$$MSW_{r=1,t}^{Total} = MSW_t^{PEL} + MSW_t^{GAS} + MSW_t^{PYR} + MSW_t^{IN} + MSW_t^{AD}, \quad \forall t \quad (64)$$

Proceso de peletización

La cantidad de pellets producida (P_t^{PEL}) es igual al producto del factor de conversión del proceso de peletización (δ^{PEL}) por la cantidad de residuos sólidos que entran al proceso:

$$P_t^{PEL} = \delta^{PEL} \cdot MSW_t^{PEL}, \quad \forall t \quad (65)$$

La capacidad de la unidad de peletización (Cap^{PEL}) debe ser mayor que los residuos sólidos que será tratados y debe ser menor que la cantidad máxima de residuos que pueden entrar a la planta ($Cap^{PEL-MAX}$):

$$Cap^{PEL} \geq MSW_t^{PEL}, \quad \forall t \quad (66)$$

$$Cap^{PEL} \leq Cap^{PEL-MAX} \cdot y^{PEL} \quad (67)$$

Proceso de gasificación

La cantidad de gas natural producido en el proceso de gasificación ($F_t^{gasification}$) es igual al factor de conversión de gasificación (δ^{GAS}) por la cantidad de residuos sólidos que entran al proceso:

$$F_t^{gasification} = \delta^{GAS} \cdot MSW_t^{GAS}, \quad \forall t \quad (68)$$

La capacidad del gasificador (Cap^{GAS}) debe ser mayor que los residuos sólidos que serán tratados para su conversión a gas natural y debe ser menor que la cantidad máxima de residuos que serán tratados ($Cap^{GAS-MAX}$) por su variable binaria:

$$Cap^{GAS} \geq MSW_t^{GAS}, \quad \forall t \quad (69)$$

$$Cap^{GAS} \leq Cap^{GAS-MAX} \cdot y^{GAS} \quad (70)$$

Proceso de pirólisis

La cantidad de aceite de pirólisis generado es igual al producto del factor de conversión del aceite de pirolisis (δ^{PYR}) por la cantidad de residuos sólidos que entran al proceso:

$$F_t^{pyrolysis-oil} = \delta^{PYR} \cdot MSW_t^{PYR}, \quad \forall t \quad (71)$$

La capacidad de la unidad de pirolisis (Cap^{PYR}) debe ser mayor a la cantidad de residuos sólidos que serán tratados y debe ser menor que la cantidad máxima de residuos que entran al proceso ($Cap^{PYR-MAX}$):

$$Cap^{PYR} \geq MSW_t^{PYR}, \quad \forall t \quad (72)$$

$$Cap^{PYR} \leq Cap^{PYR-MAX} \cdot y^{PYR} \quad (73)$$

Proceso de incineración

La cantidad de vapor generado en el proceso de incineración (St_t) es igual al producto del factor de conversión del proceso de incineración (δ^{IN}) por la cantidad de residuos sólidos que entran al proceso:

$$St_t = \delta^{IN} \cdot MSW_t^{IN}, \quad \forall t \quad (74)$$

La capacidad de la unidad de incineración debe ser mayor a la cantidad de residuos sólidos incinerados (Cap^{IN}) y debe ser menor que la cantidad máxima de residuos que entran al proceso (Cap^{IN-MAX}):

$$Cap^{IN} \geq MSW_t^{IN} \quad (75)$$

$$Cap^{IN} \leq Cap^{IN-MAX} \cdot y^{IN} \quad (76)$$

Proceso de digestión anaeróbica

La cantidad de biogás obtenido de la digestión anaeróbica (F_t^{ad}) es igual al producto del factor de conversión del proceso de digestión anaeróbica (δ^{AD}) por la cantidad de residuos sólidos que entran al proceso:

$$F_t^{ad} = \delta^{AD} \cdot MSW_t^{AD}, \quad \forall t \quad (77)$$

La capacidad del digestor anaeróbico (Cap^{AD}) debe ser mayor a la cantidad de residuos sólidos que son alimentados y debe ser menor que la cantidad máxima de residuos que son tratados (Cap^{AD-MAX})

$$Cap^{AD} \geq MSW_t^{AD}, \quad \forall t \quad (78)$$

$$Cap^{AD} \leq Cap^{AD-MAX} \cdot y^{AD} \quad (79)$$

- **Estufas de pellets**

La cantidad de pellets producida es enviada para satisfacer las demandas de la comunidad (P_t^{PEL}) es igual a la sumatoria de la cantidad de pellets que utiliza cada estufa de pellets en un tiempo dado (P_t^{IC}):

$$P_t^{PEL} = P_t^{IC}, \quad \forall t \quad (80)$$

Además, la capacidad de la estufa de pellets debe de ser mayor que la cantidad de pellets que puedan ser suministrados para su operación y a su vez debe de ser menor que la capacidad máxima disponible de las mismas:

$$Cap^{PS} \geq P_t^{IC}, \quad \forall t \quad (81)$$

$$Cap^{PS} \leq Cap^{MAX} \cdot y^{PS} \quad (82)$$

- **Producción de biocombustibles**

La cantidad de biocombustibles (F_t^{BF}) se compone de la cantidad de gas natural proveniente de la planta de gasificación ($F_t^{gasification}$) y de la planta de digestión anaeróbica (F_t^{ad}):

$$F_t^{BF} = F_t^{gasification} + F_t^{ad}, \quad \forall t \quad (83)$$

- **Balance de combustible**

El combustible que puede suministrarse a las unidades del sistema de cogeneración ($F_{u,t}$) es igual a la suma de la cantidad de biocombustible producido (F_t^{BF}) más la cantidad de gas natural disponible (F_t^{NG}):

$$\sum_u F_{u,t} = F_t^{BF} + F_t^{NG}, \quad \forall t \quad (84)$$

- **Costos de capital**

Los costos de capital están conformados por el costo fijo de cada una de las unidades (FCost) multiplicado por su variable binaria más el costo variable de cada unidad (VCost) por su capacidad:

Costo de capital de las unidades CHP

$$CapCost^{CHP} = \sum_u (FCost_u \cdot y_u + VCost_u \cdot Cap_u^{CHP}) \quad (85)$$

Costo de capital del sistema de refrigeración por absorción

$$CapCost^{AC} = FCost^{AC} \cdot y^{AC} + VCost^{AC} \cdot Cap^{AC} \quad (86)$$

Costo de capital del Colector Solar

$$CapCost^{SC} = FCost^{SC} \cdot y^{SC} + VCost^{SC} \cdot A^{SC} \quad (87)$$

Costo de capital del Panel Solar

$$CapCost^{SP} = FCost^{SP} \cdot y^{SP} + VCost^{SP} \cdot A^{SP} \quad (88)$$

Costo de capital del Aerogenerador

$$CapCost^{AG} = FCost^{AG} \cdot y^{AG} + VCost^{AG} \cdot A^{rotor} \quad (89)$$

Costo de capital de la planta de tratamiento de agua gris

$$CapCost^{GW} = FCost^{GW} \cdot y^{GW} + VCost^{GW} \cdot Cap^{GW} \quad (90)$$

Costo de capital de la planta de tratamiento de agua negra

$$CapCost^{BW} = FCost^{BW} \cdot y^{BW} + VCost^{BW} \cdot Cap^{BW} \quad (91)$$

Costo de capital del Sistema de captación de agua pluvial

$$CapCost^{RW} = FCost^{RW-IC} \cdot y^{RW-IC} + VCost^{RW-IC} \cdot A^{RW-IC} + Cap^{RWSS-IC} \cdot VCost^{RWSS-IC} \\ + FCost^{RW} \cdot y^{RW} + VCost^{RW} \cdot A^{RW} + Cap^{RWSS} \cdot VCost^{RWSS} \quad (92)$$

Costo de capital de la unidad de Gasificación

$$CapCost^{GAS} = FCost^{GAS} \cdot y^{GAS} + VCost^{GAS} \cdot Cap^{GAS} \quad (93)$$

Costo de capital de la unidad de Peletización

$$CapCost^{PEL} = FCost^{PEL} \cdot y^{PEL} + VCost^{PEL} \cdot Cap^{PEL} \quad (94)$$

Costo de capital de la unidad de Pirólisis

$$CapCost^{PYR} = FCost^{PYR} \cdot y^{PYR} + VCost^{PYR} \cdot Cap^{PYR} \quad (95)$$

Costo de capital de la unidad de Incineración

$$CapCost^{IN} = FCost^{IN} \cdot y^{IN} + VCost^{IN} \cdot Cap^{IN} \quad (96)$$

Costo de capital del Digestor anaeróbico

$$CapCost^{AD} = FCost^{AD} \cdot y^{AD} + VCost^{AD} \cdot Cap^{AD} \quad (97)$$

Costo de capital del Sistema de bombeo eólico

$$CapCost^{WP} = \sum_{ww} (FCost^{WP} \cdot y_{ww}^{WP} + VCost^{WP} \cdot Cap_{ww}^{WP}) \quad (98)$$

