



UNIVERSIDAD  
**AUTÓNOMA**  
DEL **CARIBE**

# **ANALISIS TERMOECONÓMICO DE UN CICLO GOSWAMI OPERANDO EN DIFERENTES TEMPERATURAS AMBIENTALES**

**JOSÉ JOSÉ BARRANCO RIQUETT**

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
BARRANQUILLA  
2023**



UNIVERSIDAD  
**AUTÓNOMA**  
**DEL CARIBE**

**ANÁLISIS TERMOCÓNOMICO DE UN CICLO GOSWAMI OPERANDO EN  
DIFERENTES TEMPERATURAS AMBIENTALES**

**JOSÉ JOSÉ BARRANCO RIQUETT**

Trabajo de grado como requisito parcial para optar por el título de:  
**Magister en ingeniería Mecánica**

Director  
MSc. Gustavo Adolfo Guzmán Reyes

**Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Mecánica  
Barranquilla, Colombia  
2023**



Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Firma Coordinador de Opción de Grado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado



## Agradecimientos

Doy las gracias al asesor Ing. Gustavo Guzmán por su invaluable apoyo en este proceso. A mi madre Martha, hermanos Jose F. y Mariamartha, a mi hijo Elias, a mi compañera Jovanna, primos y amigos por ser fuente de inspiración y por estar ahí en los momentos más importantes.

Y aunque algunos de mis seres queridos ya no están físicamente conmigo, agradezco a la memoria de Jose Joaquín, Yesid y Alfredo por el impacto positivo que tuvieron en mi vida y por dejarme con recuerdos que siempre atesoraré.

## Resumen

Se realiza evaluación termoeconómico del ciclo Goswami con la intención de estimar el costo termoeconómico de la generación en diferentes escenarios (Máxima eficiencia, producción de potencia, frío o cogeneración) para una planta. La evaluación se realiza con múltiples temperaturas ambientales (4 [°C], 9 [°C], 15 [°C], 21 [°C], 32 [°C]), para simular la ubicación de la planta en diferentes regiones climáticas. Se programa algoritmo genético para la creación al azar de vectores con propiedades iniciales, luego se optimiza según criterio multiobjetivo de Pareto. A continuación, se realiza el estudio termoeconómico. En configuración técnica donde el producto objetivo sea la generación de potencia, los resultados son los siguientes, a temperatura ambiental de 4[°C], genera 260,5 [kJ/kg], a 9[°C] 44,5 [kJ/kg], a 15[°C] 142,11 [kJ/kg] y 32[°C] 32,21[kJ/kg] con un costo termoeconómico de 134,70 [\$Kg/T], 2.215,78[\$Kg/T], 68,36[\$Kg/T] y 3.439,26[\$Kg/T], respectivamente.

**Palabras clave:** Termoeconomía, optimización, temperatura, ciclo Goswami.



## Abstract

A thermoeconomic evaluation of the Goswami cycle is performed in order to estimate the thermoeconomic cost of power generation under different scenarios (maximum efficiency, power production, cooling or cogeneration) of a plant. The evaluation is conducted at multiple ambient temperatures (4 [°C], 9 [°C], 15 [°C], 21 [°C], 32 [°C]) to simulate the plant's location in different climatic regions. A genetic algorithm programmed randomly generate vectors with initial properties, which are the optimized according to the Pareto multi-objective criterion. Subsequently, the thermoeconomic study conducted. In a technical configuration where power generation is the target product, the results are as follows, at an ambient temperature of 4[°C], it generates 260,5 [kJ/kg], at 9[°C] 44,5 [kJ/kg], at 15[°C] 142,11 [kJ/kg] and at 32[°C] 32,21[kJ/kg] , with a thermoeconomic cost of 134,70 [\$Kg/TJ], 2.215,78[\$Kg/TJ], 68,36[\$Kg/TJ] and 3.439,26[\$Kg/TJ], respectively.

**Keyword:** thermoeconomics, optimization, temperature, Goswami cycle.



## Contenido

Agradecimientos .....	IV
Resumen.....	V
Abstract.....	III
Contenido.....	III
Lista de símbolos .....	VII
Lista de Gráficas .....	IX
Lista de Tablas.....	XI
1. Introducción .....	13
1.1. Formulación del problema .....	14
1.2. Hipótesis de investigación: .....	15
1.3. Justificación .....	16
1.4. Marco de referencia .....	17
1.4.1. Calor de bajo grado.....	17
1.4.2. Mezcla zeotrópica. ....	17
1.4.3. Estado de referencia. ....	17
1.4.4. Exergía.....	17
1.4.5. Exergía Física. ....	17
1.4.6. Exergía Química.....	18
1.4.7. Eficiencia exergética .....	18
1.4.8. Ciclo Goswami .....	18
1.4.9. Optimización.....	20



1.4.10.	Criterio Multiobjetivo de decisión.....	20
1.4.11.	Optimización de Pareto.....	20
1.4.12.	Clasificación climática Caldas-Lang.....	21
1.4.13.	Presión atmosférica .....	25
1.5.	Antecedentes .....	26
2.	Objetivos.....	29
2.1.	Objetivo general.....	29
2.2.	Objetivos específicos .....	29
4.	Metodología .....	30
4.1.	Programación del ciclo Goswami.....	30
4.2.	Estrategias de optimización multiobjetivo .....	31
4.2.	Estudio Termoeconómico .....	31
4.3.	Análisis termodinámico .....	32
4.4.	Análisis termoeconómico .....	34
4.4.1.	Matriz de incidencia.....	35
4.4.2.	Termoeconomía .....	36
4.4.3.	Preposiciones de costo exergetico.....	37
4.4.4.	Costo de inversión para la bomba [29][50].....	38
4.4.5.	Costo de inversión para el intercambiador de calor [29][50].....	38
4.4.6.	Costo de inversión para la caldera.....	40
4.4.7.	costo de inversión para el rectificador 1.....	40
4.4.8.	Costo de inversión para el rectificador 2.....	41





