



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DISEÑO ÓPTIMO DE COMPLEJOS RESIDENCIALES  
TOTALMENTE INTEGRADOS, INVOLUCRANDO EL NEXO  
AGUA-ENERGÍA-DESPERDICIOS”**

TESIS presentada por:

**JESÚS MANUEL NÚÑEZ LÓPEZ**

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

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

Asesor: **Dr. José María Ponce Ortega**

Co-Asesor: **Dr. Eusiel Rubio Castro**

Morelia, Michoacán

Febrero de 2018

# ABSTRACT

Optimal Design of Total Integrated Residential Complexes Involving Water-Energy-Waste Nexus

By

**Ch. E. Jesús Manuel Núñez López**

February 2018

Master in Chemical Engineering Sciences

Supervised by PhD. José María Ponce Ortega and PhD. Eusiel Rubio Castro

This work presents a multi-objective optimization model for the design of an integrated residential complex, which incorporates the proper use of available resources and wastes through recycling and reusing networks. The proposed model involves the proper use of water accounting for rainwater harvesting and the reuse of reclaimed water. The model also includes the design of a cogeneration system to satisfy electricity demands as well as hot water demands. The treatment of the produced solid waste is also incorporated through an incineration system, and an algae system is involved for sequestering the associated emissions. The proposed model aims to satisfy the energy, heat and water demands, and the treatment for the residues with the objective to minimize the associated cost and the associated emissions. Furthermore, the proposed model includes an objective function associated to the minimization of the damage to the human health of the inhabitants.

**Keywords:** Energy Integration, Water Integration, Residential Complex, Optimization, Residential Cogeneration, Human Health.

# RESUMEN

Diseño Óptimo de Complejos Residenciales Totalmente Integrados, Involucrando el  
Nexo Agua-Energía-Desperdicios

Por

**Ing. Quim. Jesús Manuel Núñez López**

Febrero del 2018

Maestría en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigido por Dr. José María Ponce Ortega y Dr. Eusiel Rubio Castro

Este trabajo presenta un modelo de optimización multi-objetivo para el diseño de un complejo residencial integrado, considerando el uso adecuado de los recursos disponibles y los desechos a través de redes de reciclaje y reúso. Esto en términos de la recolección y uso óptimo del agua de lluvia; así como la reutilización del agua recuperada. Así también se incluye el diseño de un sistema de cogeneración a fin de satisfacer las demandas de electricidad y de agua caliente. En tanto que el tratamiento de los desechos sólidos producidos es incorporado a través de un sistema de incineración, cuyas emisiones son tratadas vía un sistema para el crecimiento de algas. Mencionado modelo tiene como objetivo satisfacer las demandas de energía, calor y agua, y el tratamiento de los residuos con el objetivo de minimizar el costo y las emisiones asociadas. Aunado a la minimización del daño a la salud humana de los habitantes de dicho complejo.

**Palabras Claves:** Integración de Energía, Integración de Agua, Complejo Residencial, Optimización, Cogeneración Residencial, Salud Humana.

## **DEDICATORIA**

A mis padres por todo el amor y el apoyo incondicional que me han brindado siempre para cumplir cada uno de mis objetivos y por la formación que me dieron lo cual me permitió ser la persona que soy hoy en día.

A mis hermanos Julio y Cristhian por estar siempre a mi lado apoyándome.

A mis amigos de Maestría, de generación y del área de optimización de procesos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis asesores el Dr. José María Ponce Ortega y el Dr. Eusiel Rubio Castro por haberme dado la oportunidad de la realización de esta tesis, por todo el tiempo, apoyo y motivación que me brindaron, así como también por los conocimientos proporcionados, los cuales fortalecieron mi formación tanto profesional como personal.

A mis maestros de maestría y sinodales de mi trabajo de tesis por todas las enseñanzas y apoyo brindado.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por haberme permitido realizar esta experiencia de crecimiento personal y académico.

A CONACYT por los recursos proporcionados.

# ÍNDICE

ABSTRACT .....	ii
RESUMEN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
NOMENCLATURA.....	x
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Marco Teórico.....	4
1.1.1 Redes de intercambio de agua.....	4
1.1.2 Redes de intercambio de energía .....	4
1.1.3 Programación matemática .....	5
1.1.4 GAMS .....	6
1.2 Antecedentes .....	7
1.2.1 Integración de agua en complejos residenciales.....	7
1.2.2 Integración de energía en complejos residenciales .....	7
1.3 Hipótesis .....	8
1.4 Objetivos.....	8
1.4.1 Objetivo General.....	8
1.4.2 Objetivos Particulares .....	8
1.5 Justificación .....	9
1.6 Alcance .....	9
2. METODOLOGÍA .....	10

2.1	Planteamiento del problema.....	11
2.2	Superestructura .....	11
2.3	Modelo matemático .....	12
2.3.1	Sistema de recolección de agua de lluvia.....	14
2.3.2	Agua fresca requerida .....	14
2.3.3	Motor de combustión interna .....	15
2.3.4	Balance en la caldera.....	17
2.3.5	Balances para el ciclo de refrigeración por absorción .....	19
2.3.6	Sistema de producción de algas .....	20
2.3.7	Agua necesitada para los jardines.....	21
2.3.8	Demandas del complejo residencial.....	22
2.3.9	Generación de aguas grises en el complejo residencial.....	23
2.3.10	Generación de aguas negras en el complejo residencial.....	24
2.3.11	Unidad de tratamiento de gas natural.....	26
2.3.12	Generación de residuos sólidos.....	27
2.3.13	Costos de operación.....	28
2.3.14	Ventas.....	30
2.3.15	Existencia de unidades .....	31
2.3.16	Demandas máximas de ventas externas.....	37
2.3.17	Funciones Objetivo.....	39
2.3.18	<i>Multi-Stakeholder</i> .....	47
3.	RESULTADOS .....	49
3.1	Caso de estudio .....	49
3.2	Análisis del caso de estudio .....	49
4.	CONCLUSIONES .....	65
5.	REFERENCIAS .....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
<b>1</b>	Esquema general de una red de intercambio de agua	4
<b>2</b>	Metodología propuesta	10
<b>3</b>	Representación esquemática de una propuesta de sistema integrado para un complejo residencial	12
<b>4</b>	Superestructura propuesta	13
<b>5</b>	Perfil de demanda de electricidad del complejo residencial considerado	49
<b>6</b>	Curva de Pareto para caso de estudio	51
<b>7</b>	Esquema que representa la solución para el escenario D	53
<b>8</b>	Escenario para la menor insatisfacción	57
<b>9</b>	Escenario para la mayor insatisfacción	58
<b>10.</b>	Escenario para la insatisfacción intermedia	59

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
<b>1</b>	Puntos de eco-indicador para la energía y los recursos usados	41
<b>2</b>	Eco-puntos para el material usado en la producción de las tecnologías	42
<b>3</b>	Resultados para diferentes escenarios analizados de la curva de Pareto	52
<b>4</b>	Emisiones de CO <sub>2</sub> descargadas al medio ambiente	54
<b>5</b>	Parámetros usados para calcular el daño a la salud humana	54
<b>6</b>	Diferentes prioridades, soluciones individuales y soluciones compromiso	56
<b>7</b>	Insatisfacción total e insatisfacciones individuales para los escenarios	60
<b>8</b>	Soluciones individuales de funciones objetivos para escenarios analizados	60
<b>9</b>	Resumen de resultados para PRHI	61
<b>10</b>	Resumen de penalizaciones por actividades u operaciones	62
<b>11</b>	Resumen de penalizaciones para condiciones de proceso y propiedades de material	63
<b>12</b>	Criterios de calidad de salud NFPA	64

# NOMENCLATURA

## Variables

$A^{RW}$	Área de recolección de lluvia en $m^2$
$Cap^{algae}$	Capacidad para el sistema de producción de algas en $m^3$
$Cap^{ARC}$	Capacidad para el ciclo de refrigeración por absorción en $m^3$
$Cap^{boiler}$	Capacidad para la caldera en $m^3$
$Cap^{FWSS}$	Capacidad para el tanque de agua fresca en $m^3$
$Cap^{gasification}$	Capacidad para el sistema de gasificación en $m^3$
$Cap^{GW}$	Capacidad para la unidad de tratamiento de aguas grises en $m^3$
$Cap^{ICE}$	Capacidad para el motor de combustión interna en $m^3$
$Cap^{NGT}$	Capacidad para la unidad de tratamiento de gases en $m^3$
$Cap^{RWSS}$	Capacidad para el sistema de almacenamiento de agua de lluvia en $m^3$
$Cap^{WW}$	Capacidad para la unidad de tratamiento de aguas negras en $m^3$
$CapCost^{algae}$	Costo de capital para el sistema de producción de algas en US\$/año
$CapCost^{ARC}$	Costo de capital para el ciclo de refrigeración por absorción en US\$/año
$CapCost^{boiler}$	Costo de capital para la caldera en US\$/año
$CapCost^{FWSS}$	Costo de capital para el tanque de almacenamiento de agua fresca en US\$/año
$CapCost^{gasification}$	Costo de capital para el sistema de gasificación en US\$/año

$CapCost^{GW}$	Costo de capital para la unidad de tratamiento de aguas grises en US\$/año
$CapCost^{ICE}$	Costo de capital para el motor de combustión interna en US\$/año
$CapCost^{NGT}$	Costo de capital para la unidad de tratamiento de gas natural en US\$/año
$CapCost^{RWSS}$	Costo de capital para el sistema de almacenamiento de agua de lluvia en US\$/año
$CapCost^{WW}$	Costo de capital para la unidad de tratamiento de aguas negras en US\$/año
$Cost^E$	Costo unitario de electricidad en US\$/kWh
$Cost^{FW}$	Costo unitario de agua fresca en US\$/m <sup>3</sup>
$Cost^{NG}$	Costo unitario de gas natural en US\$/kg
$Cost^{ref}$	Costo unitario de refrigeración en US\$/kWh
$e_t^{ICE-algae}$	Electricidad enviada al sistema de producción de algas desde el ICE en kWh/h
$e_t^{ICE-GWT}$	Electricidad enviada a la unidad de tratamiento de aguas grises desde el ICE en kWh/h
$e_t^{ICE-residential}$	Electricidad enviada al complejo residencial desde el ICE en kWh/h
$e_t^{ICE-sale}$	Electricidad vendida producida por el ICE en kWh/h
$e_t^{ICE-WWT}$	Electricidad enviada a la unidad de tratamiento de aguas negras desde el ICE en kWh/h

$e_t^{purchased}$	Electricidad comprada en kWh/h
$e_t^{purchased-algae}$	Electricidad comprada para el sistema de producción de algas en kWh/h
$e_t^{purchased-GWT}$	Electricidad comprada para la unidad de tratamiento de aguas grises en kWh/h
$e_t^{purchased-WWT}$	Electricidad comprada por la unidad de tratamiento de aguas negras en kWh/h
$E_t^{algae}$	Electricidad requerida para el sistema de producción de algas en kWh/h
$E_t^{GW}$	Electricidad requerida para la unidad de tratamiento de aguas grises en kWh/h
$E_t^{ICE}$	Electricidad generada por el motor de combustión interna en kWh/h
$E_t^{WW}$	Electricidad requerida en la unidad de tratamiento de aguas negras en kWh/h
$EI^{DR}$	Impacto ambiental por daño a los recursos
$EI^{EQ}$	Impacto ambiental por daño a la calidad del ecosistema
$EI^{HH}$	Impacto ambiental a la salud humana
$EnvImp$	Impacto ambiental total ocasionado por el proceso
$f_t^{FW-algae}$	Agua fresca de entrada al sistema de producción de algas en m <sup>3</sup> /h
$f_t^{FW-boiler}$	Agua fresca de entrada a la caldera en m <sup>3</sup> /h
$f_f^{FW-garden}$	Agua fresca usada en jardines en m <sup>3</sup> /h

$f_t^{FW-ICE}$	Agua fresca requerida en el ICE en m <sup>3</sup> /h
$f_t^{FW-residential}$	Agua fresca de entrada al complejo residencial en m <sup>3</sup> /h
$f_t^{NG-boiler-purchased}$	Flujo de gas natural comprador para la caldera en kg/h
$f_t^{NG-gasification-boiler}$	Flujo de gas natural del gasificador hacia la caldera en kg/h
$f_t^{NG-gasification-ICE}$	Flujo de gas natural del gasificador al ICE en kg/h
$f_t^{NG-gasification-purchased}$	Flujo de gas natural comprador para el proceso de gasificación en kg/h
$f_t^{NG-gasification-sale}$	Flujo de gas natural comprador por el gasificador en kg/h
$f_t^{NG-gastreatment-boiler}$	Flujo de gas natural enviado a la unidad de tratamiento de gas natural desde la caldera en kg/h
$f_t^{NG-gastreatment-gasification}$	Flujo de gas natural enviado a la unidad de tratamiento de gas natural desde el proceso de gasificación en kg/h
$f_t^{NG-gastreatment-ICE}$	Flujo de gas natural proveniente de la unidad de tratamiento de gases hacia el ICE en kg/h
$f_t^{NG-purchased-ICE}$	Flujo de gas natural comprador para el ICE en kg/h
$f_t^{reclaim-algae}$	Flujo de agua tratada usada en el sistema de algas en m <sup>3</sup> /h
$f_t^{reclaimed-drainage}$	Flujo de agua tratada enviada al drenaje en m <sup>3</sup> /h
$f_t^{reclaim-garden}$	Flujo de agua tratada enviada a los jardines en m <sup>3</sup> /h
$f_t^{RW-algae}$	Flujo de entrada de agua de lluvia al sistema de algas en m <sup>3</sup> /h
$f_t^{RW-boiler}$	Flujo de entrada de agua de lluvia a la caldera en m <sup>3</sup> /h
$f_t^{RW-garden}$	Flujo de agua de lluvia utilizada en jardines en m <sup>3</sup> /h

$f_t^{RW-ICE}$	Flujo de entrada de agua de lluvia al ICE en $\text{m}^3/\text{h}$
$f_t^{RW-residential}$	Flujo de agua de lluvia enviada al complejo residencial en $\text{m}^3/\text{h}$
$f_t^{RW-sale}$	Flujo de agua de lluvia vendida a comprador externo en $\text{m}^3/\text{h}$
$f_j$	Solución compromiso para el problema
$F_t^{biofuel}$	Biocombustible producido por el sistema de algas en $\text{kg}/\text{año}$
$F_t^{CW-boiler}$	Agua fresca de entrada a la caldera en $\text{m}^3/\text{h}$
$F_t^{CW-ICE}$	Agua fresca de entrada al motor de combustión interna en $\text{m}^3/\text{h}$
$F_t^{CW-residential}$	Flujo de entrada de agua fresca al complejo residencial en $\text{m}^3/\text{h}$
$F_t^{FW}$	Flujo total de agua fresca en $\text{m}^3/\text{h}$
$F_t^{GW-residential}$	Flujo de agua a la unidad de tratamiento de aguas grises desde el complejo residencial en $\text{m}^3/\text{h}$
$F_t^{Inlet-GW}$	Flujo total de entrada a la unidad de tratamiento de aguas grises en $\text{m}^3/\text{h}$
$F_t^{NG-boiler}$	Flujo de gas natural emitido por la caldera en $\text{kg}/\text{h}$
$F_t^{NG-gasification}$	Flujo de gas natural emitido por el proceso de gasificación en $\text{kg}/\text{h}$
$F_t^{NG-GWT}$	Flujo de gas natural producido por la unidad de tratamiento de aguas grises en $\text{kg}/\text{h}$
$F_t^{NG-ICE}$	Flujo de gas natural requerido por el ICE en $\text{kg}/\text{h}$
$F_t^{NGT-Inlet}$	Flujo total de gas natural de entrada a la unidad de tratamiento de gases en $\text{kg}/\text{h}$

$F_t^{NG-needed-gasification}$	Flujo total de gas natural requerido en el proceso de gasificación en kg/h
$F_t^{NG-Outlet}$	Flujo total de salida de gas natural de la unidad de tratamiento de gases en kg/h
$F_t^{NG-WW}$	Flujo de gas natural de entrada a la unidad de tratamiento de gases proveniente de la unidad de tratamiento de aguas negras en kg/h
$F_t^{NGT-Inlet}$	Flujo total de entrada de gas natural a la unidad de tratamiento de gases en kg/h
$F_t^{reclaimed-GW}$	Flujo de agua tratada en la unidad de tratamiento de aguas grises en m <sup>3</sup> /h
$F_t^{RW}$	Agua de lluvia en m <sup>3</sup> /h
$F_t^{solidwaste}$	Residuos sólidos generados por el complejo residencial en kg/h
$F_t^{SRW}$	Agua de lluvia almacenada en el tanque de almacenamiento en el periodo $t$ en m <sup>3</sup> /h
$F_{t-1}^{SRW}$	Agua de lluvia almacenada en el tanque de almacenamiento en el periodo $t-1$ en m <sup>3</sup> /h
$F_t^{treated-WW}$	Flujo de aguas negras tratada en la unidad de tratamiento en m <sup>3</sup> /h
$F_t^{W-garden}$	Flujo de agua enviado a la unidad de tratamiento de aguas negras desde el jardín en m <sup>3</sup> /h
$F_t^{W-inlet-algae}$	Agua requerida para el sistema de algas en m <sup>3</sup> /h
$F_t^{WW}$	Flujo total de entrada a la planta de tratamiento de aguas negras en m <sup>3</sup> /h

$F_t^{WW-algae}$	Flujo de agua del sistema de algas hacia la planta de tratamiento de aguas negras en m <sup>3</sup> /h
$F_t^{WW-Drainage}$	Flujo de agua negra enviado al drenaje en m <sup>3</sup> /h
$FFwTot$	Flujo total de agua fresca requerido en el proceso en m <sup>3</sup> /año
$Fg_t^{boiler-algae}$	Emisiones de CO <sub>2</sub> enviadas de la caldera al sistema de producción de algas en kg/h
$Fg_t^{boiler-discharge}$	Emisiones de CO <sub>2</sub> al medio ambiente por la caldera en kg/h
$Fg^{ICE-algae}$	Emisiones de CO <sub>2</sub> enviadas del ICE al sistema de algas en kg/h
$Fg^{ICE-discharge}$	Emisiones de CO <sub>2</sub> al medio ambiente por el ICE en kg/h
$g_t^{gasification-algae}$	Emisiones de CO <sub>2</sub> enviadas del gasificador al sistema de producción de algas en kg/h
$g_t^{gasification-discharge}$	Emisiones de CO <sub>2</sub> al medio ambiente por el gasificador en kg/h
$G_t^{algae}$	CO <sub>2</sub> atrapado por el sistema de algas en kg/h
$G_t^{boiler}$	Flujo de CO <sub>2</sub> producido por la caldera en kg/h
$G_t^{gasification}$	Flujo de CO <sub>2</sub> producido por el sistema de gasificación en kg/h
$G_t^{ICE}$	Flujo de CO <sub>2</sub> generado por el ICE en kg/h
$GDischargeTotal$	Flujo total de emisiones de CO <sub>2</sub> al medio ambiente en toneladas/año
$h_t^{boiler-ARC}$	Flujo de agua caliente de la caldera hacia el ARC en m <sup>3</sup> /h
$h_t^{boiler-residential}$	Flujo de agua caliente de la caldera al complejo residencial en m <sup>3</sup> /h
$h_t^{boiler-sale}$	Flujo de agua caliente de la caldera vendido en m <sup>3</sup> /h

$h_t^{ICE-ARC}$	Flujo de agua caliente enviado al ARC desde el ICE en m <sup>3</sup> /h
$h_t^{ICE-residential}$	Flujo de agua caliente al complejo residencial desde el ICE en m <sup>3</sup> /h
$h_t^{ICE-sale}$	Flujo de agua caliente vendido del ICE en m <sup>3</sup> /h
$h_t^{purchase-ARC}$	Flujo de agua caliente comprador para el ARC en m <sup>3</sup> /h
$H_t^{HW-ARC}$	Flujo de agua caliente requerido por el ARC en m <sup>3</sup> /h
$H_t^{HW-boiler}$	Flujo de agua caliente producido por la caldera en m <sup>3</sup> /h
$H_t^{ICE}$	Flujo de agua caliente generado por el ICE en m <sup>3</sup> /h
$OH$	Daño a la salud humana por el proceso
$PRHI$	Índice de ruta de proceso de salubridad
$r_t^{ARC-residential}$	Refrigeración enviada al complejo residencial desde el ARC en kWh/h
$r_t^{ARC-sale}$	Refrigeración vendida por el ARC en kWh/h
$r_t^{purchased-residential}$	Refrigeración comprada para el complejo residencial en kWh/h
$R_t^{ARC}$	Refrigeración total generada por el ARC en kWh/h
$R_t^{residential}$	Refrigeración requerida por el complejo residencial en kWh/h
$Sale^{biofuel}$	Biocombustible vendido en kg/h
$Sale^{CW}$	Agua fresca vendida en m <sup>3</sup> /h
$Sale^E$	Electricidad vendida en kWh/h
$Sale^{HW}$	Agua caliente vendida en m <sup>3</sup> /h
$Sale^{NG}$	Gas natural vendido en kg/h

$Sale^R$	Refrigeración vendida en kWh/h
$SWSROIM$	Tasa de retorno del proceso
$TAC$	Costo total anual en US\$/año
$TotCapCost$	Costo total de capital en US\$/año
$TotOpCost$	Costo total de operación en US\$/año
$TotSales$	Venta total en US\$/año

### **Parámetros**

$\alpha^{algae-E}$	Factor de conversión de electricidad para el sistema de algas
$\alpha^{algae-W}$	Factor de conversión de agua para el sistema de algas
$\alpha^{fluegases-gasification}$	Factor de conversión de CO <sub>2</sub> para el proceso de gasificación
$\alpha^{gasification}$	Factor de conversión de gasificación
$\alpha^{GW-residential}$	Factor de generación de aguas grises en el complejo residencial
$\alpha^{ICE-CW}$	Factor de conversión de agua fresca en el ICE
$\alpha^{ICE-E}$	Factor de conversión de electricidad en el ICE
$\alpha^{NG-GWT}$	Factor de conversión de gas natural en la planta de tratamiento de aguas grises
$\alpha^{NG-needed-gasification}$	Factor de conversión de gas natural en el gasificador
$\alpha^{NG-NGT}$	Factor de Natural gas para la planta de tratamiento de gases
$\alpha^{NG-WW}$	Factor de conversión de gas natural en la planta de tratamiento de aguas negras
$\alpha^{reclaimed-GW}$	Factor de conversión de agua tratada en la planta de tratamiento de aguas grises

$\alpha^{treating-WW}$	Factor de tratamiento de aguas negras
$\alpha^{WW-algae}$	Factor de conversión de aguas negras en el sistema de algas
$\alpha^{WW-residential}$	Factor de aguas negras generadas en el complejo residencial
$\beta^{boiler}$	Factor de conversión en la caldera
$\beta^{ICE-HW}$	Factor de conversión de agua caliente en el ICE
$\beta^{R-ARC}$	Factor de producción de refrigeración en el ARC
$\gamma^{ICE-g}$	Factor de generación de CO <sub>2</sub> en el ICE
$A^{RW-MAX}$	Área máxima de recolección de agua de lluvia disponible en m <sup>2</sup>
$AP$	Penalizaciones por actividades u operaciones
$Cap^{algae-MAX}$	Capacidad máxima para el sistema de algas en m <sup>3</sup>
$Cap^{ARC-MAX}$	Capacidad máxima para el ARC en m <sup>3</sup>
$Cap^{boiler-MAX}$	Capacidad máxima para la caldera en m <sup>3</sup>
$Cap^{FWSS-MAX}$	Capacidad máxima para el tanque de almacenamiento de agua fresca en m <sup>3</sup>
$Cap^{gasification-MAX}$	Capacidad máxima para el sistema de gasificación en m <sup>3</sup>
$Cap^{GW-MAX}$	Capacidad máxima para la planta de tratamiento de aguas grises en m <sup>3</sup>
$Cap^{ICE-MAX}$	Capacidad máxima para el motor de combustión interna en m <sup>3</sup>
$Cap^{NGT-MAX}$	Capacidad máxima para la planta de tratamiento de gases en m <sup>3</sup>
$Cap^{WW-MAX}$	Capacidad máxima para la planta de tratamiento de aguas negras en m <sup>3</sup>