Costo de capital del Sistema de bombeo fotovoltaico

$$CapCost^{PP} = \sum_{pw} (FCost^{PP} \cdot y_{pw}^{PP} + VCost^{PP} \cdot Cap_{pw}^{PP}) \quad (99)$$

Costo de capital del Tanque de almacenamiento térmico

$$CapCost^{ST} = FCost^{ST} \cdot y^{ST} + VCost^{ST} \cdot Cap^{ST} \quad (100)$$

Costo de capital de las estufas de pellets

$$CapCost^{PS} = \sum_s (FCost^{PS} \cdot y_s^{PS} + VCost^{PS} \cdot Cap_s^{PS}) \quad (101)$$

Costo de Capital Total

El Costo de Capital Total es igual a la suma de los costos de capital de cada una de las unidades del proceso integrado:

$$\begin{aligned}
 TCapCost = & CapCost^{CHP} + CapCost^{AC} + CapCost^{SC} + CapCost^{SP} + CapCost^{AG} + \\
 & CapCost^{GW} + CapCost^{BW} + CapCost^{RW} + CapCost^{GAS} + CapCost^{PEL} + \\
 & CapCost^{PYR} + CapCost^{IN} + CapCost^{AD} + CapCost^{ST} + CapCost^{WP} + \\
 & CapCost^{PP} + CapCost^{PS}
 \end{aligned} \quad (102)$$

- **Costos de Operación**

Agua Fresca

El costo del agua fresca requerida en la comunidad ($OCost^{FreshW}$) es igual al costo unitario del agua fresca (UC^{FreshW}) multiplicado por el agua extraída del pozo:

$$OCost^{FreshW} = UC^{FreshW} \cdot \sum_t W_t^{Fresh} \quad (103)$$

Gas Natural

El costo del gas natural requerido ($OCost^{NG}$) es igual al costo del gas natural por la cantidad de gas natural (UC^{NG}) utilizado en cada una de las unidades CHP:

$$OCost^{NG} = UC^{NG} \cdot \sum_t F_t^{NG} \quad (104)$$

Costos de operación y mantenimiento

Los costos de operación y mantenimiento de cada una de las unidades son calculados en base a la producción que realizan.

Costo de operación y mantenimiento de las unidades CHP

$$OMCost^{CHP} = \sum_u (UCOM_u \cdot \sum_t E_{u,t}) \quad (105)$$

Costo de operación y mantenimiento del Colector solar

$$OMCost^{SC} = UCOM^{SC} \cdot \sum_t W_t^{SC} \quad (106)$$

Costo de operación y mantenimiento del Sistema de refrigeración por absorción

$$OMCost^{AC} = UCOM^{AC} \sum_t W_t^{CL} \quad (107)$$

Costo de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de agua negra

$$OMCost^{BWT} = UCOM^{BWT} \sum_t W_t^{IC-BW} \quad (108)$$

Costo de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de agua gris

$$OMCost^{GWT} = UCOM^{GWT} \sum_t W_t^{IC-GW} \quad (109)$$

Costo de operación y mantenimiento de las plantas de procesamiento de residuos sólidos

Los costos de operación de cada una de las plantas de procesamiento de residuos sólidos son calculados en función de los residuos sólidos que ingresan a las plantas multiplicados por su costo de operación.

$$OMCost^{GAS} = UCOM^{GAS} \sum_t MSW_t^{GAS} \quad (110)$$

$$OMCost^{PEL} = UCOM^{PEL} \sum_t MSW_t^{PEL} \quad (111)$$

$$OMCost^{PYR} = UCOM^{PYR} \sum_t MSW_t^{PYR} \quad (112)$$

$$OMCost^{IN} = UCOM^{IN} \sum_t MSW_t^{IN} \quad (113)$$

$$OMCost^{AD} = UCOM^{AD} \sum_t MSW_t^{AD} \quad (114)$$

Costo de operación y mantenimiento del sistema de bombeo eólico

$$OMCost^{WP} = \sum_{ww} (UCOM_{ww}^{WP} \cdot \sum_t W_{ww,t}^{WP}) \quad (115)$$

Costo de operación y mantenimiento del sistema de bombeo fotovoltaico

$$OMCost^{PP} = \sum_{pw} (UCOM_{pw}^{PP} \cdot \sum_t W_{pw,t}^{PP}) \quad (116)$$

Costo de operación total

El costo de operación total es igual al costo de operación de agua fresca más el costo de operación y mantenimiento de cada uno de los procesos involucrados:

$$\begin{aligned}
TOC_{cost} = & OC_{cost}^{FreshW} + OC_{cost}^{NG} + OMC_{cost}^{CHP} + OMC_{cost}^{SC} + OMC_{cost}^{AC} \\
& + OMC_{cost}^{BWT} + OMC_{cost}^{GWT} + OMC_{cost}^{WP} + OMC_{cost}^{PP} + \\
& OMC_{cost}^{GAS} + OMC_{cost}^{PEL} + OMC_{cost}^{PYR} + OMC_{cost}^{IN} + OMC_{cost}^{AD}
\end{aligned} \tag{117}$$

Costo Total Anual

El Costo Total Anual (TAC) es igual al costo de operación total (TOC_{cost}) más el costo de capital total ($TCostCap$):

$$TAC = TCapCost + TOC_{cost} \tag{118}$$

Venta de cultivos

La ganancia obtenida por la venta de cultivos ($SalesC$) depende de la cantidad de cultivos vendidos (C_c) y del costo de venta de los mismos (USC_c):

$$SalesC = \sum_c USC_c \cdot \sum_t C_{c,t}, \tag{119}$$

Venta de animales

La ganancia obtenida por la venta de animales se determina de la misma manera:

$$SalesA = \sum_a USC_a \cdot a_a, \tag{120}$$

Venta de Pellets

$$SalesPellets = USC^{PEL} \cdot \sum_t P_t^{PEL} \tag{121}$$

Venta de Pirólisis oil

$$SalesOil = USC^{PYR-OIL} \cdot \sum_t F_t^{pyrolysis-oil} \tag{122}$$

Venta de biocombustibles

$$SalesGas = USC^{GAS} \cdot \sum_t F_t^{gasification} \tag{123}$$

$$SalesAd = USC^{AD} \cdot \sum_t F_t^{ad} \tag{124}$$

Venta de residuos sólidos reciclables

$$SalesRP = \sum_t \sum_{r=2}^5 USC_r \cdot MSW_{r,t}^{Total}, \tag{125}$$

Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Las emisiones de gases de efecto invernadero se calculan multiplicando un factor de emisión (γ) asociado a cada planta de procesamiento por la cantidad de residuos sólidos manejados:

- **Unidades CHP**

$$GHGE^{CHP} = \gamma^{CHP} \cdot \sum_t F_{u,t} \quad (126)$$

- **Planta de Peletización**

$$GHGE^{PEL} = \gamma^{PEL} \cdot \sum_t MSW_t^{PEL} \quad (127)$$

- **Planta de Gasificación**

$$GHGE^{GAS} = \gamma^{GAS} \cdot \sum_t MSW_t^{GAS} \quad (128)$$

- **Planta de Pirólisis**

$$GHGE^{PYR} = \gamma^{PYR} \cdot \sum_t MSW_t^{PYR} \quad (129)$$

- **Planta de Digestión Anaeróbica**

$$GHGE^{AD} = \gamma^{AD} \cdot \sum_t MSW_t^{AD} \quad (130)$$

- **Planta de Incineración**

$$GHGE^{IN} = \gamma^{IN} \cdot \sum_t MSW_t^{IN} \quad (131)$$

Ganancias

Las ganancias obtenidas en el sistema (*Profit*) se calculan como la suma de las ventas por cultivos, animales, pellets, aceite de pirólisis, gas natural, biogás y residuos sólidos que pueden ser reciclados menos el costo total anual.

$$\begin{aligned} Profit = & SalesC + SalesA + SalesPel + SalesOil + SalesPyr \\ & + SalesGas + SalesAd + SalesRP - TAC, \end{aligned} \quad (132)$$

Funciones Objetivo

Costo

El costo del sistema se calcula como el negativo del valor calculado de las ganancias:

$$Cost = -Profit \quad (133)$$

Agua fresca consumida

El agua fresca consumida ($TotWFresh$) es igual al agua extraída del pozo para su uso en la comunidad:

$$TotWFresh = \sum_t W_t^{Fresh} \quad (134)$$

Emisiones de gases de efecto invernadero

Las emisiones de gases de efecto invernadero son calculadas en base a un factor de emisiones asociado al tipo de combustible multiplicado por la cantidad de combustible utilizada:

$$GHGE = GHGE^{CHP} + GHGE^{PEL} + GHGE^{GAS} + GHGE^{PYR} + GHGE^{AD} + GHGE^{IN} \quad (135)$$

El modelo generado corresponde a un problema multiobjetivo en el cual se propone minimizar en forma simultánea las funciones objetivo del costo total anual, consumo de agua y emisiones de gases de efecto invernadero.

