

**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA**

**Diseño Óptimo de Suministro de Energía y Agua
Potable en una Comunidad Aislada de Bajos Recursos
por Métodos Multiobjetivo**

Tesis que para obtener el Título de

Ingeniero Químico

PRESENTA

Xaté Geraldine Sánchez Zarco

Asesor: Dr. José María Ponce Ortega

Morelia, Michoacán. Noviembre 2018.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis de diferentes métodos de optimización multiobjetivo para el diseño óptimo de un sistema integrado para satisfacer la necesidad de agua, energía y alimentos en una comunidad aislada. En el modelo matemático propuesto se incorporan tres objetivos fundamentales, los cuales son el beneficio económico, las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de agua fresca. El modelo matemático representa una propuesta para satisfacer las demandas de energía eléctrica por medio de unidades de cogeneración CHP como microturbina, motor de combustión interna, motor Stirling y celda de combustible, redes de distribución de agua, consumo de agua caliente, además de consumo de agua pluvial para áreas de agricultura, ganaderas, entre otros, así como tratamiento de aguas negras y grises, plantas de incineración, gasificación, digestión anaeróbica, producción de aceite de pirólisis y producción de gas natural. Se incorporan diversos métodos para resolver el problema de optimización multiobjetivo, y se aplica el modelo matemático propuesto a un caso de estudio de una de las comunidades más pobres de México. Los resultados muestran que es posible obtener soluciones atractivas que compensen los objetivos considerados.

Palabras clave: Optimización, integración de procesos, comunidades aisladas, simulación, multiobjetivos.

ABSTRACT

This Thesis presents an analysis of different multiobjective optimization methods for the optimal design of an integrated system to satisfy the need for water, energy and food in an isolated community. In the proposed mathematical model, three fundamental objectives are incorporated, which are the economic benefit, the emissions of greenhouse gases and the consumption of fresh water. The mathematical model represents a proposal to satisfy the demands of electrical energy by means of CHP cogeneration units such as microturbine, internal combustion engine, Stirling engine and fuel cell, water distribution networks, hot water consumption, as well as consumption of rainwater for agriculture, livestock, among others, as well as black and gray water treatment, incineration plants, gasification, anaerobic digestion, production of pyrolysis oil and production of natural gas. Various methods are incorporated to solve the multiobjective optimization problem, and the proposed mathematical model is applied to a case study of one of the poorest communities in Mexico. The results show that it is possible to obtain attractive solutions that tradeoff the considered objectives.

Keywords: Optimization, process integration, isolated communities, simulation, multiobjective problems.

Agradecimientos

A mi familia, amigos y compañeros por cada motivación y apoyo incondicional.

Al Dr. José María Ponce Ortega por la oportunidad de formar parte de su grupo de investigación y a la compañera Brenda Casino Loeza por la colaboración en el modelo matemático.

Se agradece el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

GLOSARIO

Aceite de Pirólisis (bio-oil): Combustible líquido que se obtiene a partir del proceso de pirólisis y/o licuefacción de la biomasa de origen forestal principalmente.

Agricultura: Conjunto de actividades y conocimientos desarrollados por el hombre, destinados a cultivar la tierra y cuya finalidad es obtener productos vegetales (como verduras, frutos, granos y pastos) para la alimentación del ser humano y del ganado.

Agua fresca: Sustancia líquida que se obtiene por infusión, destilación u otro procedimiento de una sustancia vegetal, como hojas, flores, frutos o cortezas de ciertas plantas.

Agua Pluvial: Agua de lluvia que no es absorbida por el suelo, sino que escurre de edificios, calles, estacionamientos y otras superficies.

Aguas Grises: Aguas procedentes de lavabos, fregaderos, cocinas, duchas, lavaderos, las cuales llevan restos de jabones y detergentes.

Aguas Negras: Tipo de agua que se encuentra contaminada con sustancia fecal y orina, que proceden de los desechos orgánicos tanto de animales como de los humanos.

Biocombustibles: Tipo de combustible cuya producción se desarrolla a través del tratamiento químico o físico de desechos orgánicos o de plantas que se pueden regenerar en un corto periodo de tiempo.

Calor: Energía que se manifiesta por un aumento de temperatura y procede de la transformación de otras energías; es originada por los movimientos vibratorios de los átomos y las moléculas que forman los cuerpos.

Celda de combustible: Dispositivo electroquímico cuyo concepto es similar al de una batería. Consiste en la producción de electricidad mediante el uso de químicos, que usualmente son hidrógeno y oxígeno, donde el hidrógeno actúa como elemento combustible, y el oxígeno es obtenido directamente del aire. También pueden ser usados otros tipos de combustibles que contengan hidrógeno en su molécula, tales como el gas metano, metanol, etanol, gasolina o diésel entre otros.

Comunidad Aislada: Se caracteriza por aislamiento geográfico, en este sentido tiene una importancia relevante las dificultades de acceso por infraestructuras viales. Características

socioeconómicas determinadas por niveles bajos de ingresos. Exclusión o desamparo de las autoridades responsables de la provisión de los servicios.

Conjunto Pareto: También llamado Curva de Contrato es el conjunto de todos los puntos eficientes en el sentido pareto de la caja de edgeworth.

Costo Total Anual: Es un indicador que sirve para calcular el costo total del financiamiento de un crédito, es decir, es una medida porcentual que integra no sólo la tasa de interés sino todos los elementos que al final tendrás que pagar tales como la cuota anual, comisiones de apertura, primas de seguros, etc.

Costos: El costo o coste es el gasto económico que representa la fabricación de un producto o la prestación de un servicio.

Digestión Anaeróbica: Es un proceso biológico para la producción de biogás, en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o biogás (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , etc.), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

Energía Eléctrica: Fuente de energía renovable que se obtiene mediante el movimiento de cargas eléctricas (electrones) que se produce en el interior de materiales conductores (por ejemplo, cables metálicos como el cobre).

Fuentes Renovables: Son aquellas a las que se puede recurrir de forma permanente porque son inagotables; por ejemplo el sol, el agua, o el viento. Se caracterizan por su impacto ambiental nulo en la emisión de gases de efecto invernadero.

Ganadería: Actividad económica que consiste en la crianza de animales para el consumo humano, esta actividad se encuentra dentro de las actividades del sector primario.

Gas Natural: El gas natural es una mezcla de hidrocarburos livianos en estado gaseoso, que en su mayor parte está compuesta por metano y etano, y en menor proporción por propano, butanos, pentanos e hidrocarburos más pesados.

Gases de Efecto Invernadero: Gases integrantes de la atmósfera, de origen natural y antropogénico, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del

espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera, y las nubes.

Incineración: Es la combustión completa de la materia orgánica hasta su conversión en cenizas, usada en el tratamiento de basuras: residuos sólidos urbanos, industriales peligrosos y hospitalarios, entre otros.

Maximización: Término que refiere a la búsqueda del máximo rendimiento. La maximización consiste en aprovechar o explotar todo lo posible ciertos recursos o funciones.

Microturbina: Son máquinas de combustión basadas en el mismo principio que las turbinas convencionales pero simplificando los elementos mecánicos.

Minimización: Se refiere a reducir algo lo más posible o a quitarle su importancia.

Motor de Combustión Interna: Obtiene la energía mecánica que requiere para moverse a partir de la energía química que se produce por el combustible que arde dentro de una cámara.

Motor Stirling: Se basa en la expansión y contracción de un gas que puede ser helio, hidrógeno, nitrógeno o aire.

Pellets: Un pellet está catalogado como biomasa sólida, el cual está formado por cilindros muy pequeños, de unos pocos milímetros de diámetro. Elaborados a partir de serrín natural seco, sin ningún aditivo.

Población: Conjunto de seres vivos de la misma manera que habitan en un lugar determinado.

Poligeneración: Consiste en usar eficientemente los recursos fósiles y renovables para generar energía; combinar recursos para abastecer varias demandas energéticas y/o térmicas.

Sistema de Refrigeración por Absorción: Es un medio de producir frío que, al igual que en el sistema de refrigeración por compresión, aprovecha que ciertas sustancias absorben calor al cambiar de estado líquido a gaseoso.

Unidad de Cogeneración CHP: Combina la generación eléctrica con la producción de calor en forma de agua caliente o vapor.

Urbanización: Conjunto de viviendas que resultan de urbanizar un terreno y que corresponden a un plano unitario; en especial el que está situado a las afueras de una población destinada principalmente a segundas residencias.

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
GLOSARIO	iv
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	3
JUSTIFICACIÓN	5
OBJETIVOS	6
Objetivo General	6
Objetivos Particulares	6
HIPÓTESIS	7
CAPÍTULO II	8
MARCO TEÓRICO	8
Ingeniería Química	8
Ingeniería de Procesos	8
Optimización	9
Simulación	10
Tipos de Simulación	10
GAMS	11
Superestructura	11
Nexo Agua-Energía-Alimentación	12
Desarrollo Humano (Extrema Pobreza)	12
CAPÍTULO III	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
ESTRATEGIA DE OPTIMIZACIÓN	16
Algoritmo Genético de Clasificación no Dominada II	16
Algoritmo Genético Multiobjetivo	17
Algoritmo Evolutivo de Fuerza de Pareto	17
Algoritmo Genético de Clasificación no Dominada	17
CAPÍTULO IV	18

MODELO MATEMÁTICO.....	18
Enfoque de múltiples partes interesadas.....	38
Programación Por Metas	38
Suma Ponderada	39
Restricción Épsilon (ϵ -constraint)	39
CAPÍTULO V	40
RESULTADOS	40
Programación por metas	40
Método Suma Ponderada.....	42
Método Restricción Épsilon (ϵ -constraint).....	44
Comparación de métodos multiobjetivo.....	55
CAPÍTULO VI.....	57
CONCLUSIONES.....	57
RECOMENDACIONES	58
NOMENCLATURA.....	59
BIBLIOGRAFÍA	73

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1. Proyección mundial de población, elaboración propia con datos obtenidos de Naciones Unidas.	1
Figura 2. Importancia de la Ingeniería en la sociedad, elaboración propia.	2
Figura 3. Ingeniería Química en la sociedad, elaboración propia.	3
Figura 4. Planteamiento del problema, elaboración propia.	13
Figura 5. Superestructura representativa del modelo matemático a optimizar.	15
Figura 6. Diagrama de flujo representativa de programación por metas.	41
Figura 7. Conjunto Pareto consumo de agua vs ganancias.	46
Figura 8. Diagrama de flujo representativa de método épsilon constraint escenario A minimizando el consumo de agua.	47
Figura 9. Diagrama de flujo representativa de método épsilon constraint escenario C minimizando el consumo de agua.	48
Figura 10. Diagrama de flujo representativa de método épsilon constraint escenario I minimizando el consumo de agua.	49
Figura 11. Conjunto Pareto de emisiones de CO ₂ vs ganancias.	51
Figura 12. Diagrama de flujo representativa de método épsilon constraint escenario A minimizando las emisiones de CO ₂	52
Figura 13. Diagrama de flujo representativa de método épsilon constraint escenario C minimizando las emisiones de CO ₂	53
Figura 14. Diagrama de flujo representativa de método épsilon constraint escenario D minimizando las emisiones de CO ₂	54
Figura 15. Comparación de métodos multiobjetivo de tipo deterministas.	55

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de programación por metas.....	40
Tabla 2. Resultados del método suma ponderada sin escalarizar.....	43
Tabla 3. Resultados de método de suma ponderada escalarizado.....	44
Tabla 4. Método ϵ constraint, maximizando ganancias, minimizando emisiones de CO_2 y el consumo de agua fresca.....	45
Tabla 5. Escenarios para el comportamiento de consumo de agua maximizando ganancias.	45
Tabla 6. Escenarios para el comportamiento de emisiones de CO_2 maximizando ganancias.	50
Tabla 7. Comparación de resultados de métodos multiobjetivo de tipo deterministas.	55

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la población mundial y su índice de desarrollo humano han ido incrementando notablemente, esto causado por una gran cantidad de avances científicos y tecnológicos como el desarrollo de antibióticos, [1] [2] electrodomésticos, medios de comunicación, etc. [3], los cuales logran la sobrevivencia de personas [4] para llegar a la edad reproductiva aumentando así las tasas de fecundidad en su población. [5] Se sabe que a finales del año 2011 la población ascendía los 7 mil millones de personas en el mundo; en el año 2015 dicha cifra aumento 3 millones más permitiendo estimar que para el año 2025 la cantidad de habitantes en el planeta sobrepase los 8.5 mil millones de personas tal como se muestra en la Figura 1, la cual presenta una proyección de población mundial. [6]

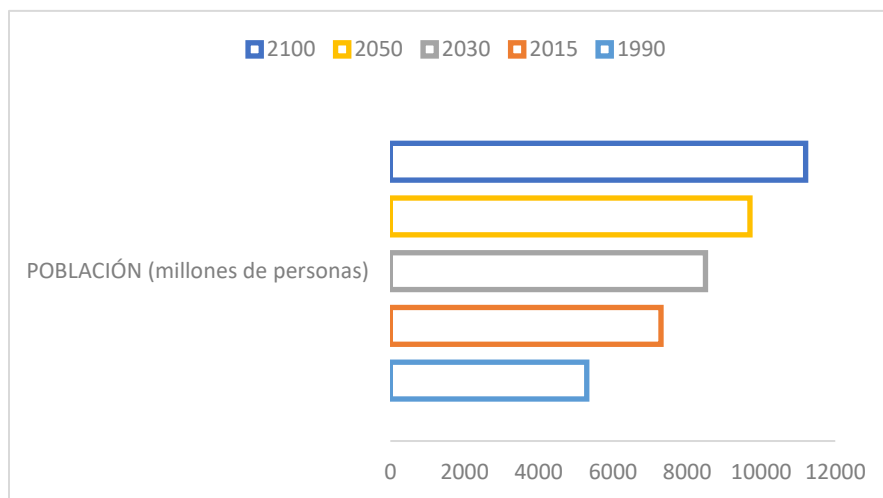


Figura 1. Proyección mundial de población, elaboración propia con datos obtenidos de Naciones Unidas.

Por lo anterior, el incremento de urbanización [7] y procesos migratorios [8] han sido afectados notablemente. Orillando a la población a habitar lugares inhabitables y remotos geográficamente y con mínima cantidad de recursos disponibles para la supervivencia, dando lugar a que en la actualidad, existan diferentes zonas en México y alrededor de todo el mundo sin acceso a servicios tales como agua potable y energía eléctrica, [9] los cuales permitan cubrir las necesidades básicas de sus habitantes.

La pobreza para México [10] es medida a través de indicadores como población vulnerable por carencias sociales, por ingresos, población en situación de pobreza, pobreza

moderada y pobreza extrema, los cuales por medio de herramientas estadísticas permiten tener una fuente que contenga la información necesaria para apoyar, fortalecer la planeación y evaluación de la política de desarrollo social. Para el año 2016 se dio a conocer a la población la medición de pobreza a nivel municipal en México, en donde un 43.6%, que representa 53.4 millones de personas, están en condiciones de pobreza, mientras un 7.6% de la población total en el país viven en situación de extrema pobreza [11].



Figura 2. Importancia de la Ingeniería en la sociedad, elaboración propia.

La necesidad de satisfacer las demandas de suministro de energía, calor y agua potable [12] [13] es un reto ante el incremento del desarrollo de la población en los últimos años [14]. En comunidades ubicadas geográficamente en zonas rurales y aisladas, el problema se intensifica primordialmente por la dependencia de programas industriales y gubernamentales para el abastecimiento de alimentos, [15] dicha dependencia se puede atribuir a la falta del líquido indispensable, el cual permitiría la producción agrícola y de ganado. [16] La extracción de agua es un problema en el mundo entero; para el año 2010, México se posicionó en el número 8 de los países con mayor extracción de agua con 80.6 km³/año, del cual 76.7% es para uso agrícola, 9.20% para uso industrial y 14.1% para el abastecimiento público [17].

ANTECEDENTES

La Ingeniería Química ha permitido ampliar su campo de estudio y aplicación fuera de la industria, [18] con el único objetivo de mejorar y facilitar la sobrevivencia de los seres humanos, buscando nuevas y mejores soluciones para cualquier tipo de problema. A partir de la experiencia y la práctica, la Ingeniería Química es la base económica de muchos países y la fuerza impulsora de muchos otros.

Por medio de la Optimización de Procesos, como rama de la Ingeniería Química y considerando problemas multiobjetivo, en la actualidad se han realizado diferentes investigaciones para implementar sistemas de suministro de servicios básicos en complejos habitacionales y no sólo en proyectos industriales, [19] [20] [21] debido a que en la mayoría de los casos las personas al frente de nuestros estados o países desconocen cómo se pueden adaptar diversos sistemas tomando en consideración aspectos económicos, sociales y ambientales, representando grandes estrategias para la solución de abastecimiento óptimo de dichos servicios básicos, logrando mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

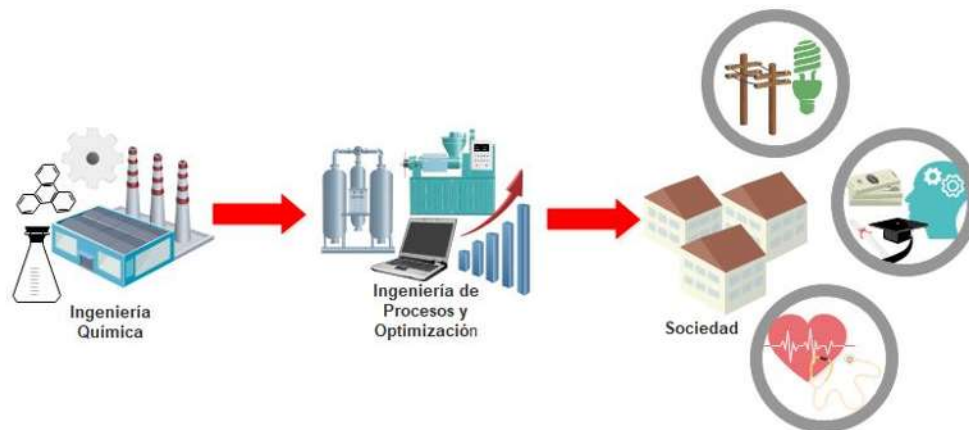


Figura 3. Ingeniería Química en la sociedad, elaboración propia.