4.4.9.	Costo de inversión para Cámara de mezclado.....	42
4.4.10.	Costo de inversión para Turbina [52] .....	42
4.4.11.	Costo de inversión del Evaporador (Intercambiador de calor) .	42
4.4.12.	Costo de inversión para Válvula de expansión .....	43
4.4.13.	Costo de inversión absorbedor .....	43
4.4.14.	Costo Exergético.....	44
4.4.15.	Costo Termoeconómico .....	47
4.5.	Potencia y frio .....	49
5.	Resultados y análisis .....	50
5.1.	Ciclo Goswami .....	50
5.1.1.	Balance de masa.....	50
5.1.2.	Balance de energía .....	52
5.1.3.	Propiedades termodinámicas de la mezcla zeotrópica .....	53
5.1.4.	Temperatura de estudio .....	55
5.1.5.	Desarrollo de la simulación del ciclo .....	55
5.1.6.	Comprobación del ciclo .....	56
5.1.7.	Comportamiento del ciclo.....	57
5.1.8.	Análisis: Máximos puntos de producción de las variables de estudio. ....	64
5.2.	Criterio de optimización. ....	67
5.2.1.	Puntos de generación .....	69
5.2.2.	Estrategia de optimización. ....	69
5.3	Costos.....	74



---

5.3.1	Costo exergético.....	74
5.3.2	Costo termoeconómico.....	81
6.	Conclusiones y recomendaciones .....	87
6.1.	Conclusiones .....	87
6.2.	Escenarios de funcionamiento (Discusión).....	87
6.3.	Recomendaciones .....	91
	Referencias.....	92
	Anexos.....	98
6.4.	Anexo 1. Tablas costo exergético y termoeconómico.....	98

## Lista de símbolos

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
$E$	Exergía	kJ/kg
$\dot{m}$	Flujo masico	kg/s
$h$	Entalpia	kJ/kg
$T$	Temperatura	°C – K
$S$	Entropía	kJ/kg
$X$	Calidad	
$M$	Concentración Molar	gr/mol
$e$	Exergía química estándar	kJ/mol
$P$	Presión	Pa
$W$	Potencia	kJ/kg
$\dot{W}$	Potencia	kW
$Q$	Frio	kJ/kg
$\dot{Q}$	Frio	kW
$\eta_{St}$	Eficiencia isentrópica	–
$\eta_{th}$	Eficiencia térmica	–
$rp$	Relación de presión	–
$\dot{C}$	Tasa de Costo	\$/h
$c$	Costo por unidad de exergía	\$/GJ
$Z$	Costo de inversión por componente	\$
$\dot{Z}$	Tasa de costo de inversión por componente	\$/h
SI	Simulación	–
F	Flujo	–

### Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
$\varphi$	Factor de mantenimiento	–
$\alpha$	Matriz recurso	



### Subíndices

Símbolo	Término
<i>o</i>	Equilibrio termodinámico
<i>E</i>	Evaporador
<i>n</i>	Neto
<i>b</i>	Caldera
<i>max</i>	Máximo
<i>gen</i>	Generado
<i>CM</i>	Cámara de mezclado
<i>A</i>	Absorbedor

### Superíndices

Símbolo	Término
*	Costo exerético

### Abreviaturas

Símbolo	Término
<i>CRF</i>	Factor de recuperación de capital
<i>SI</i>	Simulación
<i>k</i>	K-ésimo componente



## Lista de Gráficas

Gráfica 1. Frontera de Pareto. Adaptada de [33]. .....	20
Gráfica 2. Clasificación Caldas-Lang Colombia [38]. .....	23
Gráfica 3 Clasificación climática Caldas-Lang [39]. .....	24
Gráfica 4 Regresión lineal de los datos de estación climática del IDEAM. [41]. .....	25
Gráfica 5. Temperatura de evaporación y condensación Amoniaco – Agua... 56	
Gráfica 6. Presión de evaporación y condensación Amoniaco – Agua..... 57	
Gráfica 7. Eficiencia exergética Vs concentración. .... 59	
Gráfica 8. Eficiencia exergética Vs Temperatura ambiente. .... 60	
Gráfica 9. Frio Vs concentración..... 61	
Gráfica 10. Frio Vs Temperatura Ambiente..... 61	
Gráfica 11. Potencia Vs Concentración. .... 62	
Gráfica 12. Potencia Vs Temperatura Ambiente..... 63	
Gráfica 13. Eficiencia exergética Vs Concentración. .... 63	
Gráfica 14. Eficiencia térmica Vs Temperatura ambiente. .... 64	
Gráfica 15 Potencia - Frio Vs Concentración. .... 65	
Gráfica 16 Eficiencia – concentración..... 66	
Gráfica 17. Generación de frio a diferente temperatura ambiente ..... 70	
Gráfica 18. Eficiencia exergética a diferente temperatura ambiente..... 71	
Gráfica 19. Eficiencia térmica a diferente temperatura ambiente..... 72	
Gráfica 20. Generación de potencia a diferente temperatura ambiente..... 72	