$CP$	Penalizaciones asociadas a las condiciones del proceso y propiedades de materiales
$E_t^{E-MAX-Dem}$	Demanda máxima externa de electricidad en kWh/h
$E_t^{residential}$	Electricidad requerida por el complejo residencial en kWh/h
Eco-indicator <sup>ref</sup>	Valor de Eco-indicador para el sistema sin integración
$F_t^{Biofuel-MAX-Dem}$	Demanda máxima externa de biocombustible en kg/h
$F_t^{NG-MAX-Dem}$	Demanda máxima externa de gas natural en kg/h
$H_t^{residential}$	Flujo total de entrada de agua caliente al complejo residencial en m <sup>3</sup> /h
$H_t^{HW-MAX-Dem}$	Demanda máxima externa de agua caliente en m <sup>3</sup> /h
HHI	Índice de riesgo de salud
ICPHI	Índice de riesgo químico y de proceso inherente
MHI	Índice de daño material
OEL <sup>min</sup>	Límite de exposición ocupacional en kg/m <sup>3</sup>
PR	Parámetros para OH
Precip <sub>t</sub>	Precipitación en m <sup>3</sup> /h
$R_t^{ARC-MAX-Dem}$	Demanda máxima externa de refrigeración en kWh/año
TAC <sup>ref</sup>	Costo total anual del sistema sin integración en US\$/año
UC <sup>E</sup>	Costo unitario de electricidad en US\$/kWh
UC <sup>FW</sup>	Costo unitario de agua fresca en US\$/m <sup>3</sup>
UC <sup>NG</sup>	Costo unitario de gas natural en US\$/kg

$UC^{ref}$	Costo unitario de refrigeración en US\$/kWh
$UFC^{algae}$	Costo unitario fijo para el sistema de algas en US\$
$UFC^{ARC}$	Costo unitario fijo para el ARC en US\$
$UFC^{boiler}$	Costo unitario fijo para la caldera en US\$
$UFC^{FWSS}$	Costo unitario fijo para el tanque de almacenamiento de agua fresca en US\$
$UFC^{gasification}$	Costo unitario fijo para el sistema de gasificación en US\$
$UFC^{GW}$	Costo unitario fijo para la planta de tratamiento de aguas grises en US\$
$UFC^{ICE}$	Costo unitario fijo para el ICE en US\$
$UFC^{NGT}$	Costo unitario fijo para la planta de tratamiento de gases en US\$
$UFC^{RW}$	Costo unitario fijo para el sistema de recolección de agua de lluvia en US\$
$UFC^{WW}$	Costo unitario fijo para la planta de tratamiento de aguas negras en US\$
$US^{biofuel}$	Precio de venta de biocombustible en US\$/kg
$US^{CW}$	Precio de venta de agua fresca en US\$/m <sup>3</sup>
$US^e$	Precio de venta de electricidad en US\$/kWh
$US^{HW}$	Precio de venta de agua caliente en US\$/m <sup>3</sup>
$US^{NG}$	Precio de venta de gas natural en US\$/kg
$US^R$	Precio de venta de refrigeración en US\$/kWh
$UVC^{algae}$	Costo variable para el sistema de algas en US\$

$UVC^{ARC}$	Costo variable para el ARC en US\$
$UVC^{boiler}$	Costo variable para la caldera en US\$
$UVC^{FWSS}$	Costo variable para el tanque de almacenamiento de agua fresca en US\$
$UVC^{gasification}$	Costo variable para el sistema de gasificación en US\$
$UVC^{GW}$	Costo variable para la planta de tratamiento de aguas grises en US\$
$UVC^{ICE}$	Costo variable para el ICE en US\$
$UVC^{NGT}$	Costo variable para la planta de tratamiento de gases en US\$
$UVC^{RW}$	Costo variable para el sistema de recolección de agua de lluvia en US\$
$UVC^{WW}$	Costo variable para la planta de tratamiento de aguas negras en US\$
$w_i$	Factor de peso para la tasa de retorno
$w_j$	Factor de peso para la solución compromiso
$WEC_{max}$	Concentración de exposición del trabajador

### **Variables Binarias**

$y^{algae}$	Variable binaria para la existencia del sistema de algas
$y^{ARC}$	Variable binaria para la existencia del ARC
$y^{boiler}$	Variable binaria para la existencia de la caldera
$y^{FWSS}$	Variable binaria para la existencia del tanque de almacenamiento de agua fresca
$y^{gasification}$	Variable binaria para la existencia del sistema de gasificación

$y^{GW}$  Variable binaria para la existencia de la planta de tratamiento de aguas grises

$y^{ICE}$  Variable binaria para la existencia del ICE

$y^{NGT}$  Variable binaria para la existencia de la planta de tratamiento de gases

$y^{RW}$  Variable binaria para la existencia del sistema de recolección de agua de lluvia

$y^{WW}$  Variable binaria para la existencia de la planta de tratamiento de aguas negras.

### **Subíndices**

$t$  Subíndice para los periodos de tiempo

## 1. INTRODUCCIÓN

Debido al incremento en la demanda de agua y energía, la humanidad se enfrenta a importantes desafíos para el desarrollo sustentable. El sector industrial juega un papel importante en el consumo, la transformación, la descarga y la gestión del agua y la energía (El-Halwagi, 2017; García y You, 2016). Para el uso adecuado del agua en la industria, se han planteado diversas estrategias para sintetizar redes de agua. Estos aportes abordan el diseño óptimo de redes de reúso/reciclo basados en la composición y en las propiedades (Ahmetovic y col., 2015; Nápoles-Rivera y col., 2010). A través de estas redes de agua industrial, se pueden obtener reducciones significativas en el consumo de agua fresca y en la cantidad de agua residual vertida al medio ambiente (Rubio-Castro y col., 2016). Estas estrategias de integración del agua también han sido aplicadas en múltiples instalaciones industriales a través de la síntesis de parques eco-industriales (Ramos y col., 2016; López-Díaz y col., 2015), redes de agua macroscópicas que interactúan con el entorno (Villicaña-García y Ponce-Ortega, 2017; Nápoles-Rivera y col., 2015), en complejos residenciales (García-Montoya y col., 2016; 2015) e incorporan fuentes de agua alternativas. Además, se han reportado varios esquemas de retro-adaptación (Saif y Almansoori, 2017).

Los procesos industriales se caracterizan por el uso significativo de energía y la pérdida excesiva de calor (Tabrizi y col., 2017). Al respecto, se han propuesto varios trabajos para la utilización efectiva del calor residual de los procesos. Una opción es el desarrollo de sistemas combinados de calor y energía (cogeneración) en instalaciones industriales (Yu y col., 2017; Bamufleh y col., 2013) y en complejos residenciales (Fuentes-Cortés y col., 2015). Posteriormente se consideró el uso de calor residual como fuente de trigeneración (generación de energía, calefacción y refrigeración) (Murugan y Horak, 2016; Yao y col., 2016). Además, se han reportado algunas investigaciones que toman en cuenta la sustentabilidad de los sistemas de cogeneración industrial (Sonar y col., 2014), que implican el uso de energía solar (Sánchez-Bautista y col., 2015) y biocombustibles (Fuentes-Cortés y col., 2017). Con base en los importantes ahorros de energía y las mejoras en la eficiencia de los sistemas de cogeneración industrial (Piacentino y col., 2016), estos enfoques se han extendido para diseñar sistemas de cogeneración residencial (Morales-Duran y col., 2017). En tales sistemas, un motor principal que utiliza un combustible fósil se puede utilizar para

producir electricidad, y el calor desperdiciado se puede utilizar para calentar agua para satisfacer las demandas de agua caliente en los hogares. El diseño adecuado de estos sistemas domésticos de cogeneración debe incluir la consideración simultánea del agua y los sistemas de energía, aunado al almacenamiento y las interacciones con las redes externas de agua y energía (Fuentes-Cortés y col., 2016; Erdem y col., 2015).

Además de los problemas de agua y energía asociados con los complejos residenciales, también es importante abordar los desechos generados por estos complejos. En ese sentido, es importante mencionar que los desechos sólidos se pueden usar como una forma de energía, las aguas residuales deben manipularse antes de la descarga y las emisiones a la atmósfera tienen un impacto negativo en el medio ambiente. Específicamente, para el diseño de complejos residenciales integrados, generalmente solo se han considerado los objetivos económicos. Y recientemente, se han incorporado objetivos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas. Nótese que en los enfoques anteriores no ha considerada la aceptabilidad de los sistemas integrados considerados. Nótese que estos sistemas son parte de un complejo de viviendas, y las implicaciones económicas para la reducción en el consumo de recursos frescos son importantes; además, la aceptabilidad asociada a las implicaciones del complejo integrado para los habitantes no se ha tenido en cuenta. Cabe señalar que los habitantes pueden estar expuestos a condiciones insalubres (Hassim y Edwards, 2006; OSHA, 2017), como ruido, malos olores y posibles daños a la salud; lo cual debe abordarse a fin de mejorar la aceptabilidad de los procesos integrados diseñados.

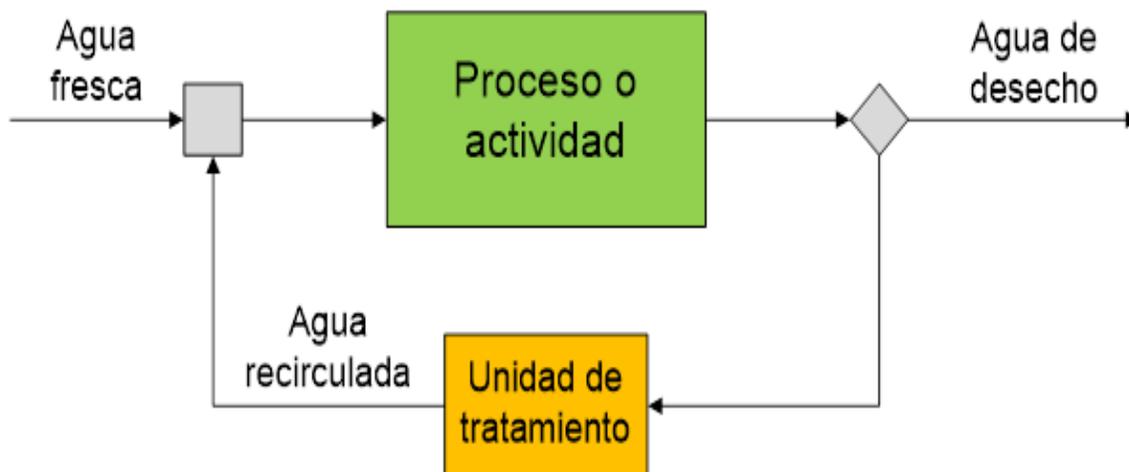
Por lo tanto, esta tesis aborda el nexo agua-energía-desperdicio en sistemas residenciales. Este nexo es un elemento importante de la vivienda sustentable. El agua fresca necesaria está relacionada con las aguas residuales descargadas y la energía necesaria está relacionada con las emisiones, y a través de una unidad de cogeneración se pueden considerar las relaciones entre las demandas de electricidad y agua caliente. Además, la reutilización de aguas grises recuperadas se puede considerar como una opción para reducir el consumo de agua fresca, la cual puede reducirse aún más incorporando sistemas de recolección de agua de lluvia. Los residuos sólidos residenciales (municipales) se pueden gasificar para producir el combustible

necesario para operar el motor de cogeneración central y la unidad de tratamiento de aguas residuales.

## 1.1 Marco Teórico

### 1.1.1 Redes de intercambio de agua

Una red de intercambio de agua es un esquema en el cual se aplica el reúso y reciclo de este recurso en algún proceso y/o actividad a fin de reducir la demanda del mismo (El-Halwagi, 2006). Puede observarse, en la **Figura 1**, como la instalación de unidades de tratamiento permite reducir tanto la demanda de agua fresca como la corriente de desecho; aunque tal instalación debe justificarse por un mejor escenario económico y ambiental respecto al proceso original sin reciclo y/o reúso del agua. Las ventajas de las redes de intercambio de agua fueron explotadas principalmente por el sector industrial a través del reúso y reciclo del agua de desecho (Rubio-Castro y col., 2010, 2011) y posteriormente fueron adoptadas por otros sectores como lo es el sector agrícola (Rubio-Castro y col., 2016) y en complejos residenciales (García-Montoya y col., 2015, 2016). Por otra parte, la integración de redes de intercambio de agua entre diferentes industrias recibe el nombre de parque industrial. Cuando una agrupación de industrias busca en conjunto un óptimo funcionamiento económico y ambiental es llamado eco-industrial (Lowe, 1997).



**Figura 1.** Esquema general de una red de intercambio de agua

### 1.1.2 Redes de intercambio de energía

El aumento del costo de la energía y una conciencia cada vez mayor puesta al cuidado del medio ambiente y a la sociedad misma, llevan a la inquietud por parte de las industrias de aplicar métodos eficientes para reducir el consumo de energía en los procesos. En esa

directriz muchos algoritmos han sido desarrollados con el objetivo de disminuir los consumos de servicios auxiliares dentro de una línea de procesos productivos. Uno de estos métodos es la denominada integración energética, el cual consiste, en primera instancia, en diseñar redes de intercambio de energía de tal manera que las corrientes del proceso que se desean enfriar lo hagan mediante las corrientes del mismo proceso que deben ser calentadas y viceversa. La integración energética constituye una poderosa herramienta que encierra un procedimiento termodinámico bien estructurado para una optimización técnico-económica de cada red de intercambio de calor. La integración energética de procesos tiene su fundamento en la primera y segunda ley de la termodinámica y constituye una etapa fundamental en el diseño de una nueva planta o en la optimización de una ya existente, haciendo énfasis en el uso eficiente de la energía y la reducción de los efectos medioambientales.

### 1.1.3 Programación matemática

La programación matemática ha mostrado ser una herramienta muy eficiente en la solución de problemas de optimización, por su gran versatilidad para modelar problemas asociados con la optimización, y porque en la actualidad, gracias a los grandes avances teóricos en el área y los impresionantes logros electrónicos, los ordenadores modernos son capaces de dar soluciones muy precisas en tiempos razonables (Belotti y col., 2013). Dentro del campo general de programación matemática existen diferentes modelos de optimización, los cuales son enlistados a continuación:

**Problema Lineal:** los problemas de programación lineal exigen que tanto las expresiones de las restricciones como de los objetivos se expresen de forma lineal, así como también que las variables deben ser números reales o continuas.

**Problema no Lineal:** cuando alguna de las restricciones o la función objetivo no es lineal, se tiene un problema no lineal, las variables de estos problemas, al igual que los lineales, deben ser variables continuas.

**Problema Mixto Entero Lineal:** tanto las restricciones, como la función objetivo debe ser lineales, y existen tanto variables continuas como discretas en estos problemas.

**Problema Mixto Entero no Lineal:** cuando alguna de las restricciones o la función objetivo no es lineal, pero a diferencia del problema no lineal, en este caso existen variables discretas además de las continuas.

Nótese que no obstante del tipo de problema asociado a la representación de un problema, proceso químico y/o actividad estos se componen de los siguientes elementos:

- Variables, que pueden ser enteras o continuas, y pueden tener límites.
- Ecuaciones de restricción o limitaciones.
- Función(es) objetivo(s).

#### 1.1.4 GAMS

GAMS (General Algebraic Modeling System) (Brooke y col., 2017) es un lenguaje de programación que permite el modelado, análisis y resolución de diversos problemas de optimización. Aunque inicialmente el manejo y comprensión de GAMS requiere esfuerzo, una vez entendidas se dispone de una herramienta muy versátil capaz de resolver problemas de programación matemática (Bussieck y Vigerske, 2003).

Otros lenguajes similares a GAMS son AMPL y AIMMS. Todos ellos presentan características análogas (Castillo y col., 2002).

Entre las características más importantes de GAMS cabe destacar:

1. Su capacidad para pasar de resolver problemas de pequeña dimensión a problemas mayores sin variar el código sustancialmente. El manejo eficiente de sus índices permite escribir de manera compacta restricciones similares mediante una sola restricción.
2. Separa el proceso de modelado del proceso de resolución del problema. Así, el usuario de GAMS debe ser capaz de conseguir una formulación consistente del problema, y una vez la expresa en notación de GAMS, este lenguaje hace uso de alguno de los optimizadores disponibles para obtener su solución.
3. La forma en la que GAMS representa un problema de optimización coincide, prácticamente, con la descripción matemática de ese problema. Por tanto, el código GAMS es sencillo de comprender para aquellos lectores familiarizados con la optimización.

## **1.2 Antecedentes**

### **1.2.1 Integración de agua en complejos residenciales**

El uso de las redes de intercambio de agua ha sido adoptado para la integración de este recurso en complejos residenciales mediante el reúso y/o reciclaje del mismo. Por ejemplo, el agua utilizada para lavandería, trastes y ducha puede ser tratada y volver a usarse para el riego de jardines, mientras que el agua utilizada en sanitarios es sólo tratada y enviada directamente al drenaje. En este contexto, García-Montoya y col. (2015) introdujeron una formulación de optimización para el diseño de sistemas de agua residencial con el objetivo de satisfacer las demandas de agua en un complejo residencial. Involucrando recolección, almacenamiento y distribución de agua de lluvia, así como también el diseño simultáneo de redes de intercambio de agua para el reciclaje, reúso, regeneración y almacenamiento de agua. García-Montoya y col. (2016) presentaron un modelo multi-objetivo de optimización para el diseño de redes de intercambio de agua en complejos residenciales involucrando sistemas de recolección de agua de lluvia y tratamiento de aguas de desecho, donde buscan encontrar un balance entre los objetivos de minimizar el costo total anual, el consumo de agua fresca y el impacto ocasionado al ambiente.

### **1.2.2 Integración de energía en complejos residenciales**

Por otro lado, el uso eficiente de la energía es otro aspecto importante a tratar en el diseño de complejos residenciales. Esto debido a que existe gran pérdida de energía en forma de calor residual mediante el uso de los sistemas convencionales por lo que distintos trabajos han sido publicados para el aprovechamiento del mismo. Por ejemplo, Sánchez-Bautista y col. (2015) presentaron un modelo para el diseño óptimo de sistemas de agua-calentamiento para uso doméstico. Dicho modelo cuenta con la disposición de la radiación solar en un lugar específico donde un colector solar es instalado para satisfacer las demandas de agua caliente. El propósito es encontrar una solución donde se optimicen los aspectos económicos y ambientales mediante el diseño y las condiciones de operación incluidas en torno al almacenamiento y distribución del agua caliente. Fuentes-Cortés y col. (2015) presentaron una formulación matemática para el diseño de un sistema de cogeneración residencial con la finalidad de satisfacer las demandas de electricidad y agua caliente en un complejo residencial, donde se consideran los riesgos asociados por la instalación y operación de las

unidades de cogeneración. González-Bravo y col. (2016) realizaron un modelo de optimización para satisfacer las demandas de agua y energía mediante plantas de potencia para uso industrial, agrícola y doméstico. Morales-Durán y col. (2017) plantearon un modelo multi-objetivo de programación mixta-entera no lineal, donde incorporan aspectos económicos y ambientales para el diseño óptimo de sistemas de cogeneración domésticos. Fuentes-Cortés y col. (2017) propusieron un modelo de programación mixto-entero no lineal en el diseño de un sistema de cogeneración residencial conectado con la red de electricidad, lo cual permite la selección y el tamaño del motor principal y del tanque de almacenamiento de energía térmica para cumplir las demandas del complejo residencial.

Nótese que existe variedad de trabajos para el uso apropiado de agua y energía en complejos residenciales, sin embargo, ninguno de ellos involucra los residuos sólidos generados por los complejos residenciales, así como tampoco la aceptabilidad del uso de dichos sistemas integrados para satisfacer las demandas de los habitantes,

### **1.3 Hipótesis**

La implementación del modelo de optimización al complejo residencial permitirá reducir tanto la demanda de agua fresca, como el consumo energético en el complejo residencial, así como también el tratamiento de los residuos; lo cual se verá reflejado en la minimización de agua fresca consumida, un menor impacto hacia el ambiente, y la reducción del costo total anual.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo General**

Desarrollar e implementar un modelo matemático en la plataforma de GAMS para el diseño de complejos residenciales considerando aspectos económicos y ambientales simultáneamente en términos del nexo agua-energía-desperdicios en complejos residenciales.

#### **1.4.2 Objetivos Particulares**

- Aplicar el modelo propuesto a un caso de estudio de la ciudad de Morelia, Michoacán.
- Analizar diferentes escenarios óptimos y proponer uno donde exista un balance entre las funciones objetivos.

- Redacción y publicación de un artículo científico, donde se muestren los resultados y alcance del proyecto.
- Utilizar la metodología del análisis de ciclo de vida mediante el eco-indicador 99 para la evaluación del impacto ambiental.
- Calcular métricas de inversión para incorporar la viabilidad del proceso.

### **1.5 Justificación**

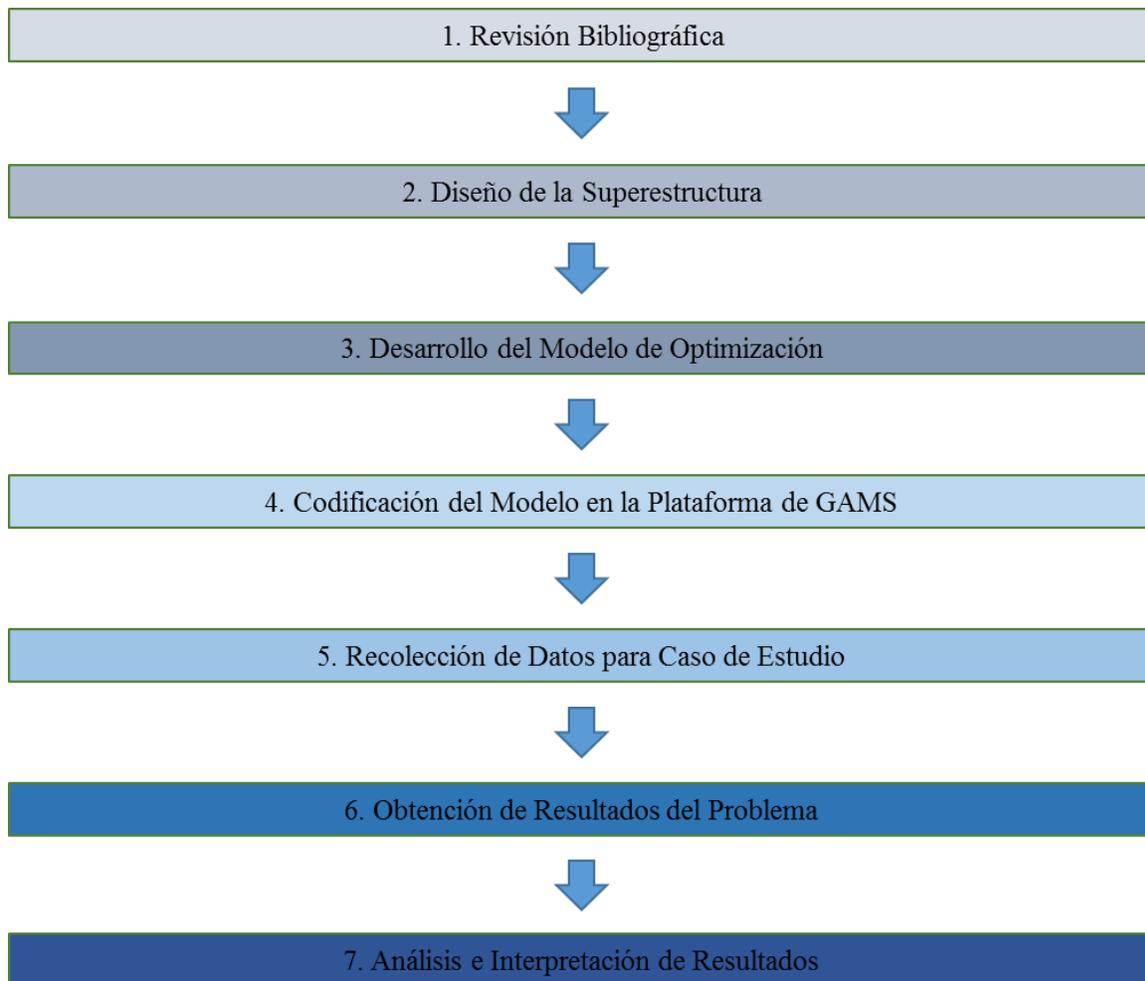
En la actualidad la escasez de los recursos es un problema a nivel mundial, en particular, la ciudad de Morelia, Michoacán tiene problemas para abastecer las demandas de agua para su población. Por lo cual, se requiere de la implementación de nuevas tecnologías para la optimización de este recurso, así como también para la integración energética en los complejos residenciales para satisfacer las demandas de agua caliente, electricidad y refrigeración; las cuales nos permitan reducir el consumo de agua fresca, el costo total anual, y por ende la minimización del impacto causado al ambiente.