Dichas estrategias han sido motivo de diferentes casos de estudios intentando involucrar diferentes tecnologías con el objetivo de disminuir costos de operación, impacto social, impacto a la salud y emisiones de dióxido de carbono al medio ambiente. Se ha estudiado la implementación de la recolección de agua pluvial, el tratamiento de desechos sólidos a partir de la incineración con un sistema de crecimiento de algas para reducir las emisiones producidas y un sistema de cogeneración para satisfacer las necesidades de

electricidad y agua caliente; [22] más tarde se analizó el efecto a la salud de los habitantes en el mismo caso de estudio. [23]

También fue considerado el uso de la implementación de Sistemas de Combinación de Calor y Energía (CHP) sin el uso de baterías para el almacenamiento de energía, reduciendo el desfase entre generación y consumo. [24] [25] [26] Uno de los problemas principales radica en que la implementación de sistemas para suministro de servicios básicos genera un costo de capital y operación alto, y en lugares remotos la posibilidad de desarrollarlos es nula debido a la pobreza extrema en que viven la mayoría de estas comunidades.

En los trabajos mencionados anteriormente se ha sido considerado el factor del Índice de Desarrollo Humano de manera indirecta, ya que cubren con algunos de aspectos que forman parte de él. El Índice de Desarrollo Humano (IDH) posiciona a todas las entidades del mundo de acuerdo a su nivel de bienestar en que se encuentran los habitantes de un lugar determinado. Para el año 2010, Michoacán obtuvo un resultado global de IDH igual 0.692, mediante los logros obtenidos en la entidad, en salud (0.844), educación (0.584) e ingreso (0.671) [27]. Se ha demostrado que la mayor diferencia entre Municipios en México se debe al Índice de Educación, [28] el cual se ve afectado ante la necesidad de contribuir económicamente en el hogar desde temprana edad, debido a la situación de pobreza.

Sin embargo, en ningún caso de estudio anterior se ha analizado la importancia de comparar diferentes métodos multiobjetivo para la solución de modelos matemáticos de redes de distribución de servicios básicos y aspectos que forman parte del Desarrollo Humano.

JUSTIFICACIÓN

En un modelo matemático que representa un problema de optimización e involucra demasiadas variables que intervienen, el uso de métodos comunes de optimización no asegura encontrar el óptimo para la solución del mismo. Los métodos deterministas y estocásticos para solucionar problemas multiobjetivo representan una forma eficiente de abordar los problemas en donde se pretende generar conjuntos de soluciones para formar un conjunto Pareto y seleccionar la mejor solución.

En comunidades de bajos recursos o considerados en extrema pobreza se ve la necesidad de medir el grado de satisfacción y oportunidades de vida de los habitantes en una comunidad específica, logrando realizar el cumplimiento de metas valiosas para cada individuo y aumentando el desarrollo del país en general, cumpliendo con sus necesidades básicas. En donde los factores de educación, salud e ingresos económicos se ven afectados por la cantidad de habitantes de la comunidad y el porcentaje de recursos gubernamentales que son destinados.

Ante esta situación, el uso de estrategias de optimización de sistemas multiobjetivo usando tecnologías combinadas de calor y energía eléctrica, las cuales involucran microturbinas, motores de combustión interna, motores Stirling y celdas de combustibles, uso de herramientas de poligeneración con residuos sólidos, recolección de agua pluvial y un mayor reciclaje de agua fresca obtenida de un cuerpo de agua (pozo), minimizando los costos de operación, así como el impacto ambiental generado por la extracción de agua y las emisiones de dióxido de carbono, representaría una gran solución al problema como se ha demostrado anteriormente en estudios. Lo que permite intuir que al tomar en consideración diferentes métodos para la solución del modelo matemático sea mejorada y con esto traer mayores satisfacciones.

El caso de estudio es una comunidad aislada en una zona montañosa en la costa de Pacífico, ubicada en el municipio de Cochoapa el Grande, Guerrero, México, la cual tiene un pozo de agua en donde los habitantes satisfacen sus demandas de consumo de agua fresca. La comunidad consiste de 2610 habitantes, en donde el 27.93% es analfabeta, se encuentran

975 hogares, con una ocupación promedio de 3 individuos, en cada hogar; en donde debido a las condiciones migratorias a partir de los 12 años de edad está ocupada laboralmente. [29]

Ante las condiciones mencionadas, la implementación de optimización de sistemas de suministro de energía y agua potable en esta comunidad podría representar una gran estrategia para la solución de abastecimiento óptimo de servicios básicos, utilizando el mejor método multiobjetivo.

OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar un modelo matemático para la optimización de sistemas de redes de distribución de energía eléctrica, calor y agua potable en comunidades aisladas y de bajos recursos, tomando en consideración las necesidades principales de la misma comunidad, con el fin de abastecer de servicios básicos a la comunidad antes mencionada. Dicho modelo será evaluado con diferentes estrategias de métodos deterministas para solucionar problemas multiobjetivo para lograr obtener la solución al pareto que satisfaga las funciones objetivo de acuerdo al peso de importancia seleccionado en diferentes escenarios.

Objetivos Particulares

- Implementar un modelo general para la síntesis óptima para la optimización de distribución de energía eléctrica, calor y agua potable en una comunidad aislada.
- Implementar diferentes estrategias de optimización multiobjetivo para identificar soluciones de Pareto en la síntesis de redes integradas en comunidades aisladas.
- Proponer soluciones para satisfacer las necesidades de agua, energía y alimentos en la comunidad de Cochoapa el Grande, Guerrero, México, la cual es una comunidad aislada y cuenta con el peor Índice de Desarrollo Humano del país.

HIPÓTESIS

Analizar e implementar un modelo multiobjetivo permitirá obtener solución de Pareto, usando tecnologías combinadas de energía además de sistemas de poligeneración para lograr obtener una solución ante el problema de satisfacer las demandas de generación y/o consumo de energía y agua fresca de una comunidad aislada. Este modelo permitirá, en zonas de bajos recursos o considerados en pobreza y extrema pobreza, mejorar la calidad de vida de los habitantes y facilitar la realización de metas importantes para cada uno de ellos. Los métodos de tipo deterministas permitirán construir el conjunto Pareto y seleccionar el óptimo en todos los escenarios realizados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Ingeniería Química

La Ingeniería Química surgió a partir del siglo XIX ante la necesidad de identificar los componentes del petróleo, sus propiedades y comportamiento, además de la necesidad de diseñar equipos de procesos en donde ocurrieran transformaciones químicas, con el objetivo de convertir cualquier materia prima en un producto útil y de mayor valor.

La ingeniería química es la rama de la Ingeniería que estudia la síntesis, desarrollo, diseño, operación y optimización de todos los procesos industriales en donde se realizan cambios químicos y físicos de los materiales. La Ingeniería Química tiene un gran campo de aplicación en áreas para diseñar e impulsar nuevos materiales y tecnologías, para lograr procesos industriales más amigables para el medio ambiente y obteniendo un mayor grado de satisfacción económico.

La Asociación Americana de Ingenieros Químicos (AIChE por sus siglas en inglés) describe la Ingeniería Química como “La profesión en la que el conocimiento de las matemáticas, la química y otras ciencias naturales obtenido por el estudio, la experiencia y la práctica se aplica con criterio para desarrollar formas económicas de utilizar materiales y energía en beneficio de la humanidad”. [30]

En la actualidad, la Ingeniería Química es considerada la base económica de muchos países y en muchos otros la fuente de desarrollo, debido a que ya no se enfoca únicamente en procesos industriales, sino que ahora muchos motivos de estudios son utilizados para ser implementados en la sociedad para el suministro de recursos como agua potable, calor, energía eléctrica y hasta en el campo agrícola

Ingeniería de Procesos

La Ingeniería de Procesos es la encargada de diseñar, planificar, mejorar, implementar o tomar cualquier tipo de decisiones con el fin de alcanzar los máximos resultados de las distintas fases que componen un proceso, bajo ciertas restricciones que aseguren la sostenibilidad económica, ambiental y social de los mismos procesos. Integra metodologías

y procedimientos de otras áreas relacionadas con la transformación de la materia y energía que sean capaz de innovar, optimizar o administras los procesos fisicoquímicos.

La Ingeniería de Procesos es considerada el alma de cualquier proyecto. Y anteriormente sólo se enfocaba en lograr los propósitos esperados en la menor cantidad de tiempo, con la menor cantidad de recursos y utilizando la forma más simple para realizarlos, en la actualidad son tomados en cuenta factores como seguridad, vida útil de los procesos, aspectos sociales y ambientales.

Además, abarca una gran cantidad de ciencias como Fenómenos de Transporte, Termodinámica, Operaciones Unitarias, etc. La Ingeniería de Procesos está compuesta de tres etapas: Síntesis, Análisis y Optimización. [31] La etapa de síntesis define las entradas y salidas de un sistema, además de los pasos que requiere para realizar la transformación esperada. El análisis permitirá conocer las salidas que se pueden obtener en el proceso. La optimización permitirá minimizar o maximizar la función objetivo, la cual será diseñada de acuerdo a las metas que se desean cumplir y estarán restringidas por restricciones del mismo proceso.

Optimización

La optimización es una herramienta cualitativa que se fundamenta sobre la formulación matemática, la cual utiliza métodos específicos deterministas y evolutivos para solucionar problemas para obtener costos efectivos, diseñar procesos o simplemente resolver cualquier problema que se presente. La optimización puede involucrar muchas variables las cuales son importantes para resolver el problema, sin embargo, entre mayor cantidad de variables son tomadas en cuenta, la complejidad de la optimización aumenta.

El objetivo de la optimización es encontrar los valores de las variables de procesos que producen el mejor valor del criterio de rendimiento. [32] Se refiere a elegir entre todo el conjunto de soluciones la mejor, también conocido como punto utópico, que en la mayoría de los procesos la mejor pero es infactible en donde por medio de la experiencia y conocimientos empíricos y críticos se realiza un análisis para seleccionar una o varias que cumplan con los criterios.

Más específicamente, la optimización logrará disminuir, de un proceso determinado, costos fijos, costos de operación, además de disminución de uso de materia prima o productos no deseados, los cuales pueden ser contaminantes para el medio ambiente, generando ganancias y menos contaminación.

Simulación

La simulación de un sistema es el estudio a través de su representación matemática o de su modelo físico [32], en donde se puede comprender un análisis global, aspectos económicos, sociales o incluso procesos posibles para poder compararlos entre ellos y obtener resultados deseados en función de datos y parámetros.

La simulación permite analizar de manera exhaustiva un determinado proyecto para un sistema antes de implementarlo, saber que tan costoso significaría su implementación. Además de que modificar un modelo matemáticamente es mucho más sencillo que modificar condiciones reales. Por medio de la simulación también se puede llegar a conocer los límites de condiciones en que se podrían operar dichos sistemas y así el tomador de decisiones pueda elegir, de acuerdo a su criterio, el mejor escenario.

La comparación de distintos diseños y procesos es posible gracias a la simulación, introduciendo nuevos parámetros, condiciones o suprimiendo información antigua, lo cual no es posible en una planta real. Un ensayo de sensibilidad nos podrá dar un panorama más amplio sobre los efectos que se puedan obtener frente a diferentes perturbaciones. [32]

Tipos de Simulación

Comúnmente la clasificación de métodos de simulación se divide de acuerdo a tres criterios: [32]

- Simulación cuantitativa y cualitativa: La primera describe numéricamente el comportamiento de un proceso por medio de un modelo matemático en el que se toman en consideración balances de masa, balances de energía, restricciones sobre aspectos operacionales. Por otro lado, la segunda estudia las relaciones causales y las tendencias, así como perturbaciones del proceso dado.

- Simulación estacionaria y dinámica: El sistema de ecuaciones para un estado estacionario se deberá caracterizar por reflejar en el modelo las variaciones de las variables de interés por medio de ecuaciones diferenciales. La simulación dinámica involucrará la variable tiempo.
- Simulación determinista y estocástica: Surge a través del punto de vista de los fenómenos o sistemas que se desean estudiar, en simulación determinista las ecuaciones consideradas dependen de variables conocidas con certeza. El modelo estocástico tiene variables sujetas a incertidumbre y que en muchas ocasiones son expresadas en función de probabilidad.

GAMS

Por sus siglas en inglés, GAMS, (General Algebraic Modeling System), es un sistema de modelado de alto nivel para la programación matemática y la optimización. Consiste en un compilador de lenguaje y un establo de solucionadores integrados de alto rendimiento [33], presenta la ventaja de plantear un lenguaje de modelización que permite poder escribir en un editor la formulación matemática del problema. Una vez que el problema se encuentra en el lenguaje GAMS, los programas disponibles en la plataforma se encargan de la solución.

El programa está creado para definir, analizar y resolver problemas de optimización enteros lineales, no lineales y mixtos, cuenta con capacidad de resolver problemas de pequeña y gran magnitud de forma compacta en los bloques. GAMS permite optimizar en un lenguaje sencillo que permite el uso para personas con poca formación en optimización.

Superestructura

Es una herramienta esencial para la optimización de un proceso [32], es una parte fundamental, la cual tiene un grado de dificultad crearla, ya que, es en la superestructura donde se intenta plasmar la idea general del proyecto a realizar incluyendo todas las variables consideradas y las propuestas de soluciones que se tienen para el posterior planteamiento del modelo matemático.

La superestructura contiene varias estructuras posibles para el proceso. Lo que significa que muchas configuraciones son tomadas en cuenta para obtener el diseño óptimo, sin embargo, esto hace que el modelo matemático que describe la superestructura se vuelve

muy complejo al analizar los costos, el uso de equipo y emisiones al medio ambiente teniendo un comportamiento no lineal, proporcionando varias soluciones.

Nexo Agua-Energía-Alimentación

La relación entre los sectores seguridad de los recursos naturales, seguridad energética y la seguridad alimentaria es conocida como nexo agua-energía-alimentación, [34] en el cual al realizar una intervención en una de las áreas mencionadas afectada de alguna manera las otras. Dicho nexo permite al país intervenciones a metas futuras de desarrollo en los sectores mencionados, en donde las tomas de decisiones son de vital importancia ante la sensibilidad de la misma. Por medio del nexo agua-energía-alimentación y con la adecuada selección de decisiones es posible diseñar sistemas integrados para países o implementar algún programa en muchas ocasiones de carácter gubernamental y conocer su enfoque de forma anticipativa.

El agua, energía y alimentos son esenciales para la vida humana y su desarrollo sostenible; el incremento de la población es un factor que sin duda afecta las demandas de agua dulce, energía y alimentos para el consumo humano. Por otro lado, el mayor consumo de agua fresca es la agricultura, la energía es necesaria para producir y transportar alimentos, lo cual lleva a desarrollar e implementar diferentes acciones para el correcto uso de los recursos naturales para satisfacer las demandas mundiales.

Desarrollo Humano (Extrema Pobreza)

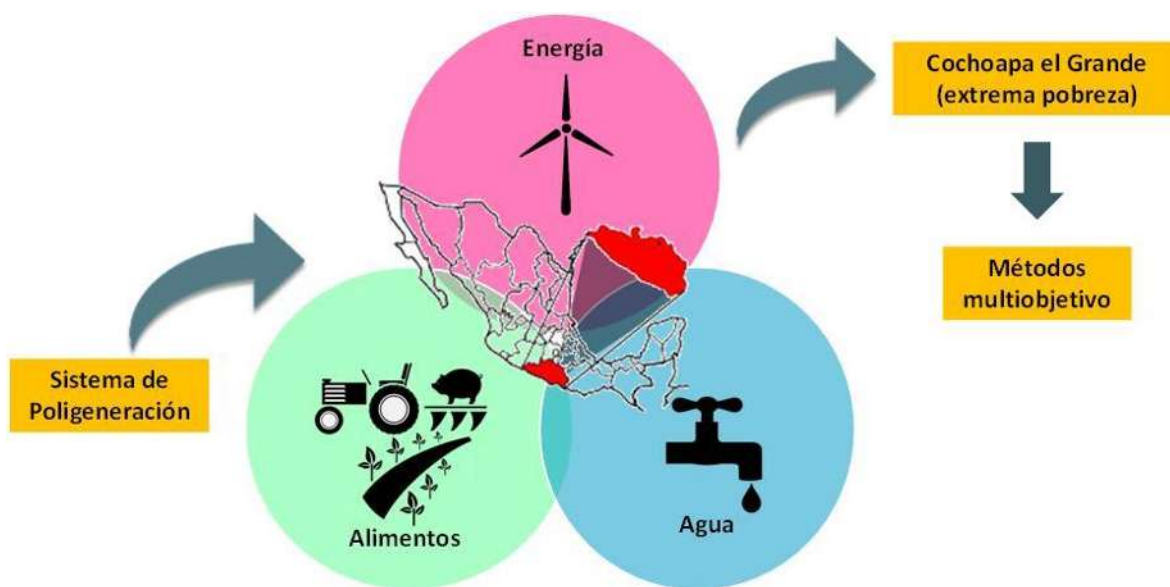
Los primeros enfoques sobre el Índice de Desarrollo Humano fueron realizados con el fin de entender el progreso social, pero con el paso del tiempo modificó su enfoque dirigido ahora a aspectos económicos y cualquier otro tipo que permitiera tener una vida saludable, duradera y digna. El Desarrollo Humano tiene por objetivo la libertad de desarrollar todo el potencial de cada vida humana, logrando metas importantes para cada individuo.