Gráfica 21. Potencia-Frio-Vs--eficiencia exergética diferentes temperaturas ambientales.....	73
Gráfica 22. Potencia-Frio Vs--eficiencia térmica diferentes temperaturas ambientales.....	74
Gráfica 23. Costo exergético [ $TJ/Kg$ ] temperatura ambiente $4^{\circ}C$ .....	78
Gráfica 24. Costo exergético [ $TJ/Kg$ ] temperatura ambiente $9^{\circ}C$ .....	79
Gráfica 25. Costo exergético [ $TJ/Kg$ ] temperatura ambiente de $15^{\circ}C$ .....	79
Gráfica 26. Costo exergético [ $TJ/Kg$ ] temperatura ambiente $32^{\circ}C$ .....	80
Gráfica 27. Costo termoeconómico [ $\$Kg/TJ$ ] temperatura ambiente $4^{\circ}C$ .....	81
Gráfica 28. Costo Termoeconómico [ $\$Kg/TJ$ ] temperatura ambiente de $9^{\circ}C$ .	82
Gráfica 29. Costo termoeconómico [ $\$Kg/TJ$ ] temperatura ambiente $15^{\circ}C$ .....	82
Gráfica 30. Costo termoeconómico [ $\$Kg/TJ$ ] temperatura ambiente $32^{\circ}C$ .....	83
Gráfica 31. Costo termoeconómico [ $\$Kg/TJ$ ] potencia-Frio.....	84
Gráfica 32. Potencia - frio [ $KJ/Kg$ ]. .....	85
Gráfica 33. Eficiencia exergética y térmica [%].....	86
Gráfica 34 Porcentaje del costo de producción de potencia. ....	89



## Lista de Tablas

Tabla 1. Pisos térmicos, Clasificación climática de Caldas. Adaptado de [37]. .....	21
Tabla 2. Climas, Clasificación climática de Lang [34]. .....	21
Tabla 3. Climas clasificación climática de Caldas-Lang [37]......	22
Tabla 4. Temperaturas ambientales usadas en la investigación.....	24
Tabla 5. Presión atmosférica estaciones del IDEAM [41]. .....	25
Tabla 6. Presión Atmosférica Clasificación Caldas-Lang.....	26
Tabla 7. Ecuación de energía, recurso y producto para cada componente. ...	33
Tabla 8. Balance de costo para cada componente del sistema. ....	34
Tabla 9. Costos de referencia para componentes [50]......	39
Tabla 10. Coeficiente global de transferencia de calor [51]. .....	40
Tabla 11. Vector extendido $Y_e$ .....	46
Tabla 12. Costo exergético de los flujos. ....	47
Tabla 13. Vector análisis externo.....	48
Tabla 14. Vector de costo. ....	49
Tabla 15. Propiedades de la mezcla amoniaco agua [56]......	54
Tabla 16. Climas y temperaturas seleccionadas para el estudio. ....	55
Tabla 17. Condiciones de funcionamiento iniciales. ....	57
Tabla 18. Ecuaciones adicionales.....	75
Tabla 19. Matriz extendida.....	76
Tabla 20, Vector extendido. ....	77
Tabla 21. Números de simulaciones por temperatura ambiente.....	87



Tabla 22. Escenario de Máxima producción de potencia a diferentes temperaturas ambientales.....	88
Tabla 23. Escenario Máxima producción de frio a diferentes a temperaturas ambientales.....	88
Tabla 24. Escenario Máxima eficiencia exergética a diferentes temperaturas ambientales.....	89
Tabla 25. Escenario Máxima eficiencia térmica a diferentes temperaturas ambientales.....	89
Tabla 26 Costo exergético temperatura ambiente 4°C. (TJ/Kg).....	98
Tabla 27. Costo exergético temperatura ambiente 9°C. (TJ/Kg).....	99
Tabla 28. Costo exergético temperatura ambiente 15°C. (TJ/Kg).....	100
Tabla 29 Costo exergético temperatura ambiente 32°C. (TJ/Kg).....	101
Tabla 30 Costo termoeconómico temperatura ambiente 4°C. (\$Kg/TJ).....	102
Tabla 31 Costo termoeconómico temperatura ambiente 9°C. (\$Kg/TJ).....	103
Tabla 32. Costo termoeconómico temperatura ambiente 15°C. (\$Kg/TJ).....	104
Tabla 33 Costo termoeconómico temperatura ambiente 32°C. ....	105



## 1. Introducción

El cambio climático, el acceso a la energía como mecanismo para mejorar la calidad de vida y el desarrollo económico son los mayores retos de nuestra era. Aunque la eficiencia energética y las energías renovables han mejorado, todavía no son suficiente para satisfacer la demanda energética actual. Por lo tanto, es necesario incluir otros enfoques, como la captura de carbono y la gestión de emisiones de metano, para reducir la huella ambiental del sector energético. Bajo este enfoque, mantener los combustibles fósiles como parte del sistema energético podría ser parte de la solución [1]. En la actualidad, el sector eléctrico mundial busca alternativas de generación en las energías renovables que sean económicamente atractivas y amigables con el ambiente. A pesar de ello, aún no se está logrando la transferencia y el desarrollo tecnológico necesario para cumplir con las metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero establecidas en el acuerdo climático de París [2].

El desarrollo de nuevos ciclos termodinámicos como el Ciclo Rankine Orgánico (CRO) [3] y el ciclo Kalina [4] han generado interés tecnológico y económico debido a que son tecnologías eficientes para la recuperación de calor residual. El ciclo Goswami es un ciclo combinado novedoso que utiliza fuentes de calor de baja y media temperatura para la generación de potencia y frío [5][6], este ciclo funciona con una mezcla zeotrópica de Amoniac - Agua, que ofrece ventajas competitivas en eficiencia y volatibilidad, en comparación con otras mezclas. Estudios teóricos han mostrado que el ciclo Goswami alcanza eficiencia de primera ley entre 40% y 58,5% y de segunda ley entre 26,9%, y 33,7%, lo que despierta interés económico [7][8].