### **1.6 Alcance**

En el presente trabajo se plantean distintos escenarios en los cuales se puede observar que es posible encontrar soluciones donde existe un balance entre aspectos económicos y ambientales por medio de la integración del proceso para el diseño e instalación de un complejo residencial. El modelo propuesto representa una herramienta importante para la toma de decisión del escenario adecuado, debido a que el mejor escenario económico representa el peor escenario ambiental y viceversa; por lo cual, mediante este trabajo se nos permite dar prioridades a cada uno de los objetivos y proponer un escenario adecuado a las necesidades de los habitantes.

## 2. METODOLOGÍA

Para resolver el problema planteado se propuso la siguiente metodología mostrada en la **Figura 2**.



**Figura 2.** Metodología propuesta

1. Se realizó una extensa revisión bibliográfica, sobre los temas de interés del proyecto, tales como programación matemática, redes de intercambio de agua y de calor, sistemas de cogeneración, análisis de impacto ambiental y riesgos a la salud humana provocados por distintos procesos.

2. Se propuso una superestructura que nos representa el problema a resolver donde se incluyen todas las configuraciones de interés.

3. En base a la superestructura propuesta se desarrolló el modelo matemático de optimización para el diseño del complejo residencial. Tal representación incluye balances de materia y energía, así como las restricciones del proceso.
4. Posteriormente se codificó el modelo de optimización en la plataforma de GAMS.
5. Se realizó la recolección de datos para un caso de estudio específico de la ciudad de Morelia, Michoacán en torno a las demandas de agua fresca, agua caliente, electricidad y refrigeración requeridas, así como también de los residuos líquidos y sólidos producidos.
6. Una vez obtenidos los datos del caso de estudio, se utilizaron para su solución y análisis en el código computacional correspondiente.
7. Finalmente, se analizaron los datos y fueron interpretados mediante curvas de Pareto y mediante la técnica de *Multi-Stakeholder*.

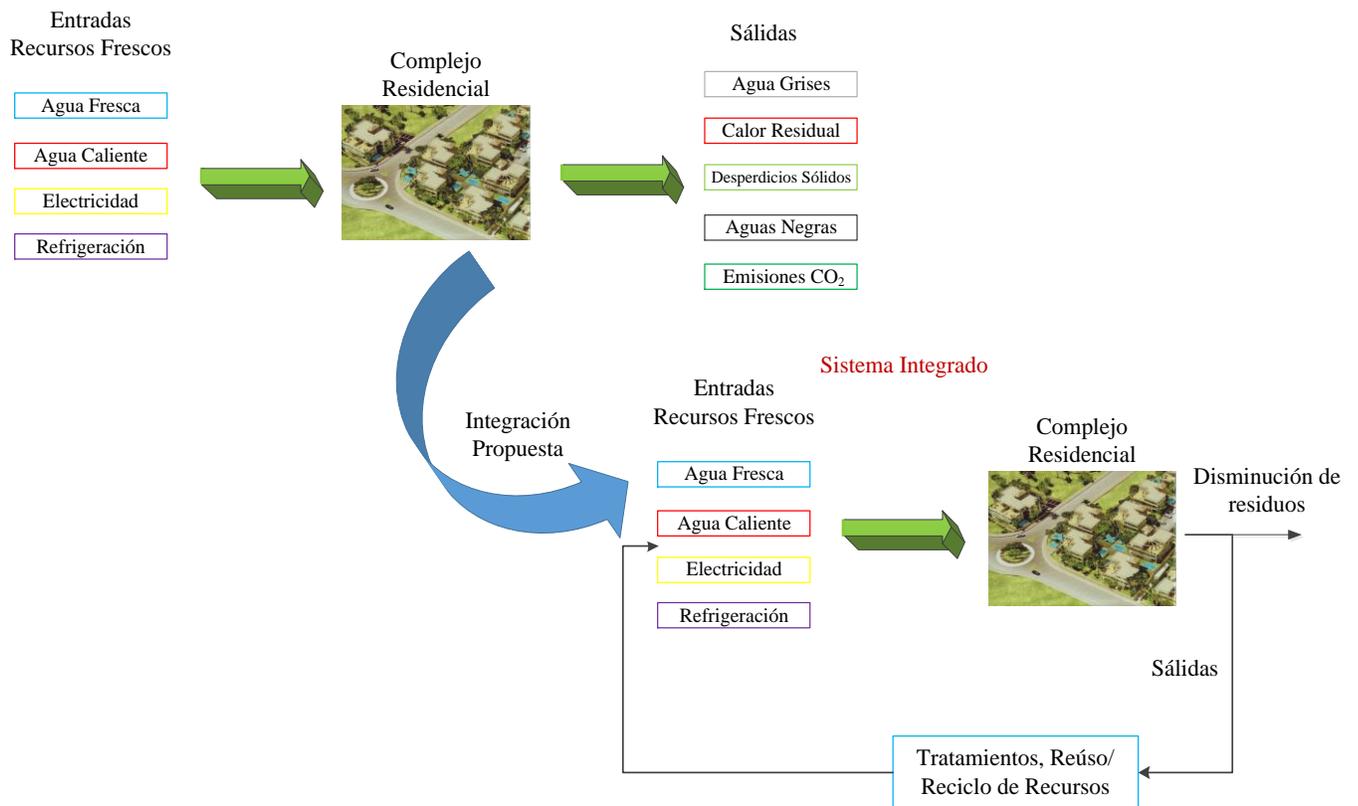
### **2.1 Planteamiento del problema**

El problema abordado en este trabajo se puede definir de la siguiente manera: Dado un complejo residencial donde se conoce el número de casas y habitantes, las demandas de agua y energía (electricidad, calefacción y refrigeración); así como las descargas sólidas, líquidas y gaseosas y el perfil de lluvia esperado durante un periodo de tiempo. Se desea obtener un diseño integrado que considere agua, energía y desechos durante períodos de tiempo específicos de tal manera que varios aspectos de la integración puedan ser inducidos, las aguas residuales (grises y negras) se pueden tratar y reciclar, los desechos sólidos se pueden convertir en energía, el exceso de calor puede usarse para calentar el agua. Particularmente la **Figura 3** presenta un esquema de un complejo residencial tradicional antes y después de la integración propuesta.

### **2.2 Superestructura**

En la **Figura 4** se muestra la superestructura propuesta en la cual ver que la demanda de agua puede ser cubierta por agua fresca desde la red de agua municipal y mediante sistemas de recolección de lluvia colocados en los techos de cada una de las casas. En tanto que, para satisfacer la demanda de electricidad se considera la compra a la compañía federal de electricidad, así como también la instalación de una unidad de cogeneración, misma que además de generarse electricidad permite aprovechar el calor residual producido para el

calentamiento de agua, de igual manera se incluye el uso de una caldera la cual funciona mediante gas natural. Notesé que el calor generado por la unidad de cogeneración y el calentador es aprovechado para la generación de refrigeración mediante un sistema de refrigeración por absorción. Por otro lado, los residuos líquidos generados por el complejo residencial son tratados para ser reusados en el riego de jardines o para la producción de algas. Los residuos sólidos generados son tratados por un sistema de gasificación para reusarse como energía.



**Figura 3.** Representación esquemática de una propuesta de un sistema integrado para un complejo residencial

### 2.3 Modelo matemático

Basados en la superestructura presentada en la **Figura 4**, el modelo de optimización se describe de la siguiente manera:

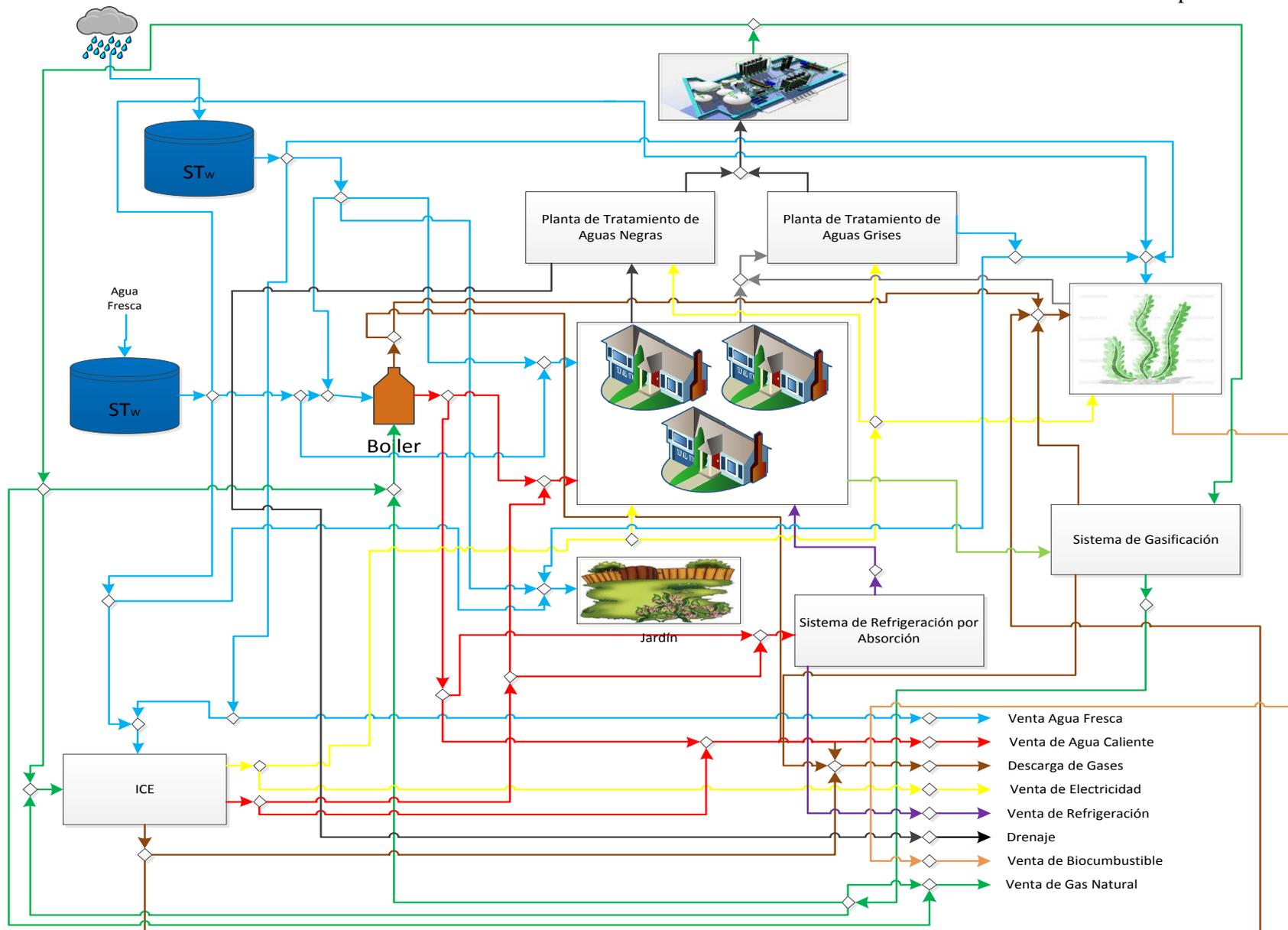


Figura 4. Superestructura propuesta

### 2.3.1 Sistema de recolección de agua de lluvia

Para determinar la cantidad de agua de lluvia recolectada en un periodo de tiempo  $t$  ( $F_t^{RW}$ ), el área acondicionada de recolección es ( $A^{RW}$ ) por la precipitación en ese periodo ( $Precip_t$ ):

$$F_t^{RW} = A^{RW} Precip_t, \quad \forall t \in T \quad (1)$$

### Sistema de almacenamiento de agua de lluvia

La capacidad para el sistema de almacenamiento de agua de lluvia ( $Cap^{RWSS}$ ) debe ser más grande que el agua almacenada en los periodos considerados ( $F_t^{RW}$ ):

$$Cap^{RWSS} \geq F_t^{RW}, \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$Cap^{RWSS} \geq F_t^{SRW}, \quad \forall t \in T \quad (3)$$

### Balance en el sistema de almacenamiento de agua de lluvia

El agua de lluvia almacenada en el tanque de almacenamiento en el periodo  $t$  ( $F_t^{SRW}$ ) es igual al agua almacenada al final del periodo anterior ( $F_{t-1}^{SRW}$ ), más el agua de entrada al tanque de almacenamiento en ese periodo ( $F_t^{RW}$ ), menos el agua que sale del tanque del almacenamiento que es enviada al complejo residencial ( $f_t^{RW-residential}$ ), al sistema de producción de algas ( $f_t^{RW-algae}$ ), al calentador ( $f_t^{RW-boiler}$ ), al motor principal (en este caso un motor de combustión interna, ICE) ( $f_t^{RW-ICE}$ ), a los jardines ( $f_t^{RW-garden}$ ), y a la venta de agua fresca ( $f_t^{RW-sale}$ ):

$$F_t^{SRW} = F_{t-1}^{SRW} + F_t^{RW} - f_t^{RW-residential} - f_t^{RW-algae} - f_t^{RW-boiler} - f_t^{RW-ICE} - f_t^{RW-garden} - f_t^{RW-sale}, \quad \forall t \in T \quad (4)$$

### 2.3.2 Agua fresca requerida

El flujo total de agua fresca consumida en el periodo  $t$  ( $F_t^{FW}$ ) es igual a la suma del agua de entrada al complejo residencial ( $f_t^{FW-residential}$ ), al sistema de algas ( $f_t^{FW-algae}$ ), el calentador

( $f_t^{FW-boiler}$ ), el motor de combustión interna ( $f_t^{FW-ICE}$ ) y los jardines ( $f_f^{FW-garden}$ ), que se establece de la siguiente manera:

$$F_t^{FW} = f_t^{FW-residential} + f_t^{FW-algae} + f_t^{FW-boiler} + f_t^{FW-ICE} + f_t^{FW-garden}, \quad \forall t \in T \quad (5)$$

### Capacidad para el tanque de almacenamiento de agua fresca

La capacidad del tanque de almacenamiento de agua fresca ( $Cap^{FWSS}$ ) debe ser más grande que el agua almacenada sobre los periodos considerados ( $F_t^{FW}$ ):

$$Cap^{FWSS} \geq F_t^{FW}, \quad \forall t \in T \quad (6)$$

#### 2.3.3 Motor de combustión interna

Se considera que un motor de combustión interna (ICE) produce en el sitio la electricidad que se necesita en el complejo residencial. Este motor opera a alta temperatura y utiliza calor que proviene de la combustión de gas natural. Además, este motor descarga cantidades significativas de calor residual, y esto puede usarse para calentar agua fría y satisfacer las necesidades residenciales de agua caliente para uso doméstico, o este calor residual puede usarse para hacer funcionar el sistema de refrigeración de absorción y para producir enfriamiento necesario en el complejo residencial. Entonces, las siguientes relaciones son necesarias para modelar las interacciones de estas unidades y para diseñar el motor de combustión interna.

#### Electricidad generada por el motor de combustión interna (ICE)

La electricidad generada por el ICE ( $E_t^{ICE}$ ) es calculada de la siguiente manera:

$$E_t^{ICE} = \alpha^{ICE-E} F_t^{NG-ICE}, \quad \forall t \in T \quad (7)$$

donde  $\alpha^{ICE-E}$  es un factor de conversión de electricidad para el ICE y  $F_t^{NG-ICE}$  es el gas natural requerido por el motor para generar electricidad.

#### Agua fresca requerida por el motor de combustión interna

El agua fresca requerida por el sistema de cogeneración ( $F_t^{CW-ICE}$ ) es igual al factor de conversión de agua fresca del ICE ( $\alpha^{ICE-CW}$ ) multiplicado por el gas natural de entrada ( $F_t^{NG-ICE}$ ) al sistema:

$$F_t^{CW-ICE} = \alpha^{ICE-CW} F_t^{NG-ICE}, \quad \forall t \in T \quad (8)$$

### Balance para el agua fresca en el ICE

El flujo total de agua fresca enviada al ICE ( $F_t^{CW-ICE}$ ) es obtenida del tanque de almacenamiento de agua de lluvia ( $f_t^{RW-ICE}$ ) y del de agua fresca ( $f_t^{FW-ICE}$ ):

$$F_t^{CW-ICE} = f_t^{RW-ICE} + f_t^{FW-ICE}, \quad \forall t \in T \quad (9)$$

### Distribución de electricidad producida por el ICE

La electricidad distribuida por el ICE ( $E_t^{ICE}$ ) es igual a la suma de la electricidad enviada al complejo residencial ( $e_t^{ICE-residential}$ ), al sistema de algas ( $e_t^{ICE-algae}$ ), a la unidad de tratamiento de aguas grises ( $e_t^{ICE-GWT}$ ), a la unidad de tratamiento de aguas negras ( $e_t^{ICE-WWT}$ ) y a la venta a comprador externo ( $e_t^{ICE-sale}$ ):

$$E_t^{ICE} = e_t^{ICE-residential} + e_t^{ICE-algae} + e_t^{ICE-GWT} + e_t^{ICE-WWT} + e_t^{ICE-sale}, \quad \forall t \in T \quad (10)$$

### Agua caliente generada por el ICE

Para calcular el agua caliente generada por el ICE ( $H_t^{ICE}$ ), el factor de agua caliente para el ICE ( $\beta^{ICE-HW}$ ) es multiplicado por el gas natural de entrada al ICE ( $F_t^{NG-ICE}$ ):

$$H_t^{ICE} = \beta^{ICE-HW} F_t^{NG-ICE}, \quad \forall t \in T \quad (11)$$

### Gas natural necesitado por el ICE

El gas natural necesitado para operar el motor de combustión interna ( $F_t^{NG-ICE}$ ) puede ser obtenido mediante compra ( $f_t^{NG-purchased-ICE}$ ), por la planta de tratamiento de gases ( $f_t^{NG-gastreatment-ICE}$ ) y por el sistema de gasificación ( $f_t^{NG-gasification-ICE}$ ):

$$F_t^{NG-ICE} = f_t^{NG-purchased-ICE} + f_t^{NG-gastreatment-ICE} + f_t^{NG-gasification-ICE}, \forall t \quad (12)$$

### Distribución de agua caliente del ICE

El agua caliente generado por el ICE ( $H_t^{ICE}$ ) puede ser enviado al complejo residencial ( $h_t^{ICE-residential}$ ), al sistema de refrigeración por absorción ( $h_t^{ICE-ARC}$ ) y a la venta ( $h_t^{ICE-sale}$ ):

$$H_t^{ICE} = h_t^{ICE-residential} + h_t^{ICE-sale} + h_t^{ICE-ARC}, \forall t \quad (13)$$

### Generación de CO<sub>2</sub> en el ICE

El flujo de emisiones de dióxido de carbón generado por la unidad ( $G_t^{ICE}$ ) es igual al factor de emisión del ICE ( $\gamma^{ICE-g}$ ) multiplicado por gas natural de entrada al sistema ( $F_t^{NG-ICE}$ ):

$$G_t^{ICE} = \gamma^{ICE-g} F_t^{NG-ICE}, \forall t \quad (14)$$

### Distribución de emisiones de CO<sub>2</sub> del ICE

El CO<sub>2</sub> generado por el ICE ( $G_t^{ICE}$ ) puede ser enviado al sistema de algas ( $Fg_t^{ICE-algae}$ ) o enviado al medio ambiente ( $Fg_t^{ICE-discharge}$ ):

$$G_t^{ICE} = Fg_t^{ICE-algae} + Fg_t^{ICE-discharge}, \forall t \quad (15)$$

#### 2.3.4 Balance en la caldera

Se necesitan balances de energía y agua en la caldera para diseñar esta unidad y determinar las condiciones de operación a través de los diferentes períodos de tiempo, que se establecen de la siguiente manera:

#### Agua caliente producida en la caldera

El agua caliente producido por la caldera ( $H_t^{HW-boiler}$ ) es igual al factor de conversión de la caldera ( $\beta^{boiler}$ ) multiplicado por el gas natural de entrada a la caldera ( $F_t^{NG-boiler}$ ):

$$H_t^{HW-boiler} = \beta^{boiler} F_t^{NG-boiler}, \forall t \quad (16)$$

#### Gas natural requerido en la caldera

El gas natural requerido en la caldera ( $F_t^{NG-boiler}$ ) es igual al gas natural proveniente del sistema de gasificación ( $f_t^{NG-gasification-boiler}$ ), más el gas natural de la unidad de tratamiento de gases ( $f_t^{NG-gastreatment-boiler}$ ) y el comprado externamente ( $f_t^{NG-boiler-purchased}$ ):

$$F_t^{NG-boiler} = f_t^{NG-boiler-purchased} + f_t^{NG-gasification-boiler} + f_t^{NG-gastreatment-boiler}, \quad \forall t \quad (17)$$

### Distribución de agua caliente de la caldera

El agua caliente producido en la caldera ( $H_t^{HW-boiler}$ ) puede ser enviado al complejo residencial ( $h_t^{boiler-residencial}$ ), al sistema de refrigeración por absorción ( $h_t^{boiler-ARC}$ ) y a la venta ( $h_t^{boiler-sale}$ ):

$$H_t^{HW-boiler} = h_t^{boiler-residencial} + h_t^{boiler-sale} + h_t^{boiler-ARC}, \quad \forall t \quad (18)$$

### Agua fresca requerida por la caldera

El agua fresca de entrada a la caldera ( $F_t^{CW-boiler}$ ) es igual al agua caliente de salida del mismo ( $H_t^{HW-boiler}$ ):

$$F_t^{CW-boiler} = H_t^{HW-boiler}, \quad \forall t \quad (19)$$

### Balance de agua fresca en la caldera

El flujo de entrada de agua fresca en la caldera ( $F_t^{CW-boiler}$ ) es igual a la suma de agua fresca proveniente del sistema de recolección de agua de lluvia ( $f_t^{RW-boiler}$ ) más el agua fresca proveniente del tanque de almacenamiento de agua fresca ( $f_t^{FW-boiler}$ ):

$$F_t^{CW-boiler} = f_t^{RW-boiler} + f_t^{FW-boiler}, \quad \forall t \quad (20)$$

### Emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por la caldera

Las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas en la caldera ( $G_t^{boiler}$ ) son calculadas a través del factor de eficiencia de la caldera y del agua caliente producida en el mismo:

$$G_t^{boiler} = Fg_t^{boiler-algae} + Fg_t^{boiler-discharge}, \quad \forall t \quad G_t^{boiler} = h^{boiler} H_t^{HW-boiler}, \quad \forall t \quad (21)$$

### Distribución de CO<sub>2</sub> de la caldera

Las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por la caldera ( $G_t^{boiler}$ ) pueden ser distribuidas de la siguiente manera:

$$G_t^{boiler} = Fg_t^{boiler-algae} + Fg_t^{boiler-discharge}, \quad \forall t \quad (22)$$

donde  $Fg_t^{boiler-algae}$  corresponde a las emisiones enviadas al sistema de algas y  $Fg_t^{boiler-discharge}$  las emisiones enviadas al medio ambiente.