Se determina la situación de pobreza de alguna localidad específica siempre que se tenga al menos una carencia social, tal es el caso como el acceso a los servicios básicos (salud, vivienda, energía eléctrica, agua potable, educación, etc.), seguridad social, transporte o economía local. Extrema pobreza es considerada cuando al menos se tienen tres o más carencias sociales, de seis posibles. [35]

CAPÍTULO III

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se requiere abastecer el suministro de agua, energía eléctrica y calor para el caso de estudio perteneciente al municipio de Cochoapa el Grande, Guerrero. La población es considerada zona de extrema pobreza [11], en donde desde temprana edad el 80% de la población ve la necesidad de migrar al extranjero para lograr estabilidad económica y cubrir sus necesidades básicas, dando como resultado que los habitantes obtengan un grado de escolaridad medio superior en el mejor de los casos; y si bien el capital migrante ha permitido la pavimentación de gran parte de la comunidad, también es la consecuencia de que no exista una fuente de empleo que permita fortalecer el mercado local en donde se consume principalmente frijoles y quelite que es sembrado.



El 50.96% de la población habla mixteco y no habla español, el grado de escolaridad es de 2.90, en el caso de las mujeres que habitan el lugar es común que a temprana edad se casen y procreen. El incorrecto uso y tratamiento de agua afecta el sector salud, el cual en zonas rurales se intensifica debido a que no cuentan con programas gubernamentales que sean capaces de cubrir dicho sector. En la comunidad antes mencionada resaltan las carencias de alimentación, enfermedades de vías respiratorias principalmente en adultos mayores y

niños por las bajas temperaturas, [36] enfermedades de transmisión sexual como el virus de papiloma humano y cáncer cérvico uterino. [37]

Acoplado al sistema propuesto, diferentes métodos multiobjetivo de tipo deterministas los cuales permitirán realizar un análisis exhaustivo tomando en cuenta diferentes variables para satisfacer las funciones objetivo, las cuales son necesarias incorporar en el conjunto habitacional, tales como el sector salud, educación e ingresos económicos que son necesarios para medir el grado de satisfacción y cumplimiento de metas de cada individuo, además de costo de operación e implementación del sistema.

En la superestructura que se muestra en la Figura 4 se muestran todas las posibles soluciones para el problema que se presenta, la cual consiste en elegir las unidades de cogeneración que producen energía eléctrica y cubren con una parte de demanda de agua caliente. También se presentan el uso de energías renovables como paneles solares y fuentes eólicas, cuenta con un sistema de refrigeración por absorción, el cual cumplirá con las demandas de aire acondicionado. El uso de agua pluvial será enviado a satisfacer necesidades en jardinería, ganadería y agricultura, para reducir la extracción de agua de pozo. A su vez, el uso de sistemas de poligeneración, por medio del uso de residuos sólidos, para la generación de biocombustibles, vapor o incluso aceite de pirólisis.

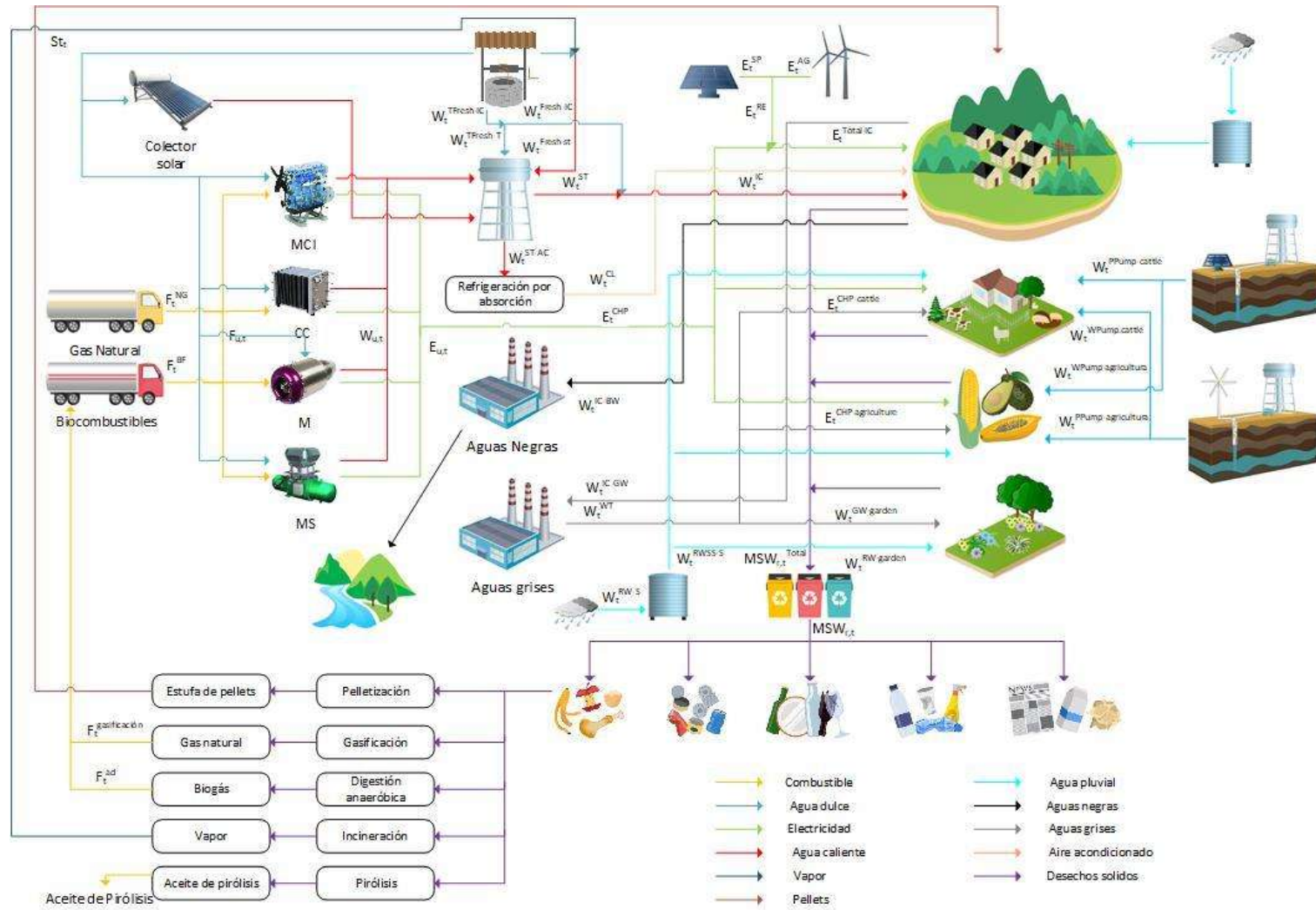


Figura 5. Superestructura representativa del modelo matemático a optimizar.

ESTRATEGIA DE OPTIMIZACIÓN

El criterio de Pareto permite evaluar las soluciones al problema de las tres funciones objetivo para cada solución posible del espacio de búsqueda en donde se tiene un vector de variables n dimensional. En donde las zonas factibles del espacio de búsqueda serán delimitadas por las restricciones que el modelo a optimizar presente. Cada punto del conjunto de Pareto representa un punto de frente de Pareto (puntos encontrados en el espacio objetivo, las mejores soluciones).

Los métodos de soluciones a modelos matemáticos multiobjetivo se pueden dividir en dos grupos:

- Algoritmos de aproximación al conjunto Pareto (métodos estocásticos).
- Métodos para generar el conjunto de soluciones, basados en optimización de programación matemática (métodos deterministas).

Entre los métodos más utilizados de aproximación al conjunto Pareto se encuentran NSGA II, MOGA, SPEA, NSGA.

Algoritmo Genético de Clasificación no Dominada II

NSGAI I se caracteriza por reducir la complejidad del método de clasificación, aumentando la necesidad de memoria. A dicho método se le agregó un mecanismo de elitismo y se cambió el procedimiento de mezclado por uno que compara que tan pobladas están las áreas próximas a cada solución (crowded operator). En este algoritmo, la población descendiente Q (tamaño N) es creada en primera instancia usando la población de padres P (tamaño N). Después de esto, las dos poblaciones son combinadas para formar R de tamaño $2N$. Después de lo anterior, mediante un ordenamiento no dominado se clasifica la población R en diferentes frentes de Pareto de acuerdo a su nivel de dominancia. Una vez el proceso de ordenamiento no dominado ha finalizado, la nueva población es generada. Esta nueva población empieza a ser construida con el mejor frente no dominado ($F1$), continúa con las soluciones del segundo frente ($F2$), tercero ($F3$) y así sucesivamente. Como la población R es de tamaño $2N$, y solamente existen N individuos que conforman la población descendiente, no todos los individuos de los frentes pertenecientes a la población R podrán ser acomodados en la nueva población.

Algoritmo Genético Multiobjetivo

Se elabora un ranking de los individuos de acuerdo a su grado de dominancia de acuerdo a la propuesta de Goldberg. Utiliza también mecanismo de mezclado y un método de formación de nichos para distribuir los individuos a lo largo del frente de Pareto. La efectividad del método es dependiente del factor de mezclado que se utiliza, generalmente logra buenos resultados.

Algoritmo Evolutivo de Fuerza de Pareto

Utiliza dos conjuntos de soluciones, la población principal donde los operadores evolutivos son aplicados y un archivo externo con una cantidad variable de soluciones no dominadas. En cada iteración del algoritmo, las mejores soluciones de la población principal se almacenan en el archivo de soluciones externas utilizando una técnica de agrupamiento. Luego, se efectúa un torneo binario entre ambos conjuntos como operador de selección. El valor de aptitud de cada individuo en la población principal se calcula considerando el ranking de los individuos de la población externa que este individuo domina.

Algoritmo Genético de Clasificación no Dominada

Este método corresponde con una implementación de un algoritmo genético que clasifica a los individuos en diferentes niveles de acuerdo al ranking de Pareto. Todos los individuos no dominados se agrupan en una categoría y se les asigna un valor de elitismo alto (individuo determinado a partir de las soluciones que se encuentran en la población de individuos no dominados solamente; de este modo, no es relevante que los miembros de la población general se dominen unos a otros). Luego, se aplican técnicas de mezclado para mantener la diversidad de la población. A continuación, se retira este grupo de la población, y se selecciona el nuevo conjunto de individuos no dominados.

Los métodos para generar el conjunto de soluciones a su vez se clasifican en métodos de escalarización y no escalarización. Entre los más utilizados en este grupo se encuentran programación por metas, método de suma ponderada y restricción ϵ -constraint). Estos últimos mencionados serán aplicados a modelo matemático a optimizar y son desarrollados en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO IV

MODELO MATEMÁTICO

El modelo propuesto consta de varias etapas que se describen a continuación.

Unidades de cogeneración

Las unidades de cogeneración (CHP) propuestas están constituidas por el Motor de combustión interna, Celda de combustible, Microturbina y Motor Stirling. La eficiencia eléctrica ($\eta_{u,t}^Q$), y la eficiencia térmica ($\eta_{u,t}^E$) indican la relación entre los productos, electricidad ($E_{u,t}$) o calor ($W_{u,t}$) y los requerimientos de combustible ($F_{u,t}$):

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

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

La capacidad de unidades CHP son determinadas por la mayor capacidad permitida en el mercado ($Cap_u^{CHP-MAX}$):

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

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

Sistema de refrigeración de absorción

Un sistema de refrigeración de absorción es considerado para proporcionar la refrigeración necesaria en la comunidad, la refrigeración producida (W_t^{CL}) es calculada por el factor de refrigeración (α^{AC}) y la entrada de agua caliente:

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

La capacidad del sistema de refrigeración de absorción (Cap^{AC}) debe ser mayor que la refrigeración máxima requerida en un período de tiempo dado, y este debe ser inferior a la mayor refrigeración necesaria (Cap^{AC-MAX}) multiplicada por su variable binaria asociada:

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

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

Colector Solar

Un colector solar puede ayudar a satisfacer las demandas de energía térmica. El calor proporcionado por el colector solar es función del factor de radiación solar (α_t) y el área del colector solar (A^{SC}):

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

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

El dimensionamiento del colector solar es limitado por el área disponible para su instalación:

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

Tanque de almacenamiento térmico

Se considera que un tanque de almacenamiento térmico sincroniza las demandas de electricidad y agua caliente de las unidades de cogeneración. El balance de masa en el tanque de almacenamiento térmico se modela de la siguiente manera:

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

El nivel de almacenamiento de agua en el período de tiempo t es igual a la adición del agua almacenada en el período de tiempo $t - 1$ más el agua enviada al tanque proveniente de las unidades de cogeneración menos el agua enviada a la comunidad y el agua enviada al sistema de refrigeración de absorción.

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

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

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

Suministro de agua caliente a la comunidad

El vapor generado en la planta de incineración (S_t) se utiliza para calentar el agua que se enviará al tanque de almacenamiento térmico ($W_t^{Fresh-St}$):

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

La entrada de agua fresca del tanque de almacenamiento térmico $W_t^{Fresh-T}$ tiene la función de ajustar la temperatura del tanque, esto se determina multiplicando cada una de las corrientes de agua caliente que entran en el tanque por un factor, de esta manera es posible llegar a 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 enviada a la comunidad debe tener una temperatura adecuada para uso sanitario, que está determinada por la cantidad de agua fresca que se suministra 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 demandas de agua en la comunidad $W_t^{Total-IC}$, se usa agua proveniente del tanque de almacenamiento térmico W_t^{IC} más el agua proporcionada por el sistema colector de agua de lluvia ($W_t^{RWSS-IC}$):

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

Electricidad generada por las energías renovables

Se propone el uso de energías renovables como paneles solares y aerogeneradores para producir electricidad:

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

La electricidad producida por el panel solar se calcula como el producto del área A^{SP} multiplicado por su eficiencia η^{SP} , y por el factor de radiación solar (h_t) y multiplicado por el coeficiente de rendimiento PR .

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

El tamaño del panel solar está limitado por su área de instalación disponible A^{SP-MAX} :

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

La energía generada por el aerogenerador es función de la velocidad del viento y está determinada por la siguiente ecuación, donde CP^{max} es el coeficiente de potencia máxima y A^{rotor} es el área del rotor del aerogenerador.

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

La instalación del aerogenerador está limitada por el área máxima disponible para la instalación ($A^{rotor-MAX}$) :

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

Electricidad producida en las unidades de cogeneración

La electricidad total producida en las unidades de cogeneración (E_t^{CHP}) es igual a la suma de la electricidad producida por cada una de las unidades del sistema de cogeneración y se utiliza para satisfacer las demandas de la comunidad E_t^{CHP-RE} , el ganado $E_t^{CHP-cattle}$ y la agricultura $E_t^{CHP-agriculture}$:

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

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

Electricidad suministrada a la comunidad

La electricidad suministrada a la comunidad es igual a la suma de la electricidad generada por energías renovables, E_t^{RE} , más la electricidad producida en las unidades de cogeneración E_t^{CHP-RE} :

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

Sistemas colectores de agua de pluvial

Para determinar la cantidad de agua pluvial cosechada en la comunidad en un período de tiempo W_t^{RW-IC} , el área de recolección A^{RW-IC} se multiplica por la precipitación en ese período Pcp_t :

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

De la misma manera, la cantidad de agua cosechada para el ganado, la agricultura y la jardinería W_t^{RW} se determina de la siguiente manera:

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

La existencia del colector de agua pluvial es función del área de recolección y se determina por su variable binaria y el área máxima disponible para instalar el colector:

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

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

Tanque de almacenamiento de agua pluvial

La capacidad del sistema de almacenamiento de agua pluvial debe ser mayor que el agua almacenada durante los períodos considerados:

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

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

Para determinar la existencia del tanque de almacenamiento térmico, las variables binarias y la capacidad máxima disponible se utilizan de la siguiente manera:

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

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

Balance en el sistema de almacenamiento de agua pluvial

El agua almacenada en el sistema de almacenamiento de agua pluvial durante el período de tiempo t , $W_t^{RWSS-IC}$, es igual al agua almacenada al final del período de tiempo anterior, $W_{t-1}^{RWSS-IC}$, más el agua de entrada al sistema de almacenamiento W_t^{RW-IC} :

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

El agua almacenada en el sistema de almacenamiento de agua pluvial durante el período de tiempo t (W_t^{RWSS}) es igual al agua almacenada al final del período de tiempo anterior (W_{t-1}^{RWSS}), más el agua de entrada al sistema de almacenamiento (W_t^{RW}), menos el agua de salida del sistema de almacenamiento que se envía al ganado ($W_t^{RW-cattle}$), agricultura ($W_t^{RW-agriculture}$) y jardinería ($W_t^{RW-garden}$):

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

Balance hídrico en jardinería

Para satisfacer las demandas de agua en jardinería (W_t^{garden}), se utiliza el agua proporcionada por el sistema de agua de lluvia ($W_t^{RW-garden}$) y por la planta de tratamiento de aguas grises ($W_t^{GW-garden}$)

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

Balance de agua fresca

El agua fresca consumida (W_t^{Fresh}) se determina agregando el agua enviada al tanque de almacenamiento térmico, el colector solar, la comunidad, el sistema de refrigeración de absorción, el agua enviada a cada unidad de cogeneración y el agua extraída por el viento y los sistemas de bombeo 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 grises

Las aguas grises generadas en la comunidad aislada (W_t^{IC-GW}) se modelan utilizando un factor de conversión de aguas grises (α^{GW}) multiplicado por la cantidad de agua que ingresa a la comunidad:

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

El tratamiento de agua grises es igual a la del agua de entrada a la planta de tratamiento (W_t^{IC-GW}) multiplicado por el factor de aguas grises (α^{GWT})

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

Las salidas de aguas grises se distribuyen para satisfacer las demandas de agua en agricultura, jardinería y ganado:

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

La capacidad de la planta de tratamiento debe ser mayor que el agua de entrada a la planta de tratamiento:

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

La capacidad de la planta de tratamiento de aguas grises debe ser menor que la capacidad máxima de agua que se puede tratar multiplicada por la variable binaria asociada:

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

Planta de tratamiento para aguas negras

El agua negra generada en la comunidad aislada (W_t^{IC-BW}) es igual al agua de entrada a la comunidad multiplicada por el factor de agua negra (α^{BW})

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

El agua residual tratada es igual al agua de entrada a la planta de tratamiento de aguas negras (W_t^{IC-BW}) multiplicado por el factor agua negra (α^{BWT}):

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

La capacidad de la planta de tratamiento de aguas negras debe ser menor que la capacidad máxima de agua que se puede tratar multiplicada por la variable binaria asociada:

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

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

Bomba fotovoltaica

La cantidad de agua bombeada a través del sistema de bombeo fotovoltaico ($W_{pw,t}^{PPump}$) puede ser distribuido o bien a la agricultura o al ganado, donde los pozos son adecuados para instalación del sistema fotovoltaico de bombeo:

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

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

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

Bomba eólica

La cantidad de agua bombeada a través del sistema de bombeo eólico ($W_{pw,t}^{WPump}$) puede ser enviada a la agricultura o al ganado, donde los pozos son adecuados para instalar el sistema de bombeo eólico:

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

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

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

El agua requerida en la agricultura

El agua requerida en la agricultura está determinada por el agua requerida 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 los cultivos producidos por área ($crop_{c,t}$) por el factor de cosecha de producción (φ_c)

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

La producción de cultivos ($crop_{c,t}$) se calcula como el producto del tipo de cultivo producido por área ($c_{c,t}$) por el área de cada cultivo (A_c)

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

Donde la producción de cada cultivo está limitada por el mínimo ($\theta_{c,t}^{C-MIN}$) y máximo ($\theta_{c,t}^{C-MAX}$), que dependen de las demandas de cultivo.