En esta investigación, se realiza un análisis termodinámico y termoeconómico del ciclo Goswami, operando a diferentes temperaturas ambientales, se usó el software matemático MatLab para programar propiedades termodinámicas de la mezcla amoniac agua ( $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ), y para calcular el modelo termodinámico, el algoritmo genético, aplicar la estrategia de optimización multiobjetivo de Pareto y la evaluación termoeconómica [9]. Los resultados obtenidos muestran que a temperatura ambiente de 4 [°C] y 9 [°C] la generación máxima de potencia es de 260,5 [kJ/kg] y 44,5 [kJ/kg], respectivamente, coincidiendo con el funcionamiento a la máxima eficiencia térmica y exergética en ambas temperaturas. A temperatura ambiente de



15 [°C] la producción de potencia alcanza 142,11 [kJ/kg] coincidiendo con la máxima eficiencia térmica. A la temperatura ambiente de 32 [°C] la producción de potencia alcanza los 32,21[kJ/kg].

### **1.1. Formulación del problema**

Según proyecciones se estima que en los próximos 2 años, la demanda diaria de energía eléctrica oscile entre 191 a 232 [GWh – dia], lo que representaría un aumento del 3,1% frente a 2.021. A mediano plazo, la tasa de crecimiento promedio anual se estima sea entre el 2,22% [10]. Para el año 2.021, se consumieron los siguientes tipos de energía; un 46% correspondiente a petróleo y sus derivados, un 17% a electricidad, un 16% a gas natural, un 7% a carbón y un 14% a biomasa y leña [11]. En cuanto a la producción de energía eléctrica, la generación por hidroeléctrica representa cerca del 70%, mientras que un 29% proviene de la quema del carbón [12].

Las estimaciones prevén que Colombia consumirá su reserva de hidrocarburo en 8 años [13], lo que obligaría a la importación de estos recursos energéticos y al aumento de las tarifas de energías [14]. Entre el 2.015 y el 2.016, Colombia experimento una crisis energética debido a la incidencia del fenómeno del niño, que disminuyó el nivel de los embalses de las principales hidroeléctricas [15] y por el daño en las generadoras Guatapé y Termoflores, provoco un inminente razonamiento energético [16].

A nivel mundial, el 81% de energía usada proviene de fuente fósiles y un 19% de fuentes renovables [17]. A pesar de que la energía eléctrica generada a partir de la geotérmica, solar, y eólica en la actualidad alcanza costos competitivos [18], el desarrollo de nuevos ciclos termodinámicos como el de Kalina, que alcanza entre el 1,35% y un 1,5% de mayor eficiencia que un ciclo Rankine a las mismas condiciones de trabajo [19], permite generar energía a partir de fuentes de energía de baja temperatura y resultar económicamente atractivo. La generadora eléctrica de la ciudad de Husavik al norte de Islandia, que produce 2 [MW] a partir de una fuente geotérmica a 124 [°C], es un ejemplo de ello [20].

El desarrollo de proyectos de hidrogenación implica la inmensa área terrestre que se inunda, lo que ocasiona enormes efectos negativos al medio ambiente,



desplazamiento de comunidades y costos económicos elevados. En las termogeneradoras, el uso de combustibles fósiles y la liberación de gases efecto invernadero a la atmosfera contribuyen al calentamiento global [21]. Además, las grandes pérdidas de energía debido al transporte causan una carga económica al servicio de energía eléctrica [17].

Ciclos como Kalina y Goswami necesitan de una fuente de energía relativamente a baja temperaturas, comúnmente se usa fuentes geotérmicas, aceites calientes y calderas de biomasa [21]. Aunque son escasos los recursos geotérmicos en la costa norte de Colombia [22] y en el país son pocos los pozos geotérmicos en producción. La disponibilidad de radiación solar en Colombia ofrece una oportunidad para la generación de energía renovable.

De la necesidad de establecer condiciones operacionales adecuadas para el buen uso de los recursos energéticos y de proponer diferentes escenarios de generación de potencia y frío que sean económicamente viable [23], dan origen a las siguientes interrogantes:

¿Pueden las nuevas tecnologías de ciclos termodinámicos como el de Goswami ser fuente de energía renovable con criterio de eficiencia en la generación de potencia fría y reducción del impacto ambiental?

¿Cuál es el costo exergético y termoeconómico de los diferentes escenarios de producción del ciclo Goswami?

## **1.2. Hipótesis de investigación:**

El ciclo termodinámico Goswami puede ser una fuente de energía renovable efectiva para la generación de potencia y frío en diferentes regiones geográficas de Colombia.

### 1.3. Justificación

La disminución de los costos de generación de energía a partir de fuentes no convencionales las ha convertido en alternativas competitivas y económicamente atractivas [2], En el año 2.017, la capacidad mundial de energía aumento un 4%, alcanzando 472 [GWh] gracias a los colectores solares. El uso de este sistema de generación ha aumentado a nivel mundial un 21%, a partir de la entrada de 110 proyectos. Las fuentes no convencionales de energía renovable tienen una participación del 10,4%, a nivel mundial [2].

La energía solar es una alternativa emergente para reducir el costo de producción de electricidad [23]. El desarrollo tecnológico alcanzado con innovadores ciclos de potencia y refrigeración, usando mezcla zeotrópica [7], permite alcanzar hasta un 50% de ahorro en capital, lo que las hace competitivas con plantas de producción convencionales [5]. China, la Unión Europea y los Estados Unidos representan cerca del 75%, de la inversión en energías renovables [2].

En promedio, Colombia recibe  $4,5 \left[ \frac{KWh}{m^2} \right]$  de radiación solar, con el departamento de La Guajira destacándose por recibir en promedio  $6 \left[ \frac{KWh}{m^2} \right]$ , lo cual es mayor que el promedio mundial de  $4,0 \left[ \frac{KWh}{m^2} \right]$ . Esta fuente de energía renovable podría ser utilizada para obtener la energía térmica necesaria para la operación de ciclos como Kalina y Goswami. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la radiación solar no es constante y varía según las condiciones climáticas. Por lo tanto, es necesario tener un plan de gestión de energía que tome en cuenta estas variaciones para garantizar la continuidad del suministro eléctrico.