$$OF = \{ \min Cost; \min TotWFresh; \min GHGE \} \quad (136)$$

3.4. Multistakeholder

El modelo propuesto corresponde a un problema de multiobjetivo, en el que se pretende minimizar simultáneamente tres funciones objetivo (consumo de agua fresca, emisiones de gases de efecto invernadero y costo total del sistema). Debido a que los objetivos evaluados están en conflicto, en este estudio se utiliza una estrategia de optimización que permite obtener una solución en la que los objetivos individuales se aproximan simultáneamente a sus límites inferiores, estos límites inferiores constituyen la solución óptima que se denomina Punto Utópico. Por otro lado, los límites superiores de los objetivos individuales corresponden al Punto Nadir, que es la peor solución del problema. Debido a que el Punto Utópico constituye una solución infactible, es necesario obtener la Solución Compromiso, que es la solución más cercana al Punto Utópico y es posible obtenerla minimizando simultáneamente las tres funciones objetivo evaluadas en este problema a través de la siguiente ecuación:

$$\min \left(\frac{Cost^{UB} - Cost}{Cost^{UB} - Cost^{LB}} + \frac{TotWFresh^{UB} - TotWFresh}{TotWFresh^{UB} - TotWFresh^{LB}} + \frac{GHGE^{UB} - GHGE}{GHGE^{UB} - GHGE^{LB}} \right) \quad (137)$$

Además, es posible evaluar diferentes soluciones factibles asignando prioridades a los objetivos, esto permite evaluar un objetivo influye sobre los demás y observar la superficie de respuesta de los objetivos estudiados. Para comparar las soluciones factibles con el Punto Nadir y el Punto Utópico, se considera el porcentaje de insatisfacción, que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\%Dissatisfaction = \left(\frac{1}{3} \right) \cdot \left(\frac{Cost - Cost^{LB}}{Cost^{UB} - Cost^{LB}} + \frac{TotWFresh - TotWFresh^{LB}}{TotWFresh^{UB} - TotWFresh^{LB}} + \frac{GHGE - GHGE^{LB}}{GHGE^{UB} - GHGE^{LB}} \right) \quad (138)$$

Esta ecuación indica que, si el porcentaje de insatisfacción es del 100%, la solución corresponde al Punto Nadir, de lo contrario, la insatisfacción del 0% corresponde al Punto Utópico. Por lo tanto, cuanto menor sea el valor de la insatisfacción, más cerca estará la solución del punto utópico.

CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO

Actualmente, el municipio de Cochoapa el Grande, ubicado en el estado de Guerrero en México ha sido catalogado como el lugar con mayor índice de pobreza y marginación del país (CONEVAL, 2016), esto es atribuido en mayor parte a su ubicación geográfica, la cual coincide con la Sierra Madre del Sur, ocasionando que el municipio sea un lugar de difícil acceso. Además, la distribución de sus localidades ha provocado que la dotación de agua de la red pública sea un verdadero problema y consecuentemente se tenga una carencia por acceso a la alimentación. Así mismo, existe una ausencia por el acceso a la energía eléctrica afectando la dotación de servicios que son esenciales para el desarrollo humano, social y económico. Cabe destacar que además de desempeñar un papel importante en el desarrollo humano, la disponibilidad de la energía es un requisito imprescindible para el desarrollo de la comunidad.

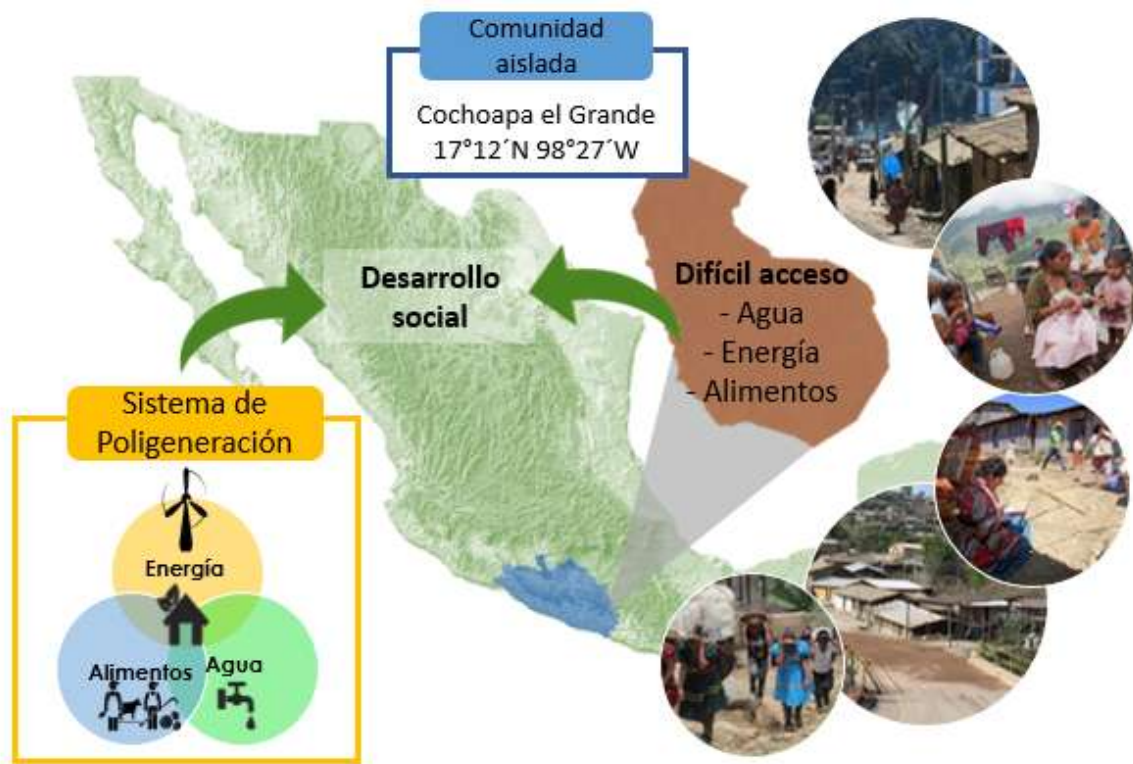


Figura 8 Representación del caso de estudio.

Ante esta problemática, surge la necesidad de crear un sistema capaz de integrar la energía-agua-alimentos de manera que se puedan satisfacer las necesidades de los habitantes de esta comunidad aislada. En este contexto, los sistemas de poligeneración son una opción atractiva que permitirá proporcionar energía eléctrica, térmica y de refrigeración a la comunidad, haciendo un manejo adecuado del agua, que a su vez facilitará el acceso y mantenimiento de los alimentos. (**Figura 8**). La comunidad consta de 18,778 habitantes y aproximadamente 3,350 hogares.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El modelo generado corresponde a un problema de Programación Mixta Entera Lineal (MILP) y fue codificada en la plataforma de modelado GAMS (Brooke y col., 2018). El modelo representa una formulación multiobjetivo, cuyo objetivo es minimizar el costo, el consumo de agua fresca y las emisiones de gases de efecto invernadero. El modelo matemático está conformado por 3,138 variables continuas, 21 variables binarias y 1,561 ecuaciones.

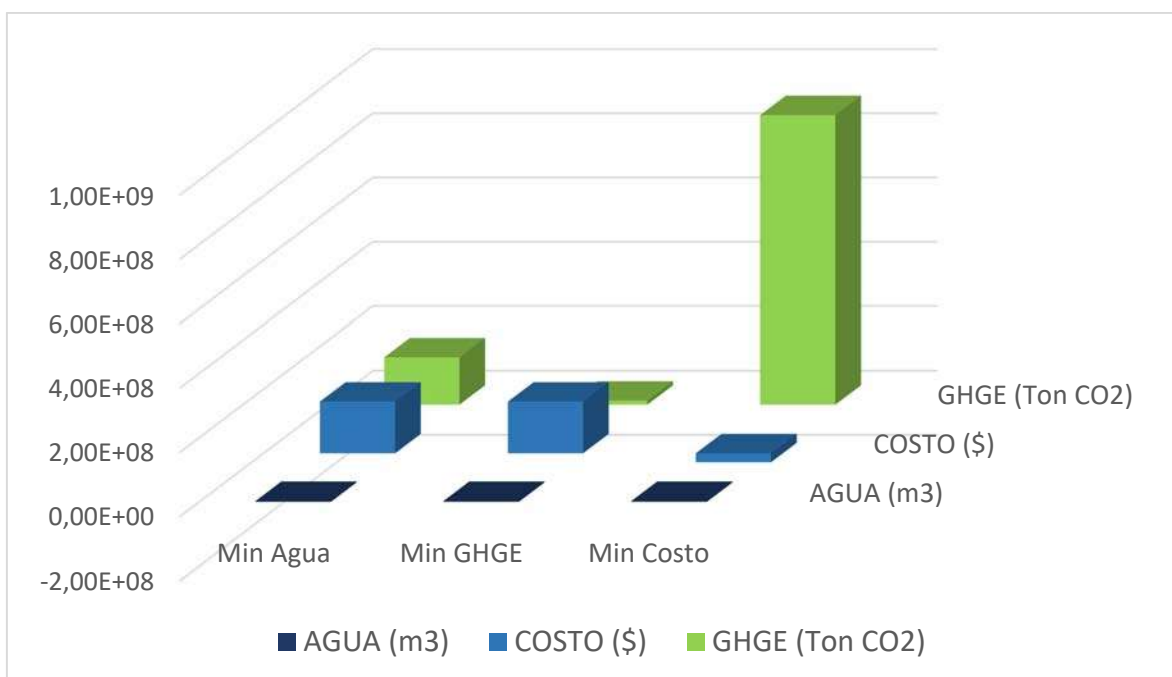


Figura 9 Solución de los escenarios Mínimo consumo de agua, Mínimo Costo y Mínimas emisiones.