#### 2.3.5 Balances para el ciclo de refrigeración por absorción

Se considera un ciclo de refrigeración de absorción para el sistema de recuperación de calor residual del motor de combustión interna, así como para proporcionar la refrigeración necesaria al complejo residencial. Las relaciones propuestas para modelar y diseñar esta unidad son las siguientes.

#### Refrigeración producida en el ciclo de refrigeración por absorción

La refrigeración producida en el ciclo de refrigeración por absorción (ARC) ( $R_t^{ARC}$ ) es calculada por el factor de refrigeración ( $\beta^{R-ARC}$ ) y el agua caliente de entrada al sistema de refrigeración ( $H_t^{HW-ARC}$ ):

$$R_t^{ARC} = \beta^{R-ARC} H_t^{HW-ARC}, \quad \forall t \quad (23)$$

#### Distribución de refrigeración del ARC

La refrigeración generada en el ARC ( $R_t^{ARC}$ ) puede ser distribuida para satisfacer la demanda del complejo residencial ( $r_t^{ARC-residential}$ ) y para la venta al comprador externo ( $r_t^{ARC-sale}$ ):

$$R_t^{ARC} = r_t^{ARC-residential} + r_t^{ARC-sale}, \quad \forall t \quad (24)$$

#### Agua caliente requerida en el ARC

El agua caliente requerida por el ARC ( $H_t^{HW-ARC}$ ) puede ser obtenida mediante compra ( $h_t^{purchase-ARC}$ ), de la caldera ( $h_t^{boiler-ARC}$ ) y/o del ICE ( $h_t^{ICE-ARC}$ ):

$$H_t^{HW-ARC} = h_t^{purchase-ARC} + h_t^{boiler-ARC} + h_t^{ICE-ARC}, \quad \forall t \quad (25)$$

### 2.3.6 Sistema de producción de algas

Se considera un sistema de producción de algas para atrapar las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas y para producir energía a partir de biocombustibles y biomasa. Esta unidad puede ser útil para mejorar la sustentabilidad del sistema y esto debe tener en cuenta los recursos disponibles en el complejo residencial. Las relaciones necesarias para modelar este sistema son las siguientes.

#### Emisiones de CO<sub>2</sub> capturadas

El CO<sub>2</sub> capturado por el sistema de algas ( $G_t^{algae}$ ) es igual al CO<sub>2</sub> proveniente de la caldera ( $Fg_t^{boiler-algae}$ ), más el CO<sub>2</sub> del ICE ( $Fg_t^{ICE-algae}$ ), y el CO<sub>2</sub> del sistema de gasificación ( $Fg_t^{gasification-algae}$ ):

$$G_t^{algae} = Fg_t^{boiler-algae} + Fg_t^{ICE-algae} + Fg_t^{gasification-algae}, \quad \forall t \quad (26)$$

#### Agua necesitada por el sistema de producción de algas

El agua necesitado por el sistema de algas ( $F_t^{W-inlet-algae}$ ) es obtenido mediante la recolección de agua de lluvia ( $f_t^{RW-algae}$ ), de agua fresca ( $f_t^{FW-algae}$ ) y/o mediante reciclo de agua tratada por la unidad de tratamiento de aguas grises ( $f_t^{reclaim-algae}$ ):

$$F_t^{W-inlet-algae} = f_t^{RW-algae} + f_t^{FW-algae} + f_t^{reclaim-algae}, \quad \forall t \quad (27)$$

El agua necesitada para el sistema de algas ( $F_t^{W-inlet-algae}$ ) es igual al factor de agua del sistema de algas ( $\alpha^{algaeW}$ ) multiplicado por la entrada de CO<sub>2</sub> ( $G_t^{algae}$ ) al sistema:

$$F_t^{W-inlet-algae} = \alpha^{algaeW} G_t^{algae}, \quad \forall t \quad (28)$$

#### Electricidad requerida por el sistema de algas

La electricidad requerida por el sistema de algas ( $E_t^{algae}$ ) es igual al factor de electricidad del sistema de algas ( $\alpha^{algae-E}$ ) multiplicado por la entrada de CO<sub>2</sub> al sistema ( $G_t^{algae}$ ):

$$E_t^{algae} = \alpha^{algae-E} G_t^{algae} , \forall t \quad (29)$$

### Satisfacción de electricidad en el sistema de algas

La electricidad requerida por el sistema de algas ( $E_t^{algae}$ ) puede ser obtenida mediante el ICE ( $e_t^{ICE-algae}$ ) y mediante el vendedor externo ( $e_t^{purchased-algae}$ ):

$$E_t^{algae} = e_t^{ICE-algae} + e_t^{purchased-algae} , \forall t \quad (30)$$

### Producción de biocombustible en el sistema de algas

El biocombustible producido en el sistema de algas ( $F_t^{Biodisel}$ ) es igual al factor de conversión de biocombustible ( $\alpha^{Biodisel}$ ) por el flujo de gases de entrada al sistema ( $G_t^{algae}$ ):

$$F_t^{Biodisel} = \alpha^{Biodisel} G_t^{algae} , \forall t \quad (31)$$

### Producción de agua de desecho en el sistema de algas

El sistema de algas también produce aguas de desecho, las cuales se calculan de la siguiente manera:

$$F_t^{WW-algae} = \alpha^{WW-algae} F_t^{W-inlet-algae} , \forall t \quad (32)$$

donde  $F_t^{WW-algae}$  es el agua de desecho producido por el sistema de algas,  $\alpha^{WW-algae}$  es el factor de conversión de agua de desecho en el sistema de algas y  $F_t^{W-inlet-algae}$  es el agua de entrada al mismo.

#### 2.3.7 Agua necesitada para los jardines

Uno de los principales consumos de agua en el complejo residencial corresponde al riego de los jardines ( $F_t^{W-garden}$ ), y en el trabajo propuesto se considera que este puede ser obtenido mediante recolección de agua de lluvia ( $f_t^{RW-garden}$ ), agua fresca ( $f_t^{FW-garden}$ ) y reciclaje de agua tratada por la unidad de tratamiento de aguas grises ( $f_t^{reclaim-garden}$ ):

$$F_t^{W-garden} = f_t^{RW-garden} + f_t^{FW-garden} + f_t^{reclaim-garden} , \forall t \quad (33)$$

### 2.3.8 Demandas del complejo residencial

Las demandas de electricidad, agua caliente, agua fría y enfriamiento del complejo residencial deben satisfacerse a través del sistema integrado, y para modelar estos aspectos, se proponen las siguientes relaciones.

#### Demanda de agua fresca para el complejo residencial

La demanda de agua fresca para el complejo residencial es modelada de la siguiente manera:

$$F_t^{CW-residencial} = f_t^{RW-residencial} + f_t^{FW-residencial} , \forall t \quad (34)$$

donde  $F_t^{CW-residencial}$  es el agua fresca necesitada en el complejo residencial para diferentes usos domésticos,  $f_t^{RW-residencial}$  es el agua usada en el complejo proveniente por recolección de agua de lluvia y  $f_t^{FW-residencial}$  es el agua fresca proveniente del tanque de almacenamiento de agua fresca.

#### Demanda de agua caliente para el complejo residencial

La demanda de agua caliente del complejo residencial se expresa de la siguiente manera:

$$H_t^{residencial} = h_t^{ICE-residencial} + h_t^{boiler-residencial} , \forall t \quad (35)$$

donde  $H_t^{residencial}$  es el agua caliente requerida por el complejo,  $h_t^{ICE-residencial}$  es el agua caliente proveniente del ICE y  $h_t^{boiler-residencial}$  y la obtenida de la caldera.

#### Necesidad de electricidad

La necesidad de electricidad del complejo residencial ( $E_t^{residencial}$ ) es obtenida del ICE ( $e_t^{ICE-residencial}$ ) y por la compra a la compañía externa ( $e_t^{purchased}$ ):

$$E_t^{residencial} = e_t^{ICE-residencial} + e_t^{purchased} , \forall t \quad (36)$$

#### Necesidad de refrigeración

La necesidad de enfriamiento para el complejo residencial ( $R_t^{residencial}$ ) es generado y enviada desde el ARC ( $r_t^{ARC-residencial}$ ) y por compra al vendedor externo ( $r_t^{purchased-residencial}$ ):

$$R_t^{residential} = r_t^{ARC-residential} + r_t^{purchased-residential}, \forall t \quad (37)$$

### 2.3.9 Generación de aguas grises en el complejo residencial

Uno de los problemas más importantes en los complejos residenciales corresponde a la cantidad significativa de aguas grises producidas, y si se descarga sin ningún tratamiento, representa un tremendo problema ambiental. De esta manera, en este trabajo, la superestructura propuesta contempla el tratamiento y la reutilización de estas aguas grises, y las relaciones implementadas para modelar este problema son las siguientes.

#### Aguas grises generadas en el complejo residencial

Las aguas grises generadas en el complejo residencial ( $F_t^{GW-residential}$ ) son calculadas de la siguiente manera:

$$F_t^{GW-residential} = \alpha^{GW-residential} (F_t^{CW-residential} + H_t^{residential}), \forall t \quad (38)$$

donde  $\alpha^{GW-residential}$  es un factor de conversión para las aguas grises generadas en el complejo residencial,  $F_t^{CW-residential}$  es el flujo de agua fresca de entrada al complejo, y  $H_t^{residential}$  es la entrada de agua caliente al complejo residencial.

#### Tratamiento de aguas grises

La entrada de agua a la unidad de tratamiento de aguas grises ( $F_t^{Inlet-GW}$ ) es calculado por la suma del agua proveniente del complejo ( $F_t^{GW-residential}$ ) más el agua proveniente del sistema de producción de algas ( $F_t^{WW-algae}$ ):

$$F_t^{Inlet-GW} = F_t^{GW-residential} + F_t^{WW-algae}, \forall t \quad (39)$$

#### Generación de agua tratada

El agua tratada ( $F_t^{reclaimed-GW}$ ) es igual al factor de conversión de agua tratada ( $\alpha^{reclaimed-GW}$ ) multiplicado por el flujo de aguas grises que entran a la unidad de tratamiento ( $F_t^{Inlet-GW}$ ):

$$F_t^{reclaimed-GW} = \alpha^{reclaimed-GW} F_t^{Inlet-GW}, \forall t \quad (40)$$

#### Electricidad requerida en la unidad de tratamiento de aguas grises

La electricidad necesitada en la unidad de tratamiento de aguas grises ( $E_t^{GW}$ ) es calculada de la siguiente manera:

$$E_t^{GW} = \alpha^{GW-E} F_t^{Inlet-GW}, \quad \forall t \quad (41)$$

donde  $\alpha^{GW-E}$  es el factor de conversión de electricidad en la unidad de tratamiento de aguas grises y  $F_t^{Inlet-GW}$  es el agua de entrada a la misma unidad.

### Satisfacción de electricidad en la unidad de tratamiento de aguas grises

La electricidad requerida por la unidad de tratamiento de aguas grises ( $E_t^{GW}$ ) puede satisfacerse por el ICE ( $e_t^{ICE-GWT}$ ) y mediante compra externa ( $e_t^{purchased-GWT}$ ):

$$E_t^{GW} = e_t^{ICE-GWT} + e_t^{purchased-GWT}, \quad \forall t \quad (42)$$

### Distribución de agua tratada

El agua tratada por la unidad de tratamiento de aguas grises ( $F_t^{reclaimed-GW}$ ) puede ser enviada al sistema de algas ( $f_t^{reclaimed-algae}$ ), a los jardines ( $f_t^{reclaimed-garden}$ ) y/o al drenaje ( $f_t^{reclaimed-drainage}$ ):

$$F_t^{reclaimed-GW} = f_t^{reclaimed-algae} + f_t^{reclaimed-garden} + f_t^{reclaimed-drainage}, \quad \forall t \quad (60)$$

### Generación de gases en la unidad de tratamiento de aguas grises

En la unidad de tratamiento de aguas grises, algunas emisiones son producidas ( $F_t^{NG-GWT}$ ), las cuales son calculadas multiplicando el factor de conversión de gas natural de la planta de tratamiento ( $\alpha^{NG-GWT}$ ) por el flujo de agua de entrada al sistema ( $F_t^{Inlet-GW}$ ):

$$F_t^{NG-GWT} = \alpha^{NG-GWT} F_t^{Inlet-GW}, \quad \forall t \quad (44)$$

#### 2.3.10 Generación de aguas negras en el complejo residencial

Las aguas negras generadas en el complejo residencial son modeladas de la siguiente manera:

#### Aguas negras generadas

Las aguas negras generadas en el complejo residencial ( $F_t^{WW}$ ) es calculado mediante la suma de agua proveniente del complejo residencial ( $F_t^{CW-residencial}$ ) más el agua caliente utilizada en el complejo ( $H_t^{residencial}$ ), multiplicado por el factor de conversión de aguas negras para el complejo residencial ( $\alpha^{WW-residencial}$ ):

$$F_t^{WW} = \alpha^{WW-residencial} (F_t^{CW-residencial} + H_t^{residencial}), \quad \forall t \quad (45)$$

### Tratamiento de aguas negras

Las aguas negras tratadas por esta unidad ( $F_t^{treated-WW}$ ) son iguales a las aguas negras que entran a la unidad de tratamiento de aguas negras ( $F_t^{WW}$ ) multiplicado por el factor de eficiencia de la unidad de tratamiento de aguas negras ( $\alpha^{treating-WW}$ ):

$$F_t^{treated-WW} = \alpha^{treating-WW} F_t^{WW}, \quad \forall t \quad (46)$$

### Electricidad requerida por la unidad de tratamiento de aguas negras

La unidad de tratamiento de aguas negras requiere de electricidad para funcionar, esta electricidad ( $E_t^{WW}$ ) es calculada de la siguiente manera:

$$E_t^{WW} = \alpha^{WW-E} F_t^{WW}, \quad \forall t \quad (47)$$

donde  $\alpha^{WW-E}$  es el factor de electricidad para la unidad de tratamiento de aguas negras y  $F_t^{WW}$  es el agua que entra a la misma unidad.

### Satisfacción de electricidad en la unidad de tratamiento de aguas negras

Para satisfacer la necesidad de electricidad para la unidad de tratamiento de aguas negras ( $E_t^{WW}$ ), esta puede ser obtenida desde el ICE ( $e_t^{ICE-WWT}$ ) y/o mediante compra ( $e_t^{purchased-WWT}$ ):

$$E_t^{WW} = e_t^{ICE-WWT} + e_t^{purchased-WWT}, \quad \forall t \quad (48)$$

### Distribución de las aguas negras tratadas

Las aguas negras tratadas ( $F_t^{treated-WW}$ ) pueden ser enviadas solamente al drenaje ( $F_t^{WW-Drainage}$ ), lo cual se calcula de la siguiente manera:

$$F_t^{treated-WW} = F_t^{WW-Drainage} , \forall t \quad (49)$$

### Gas natural generado en la unidad de tratamiento de aguas negras

La unidad de tratamiento de aguas negras genera gas natural ( $F_t^{NG-WW}$ ), el cual es calculado mediante el factor de gas natural de la unidad de tratamiento de aguas negras ( $\alpha^{NG-WW}$ ) multiplicado por el flujo de entrada de agua a dicha unidad ( $F_t^{WW}$ ):

$$F_t^{NG-WW} = \alpha^{NG-WW} F_t^{WW} , \forall t \quad (50)$$

#### 2.3.11 Unidad de tratamiento de gas natural

Se necesita una unidad de tratamiento para tratar los gases generados que sean útiles para usar en diferentes unidades, y para modelar esta unidad se necesitan las siguientes relaciones.

#### Flujo de gas natural que entra a la unidad de tratamiento

El flujo de gas natural que entra a la unidad de tratamiento ( $F_t^{NGT-Inlet}$ ) está compuesto por los gases provenientes de la unidad de tratamiento de aguas grises ( $F_t^{NG-GWT}$ ) y los gases provenientes de la unidad de gases de tratamiento de aguas negras ( $F_t^{NG-WW}$ ):

$$F_t^{NGT-Inlet} = F_t^{NG-GWT} + F_t^{NG-WW} , \forall t \quad (51)$$

#### Gas natural tratado

El flujo de salida de gases de la unidad de tratamiento de gases ( $F_t^{NG-Outlet}$ ) se calcula de la siguiente manera:

$$F_t^{NG-Outlet} = \alpha^{NG-NGT} F_t^{NGT-Inlet} , \forall t \quad (52)$$

donde  $\alpha^{NG-NGT}$  es el factor de conversión de gas natural para la unidad de tratamiento de gases y  $F_t^{NGT-Inlet}$  es el gas que entra a la unidad de tratamiento de gases.

#### Distribución de gas natural tratado

El flujo de salida de gas natural de la unidad de tratamiento de gases ( $F_t^{NG-Outlet}$ ) puede ser utilizado en el ICE ( $f_t^{NG-gastreatment-ICE}$ ), la caldera ( $f_t^{NG-gastreatment-boiler}$ ), el sistema de

gasificación ( $f_t^{NG-gastreatment-gasification}$ ) y puede ser vendido a una compañía externa ( $f_t^{NG-gastreatment-sale}$ ):

$$F_t^{NG-Outlet} = f_t^{NG-gastreatment-ICE} + f_t^{NG-gastreatment-boiler} + f_t^{NG-gastreatment-gasification} + f_t^{NG-gastreatment-sale}, \quad \forall t \quad (53)$$

### 2.3.12 Generación de residuos sólidos

En los complejos residenciales, hay una gran producción de desechos sólidos. Este desecho sólido genera muchos problemas ambientales. Por lo tanto, en la superestructura propuesta se considera la gasificación de los residuos sólidos, y de esta forma evitar la producción de estos residuos y al mismo tiempo producir electricidad, que se necesita como insumo en varias unidades del complejo residencial integrado. Las relaciones propuestas para modelar los sistemas de gasificación se establecen de la siguiente manera.

#### Gas natural producido en el proceso de gasificación

El gas natural que se produce en el proceso de gasificación ( $F_t^{NG-gasification}$ ) es igual al factor de conversión de gasificación de la unidad ( $\alpha^{gasification}$ ) multiplicado por la cantidad de residuos sólidos producidos en el complejo residencial ( $F_t^{solidwaste}$ ):

$$F_t^{NG-gasification} = \alpha^{gasification} F_t^{solidwaste}, \quad \forall t \quad (54)$$

#### Distribución de gas natural producido en el proceso de gasificación

El gas natural producido en el sistema de gasificación ( $F_t^{NG-gasification}$ ) puede ser enviado al ICE ( $f_t^{NG-gasification-ICE}$ ), la caldera ( $f_t^{NG-gasification-boiler}$ ) y/o puede ser vendido a una compañía externa ( $f_t^{NG-gasification-sale}$ ):

$$F_t^{NG-gasification} = f_t^{NG-gasification-ICE} + f_t^{NG-gasification-boiler} + f_t^{NG-gasification-sale}, \quad \forall t \quad (55)$$

#### Generación de CO<sub>2</sub>

En el proceso de gasificación se generan emisiones de CO<sub>2</sub>, las cuales se calculan de la siguiente manera:

$$G_t^{gasification} = \alpha^{fluegases-gasification} F_t^{solidwaste} , \forall t \quad (56)$$

donde  $G_t^{gasification}$  es el flujo de gases generados por el proceso de gasificación,  $\alpha^{fluegases-gasification}$  es el factor de conversión de CO<sub>2</sub> para el proceso de gasificación, y  $F_t^{solidwaste}$  es la entrada de los residuos sólidos a dicho proceso.

### Distribución de emisiones de CO<sub>2</sub> del proceso de gasificación

El CO<sub>2</sub> generado en el proceso de gasificación ( $G_t^{gasification}$ ) puede ser capturado por el sistema de algas ( $g_t^{gasification-algae}$ ) y/o enviado al medio ambiente ( $g_t^{gasification-discharge}$ ):

$$G_t^{gasification} = g_t^{gasification-algae} + g_t^{gasification-discharge} , \forall t \quad (57)$$

### Combustible necesitado en el gasificador

El gasificador necesita combustible para operar, el cual se calcula como se muestra a continuación:

$$F_t^{NG-needed-gasification} = \alpha^{NG-needed-gasification} F_t^{solidwaste} , \forall t \quad (58)$$

donde  $F_t^{NG-needed-gasification}$  es el combustible necesitado por el gasificador,  $\alpha^{NG-needed-gasification}$  es el factor de gas natural para el gasificador y  $F_t^{solidwaste}$  es el flujo de entrada de residuos sólidos al proceso de gasificación.

### Balance para el gas natural requerido en el gasificador

El gas natural necesitado en el gasificador ( $F_t^{NG-needed-gasification}$ ) es obtenido por la unidad de tratamiento de gas natural ( $f_t^{NG-gastreatment-gasification}$ ) o mediante compra ( $f_t^{NG-gasification-purchased}$ ):

$$F_t^{NG-needed-gasification} = f_t^{NG-gastreatment-gasification} + f_t^{NG-gasification-purchased} , \forall t \quad (59)$$

#### 2.3.13 Costos de operación

El costo de operación asociado al sistema ( $TotOpCost$ ) es determinado por los costos de operación del agua fresca, del gas natural, de electricidad y de enfriamiento. Cuya estimación se describe a continuación:

$$TotOpCost = Cost^{FW} + Cost^{NG} + Cost^E + Cost^{ref} \quad (60)$$

### Costo de agua fresca

El costo de operación asociado al agua fresca ( $Cost^{FW}$ ) es igual al costo unitario del agua fresca ( $UC^{FW}$ ), multiplicado por la cantidad total de agua fresca requerida en todos los periodos de tiempo.

$$Cost^{FW} = UC^{FW} \sum_t F_t^{FW} \quad (61)$$

### Costo de gas natural

El costo del gas natural ( $Cost^{NG}$ ) es calculado mediante el gas natural comprado para el ICE, más el gas natural comprado para el calentador, más el gas natural comprado para el proceso de gasificación, los cuales son multiplicador por el costo unitario de gas natural ( $UC^{NG}$ ):

$$Cost^{NG} = UC^{NG} \left( \sum_t f_t^{NG-purchased-ICE} + \sum_t f_t^{NG-boiler-purchased} + \sum_t f_t^{NG-gasification-purchased} \right) \quad (62)$$

### Costo de electricidad

El costo total de la electricidad ( $Cost^E$ ) es igual a la electricidad comprada para uso en el complejo residencial, más la electricidad comprada para el sistema de algas, las unidades de tratamiento de aguas grises y negras, multiplicado por el costo unitario de la electricidad ( $UC^E$ ):

$$Cost^E = \sum_t UC^E (e_t^{purchased-residential} + e_t^{purchased-algae} + e_t^{purchased-GWT} + e_t^{purchased-WWT}) \quad (63)$$

### Costo de enfriamiento

El costo de refrigeración ( $Cost^{ref}$ ) es igual a la suma de la refrigeración requerida en cada uno de los periodos de tiempo, multiplicados por el costo unitario de refrigeración ( $UC^{ref}$ ):

$$Cost^{ref} = UC^{ref} \sum_t r_t^{purchased-residential} \quad (64)$$

### 2.3.14 Ventas

En el esquema integrado propuesto para el complejo residencial, hay varios productos tales como agua fresca, agua caliente, electricidad, refrigeración, gas natural y biocombustibles que pueden venderse a usuarios externos. Cuya representación económica se describe a continuación:

#### Venta de agua fresca

La venta de agua fresca ( $Sale^{CW}$ ) consiste en la venta total de agua fresca en cada periodo multiplicado por el precio de venta de agua fresca ( $US^{CW}$ ) en los respectivos periodos:

$$Sale^{CW} = US^{CW} \sum_t f_t^{RW-sale} \quad (65)$$

#### Venta de agua caliente

Para satisfacer las necesidades en el complejo residencial, se requiere agua caliente, pero el exceso se puede vender a usuarios externos y la ganancia asociada se determina de la siguiente manera:

$$Sale^{HW} = US^{HW} \left( \sum_t h_t^{boiler-sale} + \sum_t h_t^{ICE-sale} \right) \quad (66)$$

donde  $Sale^{HW}$  es el total de agua caliente vendida y  $US^{HW}$  es el precio unitario del agua caliente.