En Colombia, se adelantan importantes inversiones en energía renovables. Grupo Tecnoglass, Almacenes Alkosto y Grupo éxito han instalado 19.000 paneles solares en total [24][25][26]. Además, se están realizando inversiones por un monto cercano a los 140.000 millones de pesos en otros proyectos de energía solar [27], lo que demuestra el interés por implementar alternativas innovadoras de fuentes no convencionales para satisfacer la necesidad de energía. Colombia es un país con



una diversidad geográfica y con gran potencial de radiación solar que permiten la implementación de proyectos de generación no convencionales.

#### **1.4. Marco de referencia**

##### **1.4.1. Calor de bajo grado.**

El calor de baja densidad exergética es difícil de convertir eficientemente en trabajo y se extrae de fuentes de calor por debajo de los 370 [°C] [6]. Las fuentes de calor de baja temperatura puede ser agua geotérmica, colectores solares, calor residual de proceso, biomasa etc.

##### **1.4.2. Mezcla zeotrópica.**

Es la mezcla de dos o más sustancias con diferente volatilidad, que al evaporarse no cambian su composición y su punto de ebullición permanece constante durante el proceso de separación. Esto significa que la mezcla se evapora y condensa en conjunto [6].

##### **1.4.3. Estado de referencia.**

Es el estado donde se alcanza el equilibrio, mecánico, químico y térmico. Este estado es utilizado como punto de partida para el análisis termodinámico de sistemas y procesos, ya que sirve como base para comparar el comportamiento y las propiedades de los sistemas diferentes [28].

##### **1.4.4. Exergía.**

La exergía es una medida de la capacidad de un sistema para realizar un trabajo útil y es el trabajo máximo teórico que se puede obtener de un sistema interactuando con su entorno hasta que ambos llegues al equilibrio termodinámico [29].

##### **1.4.5. Exergía Física.**



Cantidad máxima de trabajo que puede extraído de un sistema a través de un proceso físico reversible que involucra solo interacciones térmica y mecánicamente con el estado de referencia, alcanzando el equilibrio [29].

$$E_{ph} = \dot{m}[(h - h_o) - T_o(S - S_o)]$$

Ecuación 1 Exergía física

Donde  $o$  denota el estado de referencia.

#### 1.4.6. Exergía Química.

La exergía química está asociada a la diferencia de composición de un sistema con respecto a su estado de referencia y se define como la cantidad máxima de trabajo que se puede obtener a través de cambios químicos en el sistema mientras se alcanza el equilibrio termodinámico con el estado de referencia [29].

$$E_{ch(NH_3/H_2O)} = \dot{m} \left[ \left( \frac{x}{M_{NH_3}} \right) e_{ch,NH_3}^0 - T_0 \left( \frac{1-x}{M_{H_2O}} \right) e_{ch,H_2O}^0 \right]$$

Ecuación 2 Exergía química

Donde  $e_{ch,NH_3}^0$  y  $e_{ch,H_2O}^0$  son la exergía química específica.

#### 1.4.7. Eficiencia exergética

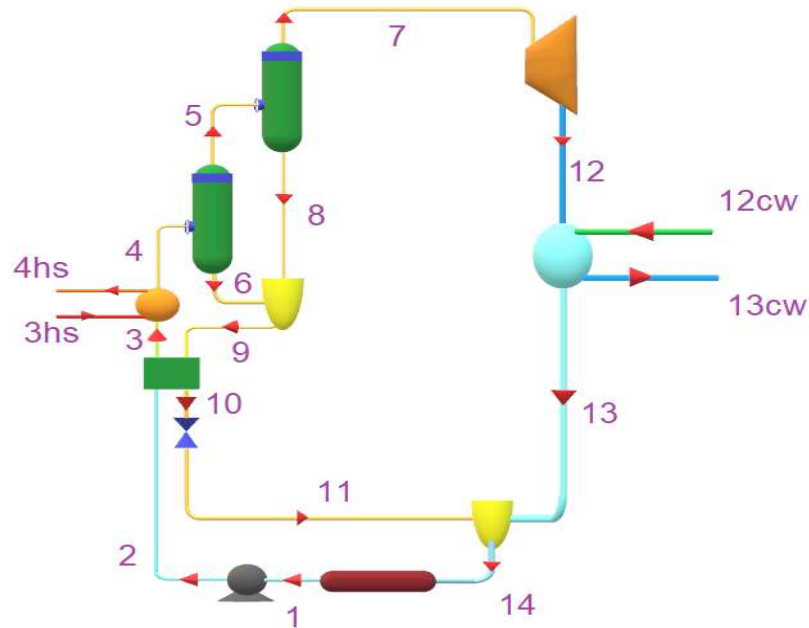
Es la relación entre el trabajo útil efectivamente generado por un sistema termodinámico y el trabajo teórico máximo que se podría obtener a partir de la misma cantidad de energía, en condiciones ideales y con respecto al medio de referencia [6].

#### 1.4.8. Ciclo Goswami

Ciclo combinado de generación de potencia eléctrica y frío, utiliza una mezcla zeotrópica de amoníaco y agua, la cual realiza la ebullición a temperatura variable, lo que produce una mejora en la eficiencia térmica en fuente de calor sensibles de baja temperatura [5]. El ciclo Goswami es un ciclo de cogeneración, en el que se

combinan un ciclo de absorción y un ciclo Rankine. Dependiendo de las diferentes proporciones de la mezcla amoníaco – agua, se generan valores variables de potencia y frío [30].