Los resultados obtenidos al resolver los objetivos de manera independiente se muestran en la **Figura 9**. Los valores de las variables más importantes se presentan en la **Tabla 1**. La configuración obtenida para el escenario del mínimo consumo de agua se presenta en la **Figura 10**, el escenario de la mínima generación de emisiones de gases de efecto invernadero se muestra en la **Figura 11**, y la **Figura 12** presenta el escenario del mínimo costo. Ninguno de los escenarios propuestos selecciona la planta de digestión anaeróbica propuesta para el manejo de residuos sólidos, ni los aerogeneradores para la generación de energía eléctrica.

Tabla 1 Resultados de los flujos principales en los escenarios evaluados.

	Min Agua	Min GHGE	Min Costo
Cost (\$/año)	161,000,000	161,000,000	-27,903,000
Agua Fresca	3,060,000	3,088,500	3,178,700
GHGE (ton CO ₂ / año)	147,400,000	12,790,000	900,200,000
TAC (\$)	183,940,000	183,920,000	7,086,900
Sales (\$)	22,924,414	22,924,532	34,990,209
MSW^{AD} (kg msw/ año)	0	0	0
MSW^{GAS} (kg msw/ año)	0	0	84,633
MSW^{IN} (kg msw/ año)	6,762	0	37,660
MSW^{PEL} (kg msw/ año)	4,275	4,275	4,275
MSW^{PYR} (kg msw/ año)	115,531	122,293	0
E_u (kWh/ año)			
ICE	0	0	0
MT	2,140	0	3,778
FC	1,305	3,778	0
SE	306	0	0
E^{SP} (kWh/ año)	6,048	6,048	6,048
F^{BF} (m ³ / año)	0	0	12,695
F^{NG} (m ³ / año)	12,757	9,943	1,837
W^{IC} (m ³ / año)	85,383	113,496	70,195
W^{BWT} (m ³ / año)	23,367	23,367	23,367
W^{GWT} (m ³ / año)	102,266	102,266	102,266
$W^{GW-agriculture}$ (m ³ / año)	82,537	92,853	72,170
$W^{GW-cattle}$ (m ³ / año)	18,382	0	29,515
$W^{GW-garden}$ (m ³ / año)	1,348	4,000	581
W^{PPump} (m ³ / año)	1,467,800	1,500,000	1,493,620
$W^{PPump-agriculture}$ (m ³ / año)	1,465,990	1,500,000	1,493,620
$W^{PPump-cattle}$ (m ³ / año)	0	0	0
W^{WPump} (m ³ / año)	1,500,000	1,467,790	1,500,000
$W^{WPump-agriculture}$ (m ³ / año)	1,500,000	1,451,530	1,500,000
$W^{WPump-cattle}$ (m ³ / año)	0	16,242	0
W^{RW} (m ³ / año)	52,072	23,959	0

W^{RWSS} (m ³ / año)	75,422	28,372	633
$W^{RW-agriculture}$ (m ³ / año)	18,015	22,136	735
$W^{RW-cattle}$ (m ³ / año)	1,470	0	3,158
$W^{RW-garden}$ (m ³ / año)	36,152	33,500	36,919
W^{SC} (m ³ / año)	243	243	0

En los escenarios evaluados, el consumo de agua no varía significativamente entre las diferentes soluciones (**Figura 9**). En el escenario de mínimo consumo de agua, el sistema consume alrededor de 3,060,000 m³ de agua por año, que comparado con el escenario de mínimo costo, éste solo aumenta aproximadamente 4%. El uso de sistemas de recolección de agua de lluvia ayuda a reducir el consumo de agua fresca, lo cual se demuestra en los resultados obtenidos. Para el escenario del mínimo consumo de agua se proporcionan alrededor de 127,494 m³ de agua por año a través de recolectores de agua de lluvia, mientras que, para los escenarios de mínima generación de emisiones y mínimo costo, se proporcionan 52,331 m³ y 632 m³ de agua por año respectivamente, lo que ocasiona un mayor consumo de agua proveniente de los pozos. Esto se puede atribuir al hecho de que, en el caso de minimizar los costos, se evitan los costos de capital de los recolectores de agua de lluvia.

Las tecnologías de cogeneración seleccionadas para el caso de minimizar el consumo de agua están constituidas por una Microturbina, una Celda de combustible y un Motor Stirling, mientras que en el caso de minimizar las emisiones se propone una Celda de combustible, y en el caso de minimizar los costos, la tecnología seleccionada fue la Microturbina.

En el caso del mínimo consumo de agua, los requerimientos de combustible aumentan en un 28% comparado con el escenario de la mínima generación de emisiones. Por otro lado, en el caso de minimizar los costos, se requiere un 46% más de combustible, lo que provoca una mayor generación de gases de efecto invernadero.

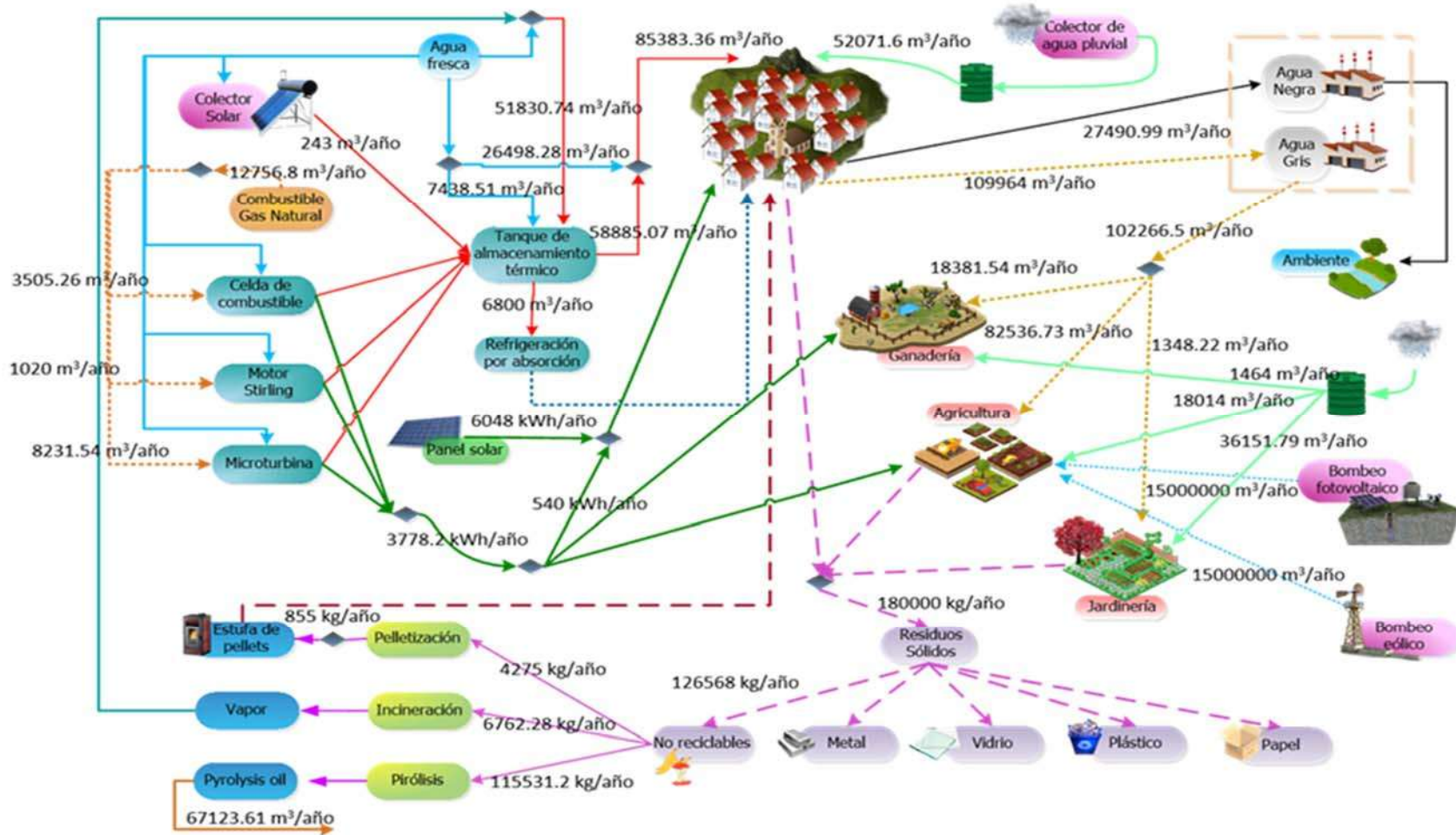


Figura 10 Solución correspondiente al escenario de Mínimo consumo de agua fresca.