#### Venta de electricidad

El exceso de electricidad producida por el ICE puede venderse, cuya ganancia ( $Sale^E$ ) es igual al precio unitario de electricidad ( $US^e$ ) multiplicado por la suma de electricidad vendida en cada periodo:

$$Sale^E = US^e \sum_t e_t^{ICE-sale} \quad (67)$$

#### Venta de refrigeración

La ganancia por refrigeración ( $Sale^R$ ) a un cliente externo es calculada multiplicando el costo unitario de refrigeración ( $US^R$ ) por la suma de la refrigeración vendida en todos los periodos de tiempo:

$$Sale^R = US^R \sum_t r_t^{ARC-sale} \quad (68)$$

### Venta de gas natural

El gas natural que se produce en la unidad de tratamiento de gases y en el proceso de gasificación que no son explotados en el proceso, puede representar ingresos económicos. Dicha venta ( $Sale^{NG}$ ) es igual al gas natural vendido que es producido por la planta de tratamiento de gases más el gas natural vendido producido por el gasificador en todos los periodos, multiplicado por el costo unitario de gas natural ( $US^{NG}$ ):

$$Sale^{NG} = US^{NG} \left( \sum_t f_t^{NG-gastreatment-sale} + \sum_t f_t^{NG-gasification-sale} \right) \quad (69)$$

### Ventas de biocombustibles

Las ganancias asociadas a la venta de biocombustible ( $Sale^{biofuel}$ ) es igual al costo unitario del biocombustible ( $US^{biofuel}$ ) por el flujo total del mismo en todos los periodos de tiempo:

$$Sale^{biofuel} = US^{biofuel} \sum_t F_t^{biofuel} \quad (70)$$

### Ventas totales

La ganancia total ( $TotSales$ ) es igual a la suma de la ganancia relacionada a la venta del agua fresca ( $Sale^{CW}$ ), del agua caliente ( $Sale^{HW}$ ), de electricidad ( $Sale^E$ ), de refrigeración ( $Sale^R$ ), de gas natural ( $Sale^{NG}$ ) y de biocombustibles ( $Sale^{biofuel}$ ):

$$TotSales = Sale^{CW} + Sale^{HW} + Sale^E + Sale^R + Sale^{NG} + Sale^{biofuel} \quad (71)$$

#### 2.3.15 Existencia de unidades

Cuando se necesita una unidad en el complejo integrado, se requiere determinar el costo fijo asociado. De esta forma, es necesario determinar la existencia de las unidades propuestas en

el complejo residencial integrado. Esto se modela a través de variables binarias y para cada unidad se requieren las siguientes relaciones.

### **Sistema de recolección de agua de lluvia**

El área usada para el sistema de recolección de agua de lluvia ( $A^{RW}$ ) debe ser menor que el área disponible más grande para el colector de agua de lluvia ( $A^{RW-MAX}$ ) multiplicado por su variable binaria asociada ( $y^{RW}$ ) usada para determinar la existencia del equipo. La variable binaria puede ser cero o uno; sí el equipo existe es igual a uno, de lo contrario sí no existe es cero.

$$A^{RW} \leq A^{RW-MAX} y^{RW} \quad (72)$$

### **Costo de capital para el sistema de recolección de agua de lluvia**

El costo fijo ( $UFC^{RW}$ ) y el costo variable del sistema de recolección de agua de lluvia definen el costo de capital asociado. La variable binaria establece la parte fija del costo, cuando la unidad del colector existe esta parte es activada y si no existe el costo fijo no es activado:

$$CapCost^{RW} = UFC^{RW} y^{RW} + A^{RW} UVC^{RW} + Cap^{RWSS} UVC^{RWSS} \quad (73)$$

donde  $UVC^{RW}$  y  $UVC^{RWSS}$  son el costo variable para el sistema de recolección de lluvia y del área del colector respectivamente, y  $Cap^{RWSS}$  es la capacidad para el sistema de almacenamiento de agua de lluvia.

### **Tanque de almacenamiento de agua fresca**

La capacidad para el tanque de almacenamiento de agua ( $Cap^{FWSS}$ ) debe ser menor que la unidad más grande disponible para instalarse en el complejo residencial ( $Cap^{FWSS-MAX}$ ) multiplicado por la variable binaria asociada variable ( $y^{FWSS}$ ) para la existencia del equipo de almacenamiento:

$$Cap^{FWSS} \leq Cap^{FWSS-MAX} y^{FWSS} \quad (74)$$

### **Costo de capital para la unidad de almacenamiento de agua fresca**

El costo fijo ( $UFC^{FWSS}$ ) y costo variable para el sistema de almacenamiento de agua fresca define el costo de capital asociado. La variable binaria establece la parte fija del costo, cuando la unidad existe la parte del costo fijo es activada y cuando no existe se desprecia.  $UVC^{FWSS}$  se refiere al costo variable para el tanque de almacenamiento de agua fresca:

$$CapCost^{FWSS} = UFC^{FWSS} y^{FWSS} + UVC^{FWSS} Cap^{FWSS} \quad (75)$$

### Costo de capital para la caldera

La capacidad de la caldera ( $Cap^{boiler}$ ) debe ser mayor que la del agua requerida para esta unidad ( $H_t^{HW-boiler}$ ):

$$Cap^{boiler} \geq H_t^{HW-boiler}, \quad \forall t \quad (76)$$

### Existencia de la caldera

La capacidad de la caldera ( $Cap^{boiler}$ ) debe ser menor que la necesitada para producir la mayor cantidad de agua caliente requerida en un periodo ( $Cap^{boiler-MAX}$ ) multiplicado por la variable binaria asociada ( $y^{boiler}$ ) para la existencia de la misma:

$$Cap^{boiler} \leq Cap^{boiler-MAX} y^{boiler} \quad (77)$$

En resumen, el costo de capital para la caldera ( $CapCost^{boiler}$ ) es igual al costo fijo de la caldera ( $UFC^{boiler}$ ) multiplicado por su respectivo variable binaria más el costo variable de la caldera ( $UVC^{boiler}$ ) por la capacidad de la caldera.

$$CapCost^{boiler} = UFC^{boiler} y^{boiler} + UVC^{boiler} Cap^{boiler} \quad (78)$$

### Costo de capital del ICE

La capacidad para el ICE ( $Cap^{ICE}$ ) debe ser más grande que la máxima electricidad necesitada en todos los periodos considerados ( $E_t^{ICE}$ ):

$$Cap^{ICE} \geq E_t^{ICE}, \quad \forall t \quad (79)$$

### Existencia del ICE

La capacidad del ICE ( $Cap^{ICE}$ ) debe ser menor que la mayor necesidad de energía en un periodo ( $Cap^{ICE-MAX}$ ) multiplicado por su variable binaria asociada ( $y^{ICE}$ ) para la existencia del ICE:

$$Cap^{ICE} \leq Cap^{ICE-MAX} y^{ICE} \quad (80)$$

El costo de capital para el ICE ( $CapCost^{ICE}$ ) es calculado mediante el costo fijo del ICE ( $UFC^{ICE}$ ) multiplicado por su respectiva variable binaria, más el costo variable del ICE ( $UVC^{ICE}$ ) por la capacidad del ICE:

$$CapCost^{ICE} = UFC^{ICE} y^{ICE} + UVC^{ICE} Cap^{ICE} \quad (81)$$

### Costo de capital del ARC

La capacidad del ciclo de refrigeración por absorción ( $Cap^{ARC}$ ) debe ser más grande que la máxima demanda de refrigeración para el complejo residencial en un periodo de tiempo dado ( $R_t^{ARC}$ ):

$$Cap^{ARC} \geq R_t^{ARC}, \forall t \quad (82)$$

La capacidad del ARC ( $Cap^{ARC}$ ) debe ser menor que la mayor refrigeración necesitada en todos los periodos ( $Cap^{ARC-MAX}$ ) multiplicado por su variable binaria asociada ( $y^{ARC}$ ) para la existencia del ARC:

$$Cap^{ARC} \leq Cap^{ARC-MAX} y^{ARC} \quad (83)$$

El costo de capital del ARC ( $CapCost^{ARC}$ ) es igual al costo fijo del ARC ( $UFC^{ARC}$ ) multiplicado por su respectiva variable binaria más el costo variable del ARC ( $UVC^{ARC}$ ) por la capacidad del ciclo de refrigeración por absorción:

$$CapCost^{ARC} = UFC^{ARC} y^{ARC} + UVC^{ARC} Cap^{ARC} \quad (84)$$

### Sistema de algas

La capacidad del sistema de algas ( $Cap^{algae}$ ) debe ser más grande que el flujo de gas requerido para producir el biocombustible en todos los periodos de tiempo ( $G_t^{algae}$ ):

$$Cap^{algae} \geq G_t^{algae}, \forall t \quad (85)$$

La capacidad del sistema de algas debe ser menor que la capacidad más grande necesitada en todos los periodos de tiempo ( $Cap^{algae-MAX}$ ) multiplicado por la variable binaria asociada ( $y^{algae}$ ).

$$Cap^{algae} \leq Cap^{algae-MAX} y^{algae} \quad (86)$$

El costo de capital para el sistema de algas ( $CapCost^{algae}$ ) es igual al costo fijo ( $UFC^{algae}$ ) multiplicado por su respectiva variable binaria. Esto más el costo variable del sistema de algas ( $UVC^{algae}$ ) por la capacidad del sistema:

$$CapCost^{algae} = UFC^{algae} y^{algae} + UVC^{algae} Cap^{algae} \quad (87)$$

### Planta de tratamiento de aguas grises

La capacidad para la planta de tratamiento de aguas grises ( $Cap^{GW}$ ) debe ser mayor que el agua de entrada a la unidad ( $F_t^{Inlet-GW}$ ):

$$Cap^{GW} \geq F_t^{Inlet-GW}, \forall t \quad (88)$$

La capacidad de la planta de tratamiento de aguas grises debe ser menor que el flujo más grande de agua de entrada al sistema en todos los periodos ( $Cap^{GW-MAX}$ ) multiplicado por su variable binaria asociada ( $y^{GW}$ ) por la existencia de la unidad de tratamiento:

$$Cap^{GW} \leq Cap^{GW-MAX} y^{GW} \quad (89)$$

El costo fijo ( $UFC^{GW}$ ) y el costo variable de la unidad de tratamiento de aguas grises definen el costo de capital asociado. La variable binaria establece la parte del costo fijo, cuando la planta de tratamiento existe esta parte es activada y cuando no existe la parte fija no es activada.  $UVC^{GW}$  se refiere al costo variable para la planta de tratamiento de aguas grises:

$$CapCost^{GW} = UFC^{GW} y^{GW} + UVC^{GW} Cap^{GW} \quad (90)$$

### Planta de tratamiento de aguas negras

La capacidad para la planta de tratamiento de aguas negras ( $Cap^{WW}$ ) debe ser mayor que el flujo de agua de entrada a esta unidad y debe ser menor que la máxima capacidad de agua de entrada en todos los periodos ( $Cap^{WW-MAX}$ ) multiplicado por su variable binaria ( $y^{WW}$ ):

$$Cap^{WW} \geq F_t^{WW}, \quad \forall t \quad (91)$$

$$Cap^{WW} \leq Cap^{WW-MAX} y^{WW} \quad (92)$$

El costo de capital para la planta de tratamiento de aguas negras ( $CapCost^{WW}$ ) es igual al costo fijo ( $UFC^{WW}$ ) multiplicado por su respectiva variable binaria, más el costo variable ( $UVC^{WW}$ ) por la capacidad de la planta de tratamiento de aguas negras:

$$CapCost^{WW} = UFC^{WW} y^{WW} + UVC^{WW} Cap^{WW} \quad (93)$$

### Tratamiento de gases

La capacidad de la planta de tratamiento de gases ( $Cap^{NGT}$ ) debe ser mayor que el flujo de entrada de gases a esta unidad y debe ser menor que la máxima capacidad de entrada de gases en todos los periodos ( $Cap^{NGT-MAX}$ ) multiplicado por su variable binaria ( $y^{NGT}$ ):

$$Cap^{NGT} \geq F_t^{NGT}, \quad \forall t \quad (94)$$

$$Cap^{NGT} \leq Cap^{NGT-MAX} y^{NGT} \quad (95)$$

El costo de capital para la planta de tratamiento de gases ( $CapCost^{NGT}$ ) es igual al costo fijo de la planta de gases ( $UFC^{NGT}$ ) multiplicado por su respectiva variable binaria, más el costo variable ( $UVC^{NGT}$ ) por la capacidad de la misma unidad:

$$CapCost^{NGT} = UFC^{NGT} y^{NGT} + UVC^{NGT} Cap^{NGT} \quad (96)$$

### Proceso de gasificación

La capacidad del gasificador ( $Cap^{gasification}$ ) debe ser más grande que la entrada de residuos sólidos a esta unidad, y debe ser menor que la máxima capacidad de entrada de residuos sólidos en todos los periodos ( $Cap^{gasification-MAX}$ ) multiplicado por su variable binaria ( $y^{gasification}$ ):

$$Cap^{gasification} \geq F_t^{NG-gasification}, \quad \forall t \quad (97)$$

$$Cap^{gasification} \leq Cap^{gasification-MAX} y^{gasification} \quad (98)$$

El costo de capital para el proceso de gasificación ( $CapCost^{gasification}$ ) es igual al costo fijo de la unidad de gasificación ( $UFC^{gasification}$ ) multiplicado por su respectiva variable binaria, más el costo variable ( $UVC^{gasification}$ ) multiplicado por la capacidad del gasificador:

$$CapCost^{gasification} = UFC^{gasification} y^{gasification} + UVC^{gasification} Cap^{gasification} \quad (99)$$

### Costo de capital total para el sistema integrado del complejo residencial

El costo de capital total ( $TotCapCost$ ) para el proceso entero es igual a la suma del costo de capital de cada uno de los procesos; incluido el costo de capital para el sistema de recolección de agua de lluvia, más el sistema de almacenamiento de agua fresca, más el calentador, más el motor de combustión interna, más el ciclo de refrigeración por absorción, más el sistema de algas, más las plantas de tratamiento de aguas grises, negras y de gases, más el proceso de gasificación:

$$\begin{aligned} TotCapCost = & CapCost^{RW} + CapCost^{FWSS} + CapCost^{boiler} \\ & + CapCost^{ICE} + CapCost^{ARC} + CapCost^{algae} + CapCost^{GW} \\ & + CapCost^{WW} + CapCost^{NGT} + CapCost^{gasification} \end{aligned} \quad (100)$$

#### 2.3.16 Demandas máximas de ventas externas

Se necesitan algunas limitaciones para el máximo de productos que pueden venderse a usuarios externos, y estos se expresan de la siguiente manera

##### Demanda máxima externa de agua fresca

La demanda máxima de agua fresca para usuarios ( $F_t^{RW-MAX-Dem}$ ) debe ser mayor que el agua fresca vendida ( $f_t^{RW-sale}$ ):

$$f_t^{RW-sale} \leq F_t^{RW-MAX-Dem}, \quad \forall t \quad (101)$$

##### Demanda máxima externa de agua caliente

La demanda máxima de agua caliente para usuarios externos ( $H_t^{HW-MAX-Dem}$ ) debe ser mayor que el agua caliente vendida, la cual es producida en la caldera ( $h_t^{Boiler-sale}$ ) más la producida en el ICE ( $h_t^{ICE-sale}$ ):

$$h_t^{boiler-sale} + h_t^{ICE-sale} \leq H_t^{HW-MAX-Dem}, \quad \forall t \quad (102)$$

### **Demanda máxima externa de electricidad**

La demanda máxima de electricidad para usuarios externos ( $E_t^{E-MAX-Dem}$ ) debe ser mayor que la electricidad vendida ( $e_t^{ICE-sale}$ ) para la compañía externa:

$$e_t^{ICE-sale} \leq E_t^{E-MAX-Dem}, \quad \forall t \quad (103)$$

### **Demanda máxima externa de refrigeración**

La demanda máxima de refrigeración para usuarios externos ( $R_t^{ARC-MAX-Dem}$ ) debe ser mayor que la refrigeración vendida a usuarios externos ( $r_t^{ARC-sale}$ ):

$$r_t^{ARC-sale} \leq R_t^{ARC-MAX-Dem}, \quad \forall t \quad (104)$$

### **Demanda máxima externa de gas natural**

La demanda máxima de gas natural para compradores externos ( $F_t^{NG-MAX-Dem}$ ) debe ser mayor que la venta de gas natural a usuarios externos proveniente del proceso de gasificación ( $f_t^{NG-gasification-sale}$ ) y del producido en la planta de tratamiento de gases ( $f_t^{NG-gastreatment-sale}$ ):

$$f_t^{NG-gasification-sale} + f_t^{NG-gastreatment-sale} \leq F_t^{NG-MAX-Dem}, \quad \forall t \quad (105)$$

### **Demanda máxima externa de biocombustibles**

La demanda máxima de biocombustibles para usuarios externos ( $F_t^{Biofuel-MAX-Dem}$ ) debe ser mayor que el biocombustible vendido.

$$F_t^{biofuel} \leq F_t^{Biofuel-MAX-Dem}, \quad \forall t \quad (106)$$

### 2.3.17 Funciones Objetivo

#### Costo total anual del sistema integrado

El costo total anual ( $TAC$ ) es igual al costo total de operación ( $TotOpCost$ ) más el costo total de capital ( $TotCapCost$ ) menos las ventas totales ( $TotSales$ ):

$$TAC = TotOpCost + TotCapCost - TotSales \quad (107)$$

#### Consumo de agua fresca

El consumo total de agua fresca ( $FFwTot$ ) en el sistema integrado es igual a la sumatoria del agua fresca consumida en cada periodo de tiempo:

$$FFwTot = \sum_t FFw_t \quad (108)$$

#### Emisiones de CO<sub>2</sub>

Las emisiones totales de CO<sub>2</sub> descargadas al medio ambiente ( $GDischargeTotal$ ) son igual a las emisiones descargadas por el ICE ( $Fg_t^{Ice-Discharge}$ ) más las emisiones del calentador ( $Fg_t^{Boiler-Discharge}$ ) y del proceso de gasificación ( $Fg_t^{Gasification-Discharge}$ ) como se muestra a continuación:

$$GDischargeTotal = \sum_t Fg_t^{Ice-Discharge} + \sum_t Fg_t^{Boiler-Discharge} + \sum_t Fg_t^{Gasification-Discharge} \quad (60)$$

#### Impacto ambiental

El impacto ambiental ( $EnvImp$ ) es cuantificado a través del análisis del ciclo de vida usando el eco-indicador 99 con las siguientes ecuaciones:

$$EnvImp = EI^{HH} + EI^{EQ} + EI^{DR} \quad (110)$$

donde  $EI^{HH}$  representa el daño a la salud humana,  $EI^{EQ}$  es el impacto ambiental que afecta a la calidad del ecosistema y  $EI^{DR}$  es el daño a los recursos y cada uno se calcula de la manera siguiente:

$$\begin{aligned}
 EI^{HH} = & EI^{algae-HH} CTS^{algae} Cap^{algae} + EI^{ARC-HH} CTS^{ARC} Cap^{ARC} + EI^{boiler-HH} CTS^{boiler} Cap^{boiler} + \\
 & EI^{WW-HH} CTS^{WW} Cap^{WW} + EI^{gasification-HH} CTS^{gasification} Cap^{gasification} + EI^{GW-HH} CTS^{GW} Cap^{GW} + \\
 & EI^{ICE-HH} CTS^{ICE} Cap^{ICE} + EI^{NGT-HH} CTS^{NGT} Cap^{NGT} + EI^{RWSS-HH} CTS^{RWSS} Cap^{RWSS} + \\
 & EI^{FWSS-HH} CTS^{FWSS} Cap^{FWSS} + EI^{biodisel-HH} \sum_t F_t^{biodisel} + EI^{BWW-HH} \sum_t F_t^{treated-ww} + \\
 & EI^{CO_2-HH} \sum_t (G_t^{ICE} + G_t^{boiler} + G_t^{gasification}) + \\
 & EI^{e-HH} \sum_t (E_t^{ICE} + e_t^{purchased-algae} + e_t^{purchased} + e_t^{purchased-GWT} + e_t^{purchased-WWT}) + EI^{water-HH} \sum_t F_t^{FW} + \\
 & EI^{GWW-HH} \sum_t F_t^{reclaimed-GW} + EI^{HW-HH} \sum_t (H_t^{ICE} + H_t^{HW-boiler} + h_t^{purchase-ARC}) + \\
 & EI^{NG-HH} \sum_t (F_t^{NG-ICE} + F_t^{NG-boiler} + F_t^{NG-GWT} + F_t^{NG-WW}) + EI^{ref-HH} \sum_t (R_t^{ARC} + r_t^{purchased-residential}) + \\
 & EI^{RW-HH} \sum_t F_t^{RW} + EI^{SW-HH} \sum_t F_t^{solidwaste}
 \end{aligned} \tag{111}$$

$$\begin{aligned}
 EI^{EQ} = & EI^{algae-EQ} CTS^{algae} Cap^{algae} + EI^{ARC-EQ} CTS^{ARC} Cap^{ARC} + EI^{boiler-EQ} CTS^{boiler} Cap^{boiler} + \\
 & EI^{WW-EQ} CTS^{WW} Cap^{WW} + EI^{gasification-EQ} CTS^{gasification} Cap^{gasification} + EI^{GW-EQ} CTS^{GW} Cap^{GW} + \\
 & EI^{ICE-EQ} CTS^{ICE} Cap^{ICE} + EI^{NGT-EQ} CTS^{NGT} Cap^{NGT} + EI^{RWSS-EQ} CTS^{RWSS} Cap^{RWSS} + \\
 & EI^{FWSS-EQ} CTS^{FWSS} Cap^{FWSS} + EI^{biodisel-EQ} \sum_t F_t^{biodisel} + EI^{BWW-EQ} \sum_t F_t^{treated-ww} + \\
 & EI^{CO_2-EQ} \sum_t (G_t^{ICE} + G_t^{boiler} + G_t^{gasification}) + \\
 & EI^{e-EQ} \sum_t (E_t^{ICE} + e_t^{purchased-algae} + e_t^{purchased} + e_t^{purchased-GWT} + e_t^{purchased-WWT}) + EI^{water-EQ} \sum_t F_t^{FW} + \\
 & EI^{GWW-EQ} \sum_t F_t^{reclaimed-GW} + EI^{HW-EQ} \sum_t (H_t^{ICE} + H_t^{HW-boiler} + h_t^{purchase-ARC}) + \\
 & EI^{NG-HH} \sum_t (F_t^{NG-ICE} + F_t^{NG-boiler} + F_t^{NG-GWT} + F_t^{NG-WW}) + EI^{ref-HH} \sum_t (R_t^{ARC} + r_t^{purchased-residential}) + \\
 & EI^{RW-EQ} \sum_t F_t^{RW} + EI^{SW-EQ} \sum_t F_t^{solidwaste}
 \end{aligned} \tag{112}$$

$$\begin{aligned}
 EI^{DR} = & EI^{algae-DR} CTS^{algae} Cap^{algae} + EI^{ARC-DR} CTS^{ARC} Cap^{ARC} + EI^{boiler-DR} CTS^{boiler} Cap^{boiler} + \\
 & EI^{WW-DR} CTS^{WW} Cap^{WW} + EI^{gasification-DR} CTS^{gasification} Cap^{gasification} + EI^{GW-DR} CTS^{GW} Cap^{GW} + \\
 & EI^{ICE-DR} CTS^{ICE} Cap^{ICE} + EI^{NGT-DR} CTS^{NGT} Cap^{NGT} + EI^{RWSS-DR} CTS^{RWSS} Cap^{RWSS} + \\
 & EI^{FWSS-DR} CTS^{FWSS} Cap^{FWSS} + EI^{biodisel-DR} \sum_t F_t^{biodisel} + EI^{BWW-DR} \sum_t F_t^{treated-ww} + \\
 & EI^{CO_2-DR} \sum_t (G_t^{ICE} + G_t^{boiler} + G_t^{gasification}) + \tag{113} \\
 & EI^{e-DR} \sum_t (E_t^{ICE} + e_t^{purchased-algae} + e_t^{purchased} + e_t^{purchased-GWT} + e_t^{purchased-WWT}) + EI^{water-DR} \sum_t F_t^{FW} + \\
 & EI^{GWW-DR} \sum_t F_t^{reclaimed-GW} + EI^{HW-DR} \sum_t (H_t^{ICE} + H_t^{HW-boiler} + h_t^{purchase-ARC}) + \\
 & EI^{NG-HH} \sum_t (F_t^{NG-ICE} + F_t^{NG-boiler} + F_t^{NG-GWT} + F_t^{NG-WW}) + EI^{ref-HH} \sum_t (R_t^{ARC} + r_t^{purchased-residential}) + \\
 & EI^{RW-DR} \sum_t F_t^{RW} + EI^{SW-DR} \sum_t F_t^{solidwaste}
 \end{aligned}$$

donde  $EI$ 's representa los eco-puntos para cada uno de los recursos frescos y el material necesitado para cada uno de las unidades de proceso, los eco-puntos son listados en la **Tabla 1** y **Tabla 2**, respectivamente.