Figura 1 Ciclo Goswami [5].



El ciclo comienza (estado 1) con la salida de la mezcla  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  del absorbedor, entra a la bomba aumentando la presión, luego ingresa al recuperador de calor (estado 2); donde su temperatura incrementa, ganando calor excedente. Posterior pasa a la caldera (estado 3), donde eleva la temperatura y se evapora. Llega al rectificador 1 (estado 4), en el que la mezcla amoníaco agua se condensa, la parte líquida pobre en amoníaco sale del rectificador (estado 6), la otra parte en estado gaseoso rica en amoníaco fluye (estado 5) y entra al rectificador 2, ahí una fracción de la mezcla pobre en amoníaco se condensa y pasa a la cámara de mezclado (estado 8), se reencuentra con la corriente del estado 6, pasa al recuperador de calor (estado 9), luego a la válvula de expansión (estado 10), donde la mezcla disminuye la temperatura y pasa a la cámara de mezclado (estado 11). El resto de la mezcla rica en amoníaco que sale del rectificador 2, llega a la turbina (estado 7), donde genera potencia sin condensarse, alcanzando una temperatura menor a la ambiental. Entra al intercambiador de calor (estado 12), donde intercambia calor con el ambiente y aumenta su temperatura, sale (estado 13) y se une a la corriente del

estado 11 en la cámara de mezclado, la mezcla llega al absorbedor (estado 14) dando inicio al ciclo.

#### 1.4.9. Optimización

Proceso de búsqueda del valor máximo y mínimo de una función, conocida como función objetivo [30]

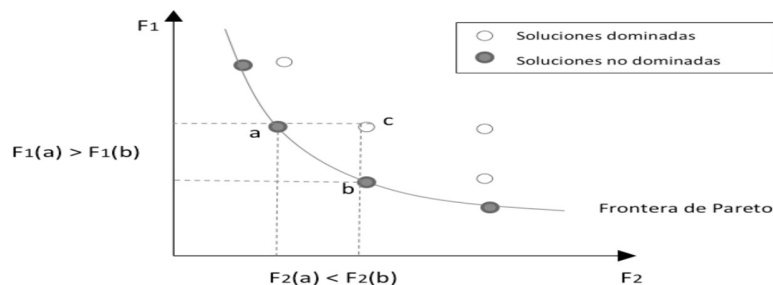
#### 1.4.10. Criterio Multiobjetivo de decisión

Es una técnica diseñada para la selección de alternativas óptimas con respecto a criterios múltiples para un objetivo específico. El método compara las alternativas y selecciona la de mayor prioridad como la opción que puede lograr el objetivo [31]. En los problemas multiobjetivo, se tiene varias funciones que deben ser optimizadas, por lo que no existe una solución global única. Por tanto, es necesario determinar un conjunto de puntos que se ajusten a una definición predeterminada de óptimo [32].

#### 1.4.11. Optimización de Pareto

Se refiere al conjunto de puntos en el espacio de búsqueda que pertenecen a las mejores soluciones de problemas de optimización y a la frontera de Pareto, como el conjunto de soluciones óptimas en el espacio objetivo [32]. La frontera de Pareto puede tomar diferentes formas, como lineal, convexa, cóncava, discontinua o continua, dependiendo de las funciones objetivos. Todas las soluciones en la frontera son igualmente buenas y sólo se prefiere una a otra cuando se ha definido una preferencia a priori.

Gráfica 1. Frontera de Pareto. Adaptada de [33].







De la Gráfica 1 se obtiene que la solución “a” (solución no dominada) es una de las soluciones óptimas, debido a que no se puede encontrar una solución “b” que mejore uno de los objetivos sin empeorar otro de los objetivos. En el caso de la gráfica “a” y “b” dominan a “c” [33].

#### 1.4.12. Clasificación climática Caldas-Lang

Es un criterio que permite identificar zonas climatológicamente homogéneas [34]. Esta clasificación se basa en la unión de la clasificación climática de Francisco José de Caldas, quien estableció los pisos térmicos en 1.802 (Tabla 1) [35], basado en la variación de la temperatura con la altitud y la clasificación climática de Lang que estableció un límite entre climas relacionando la precipitación media anual y la temperatura media anual, dando origen a la relación de Lang (Tabla 2). Estos dos sistemas de clasificación por sí solo no son insuficientes, por tanto, en 1.962 Shaufelberger plantea su unificación, dando origen al sistema de clasificación Caldas-Lang donde se considera el factor térmico y el factor de humedad [36].

Tabla 1. Pisos térmicos, Clasificación climática de Caldas. Adaptado de [37].

<b>Piso térmico</b>	<b>Rango de elevación [m]</b>	<b>Rango de temperatura [°C]</b>
Cálido	0 a 800	> 24
Templado	800 a 1.800	De 24 a 18
Frio	1.800 a 2.800	De 18 a 12
Muy frio	2.800 a 3.700	De 12 a 6
Extremadamente frio	3.700 a 4.700	De 6 a 0
Nival	> 4.700	< 0

Tabla 2. Climas, Clasificación climática de Lang [34].

<b>Factor de humedad</b>	<b>Factor de Lang (P/T)</b>
Desértico	0 a 20
Árido	20,1 a 40,0
Semiárido	40,1 a 60,0
Semihúmedo	60,1 a 100
Húmedo	100 a 160



Superhúmedo

> 160

La unificación realizada por Shaufelberger origina la combinación de climas mostrado en la Tabla 3.

Tabla 3. Climas clasificación climática de Caldas-Lang [37].