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

El agua requerida en el ganado

El agua requerida en el ganado ($W_{a,t}^{cattle-req}$) está constituido por el agua suministrada por la planta de tratamiento de agua grises, el colector de agua de lluvia, la fotovoltaica y la bomba de viento:

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

El agua necesaria en el ganado ($W_{a,t}^{cattle-req}$) se calcula como el producto del factor que representa el agua requerida por cada tipo de animal (ϕ_a^{wreq}) por el tipo de animales:

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

Los animales producidos ($a_{a,t}$) se determinan usando la siguiente ecuación:

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

Donde la producción de un animal se determina por la cantidad de alimento necesaria ($fooda_{a,t}$) multiplicado por el factor de crecimiento (ϕ_a^{growth})

La cantidad de alimento necesaria para cada tipo de animal está limitada por el alimento mínimo y máximo que se necesita.

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

Balance de residuos sólidos municipales

El total de desechos sólidos generados por tipo ($MSW_{r,t}^{Total}$) es igual a la suma de los residuos sólidos generados en la comunidad, el ganado, la agricultura y la jardinería, que se modela de la siguiente manera:

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

Distribución de residuos sólidos

Los residuos sólidos se clasifican de acuerdo a su tipo en no reciclables, metales, vidrio, plástico y papel, donde los no reciclables son enviados a diferentes procesos tales como la granulación, la gasificación, la pirólisis, la incineración y la digestión anaeróbica para obtener productos de valor:

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

Planta de granulación

Los pellets producidos se calculan como el factor de conversión de pelletización (δ^{PEL}) multiplicado por los residuos no reciclables tratados en la planta de pelletización (MSW_t^{PEL})

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

La capacidad de la unidad de pelletización debe ser mayor que la de los desechos sólidos de entrada y debe ser menor que la capacidad máxima para tratar desechos sólidos:

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

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

Planta de gasificación

El gas producido se calcula como el factor de conversión de gas multiplicado por los residuos no reciclables tratados en la planta de gasificación:

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

La capacidad de la unidad de gasificación debe ser mayor que la de los desechos sólidos de entrada y debe ser menor que la capacidad máxima o tratamiento de desechos sólidos:

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

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

Planta de pirólisis

El aceite de pirólisis producido se calcula como el factor de conversión de aceite de pirólisis multiplicado por los residuos no reciclables tratados en la planta de pirólisis:

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

La capacidad de la unidad de pirólisis debe ser mayor que la de los desechos sólidos de entrada y debe ser inferior a la capacidad máxima de los desechos sólidos tratados.

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

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

Planta de incineración

El equipo producido se calcula como el factor de conversión de vapor multiplicado por los residuos no reciclables tratados en la planta de incineración:

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

La capacidad de la unidad de incineración debe ser mayor que los residuos sólidos de entrada y debe ser inferior a la capacidad máxima disponible de la unidad de tratamiento de residuos sólidos.

$$St_t = \delta^{IN} \cdot MSW_t^{IN}, \quad \forall t \quad (75)$$

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

Planta de digestión anaeróbica

El biogás producido se calcula como el factor de conversión de biogás multiplicado por los residuos no reciclables tratados en la planta de digestión anaeróbica:

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

La capacidad de la unidad de digestión anaeróbica debe ser mayor que la de los desechos sólidos de entrada y debe ser inferior a la capacidad máxima para tratar los desechos sólidos.

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

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

Estufas de pellets

Los pellets producidos se envían para satisfacer las demandas de la comunidad, que son iguales a la suma de los gránulos utilizados por cada estufa de pellets durante un período de 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 ser mayor que la de los pellets que pueden suministrarse para su funcionamiento y debe ser inferior a la capacidad máxima disponible de los gránulos:

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

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

Biocombustibles producidos

La producción de biocombustibles está representada por el gas natural producido en la planta de gasificación y la planta de digestión anaerobia:

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

Balance de combustible

El combustible suministrado a las unidades 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 consumido (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 constituidos por el costo fijo de cada una de las unidades (FCost) multiplicado por su variable binaria más el costo variable de cada unidad (VCost) multiplicado por su capacidad. De esta forma, para cada unidad, el costo de capital correspondiente se determina de la siguiente manera:

Costos de capital de las unidades CHP

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

Los costos de capital de un sistema refrigeración de absorción

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

Los costos de capital del colector solar

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

Los costos de capital del panel solar

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

Los costos de capital de un aerogenerador

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

Los costos de capital de planta de tratamiento de aguas grises

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

Los costos de capital de la planta de tratamiento de aguas negras

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

Los costos de capital de los sistemas de recolección de agua de lluvia

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

Los costos de capital de planta de gasificación

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

Los costos de capital de planta de pelletización

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

Los costos de capital de la planta de pirolisis

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

Los costos de capital de la planta de incineración

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

Los costos de capital de la planta de digestión anaeróbica

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

Costos de capital de bomba de viento

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

Los costos de capital de bomba fotovoltaica

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

Los costos de capital de tanque de almacenamiento térmico

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

Costos de capital de 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 la suma de todos los costos de capital y se determina de la siguiente manera:

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

Costos de operación

Agua Fresca

El costo del agua fresca ($OCost^{FreshW}$) es igual al costo unitario de agua dulce (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 de gas natural ($OCost^{NG}$) es igual al costo unitario del gas natural (UC^{NG}) multiplicado por el gas natural 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

Costos de operación y mantenimiento de todo el proceso se calculan en base de su producción de la siguiente manera:

Costos de operación y mantenimiento de unidades CHP

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

Costos de operación y mantenimiento del colector solar

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

Costos de operación y mantenimiento de un sistema de refrigeración de absorción

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

Costos de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas negras

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

Costos de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas grises

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

Costos de operación y mantenimiento de la planta municipal de residuos sólidos

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

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

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

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

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

Costos de operación y mantenimiento de bomba de viento

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

Costos de operación y mantenimiento de bomba fotovoltaica

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

Costo total de operación

El costo total de operación está constituido por el costo de la operación de agua dulce, el gas natural y los costos de operación y mantenimiento de todo el proceso:

$$\begin{aligned} TOCost = & OCost^{FreshW} + OCost^{NG} + OMCost^{CHP} + OMCost^{SC} + OMCost^{AC} \\ & + OMCost^{BWT} + OMCost^{GWT} + OMCost^{WP} + OMCost^{PP} + \\ & OMCost^{GAS} + OMCost^{PEL} + OMCost^{PYR} + OMCost^{IN} + OMCost^{AD} \end{aligned} \quad (117)$$

Costo total anual

El costo total anual (TAC) es igual al costo total de operación ($TOCost$) más el costo total de capital ($TCostCap$)

$$TAC = TCapCost + TOCost \quad (118)$$

Ventas

El beneficio obtenido por la venta de los productos es igual a la cantidad de productos vendidos multiplicados por su costo unitario. De esta manera, las diferentes ventas se expresan de la siguiente manera:

Ventas de cultivos

$$SalesC = \sum_c USC_c \cdot \sum_t c_{c,t}, \quad (119)$$

Ventas de animales

$$SalesA = \sum_a USC_a \cdot a_a, \quad (120)$$

Ventas de pellets

$$SalesPellets = USC^{PEL} \cdot \sum_t P_t^{PEL} \quad (121)$$

Venta de aceite de pirólisis

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

Ventas de biocombustibles

$$SalesGas = USC^{GAS} \cdot \sum_t F_t^{gasification} \quad (123)$$

$$SalesAd = USC^{AD} \cdot \sum_t F_t^{ad} \quad (124)$$

Ventas de productos reciclables

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

Emisiones de gases de efecto invernadero

Las emisiones de gases de efecto invernadero se calculan multiplicando el factor de emisión (γ) asociado a cada una de las unidades de CHP por el flujo de gas natural suministrado a la unidad:

Unidades CHP

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

Las emisiones de gases de efecto invernadero de las plantas de proceso se calculan multiplicando el factor de emisión asociado a cada uno de los tiempos de plantas de proceso la cantidad de residuos sólidos tratados:

Planta de granulación

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

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

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

Beneficio

El beneficio total del sistema (*Profit*) está constituido por la suma de los productos vendidos como cultivos, animales, pellets, aceite de pirólisis, gas natural, biogás y productos reciclables menos el costo total anual.

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

Funciones objetivo

Las funciones objetivo consideradas se expresan a continuación:

Costo

El costo es igual al valor negativo de la ganancia:

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

Consumo de agua fresca

El consumo total agua dulce (*TotWFresh*) es igual al agua extraída en la comunidad:

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

Emisiones de gases de efecto invernadero

Las emisiones de gases de efecto invernadero corresponden a las emisiones de las unidades CHP y las plantas de procesamiento de desechos sólidos:

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

El modelo propuesto corresponde a un problema de optimización multiobjetivo, donde se ha propuesto la reducción al mínimo de cada función objetivo al mismo tiempo.

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

Enfoque de múltiples partes interesadas

El modelo propuesto corresponde a un problema multiobjetivo que busca minimizar simultáneamente tres funciones objetivo (consumo de agua fresca, emisiones de gases de efecto invernadero y costo anual total del sistema). Debido a que los objetivos evaluados están en conflicto por ser satisfechos, en este estudio se considera utilizar una estrategia de optimización que permita obtener una solución en la que los objetivos individuales se acerquen simultáneamente a los límites inferiores, estos límites inferiores constituyen la solución óptima que se llama 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 representa una solución infactible, es necesario obtener la solución de compromiso, que es la solución más cercana al Punto Utópico.

Programación Por Metas

El modelo busca minimizar la desviación total de las metas, las cuales involucran cada función objetivo (*PROFIT*, *TotFresh*, *GHGE*). Se deben fijar las metas u objetivos para cada función objetivo, donde *D* es la sumatoria total de las desviaciones:

$$MinD = (d_{PROFIT}^+ + d_{PROFIT}^-) + (d_{TotFresh}^+ + d_{TotFresh}^-) + (d_{GHGE}^+ + d_{GHGE}^-) \quad (137)$$

Sujeto a cada una de la función objetivo (Ecs. 133, 134 y 135) agregando sus respectivas variables de desviación (d_i) representando (d_i^+) un valor excedente sobre la meta y (d_i^-) un valor restante para lograr una meta objetiva (b_i):

$$PROFIT - d_{PROFIT}^+ + d_{PROFIT}^- = b_{PROFIT} \quad (137-a)$$

$$TotFresh - d_{TotFresh}^+ + d_{TotFresh}^- = b_{TotFresh} \quad (137-b)$$

$$GHGE - d_{GHGE}^+ + d_{GHGE}^- = b_{GHGE} \quad (137-c)$$

$$d_{PROFIT}^+, d_{PROFIT}^-, d_{TotFresh}^+, d_{TotFresh}^-, d_{GHGE}^+, d_{GHGE}^- \geq 0 \quad (137-d)$$

Suma Ponderada

Se escalariza el conjunto de objetivos en un solo objetivo multiplicando cada objetivo con un peso definido (w_i) (Ec. 80).

$$MinU = \omega^{PROFIT} PROFIT + \omega^{TotFresh} TotFresh + \omega^{GHGE} GHGE \quad (138)$$

Si todos los pesos son positivos y el frente Pareto es convexo, el mínimo de la función siempre será un óptimo de Pareto.

Restricción Épsilon (ϵ -constraint)

En este método una de las funciones objetivo se optimiza mientras que todas las otras funciones están limitadas por medio de restricciones adicionales.

$$Min(PROFIT) \quad (139)$$

$$Min(TotFresh) \quad (140)$$

$$Min(GHGE) \quad (141)$$

Sujeto a:

$$PROFIT \leq \epsilon_{PROFIT} \quad (139-a)$$

$$TotFresh \leq \epsilon_{TotFresh} \quad (140-a)$$

$$GHGE \leq \epsilon_{GHGE} \quad (141-a)$$

Donde $(\epsilon_{PROFIT}, \epsilon_{TotFresh}, \epsilon_{GHGE})$ representan los valores de las funciones objetivos (Ecs.139, 140,141) y se van alterando para obtener el conjunto óptimo de Pareto es un rango deseado.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

Como se mencionó en los capítulos anteriores, el caso a estudiar es la comunidad de Cochoapa el Grande, localizada en el estado de Guerrero, es considerada la segunda comunidad más pobre en todo México, cuyas principales deficiencias es la falta de ingresos a los habitantes, los cuales permitan satisfacer sus necesidades básicas, cubrir con demandas de agua caliente, energía eléctrica, entre otras y con grandes problemas de salud debido en gran medida a la falta del correcto suministro de agua fresca. El modelo matemático lineal desarrollado es un problema multiobjetivo, el cual se resolverá por diferentes métodos para encontrar la solución óptima al modelo, que a continuación serán desarrollados.

Programación por metas

La programación por metas es una buena estrategia para problemas multiobjetivo, en este caso tenemos 3 funciones objetivo, en donde cada una de ellas se superpone para maximizar las ganancias (PROFIT), minimizar las emisiones de efecto invernadero (GHGE) y el consumo de agua dulce de pozo (TOTFRESH).

El método a través de una función objetivo que involucra variables de desviación positiva y negativa para cada una de las variables PROFIT, GHGE, TOTFRESH, las cuales permitirán acercarse al mínimo de cada variable, que en este caso es la meta a alcanzar.

Tabla 1. Resultados de programación por metas.

PROFIT (\$)	GHGE (Ton CO ₂)	TOTFRESH (m ³)
- 27,870,000.00	12,790,000.00	3,088,100.00

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para este método. Las emisiones de dióxido de carbono y el consumo de agua fresca son buenos resultados, sin embargo, a través de este método no es posible obtener ganancias, que no significa estar mal ya que se está cumpliendo con usar cantidades mínimas de emisiones de dióxido de carbono y bajo consumo de agua fresca. En la Figura 6 se representa la solución general con todas las tecnologías utilizadas.

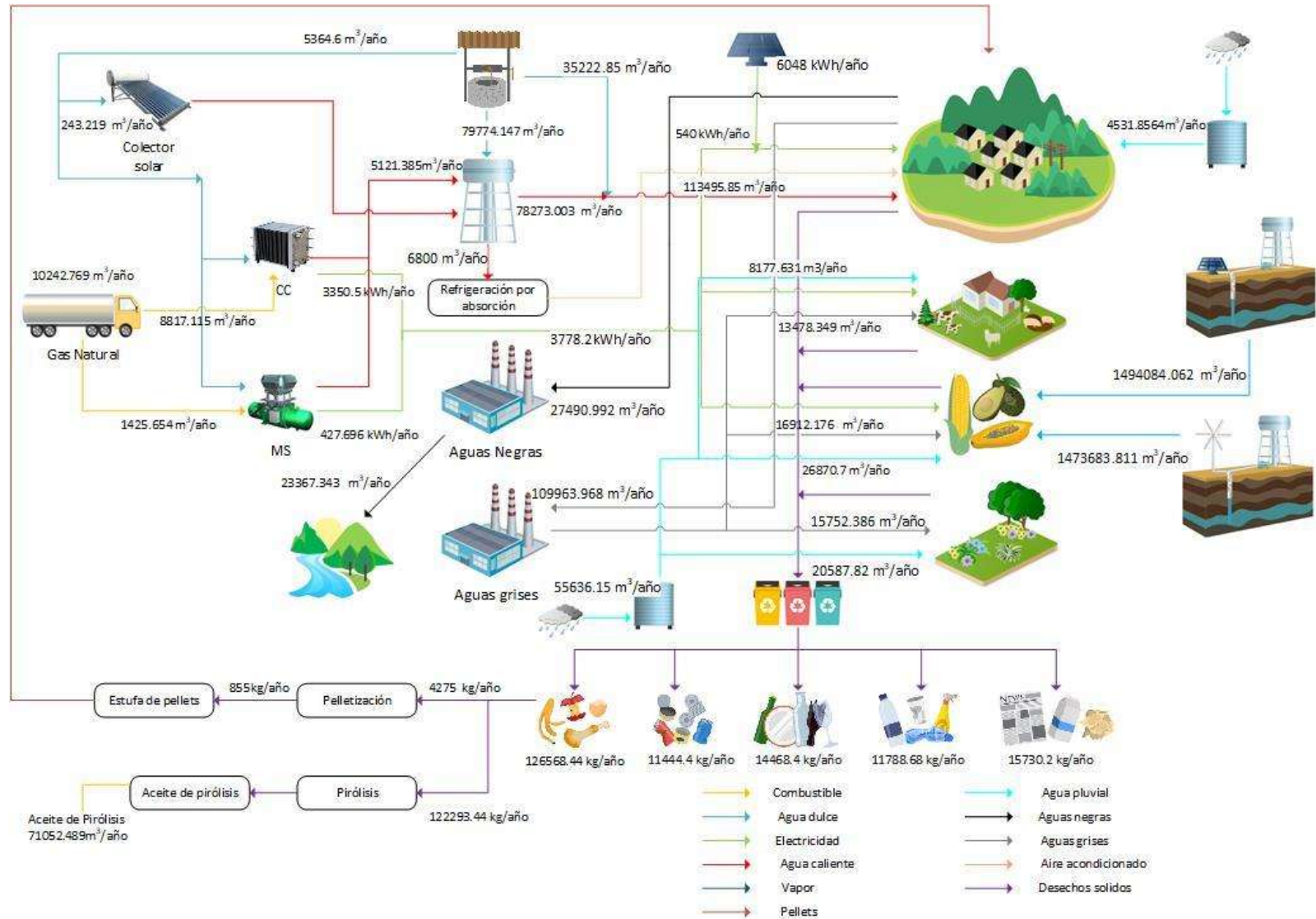


Figura 6. Diagrama de flujo representativa de programación por metas.