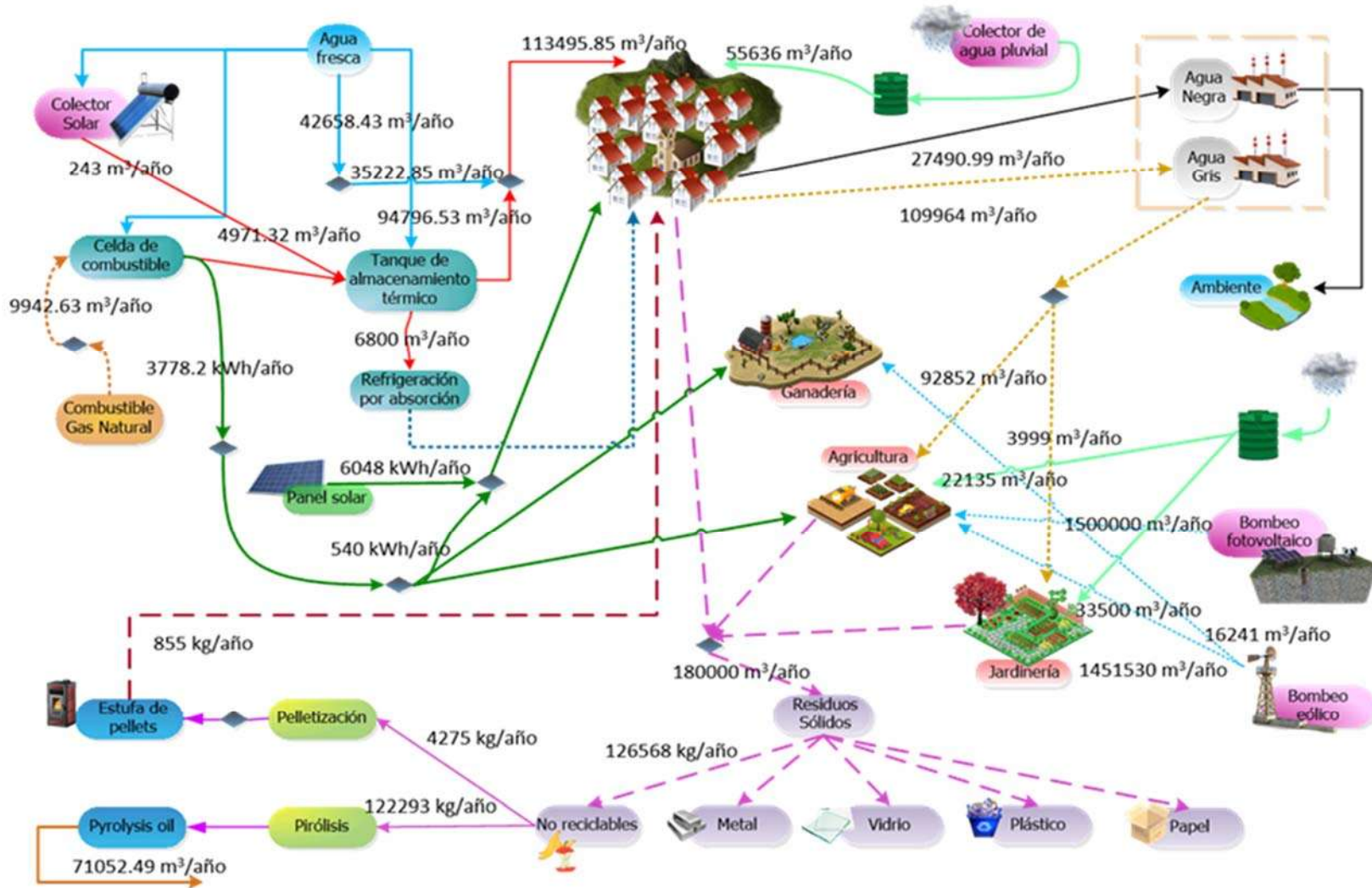


Figura 11 Solución correspondiente al escenario de Mínima generación de emisiones de gases de efecto invernadero.

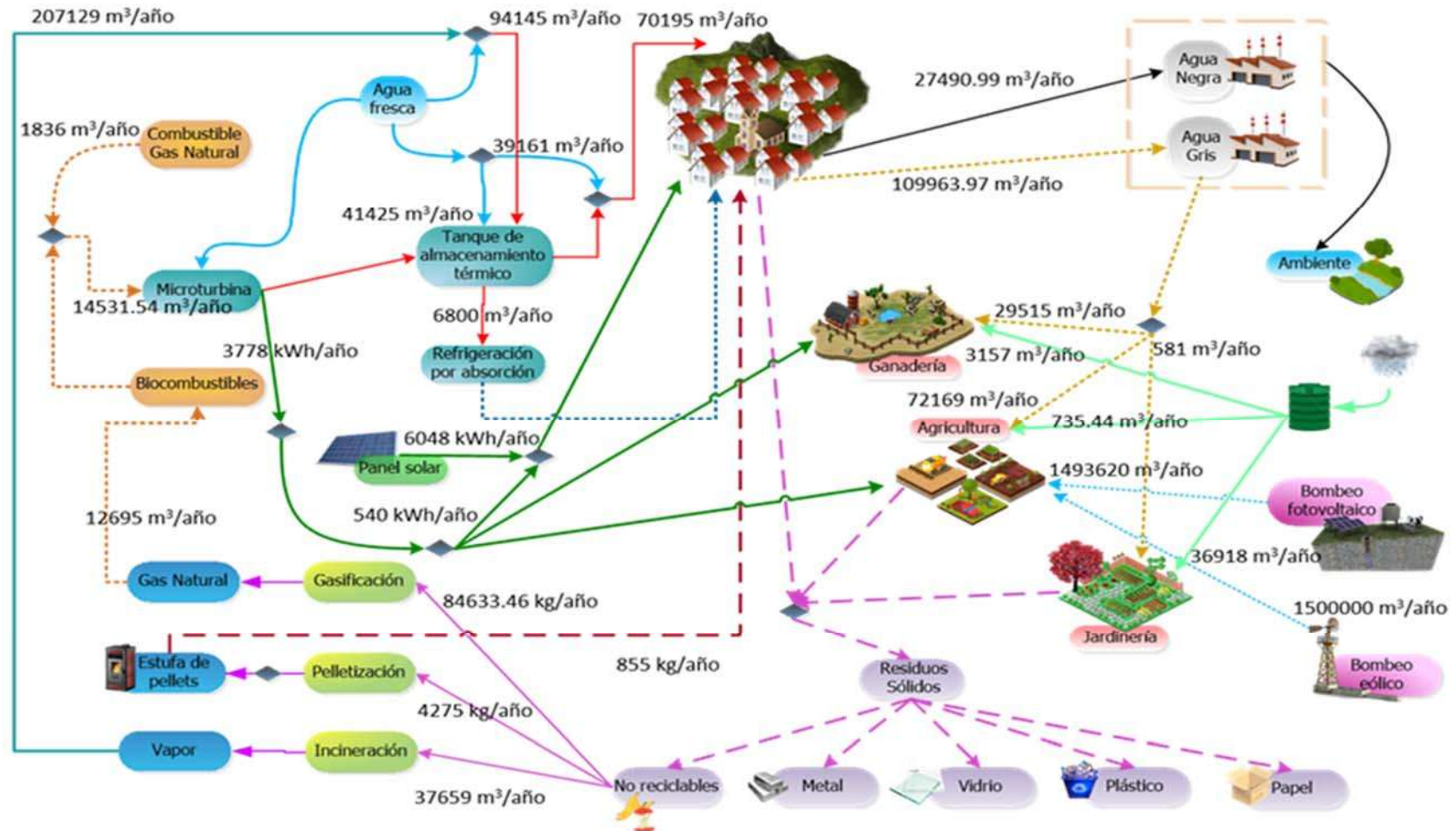


Figura 12 Solución correspondiente al escenario de Mínimo costo.