---

**TIPOS DE CLIMA SEGÚN CALDAS – LANG**

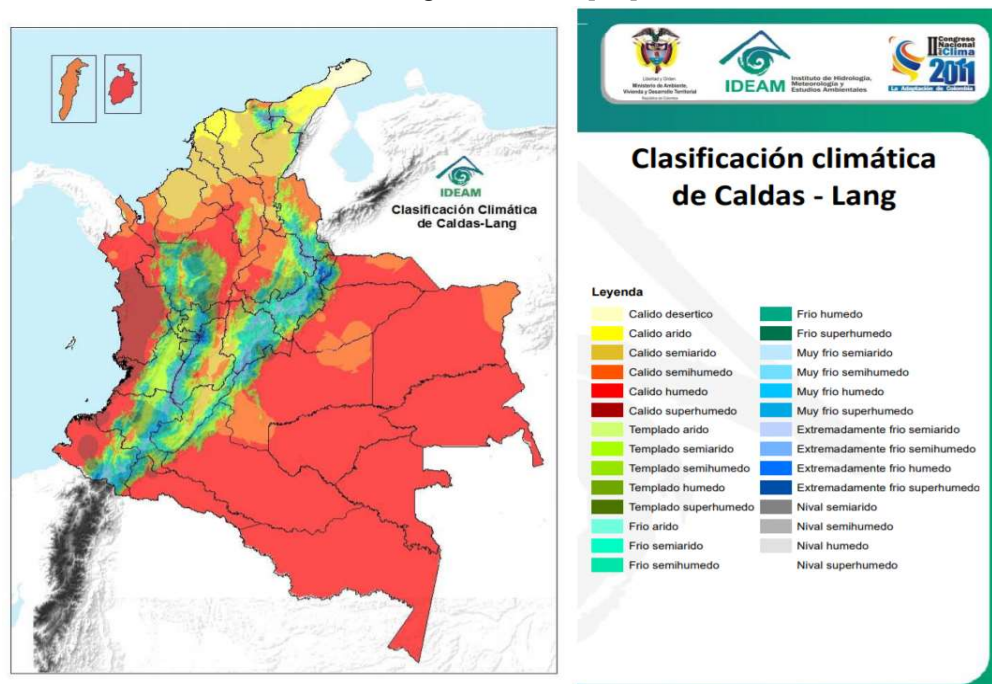
---

Cálido superhúmedo  
Cálido húmedo  
Cálido semihúmedo  
Cálido semiárido  
Cálido árido  
Templado superhúmedo  
Templado húmedo  
Templado semihúmedo  
Templado semiárido  
Templado árido  
Frío superhúmedo  
Frío húmedo  
Frío semihúmedo  
Frío semiárido  
Frío árido  
Muy frío bajo superhúmedo  
Muy frío bajo húmedo  
Muy frío bajo semihúmedo  
Muy frío bajo semiárido  
Muy frío bajo árido  
Extremadamente frío superhúmedo  
Extremadamente frío húmedo  
Extremadamente frío semihúmedo  
Extremadamente frío semiárido  
Extremadamente frío árido  
Nival superhúmedo  
Nival húmedo  
Nival semihúmedo  
Nival semiárido

### Nival árido

El IDEAM en su página Web presenta diferentes clasificaciones climatológicas para Colombia, en este trabajo se utilizó la clasificación Caldas-Lang mostrada en la Gráfica 2, donde se muestra los 28 tipos de climas presentes en Colombia [38]. En esta clasificación la primera palabra hace relación a su característica térmica y la segunda a su estado de humedad promedio.

Gráfica 2. Clasificación Caldas-Lang Colombia [38].



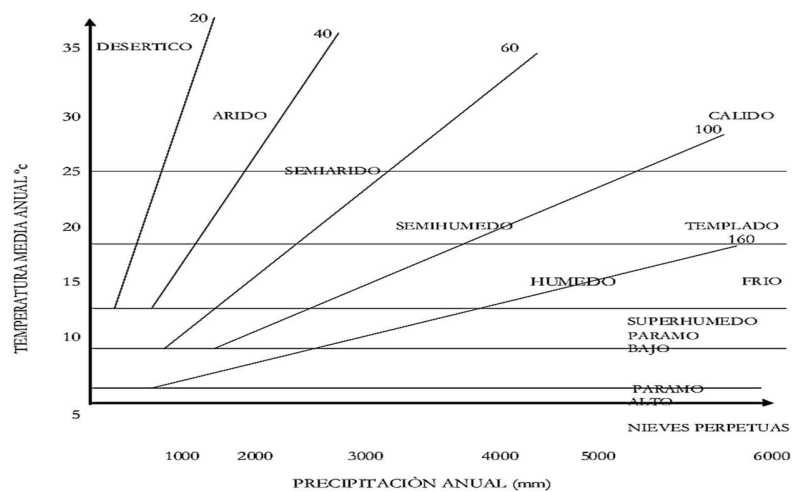
El clima predominante en el país es el cálido con sus diferentes grados de humedad, en gran parte de la Guajira se encuentra el clima desértico, el clima árido y semiárido en parte del Magdalena y norte de Bolívar, Córdoba y Sucre. El semihúmedo y húmedo se localiza en gran parte de la franja del Orinoco, Amazona, Magdalena medio, sur de la región caribe y parte norte de Santander. El clima superhúmedo predomina la región pacífica.

Los climas templados se encuentran en las laderas de las tres cordilleras hasta una elevación de 1.900 [m. s. n. m.] su grado más seco en los departamentos del Valle



de Cauca y parte de los Santanderes, los húmedos y semihúmedos se concentra en el centro de Antioquia, en el área occidental del Cauca y a lo largo del piedemonte llanero y amazónico. Por encima de los 2.000 [m. s. n. m] se encuentran los climas fríos, en los picos de las cordilleras y la Sierra Nevada de Santa Marta, el grado seco se encuentra en el altiplano cundiboyacense y Nariño, el grado húmedo se encuentra en Cundinamarca, Meta y Arauca.