**Tabla 1.** Puntos de eco-indicador para la energía y recursos usados en el problema

Puntos			
Energía y Recursos	Calidad de Ecosistema	Salud Humana	Daño a los Recursos
Biocombustible (kWh)	0.000025	0.000360	0.000012
CO <sub>2</sub> (ton)	0.000027	0.000337	0.001870
Electricidad (kWh)	0.010885	0.001047	0.039438
Agua gris (m <sup>3</sup> )	0.003000	0.004500	0.002500
Agua caliente (m <sup>3</sup> )	0.002927	0.001849	0.001212
Gas natural (kWh)	0.005384	0.000616	0.024764
Refrigeración (kWh)	0.001283	0.000808	0.004003
Agua de lluvia (m <sup>3</sup> )	0.000160	0.000001	0.000016
Residuos sólidos (kg)	0.020200	0.008807	0.000756
Agua (m <sup>3</sup> )	0.013854	0.006497	0.011885
Agua de desecho (m <sup>3</sup> )	0.024580	0.010580	0.017050

**Tasa de retorno sustentable**

Para evaluar a sustentabilidad del proceso, recientemente El-Halwagi (2017) propuso la tasa de retorno sustentable (*SWSROIM*), y en este trabajo se determina de la siguiente manera:

$$SWSROIM = \frac{TAC[1 + \sum_i^N w_i (\frac{EnvImp}{Eco-indicator^{ref}})]}{TAC^{ref}} \tag{114}$$

donde  $TAC^{ref}$  y  $Eco-indicator^{ref}$  son el costo total anual y el impacto ambiental, respectivamente, los cuales están asociados para satisfacer las necesidades del complejo residencial antes de la integración,  $w_i$  es el factor de peso para las unidades asociadas al proceso.

**Tabla 2.** Eco-puntos para el material usado en la producción de las tecnologías

Puntos (pts/kg material)			
Tecnología	Calidad del Ecosistema	Salud Humana	Daño a los recursos
Sistema de algas	3.00E-04	4.50E-04	2.50E-04
ARC	2.74E-10	2.70E-11	2.70E-11
Caldera	1.28E-03	8.08E-04	4.00E-03
Tratamiento aguas negras	1.50E-04	1.00E-05	1.00E-05
Tanque almacenamiento agua fresca	3.00E-03	4.50E-03	2.50E-03
Gasificador	1.74E-06	1.74E-06	1.74E-06
Tratamiento aguas grises	1.50E-04	1.00E-05	1.00E-05
ICE	2.74E-10	1.40E-10	2.50E-11
Tratamiento gas natural	3.00E-05	4.50E-04	2.50E-05
Colector agua de lluvia	1.60E-04	1.00E-06	1.60E-06

**Índice de salubridad de la ruta de proceso**

El índice de salubridad de la ruta del proceso (PRHI) se utilizó para evaluar los riesgos a la salud de los habitantes del complejo residencial mediante de los diferentes procesos involucrados en la superestructura (calentador, sistema de algas, gasificación, ICE, tratamiento de aguas grises y negras, unidad de tratamiento de gas natural). El PRHI es un número adimensional, que indica el peligro potencial para la salud ocupacional de una ruta

de proceso, valores más altos de PRHI indican riesgos mayores. Supone que todos los materiales liberados en el aire son inhalados por los habitantes expuestos, independientemente de los efectos de distribución de la pluma. El desarrollo del PRHI tiene en cuenta todos los factores que pueden contribuir potencialmente a los riesgos para la salud. Los efectos de los productos químicos se evalúan utilizando los valores asignados, que indican su nivel inherente de peligrosidad para la salud (Hassim y Edwards, 2006) y los datos necesarios disponibles de OSHA para los efectos sobre la salud y el límite de exposición en el lugar de trabajo.

Por otra parte, *OH* nos indica la contribución de cada proceso, los cuales se determinan multiplicando el factor asociado por su flujo de entrada o por los gases de combustión necesarios en el caso del sistema de algas. De esta forma, se obtiene una medida indirecta del daño a la salud debido a la cantidad de sustancias presentes, que se modela de la siguiente manera:

$$OH = PR^{BOILER} \times F_t^{NG-boiler} + PR^{GW} \times F_t^{Inlet-GW} + PR^{WW} \times F_t^{WW} + PR^{NGT} \times F_t^{NGT-Inlet} + PR^{ICE} \times F_t^{NG-ICE} + PR^{ALGAE} \times G_t^{algae} + PR^{GASIFICATION} \times F_t^{NG-needed-gasification} \quad (115)$$

El PRHI se estima como el procedimiento desarrollado por Hassim y Edwards, que se basa en datos de NFPA y OSHA. El PRHI se calcula de la siguiente manera:

$$PRHI = ICPHI * MHI * HHI \frac{WEC_{max}}{OEL_{min}} \quad (116)$$

El PRHI se evalúa para cada ruta del proceso, con la intención de determinar qué proceso es el más peligroso, para poder clasificar todos los procesos peligrosos involucrados en la superestructura propuesta

### Índice de riesgo químico y de proceso inherente (ICPHI)

El índice de riesgo químico y de procesos inherentes (*ICPHI*, por sus siglas en inglés) involucra condiciones de proceso y actividades de trabajo que son potencialmente dañinas para la salud. Está conformado por la suma de penalidades por actividades u operaciones (*AP*) más las penalizaciones asociadas a las condiciones del proceso y las propiedades del material (*CP*):

$$ICPHI = AP + CP \quad (117)$$

En relación a la ecuación anterior, *ICPHI* describe las propiedades físicas de los materiales, las condiciones del proceso y el tipo de proceso que causa riesgo de exposición en el lugar de trabajo y se basa en la probabilidad de que las emisiones o las condiciones del proceso causen las liberaciones. A los efectos de la evaluación, para cada actividad y condiciones de proceso, hay penalizaciones asignadas, una penalización más alta indica un riesgo más alto que representa la actividad.

### **Índice de riesgo de salud (HHI)**

Los riesgos químicos tienen una amplia gama de peligros para la salud, como irritación, sensibilización, carcinogenicidad y riesgos físicos, como la inflamabilidad, la corrosión y la explosividad. Debido a esto, es importante evaluar su capacidad para causar enfermedades ocupacionales, que se expresa en el Índice de riesgo de salud (HHI). Para este propósito, la Administración de Salud Ocupacional (OSHA), el Código de Salud (HC) y los Efectos de Salud (HE) enumeran los principales efectos de la exposición a cada sustancia. Los códigos de salud se usan para determinar si una violación de un estándar de contaminación atmosférica es grave o no grave, según las pautas del Manual de operaciones de campo. Hassim y Edwards (2006) propusieron una matriz de clasificación para enfermedades ocupacionales en la que se enumeran los efectos sobre la salud con sus respectivos valores, los cuales varían de 1 a 20, donde 1 representa los efectos más graves para la salud y 20 los efectos menores. Con el fin de hacer constantes las penalizaciones de cada sistema para los cálculos de índice, se utiliza el valor de HHI = 21 (código HE). Además, para ser coherente con las otras sanciones, HHI se escala utilizando la siguiente relación:

$$Scaled\ penalty = \frac{21 - (HE\ code)}{20} \times 5 \quad (118)$$

Donde una penalización de 0 representa el efecto mínimo de salud y 5 representa el máximo.

### **Índice de daños materiales (MHI)**

El Índice de daños materiales se basa en los datos de NFPA, que evalúan los límites de exposición a los que los trabajadores están expuestos y los posibles daños y/o efectos que

podrían ocurrir en la salud. Asignando valores de 0 a 4, donde 4 representa el más peligroso. Este índice se evalúa para cada producto químico presente en el proceso.

### **Concentración de la exposición del trabajador (WEC)**

Es la concentración máxima permisible a la que está expuesto un trabajador. Se calcula por medio de posibles fugas y emisiones fugitivas que pueden ocurrir en el proceso, dividido por la tasa de ventilación que oscila entre 2 y 300 m<sup>3</sup>/h. En este caso, se necesitan 300 m<sup>3</sup>/h como el mejor escenario. Además, este valor se multiplica por la relación de horas de exposición de los trabajadores y el total de horas de trabajo. Es probable que el trabajador no inhale durante 8 horas continuas, por lo que se supone que el tiempo de exposición es de 6 horas (Hassim y Edwards, 2006). Este cálculo se realiza para cada flujo peligroso involucrado en cada proceso.

### **Límite de exposición ocupacional (OEL)**

Representa el límite mínimo de exposición permisible de acuerdo con OSHA. Este límite se usa para cada producto químico presente en las diferentes corrientes del proceso. Luego, se selecciona el límite mínimo porque es lo mínimo que un ser humano puede manejar.

### **Suposiciones de cada proceso considerado**

#### **Calentador**

El calentador tiene un flujo de alimentación de gas natural, que está compuesto por metano, etano, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, esta corriente se quemará para generar calor y producir una corriente de gases de combustión. Al respecto se considera una combustión completa, que produce CO<sub>2</sub> y agua, pero el agua no tiene ningún efecto dañino en la salud humana, por lo que se omite del análisis.

#### **Planta de tratamiento de aguas negras**

El agua negra generalmente está compuesta de proteínas, carbohidratos, aceites y grasas. Por estas razones, se supone que la corriente de aguas negras está compuesta de O<sub>2</sub> disuelto, amoníaco libre, nitritos, nitratos, fósforo total, cloruros, H<sub>2</sub>S y agua. Una vez que se trata la corriente, se produce una corriente de agua limpia que podría ir a disposición final y otra corriente de gases sin procesar que está compuesta de metano, agua, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S.

### **Planta de tratamiento de aguas grises**

Se considera que toda la composición no tiene nitrógeno y fósforo porque estos químicos están asociados a la materia fecal y la orina y por esta razón se omiten los químicos. Por lo tanto, la composición del flujo de salida está disuelta en O<sub>2</sub>, cloruros, H<sub>2</sub>S y agua. Además, la composición de la salida de gases es la misma que el agua negra tratada.

### **Unidad de tratamiento de gases**

Una vez que se obtienen las corrientes de gas de ambas unidades de tratamiento de aguas residuales, se mezclan. La corriente resultante pasa a través de una unidad de tratamiento de gas, donde el objetivo principal es separar el gas natural de la corriente de entrada. Además, el H<sub>2</sub>S que está presente en las aguas residuales puede recuperarse y representa uno de los químicos más peligrosos para la salud humana.

### **Motor de combustión interna**

Para evaluar el riesgo para la salud asociado con un motor de combustión interna, tomamos en cuenta el gas natural y los gases de combustión como las corrientes más dañinas. Los posibles efectos en la salud de los productos de la combustión incluyen irritación ocular y respiratoria, dolores de cabeza, fatiga y mareos

### **Sistema de algas**

En el sistema de algas, se consideran los biocombustibles, los gases de combustión y las corrientes de aguas grises, siendo los dos últimos los que tienen el mayor impacto en el PRHI. La corriente de aguas grises contiene H<sub>2</sub>S que causa una amplia gama de efectos sobre la salud. Los trabajadores están expuestos principalmente al H<sub>2</sub>S al respirarlo y su exposición a concentraciones muy altas puede conducir rápidamente a la muerte.

### **Proceso de gasificación**

Para el proceso de gasificación, se considera el flujo de residuos sólidos, que es la biomasa para el proceso y la corriente de gas natural, además se evaluaron los gases de combustión y gas de síntesis generados, siendo estos los que contienen componentes más nocivos para la salud, tales es el caso de HCN y H<sub>2</sub>S. El proceso de gasificación causa varios problemas, como polvo, ruido, olor y gases de escape, que a su vez pueden causar varios problemas de

salud para los humanos. El monóxido de carbono, el dióxido de carbono y el ácido sulfhídrico que se liberan durante el proceso de gasificación pueden causar problemas de salud como daño pulmonar y problemas relacionados con la piel y los ojos. Debido a esto, el proceso de gasificación debe llevarse a cabo bajo condiciones controladas que no permitan ninguna fuga durante todo el proceso.

### 2.3.18 Multi-Stakeholder

Debido a la cantidad de objetivos, no es posible encontrar una solución al problema a través de una curva de Pareto y puede haber una gran insatisfacción con uno de los objetivos. Por lo tanto, para la solución del problema, se utiliza una herramienta diferente (optimización de múltiples partes interesadas (*multi-stakeholder*)) para encontrar un equilibrio entre las funciones objetivo y dar una solución razonable al problema, que se modela matemáticamente de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 f_j = & w_j^{TAC} \left( \frac{TAC - TAC^{LB}}{TAC^{UB} - TAC^{LB}} \right) + w_j^{FFwTot} \left( \frac{FFwTot - FFwTot^{LB}}{FFwTot^{UB} - FFwTot^{LB}} \right) + \\
 & w_j^{GHGE} \left( \frac{GHGE - GHGE^{LB}}{GHGE^{UB} - GHGE^{LB}} \right) + w_j^{EnvImp} \left( \frac{EnvImp - EnvImp^{LB}}{EnvImp^{UB} - EnvImp^{LB}} \right) + \\
 & w_j^{SWSROIM} \left( \frac{SWSROIM - SWSROIM^{LB}}{SWSROIM^{UB} - SWSROIM^{LB}} \right) + w_j^{OH} \left( \frac{OH - OH^{LB}}{OH^{UB} - OH^{LB}} \right)
 \end{aligned} \tag{119}$$

donde  $w_j$  representa las prioridades para cada uno de los objetivos y el superíndice LB indica los valores objetivos obtenidos en el punto utopía que es el punto obtenido al resolver cada objetivo por separado y el superíndice UB indica los valores objetivos en el punto nadir que significa la peor solución para cada objetivo. La insatisfacción se calculó de la siguiente manera para cada objetivo y la insatisfacción total para los escenarios es el promedio para todos los objetivos

$$\begin{aligned}
 dis = & \left( \frac{100}{6} \right) \left( \frac{TAC - TAC^{LB}}{TAC^{UB}} \right) + \left( \frac{FFwTot - FFwTot^{LB}}{FFwTot^{UB}} \right) + \left( \frac{GHGE - GHGE^{LB}}{GHGE^{UB}} \right) + \\
 & \left( \frac{EnvImp - EnvImp^{LB}}{EnvImp^{UB}} \right) + \left( \frac{SWSROIM - SWSROIM^{LB}}{SWSROIM^{UB}} \right) + \left( \frac{OH - OH^{LB}}{OH^{UB}} \right)
 \end{aligned} \tag{120}$$

En base a lo anterior, la formulación del modelo de optimización se presenta como un problema multi-objetivo mixto-entero no lineal, cuyas funciones objetivas son la

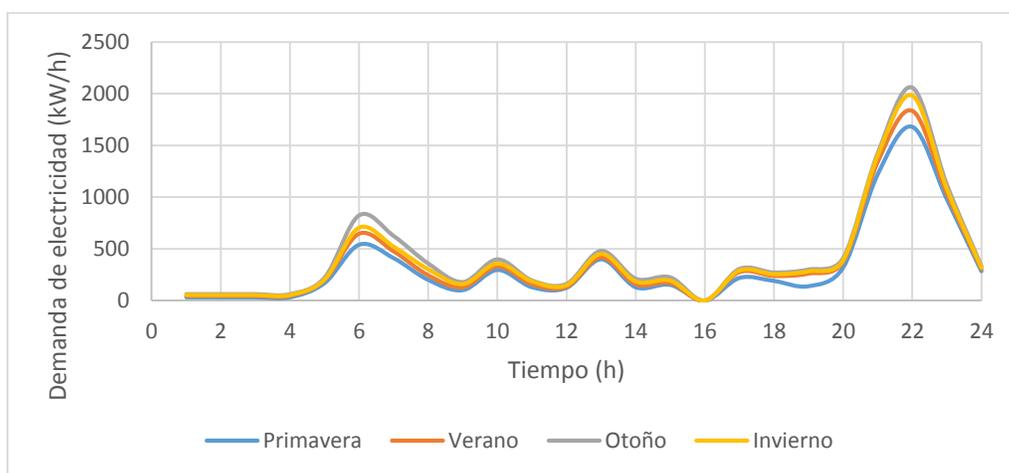
minimización del TAC, el consumo total de agua fresca, la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero, el impacto ambiental, la tasa de retorno sustentable, y el índice de salubridad de la ruta del proceso. Para resolver este problema, primero se obtiene la solución objetiva única para minimizar cada uno de los objetivos. Con base en estas soluciones extremas anteriores, se evalúa la solución compromiso a través de la herramienta de múltiples partes interesadas.

### 3. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para el modelo de optimización establecido, con el caso de estudio seleccionado y la estrategia de solución adecuada en base al problema de optimización.

#### 3.1 Caso de estudio

Como caso de estudio, se considera un complejo residencial ubicado en la región centro-oeste de México, que consta de 1,440 hogares. Este complejo residencial tiene un consumo total de 538,376 m<sup>3</sup>/año de agua fresca, 36,689.20 m<sup>3</sup>/año de agua caliente, 2,400 kWh/año de refrigeración y genera 864 toneladas de residuos sólidos por año que se tratan mediante un proceso de gasificación para producir gas natural. Para satisfacer tanto las demandas como los tratamientos de residuos necesarios; se propone implementar la formulación de optimización para el diseño de un complejo residencial integrado. El perfil de demanda de electricidad se muestra en la **Figura 5**, que podría obtenerse de la red federal de electricidad y del sistema de cogeneración.



**Figura 5.** Perfil de demanda de electricidad del complejo residencial considerado

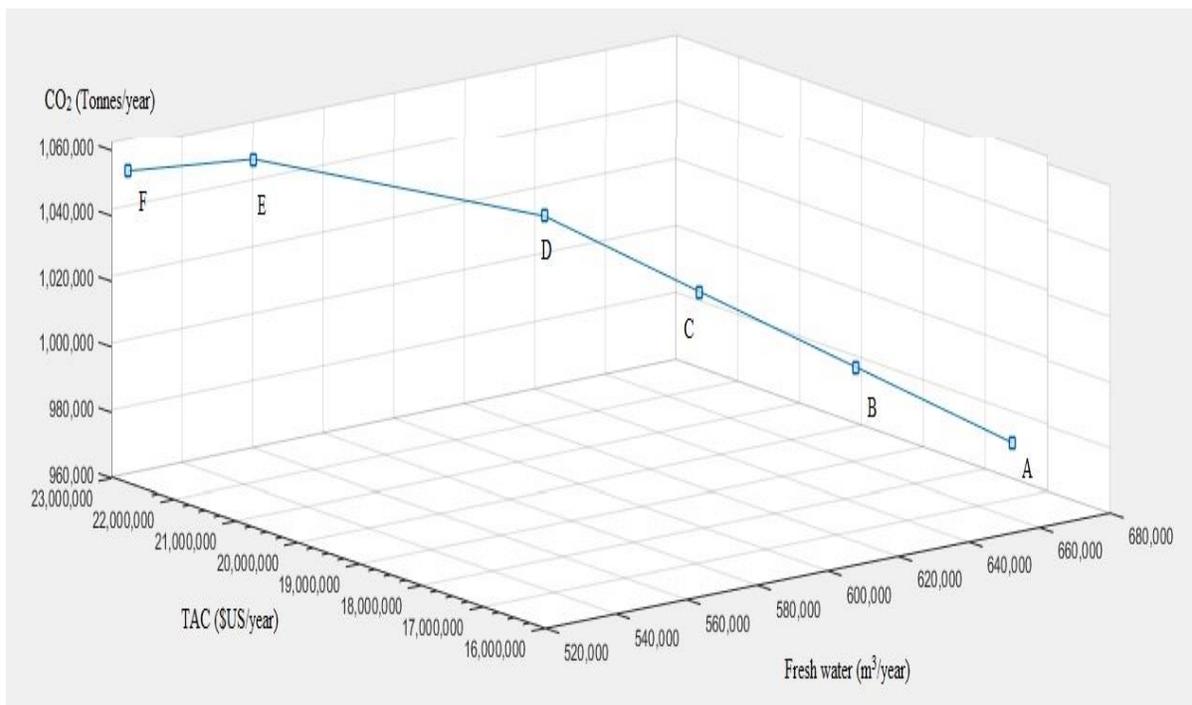
#### 3.2 Análisis del caso de estudio

Como se mencionó anteriormente, el modelo propuesto fue codificado en forma indexada en la plataforma GAMS (Brooke y col., 2017) para su aplicación a casos de estudios particulares. En relación al caso de estudio aquí abordado el problema de optimización resultante consta de 1,098 variables continuas, 10 variables binarias y 3,570 restricciones. Y

para su ejecución computacional se empleó el solucionador Baron y se requirió entre 15 y 18 minutos para su solución. Esto utilizando una computadora con procesador Intel Core i7 a 2.4 GHz y 8 GB de RAM. En cuanto a los factores de peso para las funciones objetivo para cada uno de los escenarios en relación a la parte de múltiples partes interesadas fueron generados aleatoriamente en el *software* MatLab.