Para el manejo de residuos sólidos, las plantas de procesamiento seleccionadas en el escenario de minimización de emisiones son las plantas de peletización y pirólisis. En el caso del mínimo consumo de agua, se seleccionan las plantas de peletización, pirólisis e incineración, que representan un incremento del 1152% en el GHGE y, en el caso de minimizar los costos, se seleccionan las plantas de gasificación, incineración y peletización, que incrementan la generación de emisiones en un 7038%.

Debido a las condiciones de la comunidad y la falta de procesos para generar energía, se presentan costos muy altos, lo que conduce a un aumento exponencial de las emisiones de gases de efecto invernadero, así como a un aumento en el consumo del agua. Esto se puede atribuir al hecho de que, en el caso de minimizar los costos, se busca obtener la máxima producción de animales y cultivos para su venta (**Tabla 2**). De la misma manera, las plantas de gasificación y pirólisis se seleccionan para generar gas natural, reducir el costo correspondiente a la compra de gas natural y obtener ganancias de la venta de petróleo de pirólisis.

Tabla 2 Resultados de la producción de combustibles, animales y cultivos en los escenarios.

	Min Agua	Min GHGE	Min Costo
$F_{gasification}$ (m ³ /año)	0	0	12,695.02
$F_t^{pyrolysis-oil}$ (m ³ /año)	67,123.60	71,052.49	0
Animales (animales/año)			
Bovino	75.00	75.00	115.00
Porcino	79.00	79.00	119.00
Ovino	85.00	85.00	128.00
Caprino	384.00	384.00	576.00
Ave	1,368.00	1,368.00	2,052.00
Cultivo (kg/año)			
Nuez	360.00	360.00	2,340.00
Jícama	1,020.00	1,020.00	6,630.00
Maíz	580.80	580.80	3,775.20
Limón	1,680.00	1,680.00	10,920.00
Mango	1,020.00	1,020.00	6,630.00
Papaya	3,460.80	3,460.80	22,495.20
Sorgo	6,387.60	6,387.60	41,519.40

En el problema planteado los objetivos se contradicen entre sí, es por ello que en el presente trabajo se implementa la metodología multistakeholder con el fin de encontrar un equilibrio entre los objetivos y brindar soluciones factibles al problema. En la **Figura 13** se muestran las soluciones de los objetivos individuales, la solución compromiso y las soluciones factibles originadas. El Punto Utópico fue constituido con los límites inferiores de cada uno de los objetivos y el Punto Nadir con los límites superiores de los objetivos estudiados.

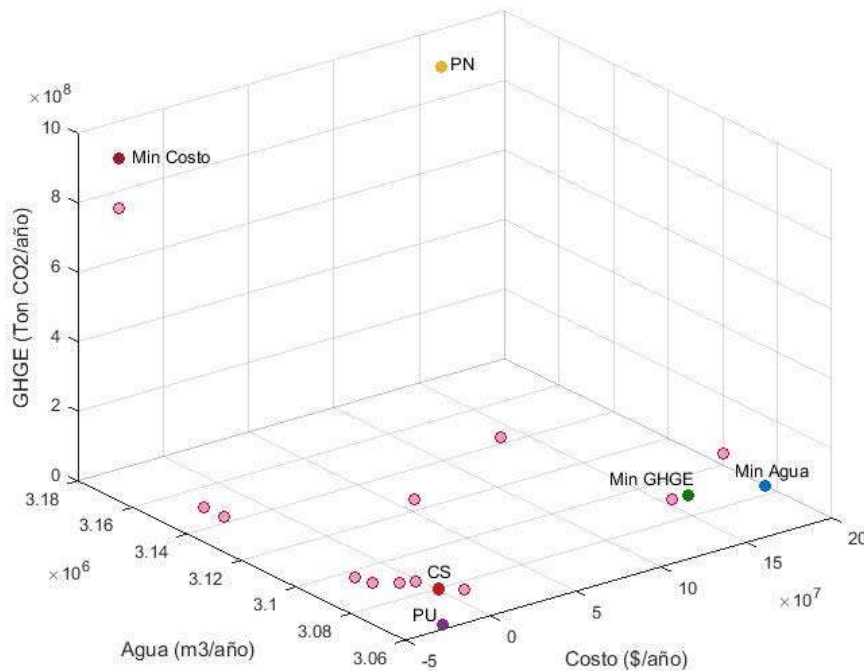


Figura 13 Representación de la solución compromiso (CS), Punto Utópico (PU), Punto Nadir (PN), y soluciones factibles.

La solución compromiso fue obtenida al minimizar simultáneamente los tres objetivos bajo estudio. Como se puede observar en la **Figura 13**, la solución compromiso se encuentra muy cerca del punto utópico por lo que representa una muy buena solución ya que los tres objetivos se encuentran muy cerca de su mínimo. En la **Figura 14** se presenta la superestructura correspondiente a la Solución Compromiso, puede observarse que la tecnología seleccionada para la

generación de electricidad fue la Celda de Combustible, además el Panel Solar es seleccionado para cumplir con la demanda energética. Para satisfacer la demanda de agua se hace uso de los colectores de agua pluvial y las plantas de procesamiento de residuos sólidos seleccionadas fueron la Peletización, Incineración y Pirólisis.

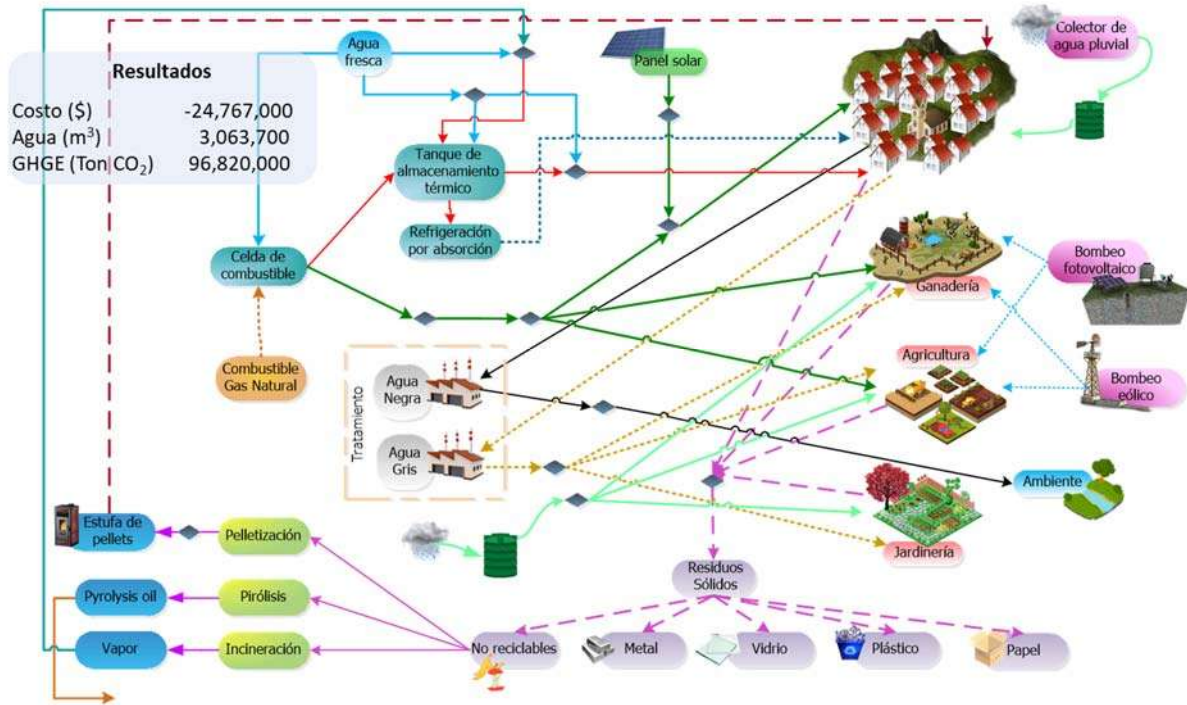


Figura 14 Solución correspondiente a la Solución Compromiso.

Para generar las soluciones factibles y aplicar la metodología multistakeholder, se asignó un peso a cada uno de los objetivos de manera aleatoria, estos valores fueron generados en el software Matlab a través de la función *Latin Hipercube*. Posterior a esto fue posible obtener soluciones aplicando la metodología multistakeholder y se realizó un análisis de insatisfacción en cada una de las soluciones factibles. La insatisfacción de cada una de las funciones objetivo, así como la insatisfacción total para cada uno de los escenarios se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 3 Porcentaje de insatisfacción para cada uno de las soluciones factibles.