Método Suma Ponderada

Como se mencionó anteriormente, el método a través de generar una nueva función objetivo que incluya las variables a optimizar y a cada una de ellas se le asigna un peso que es multiplicado por cada término, el cual fue seleccionado a criterio propio para conocer el comportamiento de la varianza de los objetivos con distintos pesos.

Este método fue analizado por dos diferentes formas de abordar el tema debido a las cifras utilizadas en los resultados. En el primer caso, cada peso fue multiplicado por la variable. En la Tabla 2 se puede observar que en ninguno de los escenarios propuestos obtenemos ganancias (PROFIT), ya que solo se están generando costos para cubrir las demandas de agua fresca, energía, etc. Sin embargo, el escenario B podría representar una buena solución, ya que de acuerdo a la cantidad de dióxido de carbono emitido a la atmosfera es el mínimo, el consumo de agua fresca no es el menor pero sólo está un 2% por arriba del mínimo y si bien no tenemos ganancias el costo no es el mayor, pero a pesar de lo mencionado de acuerdo al porcentaje de insatisfacción es un poco elevado lo que significa que los al asignar los pesos no se logran satisfacer los tres objetivos de la mejor manera.

El escenario F es el que representa la menor insatisfacción con un valor de 28.74% lo que significa que los tres objetivos se están satisfaciendo de buena manera, se tiene el menor consumo de agua fresca pero en este escenario se tiene una cantidad elevada de emisiones de dióxido de carbono respecto al mínimo que se podrían tener, en el caso del objetivo de PROFIT no se logra obtener y se tiene uno de los mayores costos.

Tabla 2. Resultados del método suma ponderada sin escalarizar.

SIN ESCALARIZAR								
	WTOTFRESH	WGHGE	WPROFIT	TOTFRESH (m ³ /año)	GHGE (ton CO ₂ /año)	PROFIT (\$/año)	INSATISFACCIÓN %	N
A	1	0	0	3,060,000.00	279,700,000.00	- 136,200,000.00	148.57	
B	0	1	0	3,114,300.00	12,790,000.00	- 151,200,000.00	115.67	
C	0	0	1	3,131,300.00	562,300,000.00	- 161,000,000.00	200.00	
D	0	3	7	3,115,800.00	12,791,000.00	- 161,000,000.00	78.26	
E	3	7	0	3,088,100.00	12,790,000.00	- 151,400,000.00	78.12	
F	7	0	3	3,060,000.00	170,700,000.00	- 161,000,000.00	28.74	
G	0	5	5	3,115,800.00	12,790,000.00	- 161,000,000.00	78.26	
H	2	3	5	3,088,400.00	12,790,000.00	- 162,200,000.00	34.99	
I	5	2	3	3,088,100.00	12,790,000.00	- 161,000,000.00	39.41	
J	3	5	2	3,088,400.00	12,790,000.00	- 161,000,000.00	39.83	

El problema en el caso anterior es que los objetivos TOTFRESH, GHGE y PROFIT tienen rangos diferentes entre sí, mientras en uno tenemos valores por 10^6 en otros se tiene 10^8 o 10^{11} y al asignar los pesos debido a la magnitud no aportan demasiado a la nueva función objetivo y en donde se logran apreciar de mejor manera en la Tabla 2 es en la columna de PROFIT ya que no varía de gran medida antes los diferentes escenarios.

En la Tabla 3 se acopló una escalarización para cada objetivo forzando a que se tenga la misma magnitud. La escalarización se logra por medio de una nueva ecuación para cada objetivo haciéndolo adimensional involucrando los valores máximos y mínimos, mostrados en la Tabla 1. Al incorporar lo mencionado se logran obtener buenos resultados.

Tabla 3. Resultados de método de suma ponderada escalarizado.

ESCALARIZADO							
	WTOTFRESH	WGHGE	WPROFIT	TOTFRESH (m ³ /año)	GHGE (ton CO ₂ /año)	PROFIT (\$/año)	INSATISFACCIÓN %
A	1	0	0	3,060,000.00	279,700,000.00	- 136,200,000.00	51.70
B	0	1	0	3,114,300.00	12,790,000.00	- 151,200,000.00	46.02
C	0	0	1	3,178,000.00	629,000,000.00	27,783,000.00	300.00
D	0	3	7	3,140,500.00	12,810,000.00	27,700,000.00	168.18
E	3	7	0	3,060,000.00	92,270,000.00	- 151,400,000.00	12.79
F	7	0	3	3,069,100.00	301,500,000.00	14,044,000.00	146.89
G	0	5	5	3,146,700.00	12,810,000.00	27,691,000.00	173.43
H	2	3	5	3,063,700.00	96,820,000.00	24,765,000.00	115.09
I	5	2	3	3,063,700.00	96,820,000.00	24,765,000.00	115.09
J	3	5	2	3,063,700.00	98,200,000.00	24,699,000.00	115.27

El escenario E, con valores de pesos propuestos representa 12.79% de insatisfacción logrando satisfacer las demandas con un consumo de agua fresca con la menor cantidad, las emisiones de gases de efecto invernadero representan un incremento muy considerable, pero solo se generan costos y no se logran obtener ganancias. El escenario donde se logran mayores ganancias es el escenario C, sin embargo, no representa una buena solución que se ve reflejado con 300% de insatisfacción, siendo el peor escenario en cuanto a las emisiones de dióxido de carbono y consumo de agua fresca.

Método Restricción Épsilon (ϵ -constraint)

El método consiste en dar prioridad a cada una de las funciones objetivo minimizando o maximizando cada una de ellas por separado y así ver cuál es el comportamiento de las demás variables a optimizar (ver Tabla 4).

Tabla 4. Método ϵ constraint, maximizando ganancias, minimizando emisiones de CO₂ y el consumo de agua fresca.

	PROFIT (\$)	GHGE (Ton CO₂)	TOTFRESH (m³)
MAX PROFIT (\$)	27,873,000.00	899,500,000.00	3,178,700.00
MIN GHGE (Ton CO₂)	- 151,200,000.00	12,790,000.00	3,114,300.00
MIN TOTFRESH (m³)	- 136,620,000.00	279,700,000.00	3,060,000.00

Para conocer el comportamiento de las variables ganancias (PROFIT), emisiones de dióxido de carbono (GHGE) y consumo de agua fresca proveniente de pozo (TOTFRESH), se realizaron dos escenarios en donde se generan diferentes puntos entre el mínimo y máximo valor obtenido de la Tabla 4 para las variables GHGE y TOTFRESH maximizando las ganancias. Los puntos obtenidos permiten conocer el conjunto Pareto.

El primer Pareto es para conocer el comportamiento de la variable del consumo de agua fresca maximizando las ganancias (ver Tabla 5).

Tabla 5. Escenarios para el comportamiento de consumo de agua maximizando ganancias.

	TOTFRESH (m³)	PROFIT (\$)	GHGE (Ton CO₂)
A	3,083,740.00	27,639,000.00	478,300,000.00
B	3,095,610.00	27,709,000.00	485,200,000.00
C	3,107,480.00	27,851,000.00	632,300,000.00
D	3,119,350.00	27,857,000.00	845,800,000.00
E	3,131,220.00	27,857,000.00	900,200,000.00
F	3,143,090.00	27,863,000.00	900,200,000.00
G	3,154,960.00	27,865,000.00	900,200,000.00
H	3,166,830.00	27,867,000.00	673,300,000.00
I	3,178,700.00	27,873,000.00	899,500,000.00

Los resultados obtenidos muestran escenarios importantes. (Ver Figura 7) El escenario A representa el mínimo para consumo de agua fresca, pero a su vez las mínimas ganancias obtenidas. Por otra parte, el escenario I muestra el máximo consumo de agua fresca de pozo y las máximas ganancias. Sin embargo, los escenarios D, E, F, G y H muestran un consumo de agua considerable aumentando alrededor de 0.3-0.5% respectivamente y no un incremento significativo en las ganancias en cada uno de los escenarios (0.1%), motivo por el cual dichos escenarios no son de gran interés.

El escenario C podría significar una solución atractiva para el modelo lineal multiobjetivo ya que presenta una cantidad mayor de ganancias (0.7%) y un aumento del consumo de agua de 0.7% respecto al escenario A. El escenario C respecto al escenario I, muestra que el consumo de agua es reducido de manera significativa (2%) y si bien las ganancias son menores en un 0.1% no presenta gran importancia y en conjunto con la reducción de agua hacen a este escenario una solución atractiva. En las Figuras 8,9 y 10 se muestra los escenarios discutidos.

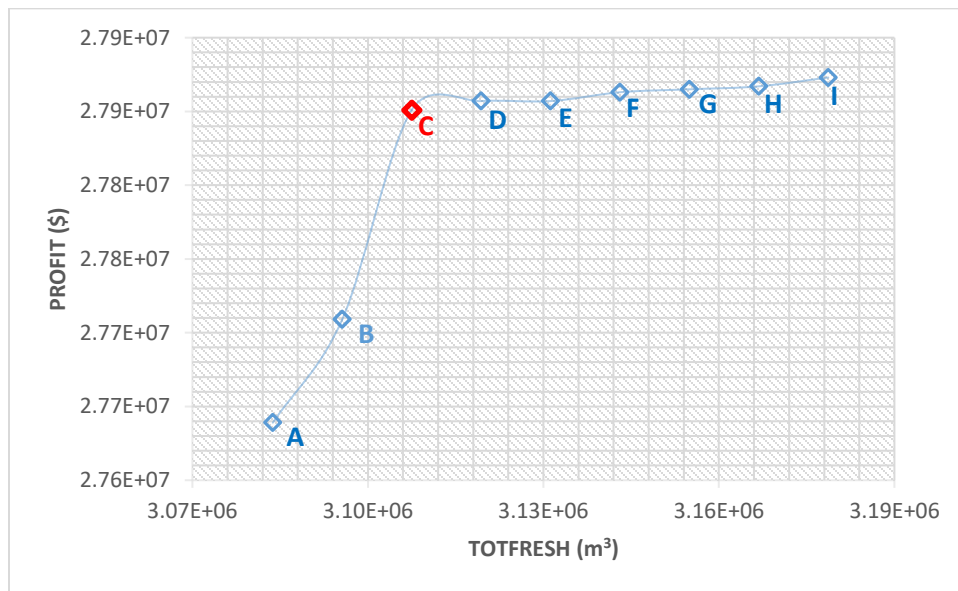


Figura 7. Conjunto Pareto consumo de agua vs ganancias.

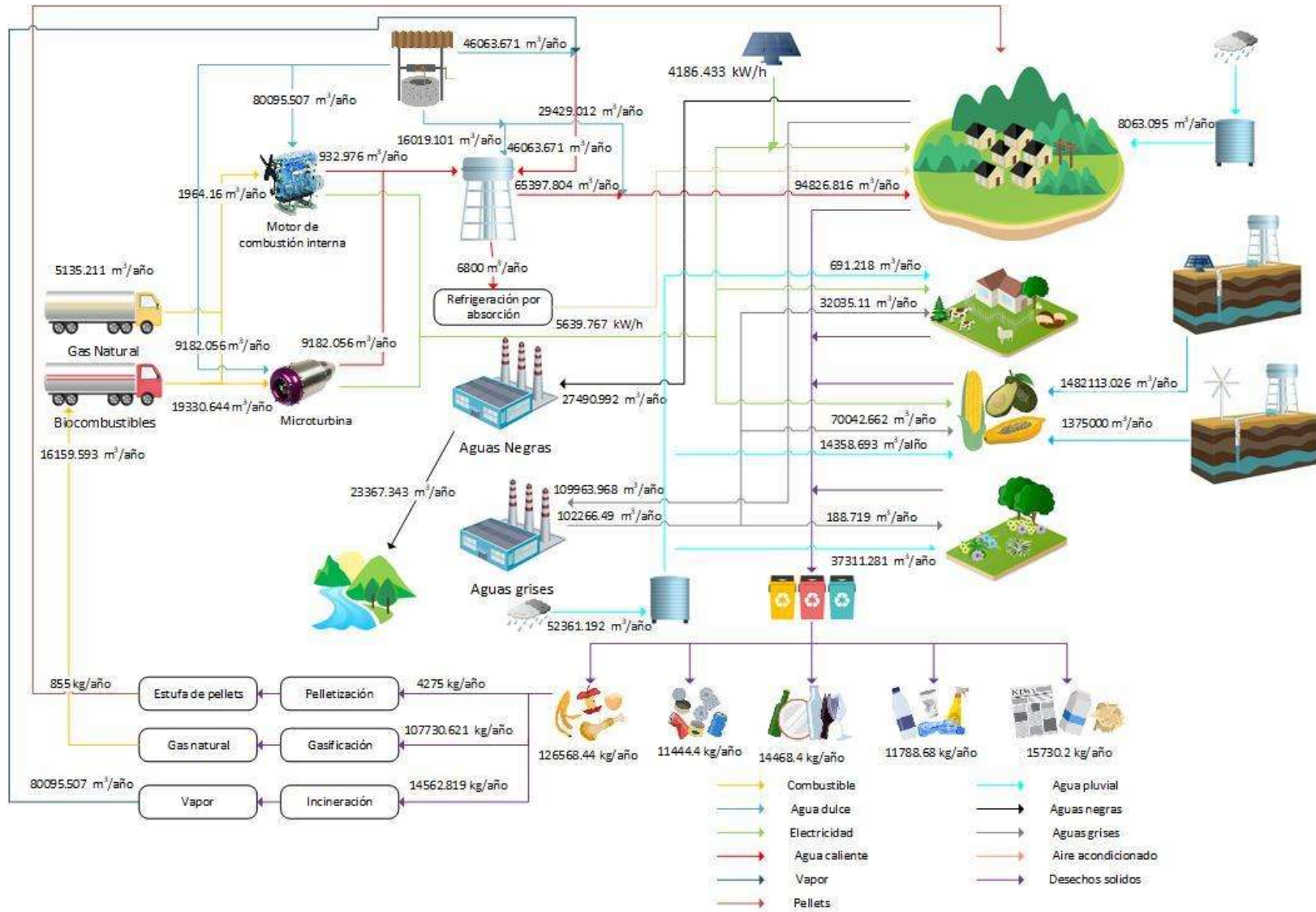


Figura 8. Diagrama de flujo representativa de método epsilon constraint escenario A minimizando el consumo de agua.

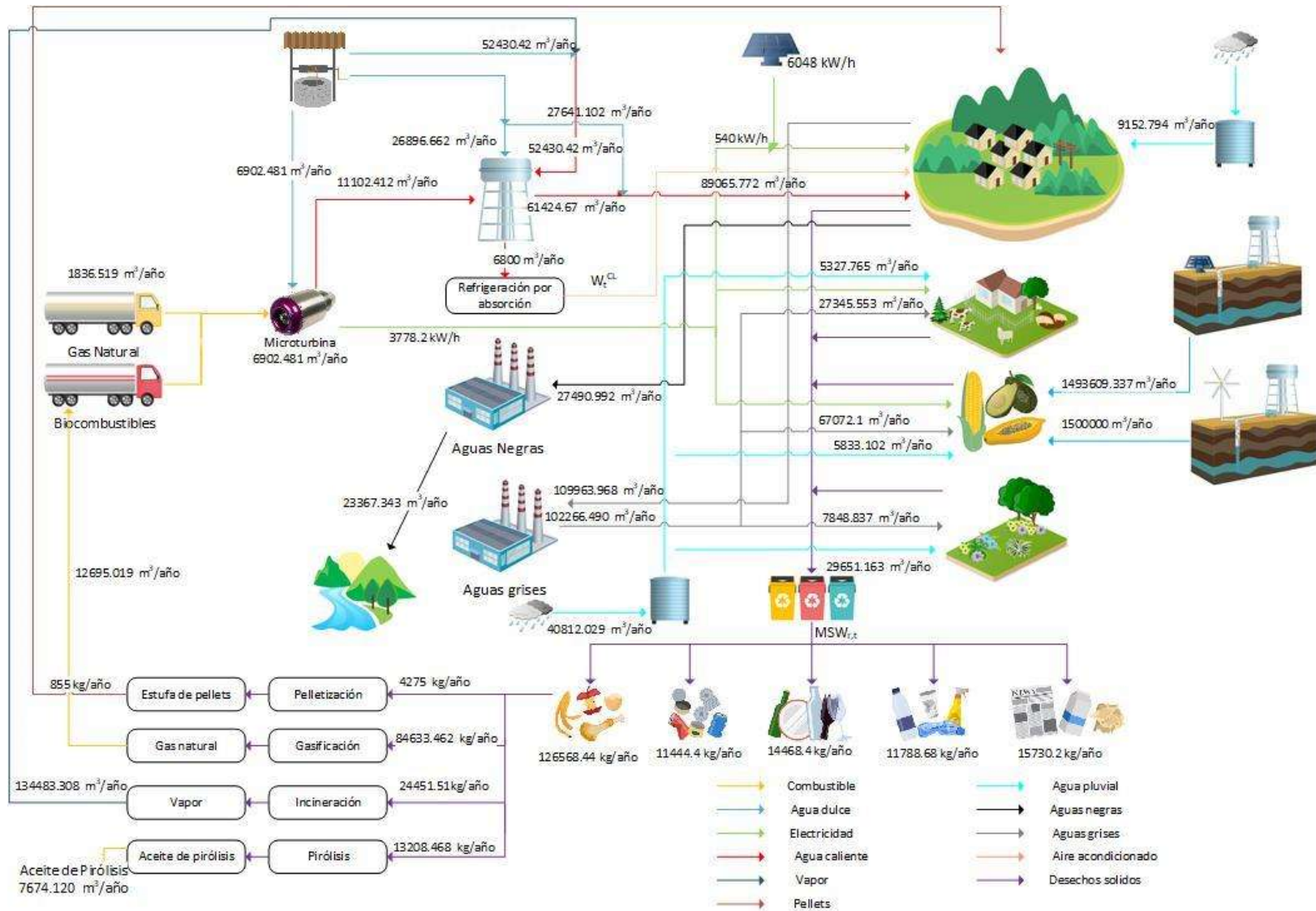


Figura 9. Diagrama de flujo representativa de método ϵ constraint escenario C minimizando el consumo de agua.