Específicamente, en primera instancia se resolvió el problema considerando solamente tres de las funciones objetivos (minimizar el costo total anual, el consumo de agua fresca y las emisiones de gases de efecto invernadero). Para resolver el problema de optimización multi-objetivo, se implementó el método de *epsilon constraint* y la curva de Pareto obtenida se muestra en la **Figura 6**. Aquí debe observarse que las soluciones debajo de esta curva son infactibles, mientras que las soluciones arriba de esta curva son sub-óptimas. Los Escenarios A y F corresponden a las soluciones extremas óptimas para el sistema; sin embargo, existen varias soluciones que equilibran estas soluciones extremas (Escenarios B, C, D y E). El TAC para estos escenarios es de US \$ 17,629 x10<sup>6</sup>/año, US \$ 18,553x10<sup>6</sup>/año, US \$ 19,469x10<sup>6</sup>/año y US \$ 22,546x10<sup>6</sup>/año, respectivamente (ver **Tabla 3**), mientras que el agua fresca total es 637,051 m<sup>3</sup>/año, 608,781 m<sup>3</sup>/año, 580,511 m<sup>3</sup>/año y 552,241 m<sup>3</sup>/año para los Escenarios B, C, D y E, respectivamente. Comparando el Escenario B respecto a los Escenarios A y F, el agua fresca total consumida tiene una reducción de 4.25% y un incremento de 21.58%, respectivamente; el TAC para el Escenario B aumenta 5.38% respecto al Escenario A y disminuye 32.08% con respecto al Escenario F. Comparando el Escenario C con respecto a los Escenarios A y F, el TAC tiene un incremento de 10.90% y una reducción de 28.52% respectivamente. Noté que el consumo total de agua fresca disminuye 8.50% respecto al Escenario A y aumenta 16.18% respecto al Escenario F. El agua fresca total consumida en el Escenario D tiene una disminución de 12.74% y un incremento de 10.79% con respecto a los Escenarios A y F, respectivamente; en cuanto al TAC para el Escenario D tiene un aumento de 16.38% respecto al Escenario A y una reducción de 25.00% respecto al Escenario F. Comparando el Escenario E con respecto a los Escenarios A y F, el agua fresca total consumida tiene una reducción de 17.00% y un incremento de 5.39%, respectivamente; en tanto que, el TAC para el Escenario E aumenta un 34.77% con respecto al Escenario A y disminuye un 13.14% con respecto al Escenario F.

Aunado a lo anterior, la **Tabla 4** presenta las emisiones de CO<sub>2</sub> enviadas al medio ambiente desde el motor de combustión interna y la caldera, así como por el proceso de gasificación para cada uno de los escenarios analizados. Debe notarse que las emisiones de CO<sub>2</sub> y el agua fresca disminuyen simultáneamente cuando aumenta el TAC.



**Figura 6.** Curva de Pareto para caso de estudio

Finalmente, para las soluciones de Pareto obtenidas, la Solución D (**Figura 7**) se puede identificar como una solución atractiva porque equilibra adecuadamente los objetivos de TAC y consumo de agua fresca. En esta solución, se utiliza el motor de combustión interna (ICE) para calentar agua y producir electricidad, en comparación con el Escenario A donde no se seleccionan. En el Escenario D, el ICE trata térmicamente 230,198 m<sup>3</sup> de agua/año y produce 180,523 kWh/año de electricidad que se utilizan en las unidades de tratamiento de aguas grises y aguas negras, se recuperan 148,672 m<sup>3</sup> de agua/año en los jardines. La caldera calienta 70,312 m<sup>3</sup> de agua/año. Para este Escenario D, los costos de operación y de capital son de US \$ 19,489 x10<sup>6</sup> y US \$ 17,000 por año, respectivamente.

Posteriormente se incluyeron los objetivos de la cuantificación del impacto ambiental, la tasa de retorno sustentable y el daño a la salud ocupacional. Los parámetros usados para calcular el impacto ambiental y el daño a la salud humana se muestran en las **Tablas 1, 2 y 5**.

**Tabla 3.** Resultados para diferentes escenarios analizados de la curva de Pareto

	Mínimo TAC Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D	Escenario E	Mínima Agua Escenario F
<b>Agua fresca consumida (m<sup>3</sup>)</b>	<b>665,320</b>	<b>637,050</b>	<b>608,781</b>	<b>580,511</b>	<b>552,241</b>	<b>523,971</b>
Agua tratada (m <sup>3</sup> /year)	146,884	148,672	148,672	148,672	148,672	148,672
Agua caliente por la caldera (m <sup>3</sup> /year)	385,320	280,317	175,315	70,312	60,909	60,909
Agua caliente por el ICE (m <sup>3</sup> /year)	0.00	76,732	153,465	230,197	240,814	240,814
Electricidad por el ICE (kWh/year)	0.00	60,174	120,348	180,523	188,849	188,849
Refrigeración(kWh/year)	216,041	192,011	167,982	143,952	140,328	140,328
Costo agua fresca (\$US/año)	665	637	608	580	552	523
Costo gas natural (\$US/año)	12,096	12,096	12,096	12,096	12,096	12,096
Costo electricidad (\$US/año)	14,597	14,689	9,444	4,199	3,471	3,471
Costo refrigeración (\$US/año)	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
<b>Costo de operación (\$US/año)</b>	<b>27,359</b>	<b>27,423</b>	<b>22,149</b>	<b>16,876</b>	<b>16,119</b>	<b>16,091</b>
Colector agua de lluvia (\$US/año)	0	0	0	0	2,996,986	6,475,100
Tanque agua fresca (\$US/año)	9,861,198	9,446,573	9,031,948	8,617,323	8,496,848	8,429,612
Caldera (\$US/año)	2,288,750	1,676,236	1,063,722	451,208	358,817	358,817
ICE (\$US/año)	0	2,005,914	4,011,729	6,017,544	6,320,100	6,320,100
ARC (\$US/año)	540,252	480,179	420,105	360,032	350,970	350,970
Alga (\$US/año)	0	0	0	0	0	0
Trat. Agua gris (\$US/año)	1,065,907	1,065,907	1,065,907	1,065,907	1,065,907	1,065,907
Trat. Agua negra (\$US/año)	457,388	457,388	457,388	457,388	457,388	457,388
Trat. Gas natural (\$US/año)	0	0	0	0	0	0
Gasificador (\$US/año)	2,520,150	2,520,150	2,520,150	2,520,150	2,520,150	2,520,150
<b>Costo de capital (\$US/año)</b>	<b>16,733,647</b>	<b>17,652,349</b>	<b>18,570,952</b>	<b>19,489,554</b>	<b>22,567,168</b>	<b>25,978,046</b>
Agua fresca (\$US/año)	0	0	0	0	0	0
Agua caliente (\$US/año)	1,920	1,920	1,920	1,920	1,920	1,920
Electricidad (\$US/año)	0	10,800	10,800	10,800	10,800	10,800
Refrigeración (\$US/año)	17,187	15,264	13,342	11,420	11,130	11,130
Gas natural (\$US/año)	13,145	13,252	13,252	13,252	13,252	13,252
<b>Ventas Totales (\$US/año)</b>	<b>32,253</b>	<b>41,237</b>	<b>39,315</b>	<b>37,393</b>	<b>37,103</b>	<b>37,103</b>
<b>TAC (\$US/año)</b>	<b>16,728,753</b>	<b>17,638,534</b>	<b>18,553,786</b>	<b>19,469,037</b>	<b>22,546,131</b>	<b>25,957,035</b>

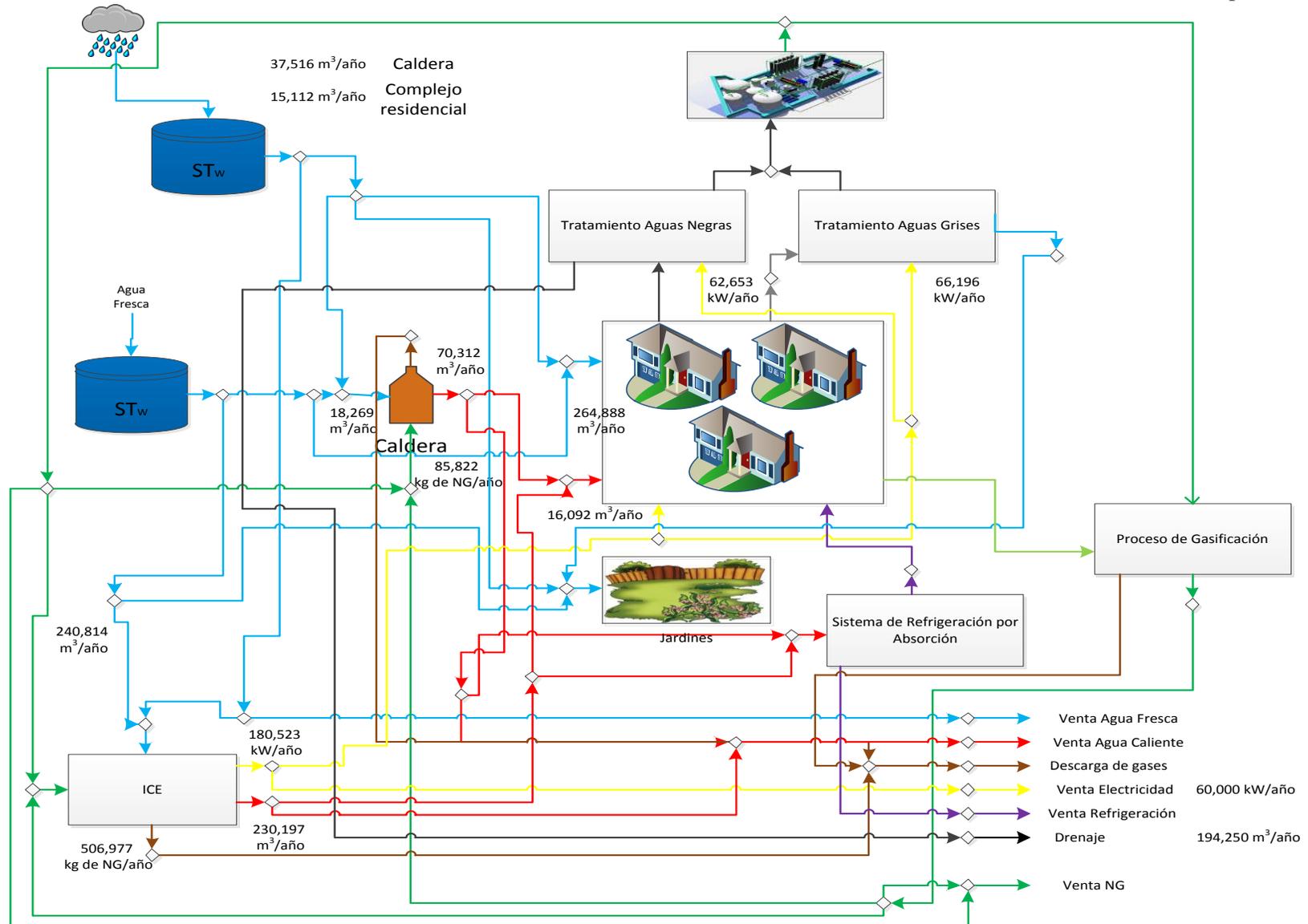


Figura 7. Esquema que representa la solución para el escenario D.

**Tabla 4.** Emisiones de CO<sub>2</sub> descargadas al medio ambiente.

Proceso/Unidad	Emisiones de CO <sub>2</sub> (Toneladas/año)					
	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D	Escenario E	Escenario F
ICE	0.00	113.08	226.16	339.24	354.88	354.88
Caldera	331.76	241.07	150.77	60.47	47.97	47.97
Gasificación	648.00	648.00	648.00	648.00	648.00	648.00
<b>TOTAL</b>	<b>979.76</b>	<b>1,002.15</b>	<b>1,024.93</b>	<b>1,047.71</b>	<b>1,050.85</b>	<b>1,050.85</b>

Después de incluirse el resto de las funciones objetivo es imposible analizar y comparar los diferentes escenarios mediante una curva de Pareto, por lo cual se utilizó la técnica de analizar las diferentes prioridades mediante el *multi-stakeholder*. Los valores obtenidos utilizando la metodología propuesta, así como los puntos de utopía y nadir, y la solución de compromiso se muestran en la **Tabla 6**. La insatisfacción de cada una de las funciones objetivo así como la disatisfacción total para todos los escenarios se muestran en la **Tabla 7**.

**Tabla 5.** Parámetros usados para calcular el daño a la salud humana

Parámetros	Valor
$PR^{Boiler}$	0.000003
$PR^{GW}$	0.429362
$PR^{WW}$	1.000000
$PR^{NGT}$	0.015741
$PR^{ICE}$	0.000031
$PR^{Algae}$	0.028992
$PR^{Gasification}$	0.015467

Tres de los escenarios fueron seleccionados para el análisis, los escenarios que tienen la insatisfacción más baja, la más alta y la insatisfacción intermedia, respectivamente. Los valores para las funciones objetivo de estos escenarios se enumeran en la **Tabla 8**.

Podemos observar en el escenario con la menor disatisfacción (**Figura 8**), ya que el TAC se encuentra alejado de ser su mejor solución en solo 0.06%; esto se debe a que no todas las unidades, como el sistema de producción de algas, el ICE y la planta de tratamiento de gases, se seleccionan para su instalación en este caso. De manera similar, se puede observar que las emisiones de dióxido de carbono están muy cerca de su valor mínimo, con solo una

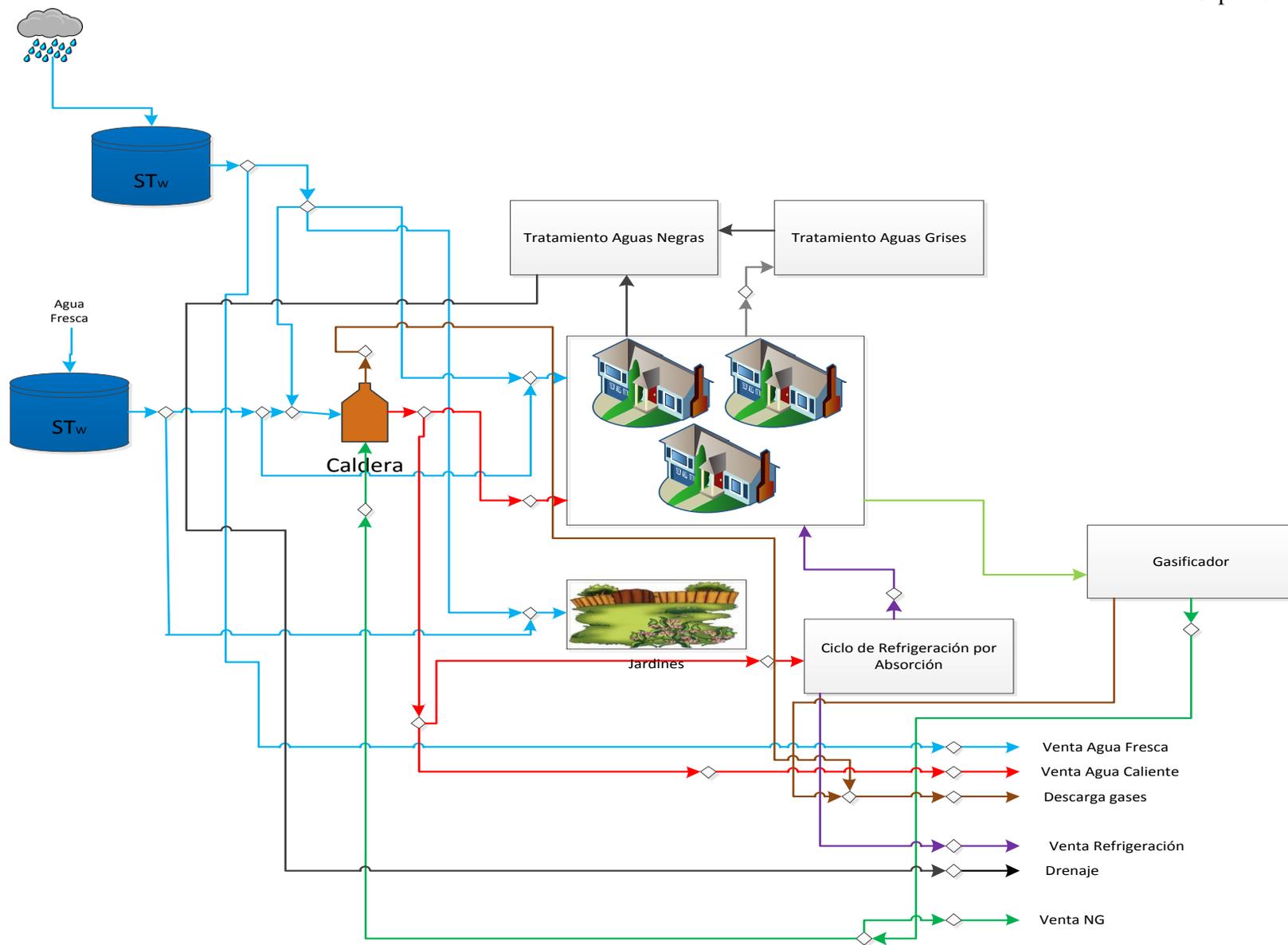
insatisfacción del 0.52%. Para la tasa de retorno sustentable, la solución está muy cerca del peor escenario porque la diferencia entre el costo total anual para la instalación y operación del complejo residencial y la compra de recursos en sí es muy grande. Lo anterior en comparación con la diferencia entre el impacto en el medio ambiente causado por la compra de recursos frescos y el daño causado por las unidades de procesamiento. Para el caso de los objetivos del consumo de agua fresca y el impacto ambiental se tienen insatisfacciones de 21.25% y 17.56%, respectivamente. Asimismo, los resultados muestran que la función del daño a la salud humana para este escenario está en su punto utópico, esto es porque en este escenario solo las unidades que necesariamente están obligadas a satisfacer las necesidades de tratamiento fueron previamente establecidas para los residuos producidos por el complejo residencial, como los residuos sólidos y el tratamiento de aguas grises y negras.

Para el escenario de mayor insatisfacción (**Figura 9**), se puede ver que la única función que está en su punto utópico es la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente. Por otro lado, observamos como el TAC tiene un 83.27% de insatisfacción, que es el mayor porcentaje observado para esta función objetivo en todos los escenarios propuestos. Del mismo modo, se observa que el consumo de agua fresca, el impacto en el medio ambiente y la tasa de retorno sustentable tienen insatisfacciones de 14.48%, 19.05% y 98.97%, respectivamente. El valor obtenido por el daño a la salud humana para este escenario es muy cercano al punto utópico ya que presenta solo 0,67% de insatisfacción, lo que se debe a la selección para instalar el sistema de producción de algas, a diferencia del escenario con menor insatisfacción, lo que provoca un ligero aumento en el flujo de entrada a la unidad de tratamiento de aguas grises.

En el escenario de insatisfacción intermedia (**Figura 10**), la variable binaria para la instalación del ICE se activa para satisfacer las demandas de agua caliente y electricidad en el complejo residencial. En este escenario, el consumo de agua fresca se encuentra en su punto utópico y dos funciones más están prácticamente en él, teniendo solo un 0.01% de insatisfacción por parte del impacto ambiental y un 0.007% por el daño a la salud humana. Mientras que el TAC tiene un 55.35% de insatisfacción y la tasa de retorno sustentable tiene un 99.56% de insatisfacción, la función objetivo de la reducción de las emisiones de dióxido de carbono presenta una insatisfacción del 7.28%, resultando la más alta obtenida de todos los escenarios propuestos.

**Tabla 6.** Diferentes prioridades, soluciones individuales y soluciones compromiso

Caso	Pesos ( $w_j$ )						Objetivos						
	TAC (\$US/año)	FFwTot (m <sup>3</sup> /año)	GHGE (ton CO <sub>2</sub> /año)	EnvImp	SWSROIM	OH	$f_j$	TAC (\$US/año)	FFwTot (m <sup>3</sup> /año)	GHGE (ton CO <sub>2</sub> /año)	EnvImp	SWSROIM	OH
Utopia								16,728,760	523,971	974	58,252	0.000	191,205
Nadir								100,000,000	722,244	1,159	3,246,632	0.002	192,520
1	1	0	0	0	0	0	0.00000	16,728,860	665,906	980	74,377	0.002	191,205
2	0	1	0	0	0	0	0.00000	69,313,010	523,971	1,051	63,936	0.001	191,220
3	0	0	1	0	0	0	0.00035	62,856,050	685,455	974	76,408	0.001	192,505
4	0	0	0	1	0	0	0.00000	19,625,890	577,557	1,052	58,252	0.002	191,220
5	0	0	0	0	1	0	0.17246	100,000,000	583,670	1,040	61,541	0.000	192,518
6	0	0	0	0	0	1	0.00000	62,835,230	681,413	979	74,851	0.001	191,205
7	1	1	1	1	1	1	2.22654	31,896,860	612,692	974	71,960	0.001	192,505
8	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5000	0.00000	16,728,790	665,321	979	74,356	0.002	191,205
9	0.3330	0.0000	0.0000	0.3330	0.0000	0.3330	0.00133	16,738,400	665,321	979	70,658	0.002	191,205
10	0.3156	0.0693	0.1350	0.3087	0.1556	0.0157	0.19947	32,145,970	612,984	974	72,003	0.001	192,505
11	0.3128	0.1559	0.3602	0.0431	0.0335	0.0945	0.21646	23,112,830	612,692	974	75,769	0.002	192,505
12	0.2823	0.3428	0.1275	0.1875	0.0592	0.0007	0.22596	23,122,610	612,692	974	71,960	0.002	192,505
13	0.2500	0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500	0.17699	37,462,410	523,971	1,051	58,256	0.001	191,220
14	0.2201	0.0770	0.3573	0.0217	0.1882	0.1356	0.32086	34,177,310	612,692	974	71,960	0.001	192,505
15	0.0000	0.3330	0.3330	0.0000	0.3330	0.0000	0.21280	100,000,000	612,692	974	71,960	3.86E-04	192,505
16	0.0000	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.0000	0.18216	69,377,500	612,692	974	71,960	5.56E-04	192,505
17	0.0000	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5000	0.00553	69,307,620	523,971	1,051	63,853	5.14E+02	191,220