Caso	Pesos			Objetivos			Contribución				% Insatisfacciones			% Ins
	COSTO (\$U.S./año)	AGUA (m ³ / año)	GHGE (Ton CO ₂ / año)	COSTO (\$U.S./ año)	AGUA (m ³ /año)	GHGE (Ton CO ₂ /año)	COSTO	AGUA	GHGE	FS	COSTO	AGUA	GHGE	
Utópico				-27,903,000	3,060,000	12,790,000					0.00	0.00	0.00	0.00
Nadir				161,000,000	3,178,700	900,200,000					1.00	1.00	1.00	100.00
1	0.2646	0.4427	0.2927	-16,770,000	3,060,600	96,820,000	0.9411	0.9949	0.9053	0.9471	0.06	0.01	0.09	5.29
2	0.3213	0.5278	0.1509	-15,760,000	3,060,300	96,820,000	0.9357	0.9975	0.9053	0.9462	0.06	0.00	0.09	5.38
3	0.4375	0.1831	0.3794	-24,650,000	3,063,700	96,820,000	0.9828	0.9688	0.9053	0.9523	0.02	0.03	0.09	4.77
4	0.4030	0.2640	0.3330	-24,660,000	3,063,700	96,820,000	0.9828	0.9688	0.9053	0.9523	0.02	0.03	0.09	4.77
5	0.7135	0.2089	0.0776	-24,830,000	3,063,800	96,820,000	0.9837	0.9680	0.9053	0.9523	0.02	0.03	0.09	4.77
6	0.1542	0.0017	0.8441	-27,110,000	3,148,200	12,790,000	0.9958	0.2570	1.0000	0.7509	0.00	0.74	0.00	24.91
7	0.2647	0.2529	0.4825	-24,770,000	3,063,700	96,820,000	0.9834	0.9688	0.9053	0.9525	0.02	0.03	0.09	4.75
8	0.4164	0.3591	0.2245	-24,500,000	3,063,700	97,410,000	0.9820	0.9688	0.9046	0.9518	0.02	0.03	0.10	4.82
9	0.4056	0.3629	0.2315	-24,500,000	3,063,700	97,410,000	0.9820	0.9688	0.9046	0.9518	0.02	0.03	0.10	4.82
10	0.0446	0.6002	0.3552	-14,950,000	3,060,000	96,670,000	0.9314	1.0000	0.9055	0.9456	0.07	0.00	0.09	5.44
11	10	0	0	-27,800,000	3,178,700	757,600,000	0.9995	0.0000	0.1607	0.3867	0.00	1.00	0.84	61.33
12	0	10	0	136,160,000	3,060,000	275,200,000	0.1315	1.0000	0.7043	0.6119	0.87	0.00	0.30	38.81
13	0	0	10	135,950,000	3,141,200	12,800,000	0.1326	0.3159	1.0000	0.4828	0.87	0.68	0.00	51.72
14	4	3	3	-24,770,000	3,063,700	96,820,000	0.9834	0.9688	0.9053	0.9525	0.02	0.03	0.09	4.75
15	3	4	3	-24,770,000	3,063,700	96,820,000	0.9834	0.9688	0.9053	0.9525	0.02	0.03	0.09	4.75
16	3	3	4	-24,770,000	3,063,700	96,820,000	0.9834	0.9688	0.9053	0.9525	0.02	0.03	0.09	4.75
17	2	7	1	-15,080,000	3,060,000	96,820,000	0.9321	1.0000	0.9053	0.9458	0.07	0.00	0.09	5.42
18	1	2	7	-14,950,000	3,084,100	21,580,000	0.9314	0.7970	0.9901	0.9062	0.07	0.20	0.01	9.38
19	7	1	2	-26,990,000	3,070,400	96,820,000	0.9952	0.9124	0.9053	0.9376	0.00	0.09	0.09	6.24

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

20	6	2	2	-24,820,000	3,063,800	96,820,000	0.9837	0.9680	0.9053	0.9523	0.02	0.03	0.09	4.77
21	2	6	2	-15,080,000	3,060,000	96,820,000	0.9321	1.0000	0.9053	0.9458	0.07	0.00	0.09	5.42
22	2	2	6	-24,770,000	3,087,800	21,580,000	0.9834	0.7658	0.9901	0.9131	0.02	0.23	0.01	8.69
23	8	1	1	-26,990,000	3,070,400	96,820,000	0.9952	0.9124	0.9053	0.9376	0.00	0.09	0.09	6.24
24	1	8	1	-15,080,000	3,060,000	96,820,000	0.9321	1.0000	0.9053	0.9458	0.07	0.00	0.09	5.42
25	1	1	8	-24,660,000	3,094,200	12,790,000	0.9828	0.7119	1.0000	0.8982	0.02	0.29	0.00	10.18
26	5	3	2	-24,770,000	3,063,700	96,820,000	0.9834	0.9688	0.9053	0.9525	0.02	0.03	0.09	4.75
27	3	2	5	-24,770,000	3,087,800	21,580,000	0.9834	0.7658	0.9901	0.9131	0.02	0.23	0.01	8.69
28	2	5	3	-15,080,000	3,060,000	96,820,000	0.9321	1.0000	0.9053	0.9458	0.07	0.00	0.09	5.42

Los resultados obtenidos muestran que el porcentaje máximo de insatisfacción fue el caso 6 con un 24% de insatisfacción, en el que se le dio mayor peso al objetivo de las emisiones. Además, se generaron más casos asignando diferentes ponderaciones para los objetivos de 0 a 10. Se propuso asignar un valor de 10 a uno de los objetivos y 0 para los demás, estos casos corresponden a los casos 11, 12 y 13 de la **Tabla 3**, los resultados de la insatisfacción muestran que el mayor porcentaje de insatisfacción corresponde al Caso 1, en el que se asignó el peso de 10 para el objetivo costo. Sin embargo, los resultados para el resto de los casos en general muestran que en los casos donde el objetivo tiene un mayor peso en el objetivo de las emisiones se presentan un mayor porcentaje de insatisfacción. Además, es posible obtener mejores resultados en los casos en que las ponderaciones se distribuyen de forma similar entre los tres objetivos, como los casos 14, 15 y 16 con 4.75% de insatisfacción, que es el porcentaje más bajo de insatisfacción de todas las soluciones factibles generadas.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un modelo de optimización multiobjetivo para el diseño óptimo de un sistema de poligeneración aplicado en una comunidad aislada. El modelo propuesto es capaz de determinar la configuración óptima de las tecnologías que satisfacen las demandas de agua, energía y alimentos de la comunidad, teniendo en cuenta objetivos económicos y ambientales. Se evaluaron los escenarios para el mínimo costo, el mínimo consumo de agua fresca y la mínima generación de emisiones de gases de efecto invernadero. Se presenta el enfoque multistakeholder donde se obtuvieron soluciones factibles que se encuentran entre los tres objetivos planteados, además mediante esta estrategia es posible encontrar la solución compromiso que es el punto donde los objetivos se minimizan simultáneamente. Como caso de estudio, se consideró la comunidad de Cochoapa el Grande, que es la comunidad con el índice de desarrollo humano más bajo de México. Se generaron diferentes soluciones factibles y se evaluó el porcentaje de insatisfacción de cada una. Los resultados muestran que la solución de compromiso está muy cerca del Punto Utópico, lo que indica que es posible obtener una solución que satisfaga casi por completo el mínimo de los objetivos. Es importante considerar que las soluciones factibles que fueron generadas cuando se asignó un mayor peso al objetivo de las emisiones presentan un porcentaje de insatisfacción mayor. Por otro lado, el menor porcentaje de insatisfacción corresponde a los casos en que las prioridades se distribuyen entre los tres objetivos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahadi, A., Kang, S. K., Lee, J. H. (2016).** A novel approach for optimal combinations of wind, PV, and energy storage system in diesel-free isolated communities. *Appl. Energy*, 170, 101-115.
- Arena, U. (2012).** Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Manage.*, 32(4), 625-639.
- Arredondo-Ramírez, K., Rubio-Castro, E., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., El-Halwagi, M. M. (2015).** Optimal design of agricultural water systems with multiperiod collection, storage, and distribution. *Agricultural Water Management*, 152, 161-172.
- Bala, B. K., Siddique, S. A. (2009).** Optimal design of a PV-diesel hybrid system for electrification of an isolated island-Sandwip in Bangladesh using genetic algorithm. *Energy for Sustainable Development*, 13(3), 137-142.
- Barbieri, E. S., Spina, P. R., Venturini, M. (2012).** Analysis of innovative micro-CHP systems to meet household energy demands. *App. Energy*, 97, 723-733.
- Biggs, E. M., Boruff, B., Bruce, E., Duncan, J. M. A., Haworth, B. J., Duce, S., Pauli, N. (2014).** Environmental Livelihood Security in South-East Asia and Oceania: a nexus-livelihoods approach for spatially assessing change. IWMI-CGIAR White Paper, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka. Online at: <
<http://www.iwmi.cgiar.org/publications/other-publication-types/environmental-livelihood-security-south-east-asia-oceania/>>
(accessed 8 July 2017)
- Biggs, E. M., Bruce, E., Boruff, B., Duncan, J. M., Horsley, J., Pauli, N., Haworth, B. (2015).** Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods. *Environ. Science and Policy*, 54, 389-397.