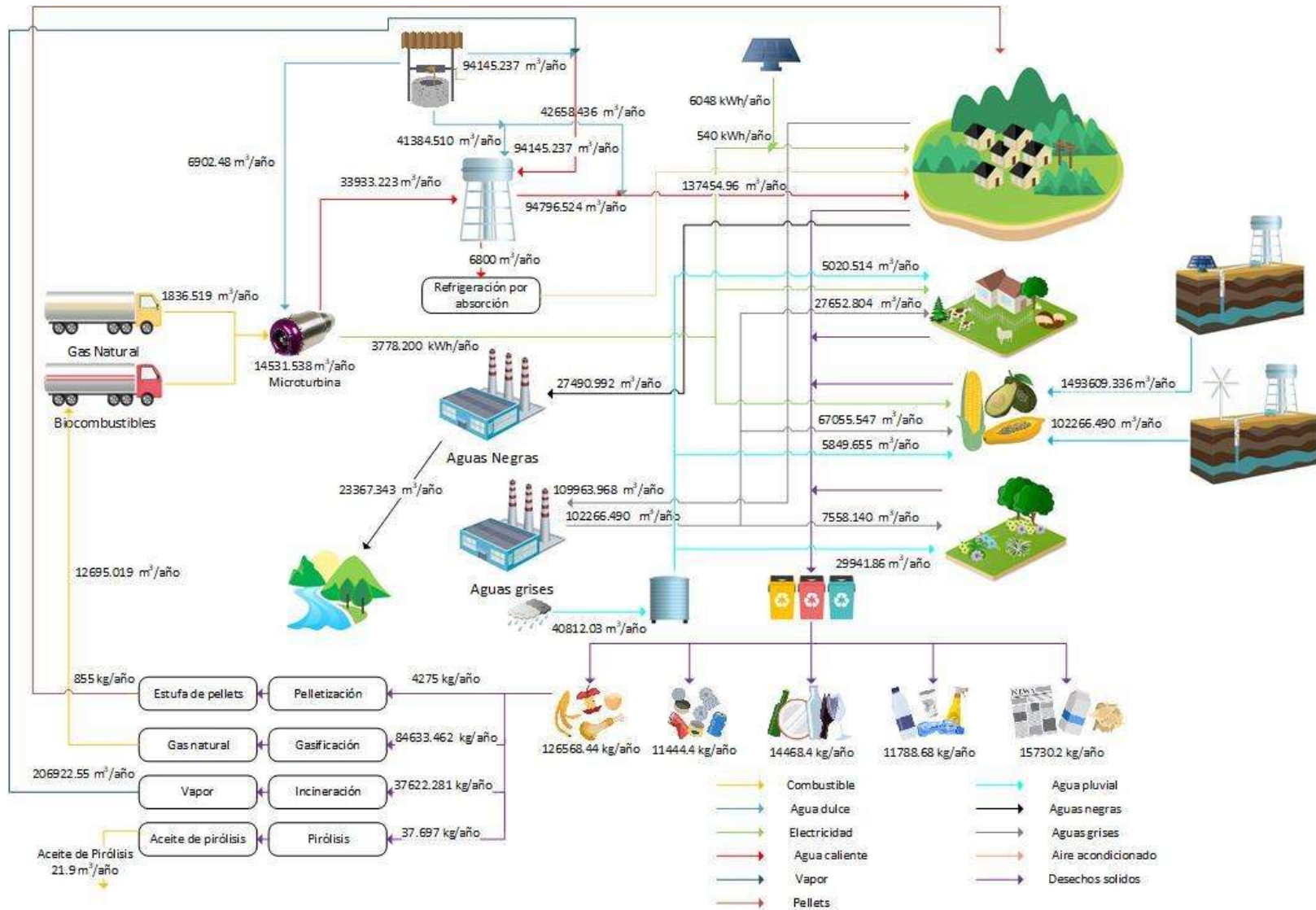


Figura 10. Diagrama de flujo representativa de método epsilon constraint escenario I minimizando el consumo de agua.

El segundo Pareto fue obtenido con los datos de la Tabla 6, se obtuvieron diferentes escenarios para la variación de emisiones de dióxido de carbono (GHGE) maximizando las ganancias (PROFIT).

Tabla 6. Escenarios para el comportamiento de emisiones de CO₂ maximizando ganancias.

	GHGE (Ton CO₂)	PROFIT (\$)	TOTFRESH (m³)
A	190,132,000.00	27,658,000.00	3,137,900.00
B	278,803,000.00	27,705,000.00	3,137,900.00
C	367,474,000.00	27,860,000.00	3,149,300.00
D	456,145,000.00	27,881,000.00	3,147,600.00
E	544,816,000.00	27,864,000.00	3,159,100.00
F	633,487,000.00	27,866,000.00	3,164,000.00
G	722,158,000.00	27,869,000.00	3,168,900.00
H	810,829,000.00	27,871,000.00	3,173,800.00

Los escenarios mostrados en la Tabla 6 permiten la construcción del Pareto que se presenta en la Figura 11. En esta ocasión, los escenarios creados son valores entre el máximo y el mínimo de la variable de emisiones de efecto invernadero, para conocer su comportamiento maximizando las ganancias.

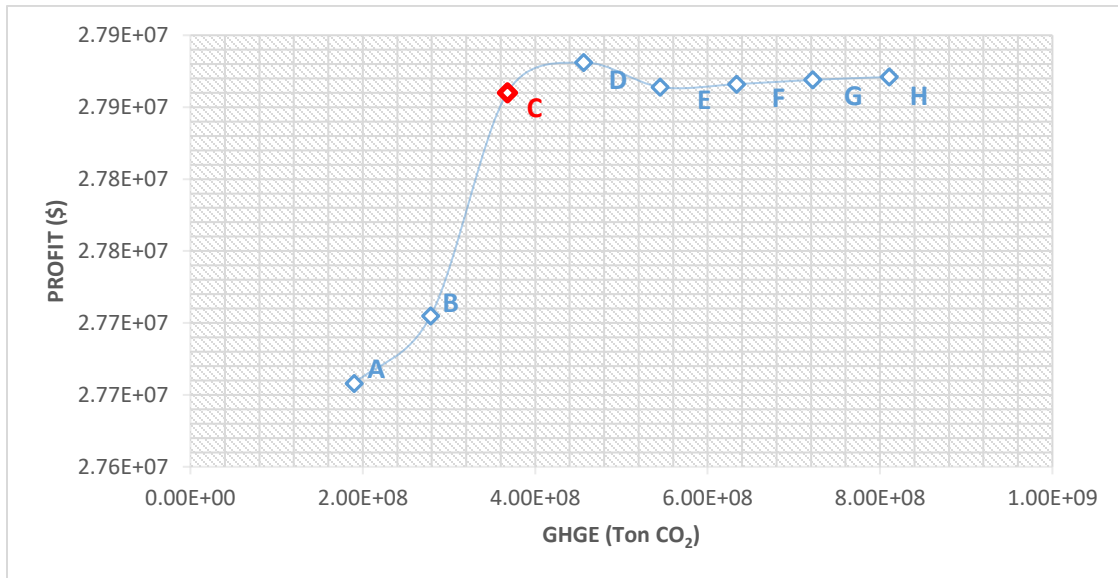


Figura 11. Conjunto Pareto de emisiones de CO₂ vs ganancias.

El escenario A representa la mínima cantidad de emisiones de dióxido de carbono y a su vez la menor cantidad de ganancias que se podrían obtener. La mayor cantidad de emisiones de dióxido de carbono se puede observar en el escenario H, sin embargo, este no tiene la mayor cantidad de ganancias, razón por la cual el escenario H no representa una buena solución al igual que los escenarios E, F y G que representan incrementos en la cantidad de emisiones de dióxido de carbono aproximados de 10-14%, respectivamente, mientras que las ganancias no aumentan significativamente.

Por otra parte, el escenario D parece ser una buena solución para el modelo multiobjetivo ya que representa la mayor ganancia obtenida en todos los escenarios y una cantidad de emisiones de dióxido de carbono que podrían ser considerables. Sin embargo, el escenario C también muestra buenos resultados, ya que disminuye en un 20% las emisiones de dióxido de carbono respecto al escenario D y aumenta un 49% respecto al mínimo que de acuerdo con el resto de los escenarios es muy bueno. Las ganancias en el escenario C también muestran un buen resultado disminuyendo 0.07% respecto del máximo y aumentado 0.8% respecto al mínimo. En las Figuras 12, 13 y 14 se muestran las superestructuras para los escenarios analizados.

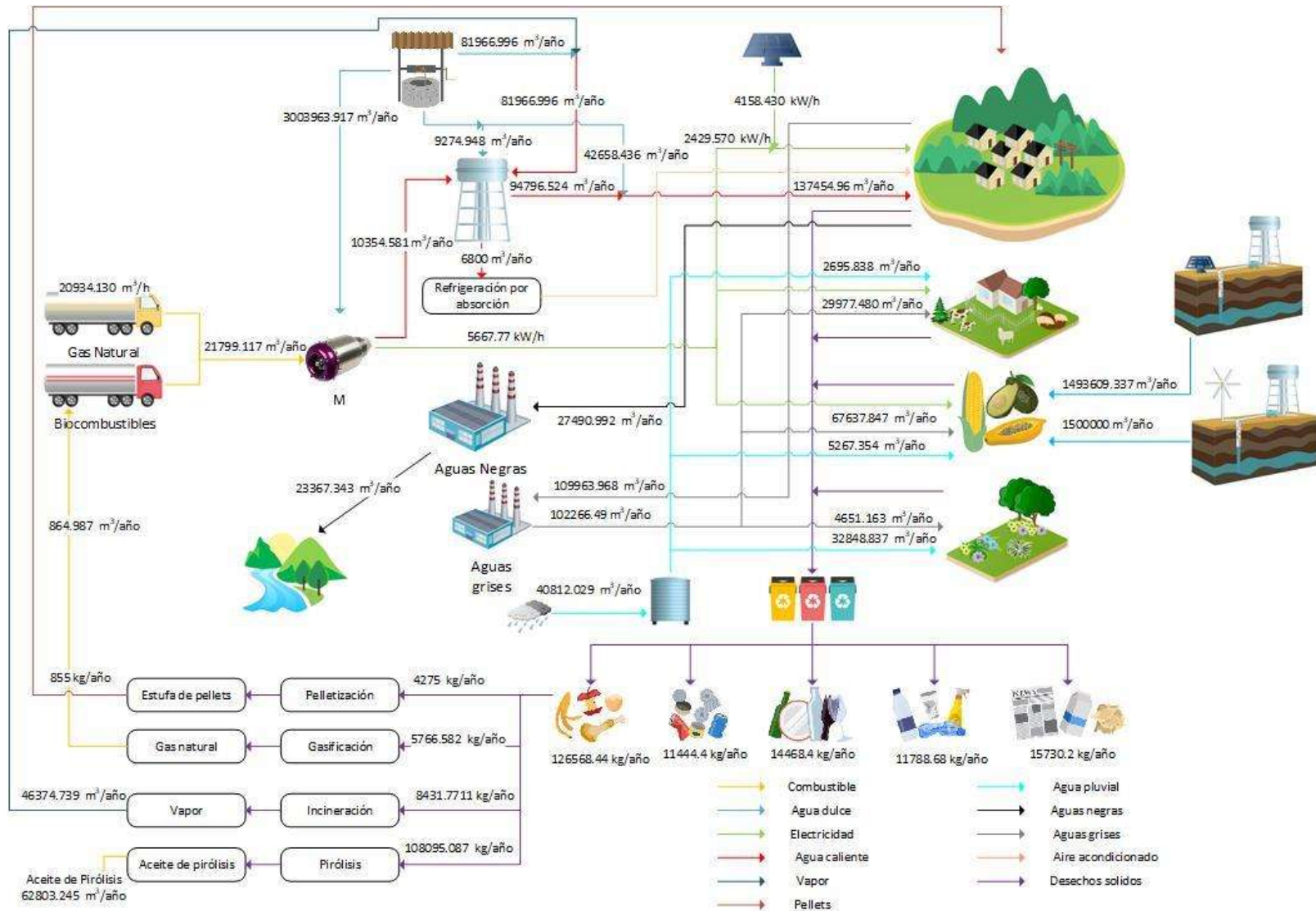


Figura 12. Diagrama de flujo representativa de método epsilon constraint escenario A minimizando las emisiones de CO₂.

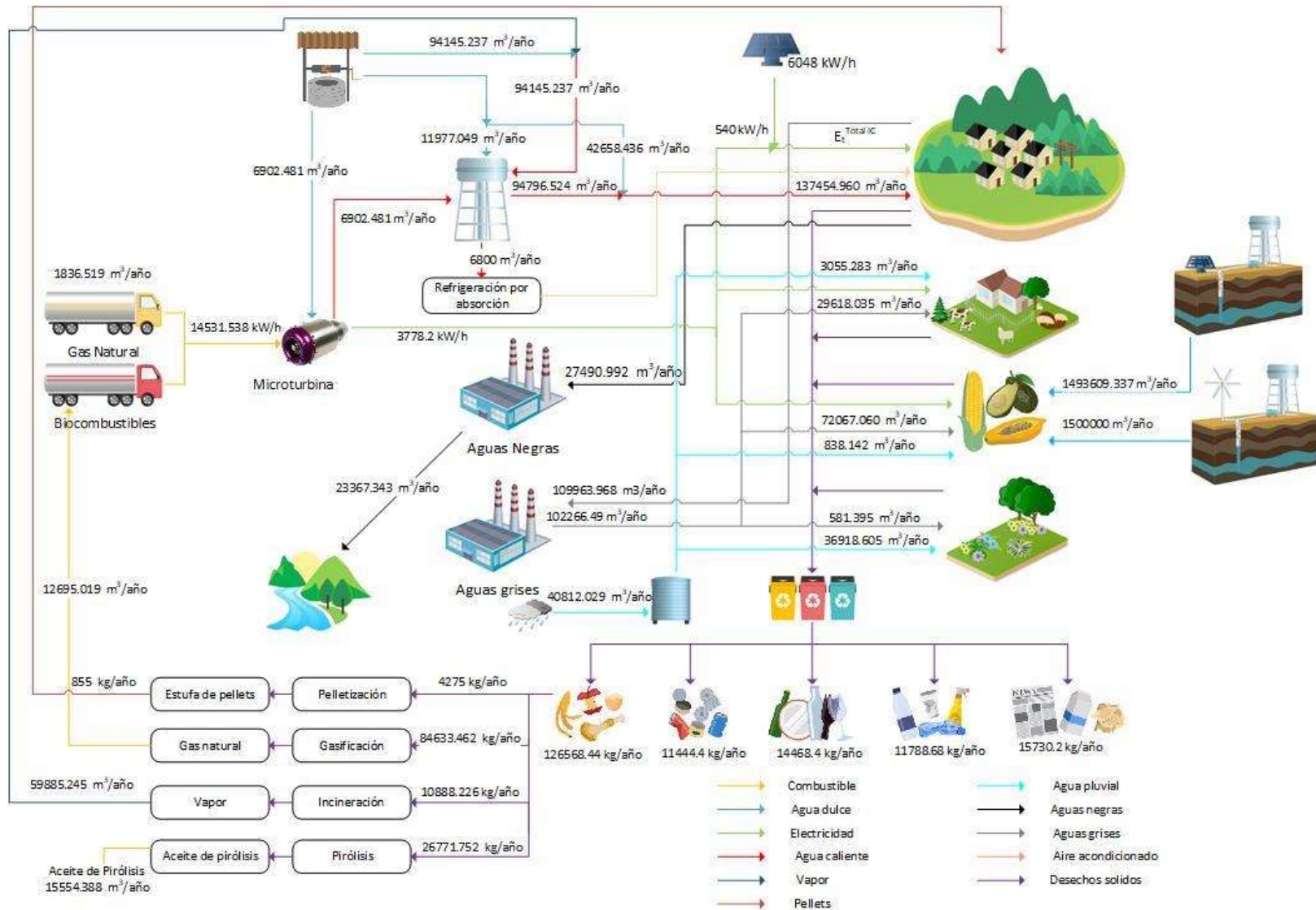


Figura 13. Diagrama de flujo representativa de método epsilon constraint escenario C minimizando las emisiones de CO₂.