**Figura 8.** Escenario para la menor insatisfacción

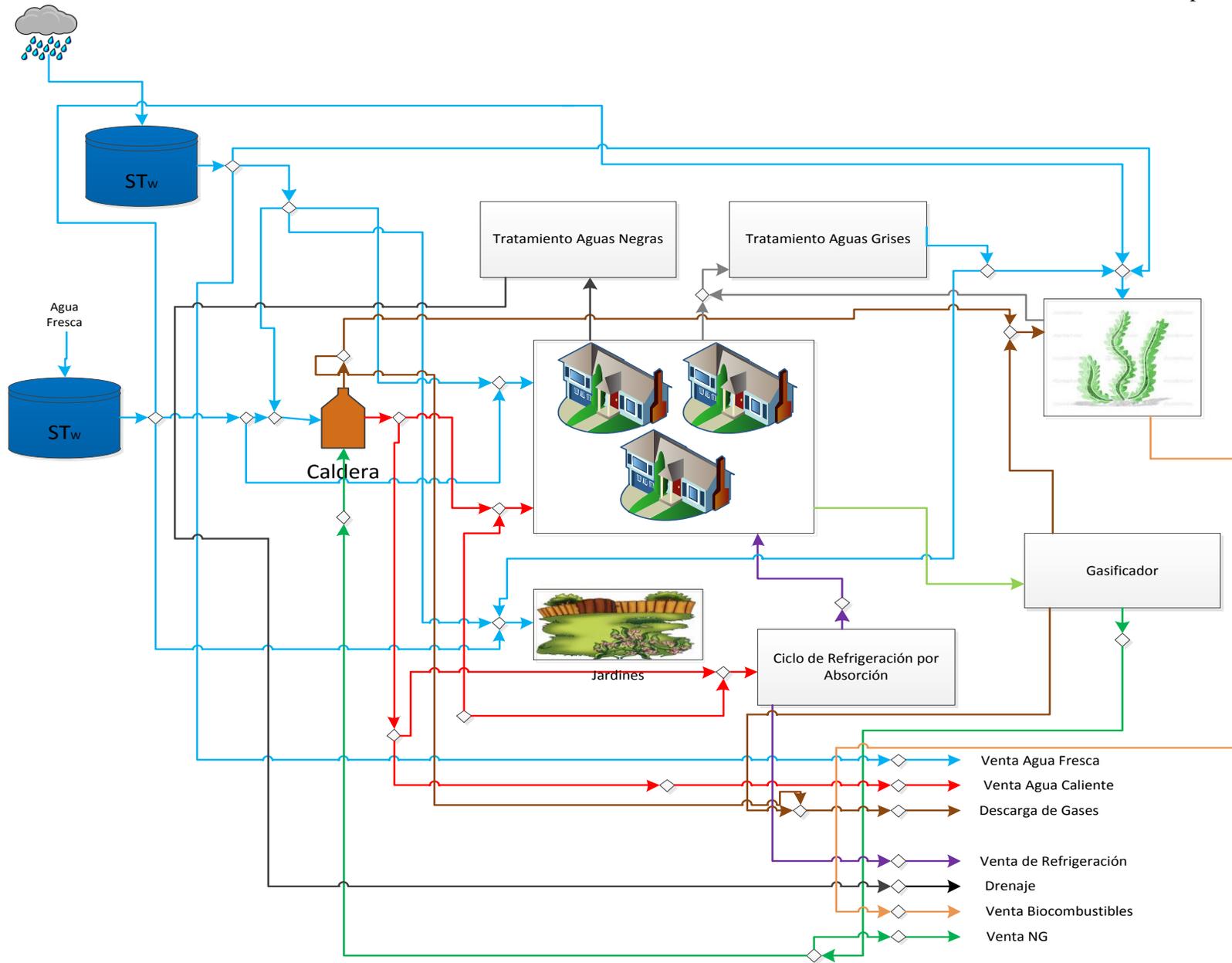
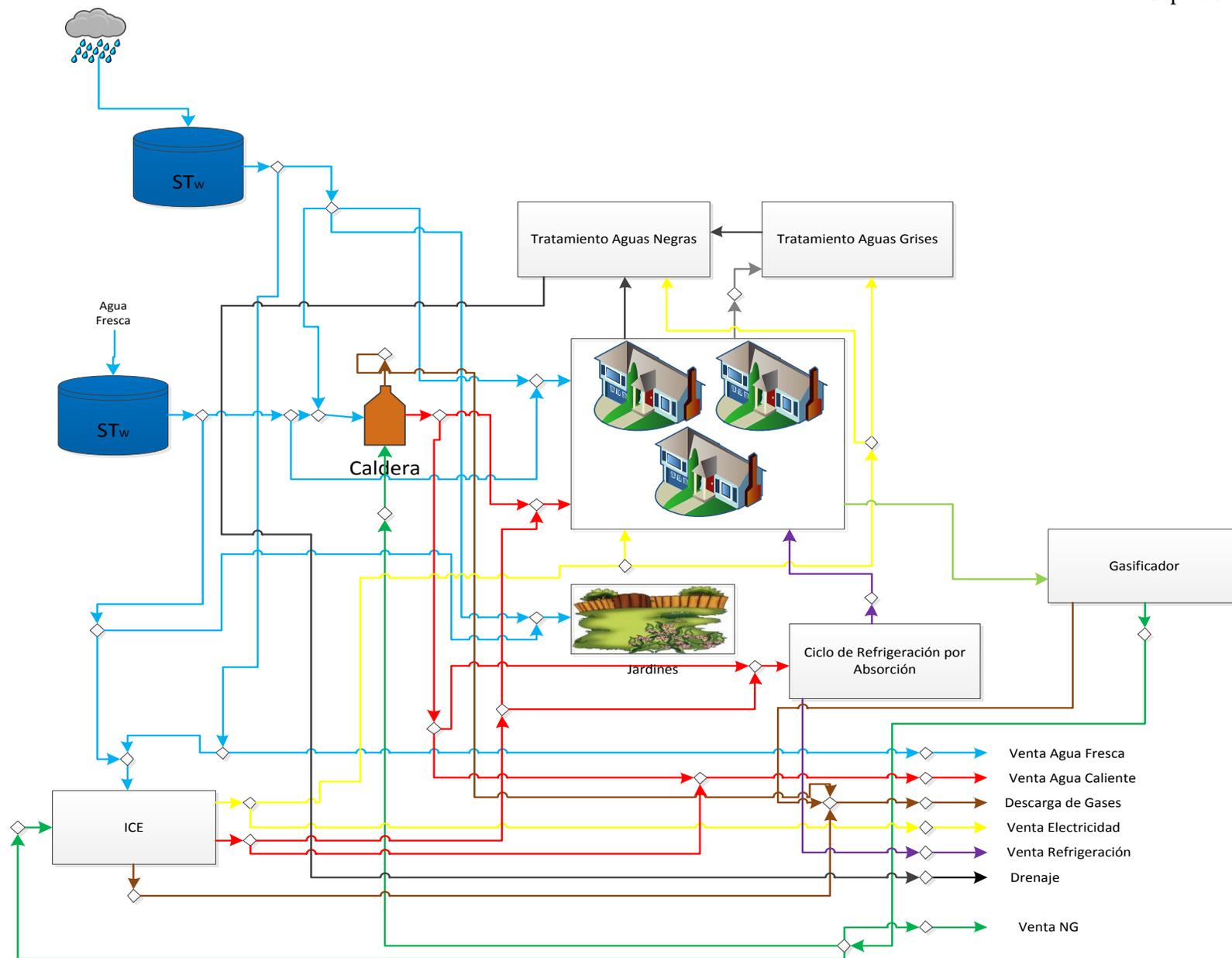


Figura 9. Escenario para la mayor insatisfacción



**Figura 10.** Escenario para la insatisfacción intermedia.

**Tabla 7.** Insatisfacción total e insatisfacciones individuales para los escenarios

Escenarios	Disatisfacción (%)						
	TAC	FFwTot	GHGE	EnvImp	SWSROIM	OH	TOTAL
1	0.00	21.31	0.57	21.68	99.80	0.000002	23.89
2	75.86	0.00	7.28	8.89	99.23	0.007609	31.88
3	73.39	23.56	0.00	23.76	99.38	0.674991	36.79
4	14.76	9.28	7.41	0.00	99.80	0.007643	21.88
5	83.27	10.23	6.33	5.34	98.86	0.681900	34.12
6	73.38	23.11	0.52	22.18	99.37	0.000000	36.42
7	47.55	14.48	0.00	19.05	99.60	0.674991	30.23
8	0.00	21.25	0.52	21.66	99.80	0.000000	23.87
9	0.06	21.25	0.52	17.56	99.80	0.000000	23.20
10	47.96	14.52	0.00	19.10	99.60	0.674991	30.31
11	27.62	14.48	0.00	23.12	99.80	0.674991	27.62
12	27.65	14.48	0.00	19.05	99.80	0.674991	26.94
13	55.35	0.00	7.28	0.01	99.56	0.007609	27.03
14	51.05	14.48	0.00	19.05	99.60	0.674991	30.81
15	83.27	14.48	0.00	19.05	98.97	0.674991	36.07
16	75.89	14.48	0.00	19.05	99.28	0.674991	34.90
17	75.86	0.00	7.28	8.77	100.00	0.007609	31.99

**Tabla 8.** Soluciones individuales de funciones objetivos para escenarios analizados

	Menor Disatisfacción	Disatisfacción Intermedia	Mayor Disatisfacción
TAC (\$US/año)	16,738,400	37,462,410	100,000,000
FFwTotal (m <sup>3</sup> /año)	665,321	523,971	612,692
Gdischarge (Ton/año)	979	1,051	974
EnvImp	70,658	58,256	71,960
SWSROIM	0.002000	0.001000	0.000386
OH	191,205	191,220	192,505

Un punto muy importante a considerar en este problema es el daño causado a la salud humana a través del ruido, el olor y las emisiones generadas por las unidades de proceso instaladas para satisfacer las necesidades del complejo residencial. Sin embargo, el impacto causado a la salud humana es muy similar en cada uno de los escenarios estudiados, esto se debe a que los residuos sólidos y líquidos generados por los hogares son constantes y las plantas de

tratamiento de aguas residuales grises y negras como el sistema de gasificación tienen un impacto muy grande en comparación con las otras unidades del proceso. Por lo tanto, para reducir este impacto, se consideró enviar estas aguas residuales a un tratamiento externo, no obstante que esto representa un aumento en el costo anual total. Como se mencionó anteriormente, se evaluó PRHI para cada proceso y los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 9**.

**Tabla 9.** Resumen de resultados para PRHI

Proceso	AP	CP	ICPHI= AP+CP	HHI	MHI	WEC <sub>max</sub>	OEL <sub>min</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	PRHI	PRHI <sub>scaled</sub>
Caldera	5	4	9	30.9	3	0.08421	0.00900	7,806.47	0.000002
Tratamiento Agua Grises	8	5	13	47.0	7	3.27323	0.00001	1,249,968,196.00	0.429361
Tratamiento Aguas Negras	8	5	13	100.8	20	2.55800	2.30E-05	2,911,224,133.00	1.000000
Tratamiento Gases	7	2	9	55.8	7	0.14599	0.00001	45,824,701.30	0.015740
Gasificador	10	4	14	114.4	18	3.09868	0.001983	45,028,5340	0.015467
Sistema de Algas	7	3	10	39.5	3	0.09288	1.30E-06	84,401,039.50	0.028991
ICE	8	3	11	31.9	11	0.18983	0.00800	91,521.20	0.000031

Un mayor PRHI significa mayor riesgo para la salud de los habitantes. El PRHI escalado se obtiene mediante la proporción de PRHI de cada proceso con el más alto PRHI, en este caso, aguas negras. Este índice no tiene ningún significado físico, este índice solo muestra qué proceso es el más peligroso para la salud según las suposiciones mencionadas anteriormente. Se puede observar que el índice alto corresponde al tratamiento aguas negras, la razón principal es porque el H<sub>2</sub>S está presente en ese proceso. Por otro lado, la caldera fue el proceso con menos PHRI, esto se puede atribuir a que contiene menos corrientes que pueden ser perjudiciales para la salud en caso de fuga que otros procesos.

La **Tabla 10** muestra las penalizaciones por actividades u operaciones, aquí es importante evaluar el modo de operación del proceso porque contribuirá a la exposición en el lugar de trabajo y dependiendo de su modo de operación este requiere trabajos de mantenimiento que podrían exponer los peligros químicos en el lugar de trabajo. Por otro lado, la **Tabla 11** muestra las penalizaciones por las condiciones del proceso y las propiedades del material.

Por ejemplo, es importante determinar la fase del material porque afecta la forma en que se expondrá un químico, así como su presión y temperatura de operación, porque existe la posibilidad de causar accidentes graves, como quemaduras y posibles emisiones fugitivas.

**Tabla 10.** Resumen de penalizaciones por actividades u operaciones

Actividad	Operación	Penalización
Transporte	Tubería	1
	Bolsa	2
	Tambor	3
	Vibración	4
Modo de Proceso	Continuo	1
	Semi-continuo	2
	Batch	3
Ventilación o <i>Flareing</i>	Efluente de venteo	1
	Por encima del nivel de plataforma	2
	Nivel de plataforma ocupada	3
Trabajos de Mantenimiento	No	0
	Si	1
Otros	Agitación	1
	Otros	1
	Manejo sólido	2
	Reducción de talla	2
	Extrusión	3
	Mezcla de aire abierta	3
Nivel de Ruido (dB)	Ruido típico (0-40 dB)	0
	Molesto, irritante, esmascamiento del habla (40-70 dB)	1
	Peligroso (70-100 dB)	2
	Altamente peligroso (100-140 dB)	3

Particularmente, una de las contribuciones a esta metodología fue evaluar el ruido en cada proceso, la exposición repetida a peligros de ruido puede conducir a *tinnitus* permanente o pérdida de audición, y también los peligros de ruido pueden crear estrés físico y psicológico, reducir la productividad, interferir con la comunicación y la concentración y contribuir a los

accidentes y lesiones en el lugar de trabajo al dificultar escuchar señales de advertencia. Existen diferentes niveles de riesgo de ruido de acuerdo con los decibelios emitidos (Instituciones de Seguridad y Salud Ocupacional), basados en estas penalizaciones por riesgo de ruido se expresan en la **Tabla 11**. El Índice de Daño de Material se basa en los datos de NFPA, que se muestran en la **Tabla 12**.

**Tabla 11.** Resumen de penalizaciones para condiciones de proceso y propiedades de material

Condiciones	Rango	Penalización
Temperatura(°C)	Bajo	0
	Alto (>92°C)	1
Presión	Bajo	0
	Alto (>68 atm)	1
Viscosidad (cp)	Bajo (0-1 cp)	1
	Medio (0-10 cp)	2
	Alto (10-100 cp)	3
Habilidad para precipitar	No	0
	Sí	1
Diferencia de densidad (sg)	Bajo (0-1 sg)	1
	Medio (0-1.5 sg)	2
	Alto (0-2.5 sg)	3
Habilidad para causar corrosión	No	0
	Sí	1
Cambios de volumen (%)	Bajo (>25%)	1
	Medio (25-32%)	2
	Alto (33-50%)	3
Solubilidad	Sí (50%)	0
	Gas	1
Estado del material	Gas	0
	Líquido	1
	Estiercol	2
	Granulo	3
	Polvo	4

**Tabla 12.** Criterios de calidad de salud NFPA

Criterios	Rating
Materiales que, con una exposición muy limitada, pueden causar la muerte o una lesión residual importante aun cuando se administre un tratamiento médico oportuno, que es demasiado peligroso para ser abordado sin un equipo de protección especializado. Este grado debe incluir:	4
Materiales que pueden penetrar la ropa protectora de goma ordinaria;	
Materiales que bajo condiciones normales o en condiciones de incendio emiten gases que son extremadamente peligrosos (es decir, tóxicos o corrosivos) por inhalación o por contacto o absorción a través de la piel.	
Materiales que con la exposición a corto plazo podrían causar lesiones temporales o residuales graves incluso si se brinda un tratamiento médico oportuno, incluidos aquellos que requieren protección contra todo contacto corporal. Este grado debe incluir:	3
Material que emite productos de combustión altamente tóxicos;	
Materiales corrosivos para el tejido vivo o tóxicos por la absorción de la piel.	
Materiales que una exposición intensa o continua pueden causar incapacidad temporal o posible lesión residual a menos que se administre un tratamiento médico oportuno, incluso aquellos que requieren el uso de equipo de protección respiratoria con suministro de aire independiente. Este grado debe incluir:	2
Materiales que emiten productos de combustión tóxicos; o materiales que producen productos de combustión altamente irritantes;	
Materiales, que en condiciones normales o en condiciones de incendio emiten vapores tóxicos que carecen de propiedades de advertencia.	
Materiales que al exponerse causarían irritación pero solo daños residuales menores incluso si no se brinda tratamiento, incluso aquellos que requieren el uso de un tipo aprobado de máscara de gas. Este grado debe incluir:	1
Materiales, que en condiciones de incendio producirían productos de combustión irritantes;	
Materiales que en la piel podrían causar irritación sin destruir el tejido	
Materiales que bajo exposición en condiciones de incendio no ofrecerían ningún peligro más allá del material combustible ordinario	0

## 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una formulación de optimización para el diseño de complejos residenciales integrados donde se toma en cuenta cumplir la satisfacción de las necesidades de agua y energía, así como la eliminación adecuada de aguas residuales, desechos sólidos y emisiones. El enfoque propuesto considera funciones objetivo económicas y ambientales, así como la aceptabilidad, que se considera a través de la minimización del daño a la salud humana de los habitantes del complejo habitacional. Se presenta una metodología de múltiples partes interesadas a fin de balancear los diferentes objetivos y cuantificar el nivel de insatisfacción para las diferentes soluciones compromiso obtenidas. Se consideró un caso de estudio para un complejo residencial en México. Los resultados muestran que es posible obtener soluciones atractivas. Particularmente, cuando la tasa de retorno sustentable es incorporada a través de un enfoque de múltiples partes interesadas, se obtienen soluciones con baja disatisfacción para todas las partes involucradas. Debe notarse que en las soluciones con baja disatisfacción generalmente los objetivos económicos y de salud humana están cerca de sus mejores soluciones, esto porque no todas las unidades como el sistema de producción de algas, el ICE y la planta de tratamiento de gas son seleccionadas para ser incluidas y esto reduce los costos y los riesgos causados a la salud ocupacional de los habitantes del complejo residencial.

## 5. REFERENCIAS

- Ahmetovic E., Ibric N, Kravanja Z., y Grossmann I. E., 2015**, “Water and energy integration: A comprehensive literature review of non-isothermal water network synthesis”. *Computers and Chemical Engineering* 82: 144-171.
- Bamufleh H. S., Ponce-Ortega J. M., y El-Halwagi M. M., 2013**, “Multi-objective optimization of process cogeneration systems with economic, environmental, and social tradeoffs”. *Clean Technologies and Environmental Policy* 15(1): 185-197.
- Belotti P., Kirches C., Leyffer S., Linderoth J., Luedtke J., y Mahajan A., 2013**, “Mixed-integer nonlinear optimization”. *Acta Numerica*, 22, 1-131.
- Brooke A., Kendrick D., Meeraus A., Raman R., 2017**, “GAMS, A user’s guide”. GAMS Development Corporation, Washington.
- Bussieck M. R., y Pruessner A., 2003**, “Mixed-integer nonlinear programming”. *SIAG/OPT Newsletter: Views & News*, 14(1), 19-22.
- Castillo E., Conejo A. J., Pedregal P., García R., y Alguacil, N., 2002**, “Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia”.
- El-Halwagi M. M., 2017**, “Sustainable design through process integration: Fundamentals and applications to industrial pollution prevention, resource conservation, and profitability enhancement”. Second Edition, Elsevier, New York, USA.
- El-Halwagi, M. M., 2006**, “Process Integration: New York: Academic Pres”.
- Erdem H. H., Akkaya A. V., Dagdas A., Sevilgen S. H., Cetin B., Sahin B., y Basak M. Z., 2015**, “Renovating thermal power plant to trigeneration system for district heating/cooling: Evaluation of performance variation”. *Applied Thermal Engineering* 86: 35-42.
- Fuentes-Cortés L. F., Martínez-Gómez J., y Ponce-Ortega J. M., 2015a**, “Optimal design of inherently safer domestic combined heat and power systems”. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 4(1): 188-201.

- Fuentes-Cortés L. F., Ponce-Ortega J. M., Nápoles-Rivera F., Serna-González M., y El-Halwagi M. M., 2015b**, “Optimal design of integrated CHP systems for housing complexes”. *Energy Conversion and Management* 99: 252-263.
- Fuentes-Cortés L. F., Santibañez-Aguilar J. E., y Ponce-Ortega J. M., 2016**, “Optimal design of residential cogeneration systems under uncertainty”. *Computers and Chemical Engineering* 88: 86-102.
- Fuentes-Cortés L. F., Serna-González M., y Ponce-Ortega J. M., 2017**, “Analysis of carbon policies in the optimal design of domestic cogeneration systems involving biogas consumption”. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 5(5): 4429-4442.
- Garcia D. J., y You F., 2016**, “The water-energy-food nexus and process systems engineering: A new focus”. *Computers and Chemical Engineering* 91: 49-67.
- Garcia-Montoya M., Bocanegra-Martínez A., Nápoles-Rivera F., Serna-Gonzalez M., Ponce-Ortega J. M., y El-Halwagi M. M., 2015**, “Simultaneous design of water reusing and rainwater harvesting systems in a residential complex”. *Computers and Chemical Engineering* 76: 104-116.
- Garcia-Montoya M., Sengupta D., Nápoles-Rivera F., Ponce-Ortega J. M., y El-Halwagi M. M., 2016**, “Environmental and economic analysis for the optimal reuse of water in a residential complex”. *Journal of Cleaner Production* 130: 82-91.
- González-Bravo R., Nápoles-Rivera F., Ponce-Ortega J. M., y El-Halwagi M. M., 2016**, “Multi-objective optimization of dual purpose power plants and water distribution networks”. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 4(12): 6852-6866.
- Hassim, M. H., y Edwards, D. W., 2006**, “Development of a methodology for assessing inherent occupational health hazards”. *Process Saf. Environ. Prot.*, 84(5), 378-390.
- López-Díaz, D. C., Lira-Barragán L. F., Rubio-Castro E., Ponce-Ortega J. M., y El-Halwagi M. M., 2015**, “Synthesis of eco-industrial parks interacting with a

surrounding watershed”. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 3(7): 1564-1578.

**Lowe, E. A., 1997**, “Creating by-product resource exchanges: Strategies for eco-industrial parks”. *Journal of Cleaner Production*, 5 (1-2), 57-65.

**Martínez, J., Domínguez, O., y Finetti, J. E., 2010**, “Diseño de redes de intercambio de energía, su enseñanza en diseño de procesos en ingeniería química”.

**Morales-Durán V., Fuentes-Cortés L. F., González-Brambila M., El-Halwagi M. M., y 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.

**Murugan S., y Horak B., 2016**, “Tri and polygeneration systems-A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60: 1032-1051.

**Nápoles-Rivera F., Ponce-Ortega J. M., El-Halwagi M. M., y Jiménez-Gutiérrez A., 2010**, “Global optimization of mass and property integration networks with in-plant property interceptors”. *Chemical Engineering Science* 65(15): 4363-4377.

**Nápoles-Rivera F., Rojas-Torres M. G., Ponce-Ortega J. M., Serna-González M., y El-Halwagi M. M., 2015**, “Optimal design of macroscopic water networks under parametric uncertainty”. *Journal of Cleaner Production* 88: 172-184.

**OSHA, 2017**, “Occupational safety and health administration”, <http://www.OSHA.gov>. (Accessed October 2017).

**Piacentino A., Gallea R., Catrini P., Cardona F., y Panno D., 2016**, “On the reliability of optimization results for Trigeneration systems in buildings, in the presence of price uncertainties and erroneous load estimation”. *Energies* 9(12): 1049.

**Ramos M. A., Boix M., Aussel D., Montastruc L., y Domenech S., 2016**, “Water integration in eco-industrial parks using a multi-leader-follower approach”. *Computers and Chemical Engineering* 87: 190-207.

**Rubio-Castro E., Ponce-Ortega J. M., Cervantes-Gaxiola M. E., Hernández-Calderón O. M., Ortiz-del-Castillo J. R., Milán-Carrillo J., y Meza-Contreras J. A.,**

2016, “Optimal design of integrated agricultural water networks”. *Computers and Chemical Engineering* 84: 63-82.

**Rubio-Castro E., Ponce-Ortega J. M., Nápoles-Rivera F., El-Halwagi M. M., Serna-González M., y Jiménez-Gutiérrez A., 2010**, “Water integration of eco-industrial parks using a global optimization approach”. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49 (20) 9945-9960.

**Rubio-Castro E., Ponce-Ortega J. M., Serna-González M., Jiménez-Gutiérrez A., y El-Halwagi M. M., 2011**, “A global optimal formulation for the water integration in eco-industrial parks considering multiple pollutants”. *Computers and Chemical Engineering*, 35 (8): 1558-1574.

**Saif Y., y Almansoori A., 2017**, “An optimization framework for the climate, land, energy, and water (CLEWS) nexus by a discrete optimization model”. *Energy Procedia* 105: 3232-3238.

**Sánchez-Bautista A.F, Santibañez-Aguilar J. E., Ponce-Ortega J. M., Nápoles-Rivera F., Serna-González M., y El-Halwagi M. M., 2015**, “Optimal design of domestic water-heating solar systems”. *Clean Technologies and Environmental Policy* 17(3): 637-656.

**Sonar D., Soni S. L., y Sharma D., 2014**, “Micro-trigeneration for energy sustainability: technologies, tools and trends”. *Applied Thermal Engineering* 71(2): 790-796.

**Tabrizi T. B., Hill G., y Aitchison M., 2017**, “The impact of different insulation options on the life cycle energy demands of a hypothetical residential building”. *Procedia Engineering* 180: 128-135.

**Villicaña-García E., y Ponce-Ortega J. M., 2017**, “An optimization approach for the sustainable water management at macroscopic level accounting for the surrounding watershed”. *Clean Technologies and Environmental Policy* 19(3): 823-844.

**Yao E., Wang H., Wang L., Xi G., y Maréchal F., 2016**, “Thermo-economic optimization of a combined cooling, heating and power system based on small-scale

compressed air energy storage”. *Energy Conversion and Management* 118: 377-386.

**Yu H., Eason J., Biegler L. T., y Feng X., 2017**, “Process integration and superstructure optimization of organic Rankine cycles (ORCs) with heat exchanger network synthesis”. *Computers and Chemical Engineering*. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2017.05.013.