- Blok, K., Turkenburg, W. C. (1994).** CO₂ emission reduction by means of industrial CHP in the Netherlands. *Energy Convers. Manage.*, 35(4), 317-340.
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A. (2018).** GAMS. A user's guide. GAMS Development Corporation, Washington, DC (USA).
- Chicco, G., Mancarella, P. (2009).** Distributed multi-generation: a comprehensive view. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(3), 535-551.
- CONEVAL, 2016.** Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social.
https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza_2016.aspx
(accessed 10 February 2016).
- Couto, N. D., Silva, V. B., Rouboa, A. (2016).** Thermodynamic Evaluation of Portuguese municipal solid waste gasification. *J. Cleaner Prod.*, 139, 622-635.
- Diaz-Barriga-Fernandez, A. D., Santibañez-Aguilar, J. E., Radwan, N., Nápoles-Rivera, F., El-Halwagi, M. M., Ponce-Ortega, J. M. (2017).** Strategic planning for managing municipal solid wastes with consideration of multiple stakeholders. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 5(11), 10744-10762.
- Ebrahimi, M., Keshavarz, A. (2014).** Combined cooling, heating and power: Decision-making, design and optimization. Elsevier.
- Elango, D., Pulikesi, M., Baskaralingam, P., Ramamurthi, V., Sivanesan, S. (2007).** Production of biogas from municipal solid waste with domestic sewage. *J. Hazard. Mater.*, 141(1), 301-304.
- Fernández-González, J. M., Grindlay, A. L., Serrano-Bernardo, F., Rodríguez-Rojas, M. I., Zamorano, M. (2017).** Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities. *Waste Manage.*, 67, 360-374.

- Fubara, T. C., Cecelja, F., Yang, A. (2014).** Modelling and selection of micro-CHP systems for domestic energy supply: The dimension of network-wide primary energy consumption. *App. Energy*, 114, 327-334.
- Fuentes-Cortés, L. F., Ávila-Hernández, A., Serna-González, M., Ponce-Ortega, J. M. (2015).** Optimal design of CHP systems for housing complexes involving weather and electric market variations. *Appl. Therm. Eng.*, 90, 895-906.
- Fuentes-Cortés, L. F., Dowling, A. W., Rubio-Maya, C., Zavala, V. M., & Ponce-Ortega, J. M. (2016).** Integrated design and control of multigeneration systems for building complexes. *Energy*, 116, 1403-1416.
- Fuentes-Cortés, L. F., Ponce-Ortega, J. M. (2017a).** Optimal design of energy and water supply systems for low-income communities involving multiple-objectives. *Energy Convers. Manage.*, 151, 43-52.
- Fuentes-Cortés, L. F., Ponce-Ortega, J. M. (2017b).** Perspectives for implementing distributed generation in developing countries through modeling techniques. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 6(1), 1022-1038.
- Garcia, D., You, F. (2017).** Systems engineering opportunities for agricultural and organic waste management in the food–water–energy nexus. *Curr. Opin. Chem. Eng.*, 18, 23-31.
- González-Bravo, R., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., El-Halwagi, M. M. (2016).** Multiobjective optimization of dual-purpose power plants and water distribution networks. *Sustainable Chemistry and Engineering*, 4(12), 6852-6866.
- Gupta, H. K., Roy, S. (2006).** Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century. Elsevier. New York, USA.

- Hang, M. Y. L. P., Martinez-Hernandez, E., Leach, M., Yang, A. (2016).** Designing integrated local production systems: a study on the food-energy-water nexus. *J. Cleaner Prod.*, 135, 1065-1084.
- Herington, M. J., van de Fliert, E. (2017).** Positive deviance in theory and practice: a conceptual review. *Deviant Behavior*, 1-15.
- Kabalina, N., Costa, M., Yang, W., Martin, A., Santarelli, M. (2017).** Exergy analysis of a polygeneration-enabled district heating and cooling system based on gasification of refuse derived fuel. *J. Cleaner Prod.*, 141, 760-773.
- Karan, E., Asadi, S., Mohtar, R., Baawain, M. (2018).** Towards the optimization of sustainable food-energy-water systems: A stochastic approach. *J. Cleaner Prod.*, 171, 662-674.
- López-Díaz, D. C., Lira-Barragán, L. F., Rubio-Castro, E., Serna-González, M., El-Halwagi, M. M., Ponce-Ortega, J. M. (2018).** Optimization of biofuels production via a water–energy–food nexus framework. *Clean Technol. Environ. Policy*, 20, 1443-1466.
- López-Lezama, J. M., Padilha-Feltrin, A., Gallego-Pareja, L. A. (2009).** Ubicación óptima de generación distribuida en sistemas de energía eléctrica. *Ingeniería y Ciencia*, 5(9), 9-24.
- Lund, H. (2007).** Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy*, 32(6), 912-919.
- Macedo, W. N., Monteiro, L. G., Corgozinho, I. M., Macêdo, E. N., Rendeiro, G., Braga, W., Bacha, L. (2016).** Biomass based microturbine system for electricity generation for isolated communities in amazon region. *Renewable Energy*, 91, 323-333.
- Matsakas, L., Gao, Q., Jansson, S., Rova, U., Christakopoulos, P. (2017).** Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals. *Electron. J. Biotechnol.* , 26, 69-83.

- Martínez-Guido, S. I., González-Campos, J. B., El-Halwagi, M. M., Ponce-Ortega, J. M. (2017).** Sustainable Optimization of Food Networks in Disenfranchised Communities. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 5(10), 8895-8907.
- Mwanza, B. G., Mbohwa, C. (2017).** Drivers to sustainable plastic solid waste recycling: A review. *Procedia Manufacturing*, 8, 649-656.
- Núñez-López, J. M., Villicaña-García, E., Cansino-Loeza, B., Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M. (2018).** Involving acceptability in the optimal design of total integrated residential complexes involving the water-energy-waste nexus. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 6(6), 7390-7402.
- Pereira-Cardenal, S. J., Mo, B., Gjelsvik, A., Riegels, N. D., Arnbjerg-Nielsen, K., Bauer-Gottwein, P. (2016).** Joint optimization of regional water-power systems. *Advances in Water Resources*, 92, 200-207.
- Rasul, G., Sharma, B. (2016).** The nexus approach to water–energy–food security: an option for adaptation to climate change. *Climate Policy*, 16(6), 682-702.
- Rosen, M. A., Le, M. N., Dincer, I. (2005).** Efficiency analysis of a cogeneration and district energy system. *Applied Thermal Engineering*, 25(1), 147-159.
- Sánchez Peña L (2012).** Hogares y consumo energético en México. *Revista Digital Universitaria* 13 (10), 1–8.
- Sánchez, A. S., Torres, E. A., Kalid, R. A. (2015).** Renewable energy generation for the rural electrification of isolated communities in the Amazon Region. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 49, 278-290.
- Sandwell, P., Chan, N. L. A., Foster, S., Nagpal, D., Emmott, C. J., Candelise, C., Nelson, J. (2016).** Off-grid solar photovoltaic systems for rural electrification and emissions mitigation in India. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 156, 147-156.

- Santibañez-Aguilar, J. E., González-Campos, J. B., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., El-Halwagi, M. M. (2011).** Optimal planning of a biomass conversion system considering economic and environmental aspects. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 50(14), 8558-8570.
- Shezan, S. A., Julai, S., Kibria, M. A., Ullah, K. R., Saidur, R., Chong, W. T., Akikur, R. K. (2016).** Performance analysis of an off-grid wind-PV (photovoltaic)-diesel-battery hybrid energy system feasible for remote areas. *J. Cleaner Prod.*, 125, 121-132.
- Somorin, T. O., Adesola, S., Kolawole, A. (2017).** State-level assessment of the waste-to-energy potential (via incineration) of municipal solid wastes in Nigeria. *J. Cleaner Prod.*, 164, 804-815.
- Unterwurzacher, E. (1992).** CHP development: Impacts of energy markets and government policies. *Energy Policy*, 20(9), 893-900.
- Wa'el A, H., Memon, F. A., Savic, D. A. (2017).** An integrated model to evaluate water-energy-food nexus at a household scale. *Environ. Modell. Software*, 93, 366-380.
- Yang, Y., Zhang, Y., Omairey, E., Cai, J., Gu, F., Bridgwater, A. V. (2018).** Intermediate pyrolysis of organic fraction of municipal solid waste and rheological study of the pyrolysis oil for potential use as bio-bitumen. *J. Cleaner Prod.*, 187, 390-399.
- Zhang, X., Vesselinov, V. V. (2017).** Integrated modeling approach for optimal management of water, energy and food security nexus. *Adv. Water Resour.*, 101, 1-10.