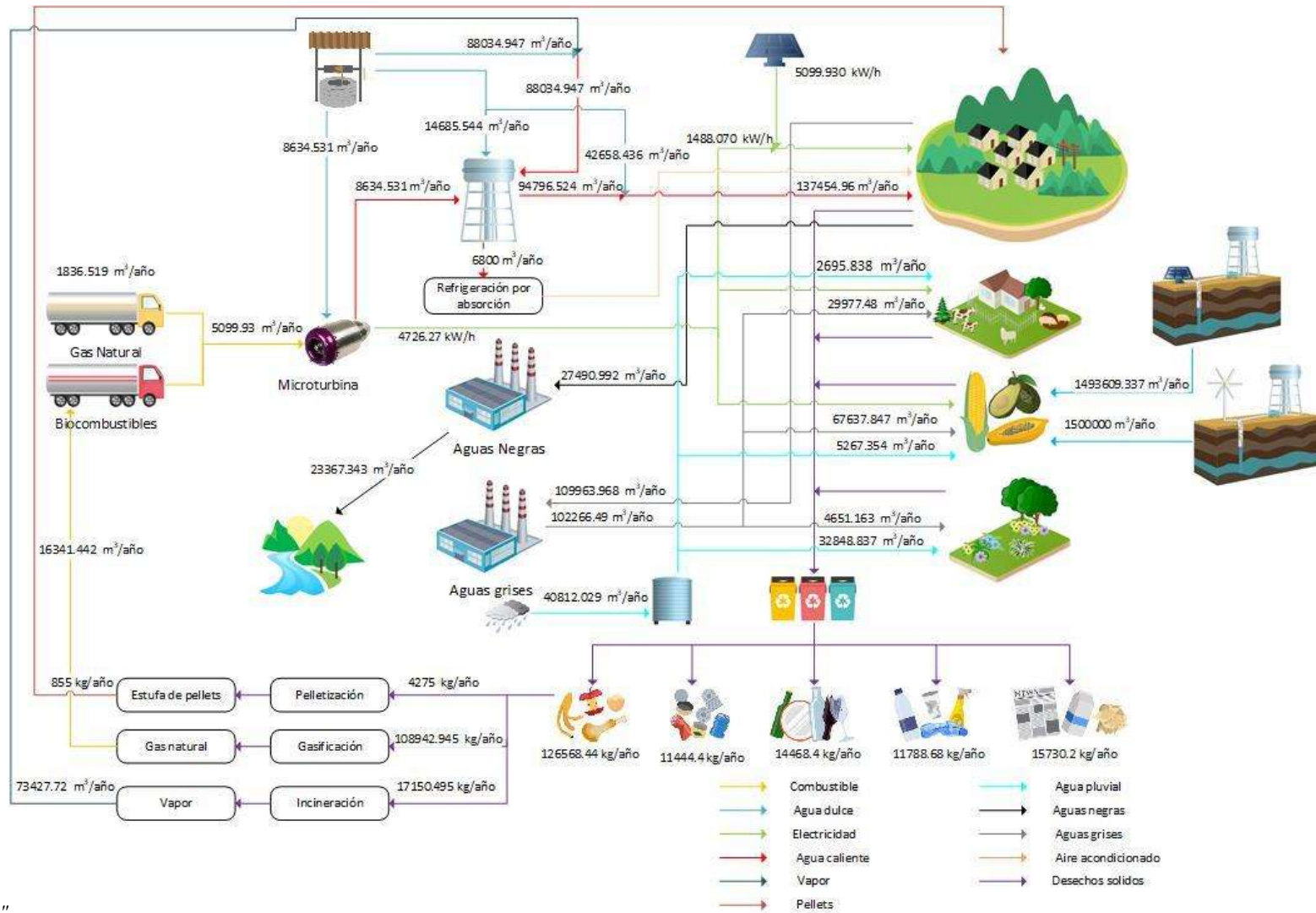


Figura 14. Diagrama de flujo representativa de método epsilon constraint escenario D minimizando las emisiones de CO₂.

Comparación de métodos multiobjetivo

Tabla 7. Comparación de resultados de métodos multiobjetivo de tipo deterministas.

	PROFIT (\$/año)	GHGE (Ton CO ₂ /año)	TOTFRESH (m ³ /año)
METAS	-27,870,000.00	12,790,000.00	3,088,100.00
SUMA PONDERADA	-161,000,000.00	170,700,000.00	3,060,000.00
SUMA PONDERADA ESCALARIZADO	-151,400,000.00	92,270,000.00	3,060,000.00
EPSILON CONSTRAINT MAX PROFIT	27,851,000.00	632,300,000.00	3,107,480.00
EPSILON CONSTRAINT	27,860,000.00	367,474,000.00	3,149,300.00

En la Tabla 7 se puede observar los resultados de las mejores soluciones seleccionadas para resolver el problema multiobjetivo aplicado a la comunidad de Cochoapa el Grande. Se puede apreciar de mejor en la Figura 15. Solo en el método épsilon constraint maximizando las ganancias y minimizando las emisiones de dióxido de carbono se logra obtener ganancias, sin embargo, el incremento en las emisiones de dióxido de carbono se elevan a gran escala por lo que elegir estos como mejores soluciones, por lo que no parece atractivo.

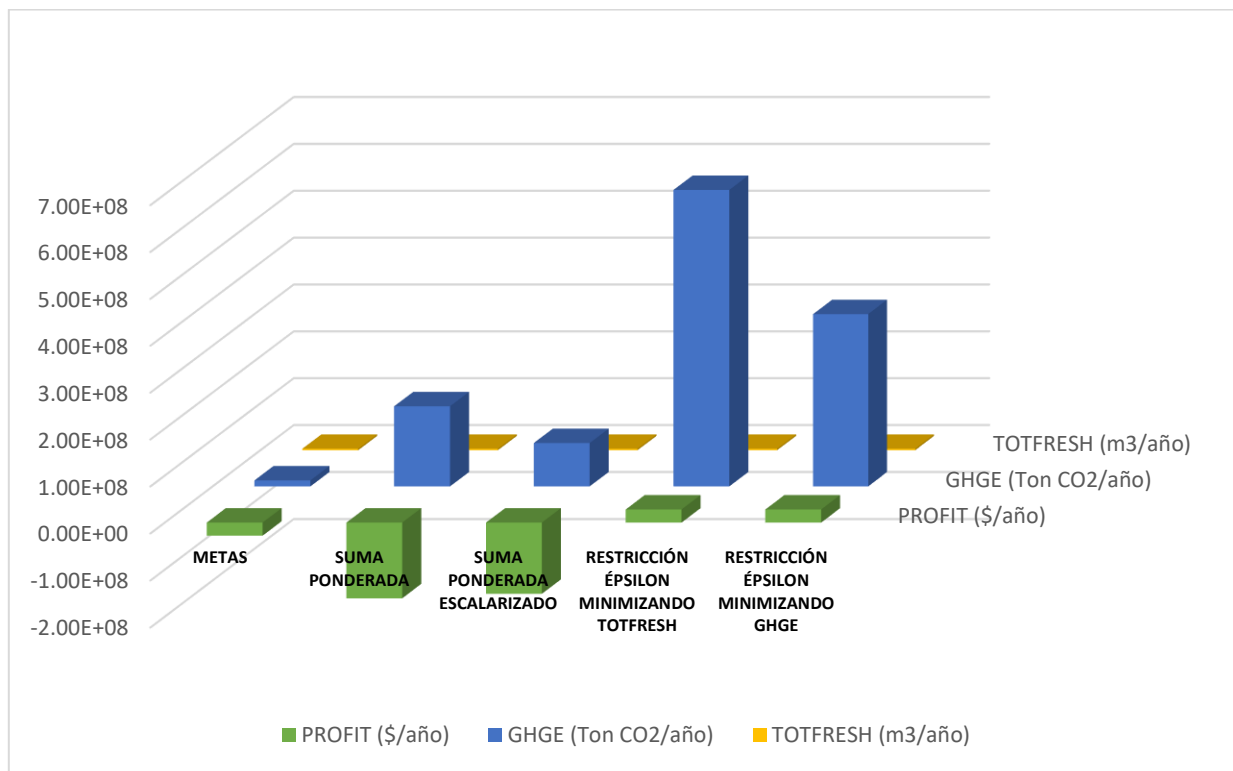


Figura 15. Comparación de métodos multiobjetivo de tipo deterministas.

La solución obtenida por el método de metas es considerada la mejor resultante. Si bien ahí no se logran tener ganancias el costo por instalación y operación de toda la red de distribución es considerable y las emisiones de gases de efecto invernadero como CO₂ son al mínimo, así como el uso de agua fresca extraída del pozo. Por lo anterior dicha solución es prometedora para el suministro de servicios básicos como energía eléctrica, servicio de agua caliente y agua potable para el cumplimiento de demanda y cuidando el medio ambiente, aplicado a una comunidad aislada de bajos recursos.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

La comunidad de Cochoapa el Grande, ubicada en el estado de Guerrero, México; es un lugar con extrema pobreza ya que las necesidades básicas de sus habitantes no se ven completadas por la escases de mercado local y oportunidades para desarrollarse en aspectos sociales y económicos. El modelo matemático lineal desarrollado consistió en incorporar técnicas de poligeneración entre los cuales se encuentran el uso de unidades de cogeneración como son microturbina, motor de combustión interna, motor Stirling y la celda de combustible, además de plantas incineración, gasificación, pirólisis, etc., para el abastecimiento de demandas de energía eléctrica, agua caliente, vapor, aceites de pirólisis y gas natural, además del uso de energías renovables. También, el uso de colectores de agua pluvial disminuye la extracción de agua fresca. La solución para el problema multiobjetivo consistió en algunos métodos de tipo deterministas como suma ponderada, programación por metas, ϵ constraint con escalarización y sin escalarización. En donde se demostró que no sólo es posible cubrir las demandas de energía eléctrica, agua fresca y calor, si no lograr obtener ganancias gracias a la existencia de plantas tratadoras de aguas grises y negras, planta de pelletización, incineración, digestión anaeróbica, producción de aceite de pirólisis y gas natural.

RECOMENDACIONES

La pobreza y el correcto uso de recursos naturales es un gran problema que persiste alrededor de todo el mundo y en comunidades de aisladas de bajos recursos dichos problemas se intensifican. Si bien los resultados del proyecto arrojan soluciones las cuales son prometedores para la implementación de redes de distribución de agua potable, energía eléctrica y suministro de agua caliente, para el abastecimiento de las demandas de una comunidad específica, aún queda por realizar. Un gran campo de investigación sería incluir todos los aspectos que conforma en Índice de Desarrollo Humano como educación, salud e ingresos de capital, ya que en cada localidad este valor se ve afectado de diferente manera y que es de vital importancia para mejorar la calidad de vida de sus habitantes y el cumplimiento de metas importantes para cada individuo.

NOMENCLATURA

Conjuntos

a	Conjunto para diferentes tipos de animales
c	Conjunto para diferentes tipos de cultivo
r	Conjunto para diferentes tipos de residuos sólidos
t	Conjunto referente al tiempo
u	Conjunto referente a las unidades de cogeneración
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 generado por aguas negras
α^{BWT}	Factor de conversión para planta de tratamiento de aguas negras
α^{GW}	Factor generado por aguas grises
α^{GWT}	Factor de conversión para planta de tratamiento de aguas grises
ΔT	Delta para temperatura
δ^{AD}	Factor de producción para planta de digestión anaeróbica
δ^{IN}	Factor de producción para planta de incineración
δ^{GAS}	Factor de producción para planta de gasificación
δ^{PEL}	Factor para planta de pelletización
δ^{PYROIL}	Factor de producción para planta de pirolisis
$\eta_{u,t}^E$	Eficiencia eléctrica de las unidades de cogeneración
$\eta_{u,t}^Q$	Eficiencia térmica de las unidades de cogeneración

η^{SP}	Eficiencia de panel solar
τ^{HW}	Factor de calentamiento de agua dulce por vapor
$\theta_{c,t}^{C-MAX}$	Producción máxima de cultivos
$\theta_{c,t}^{C-MIN}$	Producción mínima de cultivos
ρ^{air}	Densidad del aire
ρ^w	Densidad del agua
$\varphi_{c,t}$	Factor de producción
ϕ_a^{wreq}	Factor de agua requerido por animal
ϕ_a^{growth}	Factor de crecimiento de los animales
γ^{AD}	Factor de emisión asociado a la planta de digestión anaeróbica
γ^{CHP}	Factor de emisión asociado a las unidades de cogeneración
γ^{GAS}	Factor de emisión asociado a la planta de gasificación
γ^{IN}	Factor de emisión asociado a la planta de incineración
γ^{PEL}	Factor de emisión asociado a la planta de pelletización
γ^{PYR}	Factor de emisión asociado a la planta de pirolisis
λ_u	Fracción de agua proveniente de las unidades de cogeneración enviadas al tanque de almacenamiento térmico
λ^{FreshC}	Fracción de agua enviada a la comunidad
λ^{SC}	Fracción de agua del colector solar enviada al tanque de almacenamiento térmico
λ^{St}	Fracción de agua dulce 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 comunitario de agua de lluvia
A^{RW-MAX}	Área máxima disponible para el colector de agua de lluvia de ganado, agricultura y jardinería
Cap^{AC-MAX}	Capacidad máxima disponible del sistema de refrigeración por absorción
Cap^{AD-MAX}	Capacidad máxima disponible de la planta de digestión anaeróbica
$Cap_u^{CHP-MAX}$	Capacidad máxima disponible de las unidades de cogeneración
Cap^{BW-MAX}	Capacidad máxima disponible de la planta de tratamiento de aguas negras
$Cap^{GAS-MAX}$	Capacidad máxima disponible de la planta de gasificación
Cap^{GW-MAX}	Capacidad máxima disponible de la planta de aguas grises
Cap^{IN-MAX}	Capacidad máxima disponible de la planta de incineración
Cap_{pw}^{PP-MAX}	Capacidad máxima disponible de la bomba fotovoltaica
Cap_s^{PS-MAX}	Capacidad máxima disponible de la estufa de pellets
$Cap^{PEL-MAX}$	Capacidad máxima disponible de la planta de pelletización
$Cap^{PYR-MAX}$	Capacidad máxima disponible de la planta de pirólisis
$Cap^{RWSS-IC-MAX}$	Capacidad máxima disponible del sistema de almacenamiento de agua de lluvia de la comunidad
$Cap^{RWSS-MAX}$	Capacidad máxima disponible del sistema de almacenamiento de agua de lluvia
Cap^{ST-MAX}	Capacidad máxima disponible del tanque de almacenamiento
Cap_{ww}^{WP-MAX}	Capacidad máxima disponible de bomba eólica

CP^{\max}	Coefficiente de potencia máxima
Cp	Capacidad de calor del agua
$E_t^{\text{CHP-agriculture}}$	La demanda de electricidad en la agricultura
$E_t^{\text{CHP-cattle}}$	La demanda de electricidad en el ganado
$E_t^{\text{Total-IC}}$	Electricidad total suministrada a la comunidad
$F\text{Cost}_u$	Costo fijo de cada una de las unidades de cogeneración
$F\text{Cost}^{\text{AC}}$	Costo fijo del sistema de refrigeración por absorción
$F\text{Cost}^{\text{AD}}$	Costo fijo de la planta de digestión anaeróbica
$F\text{Cost}^{\text{AG}}$	Costo fijo de los aerogeneradores
$F\text{Cost}^{\text{BW}}$	Costo fijo de la planta de tratamiento de aguas negras
$F\text{Cost}^{\text{IN}}$	Costo fijo de la planta de incineración
$F\text{Cost}^{\text{GAS}}$	Costo fijo de la planta de gasificación
$F\text{Cost}^{\text{GW}}$	Costo fijo de la planta de aguas grises
$F\text{Cost}^{\text{PP}}$	Costo fijo del bombeo fotovoltaico
$F\text{Cost}^{\text{PS}}$	Costo fijo de la estufa de pellets
$F\text{Cost}^{\text{PEL}}$	Costo fijo de la planta de pelletización
$F\text{Cost}^{\text{PYR}}$	Costo fijo de la planta de pirólisis
$F\text{Cost}^{\text{SC}}$	Costo fijo del colector solar
$F\text{Cost}^{\text{SP}}$	Costo fijo del panel solar
$F\text{Cost}^{\text{ST}}$	Costo fijo del tanque de almacenamiento
$F\text{Cost}^{\text{RW}}$	Costo fijo del sistema de recolección de agua de lluvia para ganado, agricultura y jardinería
$F\text{Cost}^{\text{RW-IC}}$	Costo fijo del sistema de almacenamiento de agua de lluvia de la comunidad
$F\text{Cost}^{\text{WP}}$	Costo fijo del sistema de bomba eólica
$MSW_{r,t}^{\text{agriculture}}$	Residuos sólidos generados en la agricultura
$MSW_{r,t}^{\text{cattle}}$	Residuos sólidos generados en el ganado

$MSW_{r,t}^{IC}$	Residuos sólidos generados en la comunidad
$MSW_{r,t}^{garden}$	Residuos sólidos generados en jardinería
$MSW_{r,t}^{Total}$	Total de residuos sólidos generados en la agricultura
$MSW_{r=1,t}^{Total}$	Residuos sólidos no reciclables
PR	Coficiente de rendimiento
Speed _t	Velocidad del viento
UC ^{FreshW}	Costo unitario de agua dulce
UC ^{NG}	Costo unitario 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 de 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 ^{PP} _{pw}	Costo de operación y mantenimiento de la bomba fotovoltaica
UCOM ^{PEL}	Costo de operación y mantenimiento de la planta de pelletización
UCOM ^{PYR}	Costo de operación y mantenimiento de la planta de pirólisis
UCOM ^{SC}	Costo de operación y mantenimiento del colector solar
UCOM ^{WP} _{vw}	Costo de operación y mantenimiento de bomba eólica
USC _a ^A	Costo de venta unitario de los animales
USC _c ^C	Costo de venta unitario de los cultivos

USC_r^{MSW}	Costo de venta unitario de los desechos sólidos municipales
USC^{AD}	Costo de venta unitario del biogás producido en el digestor anaeróbico
USC^{GAS}	Costo de venta unitario de gas natural producido en la planta de gasificación
USC^{PEL}	Costo de venta unitario de pellets
$USC^{PYR-OIL}$	Costo de venta unitario de aceite de pirólisis
$VCost_u$	Costo variable de las unidades de cogeneración
$VCost^{AC}$	Costo variable del sistema de refrigeración por absorción
$VCost^{AD}$	Costo variable de la planta de digestión anaeróbica
$VCost^{AG}$	Costo variable de los aerogeneradores
$VCost^{BW}$	Costo variable de la planta de tratamiento de aguas negras
$VCost^{GAS}$	Costo variable de la planta de gasificación
$VCost^{GW}$	Costo variable de la planta de aguas grises
$VCost^{IN}$	Costo variable de la planta de incineración
$VCost_{pw}^{PP}$	Costo variable del bombeo fotovoltaico
$VCost^{PS}$	Costo variable de la estufa de pellets
$VCost^{PEL}$	Costo variable de la planta de pelletización
$VCost^{PYR}$	Costo variable de la planta de pirólisis
$VCost^{RWSS-IC}$	Costo variable del sistema de almacenamiento de agua de lluvia de la comunidad
$VCost^{RWSS}$	Costo variable del sistema de almacenamiento de agua de lluvia
$VCost^{RW}$	Costo variable del sistema colector de agua de lluvia de la comunidad
$VCost^{RW-IC}$	Costo variable del sistema colector de agua de lluvia
$VCost^{SC}$	Costo variable del colector solar
$VCost^{SP}$	Costo variable del panel solar
$VCost^{ST}$	Costo variable del tanque de almacenamiento

$V\text{Cost}_{ww}^{WP}$	Costo variable del bombeo del viento
W_t^{CL}	Demanda de aire acondicionado para la comunidad
W_t^{garden}	Demanda de agua en jardinería
$W_t^{\text{Total-IC}}$	Demanda de agua en la comunidad
Variables	
$a_{a,t}$	Animales producidos en ganado
A_c	Área disponible para cultivos
A^{AG}	Área disponible para la instalación de aerogeneradores
A^{rotor}	Área del rotor para aerogeneradores
A^{RW-IC}	Área de agua de lluvia para la comunidad
A^{RW}	Área de agua de lluvia para el ganado, la agricultura y la jardinería
A^{SC}	Área del colector solar
A^{SP}	Área del panel solar
$c_{c,t}$	Cultivos producidos en la agricultura
Cap^{AC}	Capacidad del sistema de refrigeración de absorción
Cap^{AD}	Capacidad de la planta de digestión anaeróbica
Cap^{BW}	Capacidad de la planta de tratamiento de aguas negras
Cap_u^{CHP}	Capacidad de las unidades de cogeneración
Cap^{GAS}	Capacidad de la planta de gasificación
Cap^{GW}	Capacidad de la planta de aguas grises
Cap^{IN}	Capacidad de la planta de incineración
Cap_{pw}^{PP}	Capacidad del bombeo fotovoltaico
Cap_s^{PS}	Capacidad de la estufa de pellets

Cap^{PEL}	Capacidad de la planta de pelletización
Cap^{PYR}	Capacidad de la planta de pirólisis
$Cap^{RWSS-IC}$	Capacidad del sistema de almacenamiento de agua de lluvia de la comunidad
Cap^{RWSS}	Capacidad del sistema de almacenamiento de agua de lluvia
Cap^{ST}	Capacidad del tanque de almacenamiento
Cap_{ww}^{WP}	Capacidad de bomba eólica
$CapCost_u$	Costo de capital de las unidades de cogeneración
$CapCost^{AC}$	Costo de capital del sistema de refrigeración por absorción
$CapCost^{AD}$	Costo de capital de la planta de digestión anaeróbica
$CapCost^{AG}$	Costo de capital de los aerogeneradores
$CapCost^{BW}$	Costo de capital de la planta de tratamiento de aguas negras
$CapCost^{GAS}$	Costo de capital de la planta de gasificación
$CapCost^{GW}$	Costo de capital de la planta de aguas grises
$CapCost^{IN}$	Costo de capital de la planta de incineración
$CapCost^{SC}$	Costo de capital del colector solar
$CapCost^{SP}$	Costo de capital del panel solar
$CapCost^{PP}$	Costo de capital del bombeo fotovoltaico
$CapCost^{PS}$	Costo de capital de la estufa de pellets
$CapCost^{PEL}$	Costo de capital de la planta de pelletización
$CapCost^{PYR}$	Costo de capital de la planta de pirólisis
$CapCost^{RW}$	Costo de capital del sistema de agua de lluvia

$CapCost^{ST}$	Costo de capital del tanque de almacenamiento
$CapCost^{WP}$	Costo de capital de bomba eólica
$E_{u,t}$	Electricidad generada por las unidades de cogeneración
E_t^{AG}	Electricidad producida en los aerogeneradores
E_t^{CHP}	Electricidad producida por las unidades de cogeneración
E_t^{CHP-RE}	Electricidad generada por las unidades de cogeneración enviadas a la comunidad
E_t^{RE}	Electricidad producida por energías renovables
E_t^{SP}	Electricidad producida en paneles solares
$F_{u,t}$	Combustible requerido para cada unidad de cogeneración
F_t^{ad}	Flujo de biogás de la planta de digestión anaeróbica
F_t^{BF}	Total de biocombustible generado
$F_t^{gasification}$	Flujo de gas natural desde la planta de gasificación
F_t^{NG}	Flujo de gas natural
$F_t^{pyrolysis-oil}$	Flujo de aceite de pirólisis
$food_{a,t}$	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 de cogeneración
$GHGE^{GAS}$	Emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la planta de gasificación
$GHGE^{IN}$	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 pelletización

$GHGE^{PYR}$	Emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la planta de pirólisis
h_i	Factor de radiación del panel solar
MSW_t^{AD}	Residuos sólidos no reciclables enviados a la planta de digestión anaeróbica
MSW_t^{GAS}	Residuos sólidos no reciclables enviados a la planta de gasificación
MSW_t^{IN}	Residuos sólidos no reciclables enviados a la planta de incineración
MSW_t^{PEL}	Residuos sólidos no reciclables enviados a la planta de pelletización
MSW_t^{PYR}	Residuos sólidos no reciclables enviados a la planta de pirólisis
$OCost^{FreshW}$	Costo de operación del agua dulce
$OCost^{NG}$	Costo de operación del 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 de 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 aguas negras
$OMCost^{GAS}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de gasificación
$OMCost^{GWT}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas grises
$OMCost^{IN}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de incineración

$OMCost^{PP}$	Costo de operación y mantenimiento de la bomba fotovoltaica
$OMCost^{PEL}$	Costo de operación y mantenimiento de la planta de pelletización
$OMCost^{PYR}$	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 de bomba eólica
P_t^{PEL}	Pellets generados en la planta de pelletización
$P_{s,t}^{IC}$	Los pellets se envían a las estufas de pellets
Q_t^{SC}	Calor transferido en el colector solar
$SalesA$	Venta de animales
$SalesAd$	Ventas de biogás
$SalesC$	Ventas de cultivos
$SalesGas$	Ventas de gas natural
$SalesOil$	Ventas de aceite de pirólisis
$SalesPellets$	Venta de pellets
$SalesRP$	Venta de desechos reciclables
St_t	Flujo de vapor enviado al motor de combustión interna
V_t^{ST}	El agua almacenada en el tanque de almacenamiento térmico
$W_{u,t}$	El flujo de agua de cada una de las unidades de cogeneración enviadas al tanque de almacenamiento térmico
W_t^{SC}	Agua caliente que sale del colector solar
$W_{a,t}^{cattle-req}$	Se requiere agua de flujo en la agricultura
W_t^{Fresh}	Flujo total de agua dulce
$W_t^{Fresh-IC}$	Flujo de agua dulce enviado a la comunidad
$W_t^{Fresh-St}$	Flujo de agua dulce calentada con vapor de la planta de incineración

$W_t^{Fresh-T}$	Flujo de agua dulce enviada al tanque de almacenamiento térmico
W_t^{IC}	Flujo de agua suministrada a la comunidad
W_t^{IC-BW}	Flujo de agua negra generado en la comunidad enviada a la planta de tratamiento de aguas negras
W_t^{IC-GW}	Flujo de aguas grises generado en la comunidad enviada a la planta de tratamiento de aguas grises
$W_t^{GW-agriculture}$	Flujo de aguas grises tratadas enviadas a la agricultura
$W_t^{GW-cattle}$	Flujo de aguas grises tratadas enviadas al ganado
$W_t^{GW-garden}$	Flujo de aguas grises tratadas enviadas a la jardinería
W_t^{GWT}	Flujo de aguas grises tratadas que salen de la planta de tratamiento de aguas grises
$W_{pw,t}^{PPump}$	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 al ganado
$W_{ww,t}^{WPump-agriculture}$	Flujo de agua del sistema de bombeo eólico a la agricultura
$W_{ww,t}^{WPump-cattle}$	Flujo de agua del sistema de bombeo eólico al ganado
$W_t^{RW-agriculture}$	Flujo de agua del sistema de recolección de agua de lluvia enviado a la agricultura
W_t^{RW}	Flujo de agua recogida en el colector de aguas pluviales
W_t^{RW-IC}	Flujo de agua enviado desde el sistema de recolección de agua de lluvia a la comunidad
W_t^{SC}	Flujo de agua enviado al colector solar

W_t^{ST-AC}	Flujo de agua enviada desde el tanque de almacenamiento térmico al sistema de enfriamiento por absorción
$W_t^{TFresh-IC}$	Flujo de agua dulce enviada a la comunidad
$WCrop_{p,c,t}$	Agua necesaria para cada cultivo

Variables binarias

y^{AD}	Variable binaria para la existencia del digestor anaerobio
y^{AC}	Variable binaria para la existencia del sistema de absorción de refrigeración
y^{AG}	Variable binaria para la existencia del aerogenerador
y^{BW}	Variable binaria para la existencia de la planta de tratamiento de aguas negras
y^{GW}	Variable binaria para la existencia de la planta de tratamiento de aguas grises
y^{GAS}	Variable binaria para la existencia de la planta de gasificación.
y^{IN}	Variable binaria para la existencia de la planta de incineración
y_{pw}^{PP}	Variable binaria para la existencia del bombeo fotovoltaico
y^{PEL}	Variable binaria para la existencia de la planta de granulación
y_s^{PES}	Variable binaria para la existencia de las estufas de pellets
y^{PYR}	Variable binaria para la existencia de la planta de pirólisis
y^{RW-IC}	Variable binaria para la existencia del colector comunitario de aguas pluviales
y^{RW}	Variable binaria para la existencia del colector de aguas pluviales para la agricultura, ganadería y jardinería

$y^{RWSS-IC}$	Variable binaria para la existencia de sistema de almacenamiento comunitario de aguas pluviales
y^{RWSS}	Variable binaria para la existencia del sistema de almacenamiento de aguas pluviales para 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
y_u	Variable binaria para la existencia de las unidades de cogeneración
y_{ww}^{WP}	Variable binaria para la existencia del viento de bombeo

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Butler, M.S, Blaskovich, M.AT, Cooper M.A, Junio 2016, Antibiotics in the clinical pipeline at the end of 2015, The journal of antibiotics, <https://www.nature.com/articles/ja201672>.
- [2] Lisa-N, H, Sarah-Carpenter, G.V., Stark-Natalya V.S., Noviembre 2017, Development of protective immunity in new zealand white rabbits challenged with *bacillus anthracis* spores and treated with antibiotics and obiltoximab, a monoclonal antibody against protective antigen, American society for microbiology, <https://aac.asm.org/content/62/2/e01590-17.short>.
- [3] Becerra, M., Febrero 2014, Medios de comunicación: América Latina a contramano, Nueva Sociedad N°249, <http://nuso.org/>.
- [4] CEPAL, Naciones Unidas, Población y Desarrollo, 2018, <https://www.cepal.org/es/areas-de-trabajo/poblacion-y-desarrollo>.
- [5] Banco Mundial, Datos, Tasa de fertilidad, total (nacimientos por cada mujer), 2015, <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.DYN.TFRT.IN>.
- [6] Naciones Unidas, Población Mundial (2015), www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html.
- [7] Aguilar, A.G., Trayectorias de urbanización e implicaciones ambientales en México, Instituto de Geografía, UNAM, INEGI, 2015, <http://www.inegi.org.mx/eventos/2015/Poblacion/doc/p-GuillermoAguilar.pdf>.
- [8] Durand, J., Massey, D.S., Pren, K., Giorguli, S, Lindstrom D. 2017, El MMP (Mexican Migration Project): Monitoreo y análisis del proceso migratorio entre México y EU, HHS Public Access, <https://europepmc.org/articles/pmc5543802>.
- [9] ACNUR, la agencia de la ONU para los Refugiados, ¿Cuáles son los países más pobres del mundo?, Febrero 2017, <https://eacnur.org/es/actualidad/noticias/emergencias/cuales-son-los-paises-mas-pobres-del-mundo>.
- [10] UNICEF México, Pobreza y desigualdad, 2008, <https://www.unicef.org/mexico/spanish/17046.html>.

- [11] Consejo nacional de evaluación de la política de desarrollo social, Medición de Pobreza, Nivel de pobreza a nivel municipio (2010-2015) <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobreza-municipal.aspx>.
- [12] Fuentes-Cortés, L.F., Ávila-Hernandez, A., Serna-González, M., Ponce-Ortega, J.M., 2015, Optimal design of CHP systems for housing complexes involving water and electric market variations. *Applied Thermal Engineering*.
- [13] Fuentes-Cortés, L.F., Ponce-Ortega, J.M., Nápoles-Rivera, F., 2015, Optimal design of integrated CHP systems for housing complexes, *Energy Conversion and Management*.
- [14] INEGI, Encuesta Intercensal 2015, Número de Habitantes en México.
- [15] SEDESOL, Programa Abasto Rural de Diconsa, <http://www.gob.mx/sedesol/acciones-y-programas/abasto-rural-diconsa>.
- [16] SAGARPA, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2018, <https://www.gob.mx/sagarpa/articulos/ganaderia-a-la-mexicana>.
- [17] CONAGUA, Estadísticas del agua en México, Agua en el Mundo, Edición 2011.
- [18] Revista Universo Laboral, Ingeniería Química, 2015.
- [19] Santibañez-Aguilar, J.E., González-Campos, J.B, Ponce-Ortega, J.M., Serna-González, M., El-Halwagi, M.M., 2014, Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives *Journal of cleaner production*, 65, 270-294, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613005234>.
- [20] González-Bravo, R., Fuentes-Cortés L.F., Ponce-Ortega J.M., 2017, Defining priorities in the design of power and water distribution networks, *Energy*, 137, 1026-1040, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217304553>.
- [21] Fuentes-Cortés, L.F., Yan Ma, Ponce-Ortega, J.M., Ruiz-Mercado, G., Zavala V.M., 2017, Valuation of water and emissions in energy systems, *Applied Energy*, 210, 518-528

- [22] Núñez-López, J.M, Rubio-Castro, E, El Halwagi, M.M., Ponce-Ortega, J.M, 2018, Optimal design of total integrated residential complexes involving water-energy-waste nexus, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20, 5, 1061-1085.
- [23] Núñez-López, .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 Chemistry & Engineering*, 6 (6), 7390–7402.
- [24] Fuentes Cortés, L.F, José María Ponce Ortega, J.M, 2017, Optimal design of energy and water supply systems for low-income communities involving multiple-objectives, *Energy Conversion and Management*, 151, 43-52, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417307628>.
- [25] Morales-Durán, V., Fuentes-Cortés, L.F., González-Brambila, M., El-Halwagi, M.M., Ponce-Ortega, J.M., 2017, Involving environmental assessment in the optimal design of domestic cogeneration systems process integration and optimization for sustainability, 1, 1, 15-32, <https://link.springer.com/article/10.1007/s41660-017-0002-5>.
- [26] Fuentes-Cortés, L.F., Zavala V.M., González-Campos, J.B, Ponce-Ortega, J.M., 2017, Optimal Coupling of Demand Patterns for Improving the Performance of CHP Systems, *Computer Aided Chemical Engineering*, 40, 1909-1914, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444639653503202>.
- [27] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo en México, Índice de Desarrollo Humano Municipal México, 2014, www.undp.org.mx/desarrollohumano.
- [28] INEGI, Cuentame, Escolaridad, 2015, <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/escolaridad.aspx?tema>.
- [29] INEGI. Anuario estadístico y geográfico de Oaxaca 2016, http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2016/702825082055.pdf.
- [30] American Institute of Chemical Engineers, Diciembre 2016, www.aiche.org/about/governance/constitution.

- [31], Jiménez Gutiérrez, A, 2003, Diseño de Procesos en Ingeniería Química Celaya, Guanajuato, México, Editorial Reverté S. A.
- [32] Thomas F. Edgar, David M. Himmelblau, Leon S. Lasdon, 2001, Optimization of Chemical Processes, New York, United States, McGraw-Hill Chemical Engineering Series.
- [33] General Algebraic Modeling System, www.gams.com/products/introduction.
- [34] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Energía, Nexo agua-energía-alimentos, <http://www.fao.org/energy/water-food-energy-nexus/es/>, 2018.
- [35] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, México, Desarrollo Humano, <http://www.mx.undp.org/content/mexico/es/home/ourwork/povertyreduction/overview.htm> 1, 2018.
- [36] Revista Estatal de Salud, Órgano de Difusión Científica, Secretaria de Salud de Guerrero, 1, 13-22, 2012.
- [37] Revista Estatal de Salud, Órgano de Difusión Científica, Secretaria de Salud de Guerrero, 5, 36-39, 2016.