Gráfica 3 Clasificación climática Caldas-Lang [39].



Al graficar la clasificación climática Caldas-Lang se obtiene la Gráfica 3, donde el eje horizontal muestra las precipitaciones anuales en [mm], el eje vertical muestra la temperatura media anual en [°C]. Las líneas inclinadas o diagonales es el factor límite de Lang con su respectivo clima, y las líneas horizontales es la clasificación climática de Caldas con su concerniente piso térmico. Partiendo de la gráfica para cada clima de la clasificación de Caldas-Lang las temperaturas ambientales que se utiliza en la investigación, son las mostrada en la tabla 4

Tabla 4. Temperaturas ambientales usadas en la investigación.

<b>T. Ambiente [°C]</b>
32
21
15
9
4

### 1.4.13. Presión atmosférica

Es el peso de la capa de gas denominada Atmósfera, que ejerce una presión por unidad de superficie sobre los objetos, cuerpo y demás en la tierra [40], la presión atmosférica disminuye con la elevación respecto al nivel del mar. En este trabajo para calcular la presión atmosférica presente en cada uno de los climas de la clasificación climática de Caldas-Lang, se realizó una regresión lineal con los valores de la presión atmosférica de las diferentes estaciones climáticas del IDEAM [39], como lo muestra la Tabla 5 y la Gráfica 4

Tabla 5. Presión atmosférica estaciones del IDEAM [41].

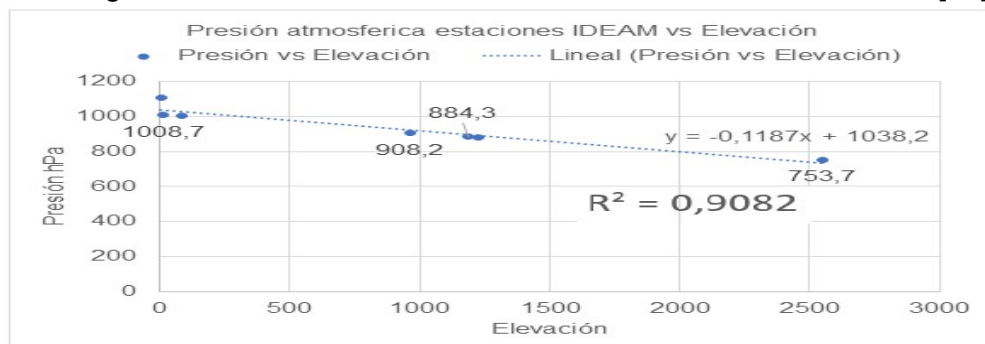
Elevación [m]	Presión [hPa]	Lugar
4	1.109,8	Riohacha
14	1.008,7	Soledad
84	1.005,3	Leticia
961	908,2	Palmira
1.189	884,3	Lebrija
1.229	882,4	Quindío
2.547	753,7	Bogotá

La regresión lineal de los datos genera la siguiente ecuación para el cálculo de la presión atmosférica. El coeficiente de determinación [ $R^2$ ] tiene un valor de 0,90 que indica un ajuste viable del modelo [42], como lo muestra la Gráfica 4.

$$P = -0.1187X + 1038.2$$

Ecuación 3 Regresión lineal Presión atmosférica.

Gráfica 4 Regresión lineal de los datos de estación climática del IDEAM. [41].





Para la clasificación climática de Caldas-Lang los valores para la presión atmosférica lo muestra la Tabla 6, donde el valor de la altura se tomó para cada piso térmico como el promedio del rango de elevación en la clasificación de Caldas, a excepción del nival y Cálido 1, que se utilizó para el cálculo el valor mínimo del rango respectivo, para el cálculo de la presión se utilizó la Ecuación 3 de regresión lineal

Tabla 6. Presión Atmosférica Clasificación Caldas-Lang.

Clima	Elevación [m]	Presión Atmosférica [KPa]
Cálido 1	0	1.038,2
Cálido	400	990,72
Templado	1.300	883,89
Frio	2.300	765,19
Muy frio	3.250	652,425
Extremadamente frio	4.200	539,66
Nival	4.700	480,31

### 1.5. Antecedentes

Demirkaya *et al* [30] utilizan algoritmos genéticos [GA] para realizar la optimización multiobjetivo de Pareto. El estudio se realiza en dos casos, el primer caso el ciclo se utiliza como un ciclo de fondo y en el segundo caso se utiliza como un ciclo superior que utiliza energía solar o geotérmica. Los objetivos termodinámicos que se consideran son la producción de potencia, capacidad de refrigeración, efectividad de la primera ley y eficiencia exergética. La optimización se lleva a cabo variando las variables de diseño presión caldera [ $P_b$ ], temperatura caldera [ $T_b$ ], concentración de la solución [ $X$ ] y temperatura de rectificador [ $T_r$ ]. Como resultados se obtuvieron que, para el primer caso se tomaron temperaturas de fuente de calor entre 70 [°C] – 150 [°C] y para el segundo caso temperaturas de fuente entre 150 [°C] – 250 [°C], el rango de concentración de amoniaco-agua se tomó entre  $0,2[\frac{\text{KgNH}}{\text{Kg solution}}]$  a  $0,65[\frac{\text{KgNH}}{\text{Kg solution}}]$  las presiones se ajustaron entre los puntos de rocío y burbuja. Desde el óptimo de Pareto se concluye que la mejora de un objetivo causa el deterioro de los demás objetivos; por tanto en el caso donde el ciclo es de fondo, el punto de mayor producción de potencia, los datos de entrada tienen los siguientes valores  $P_b = 5,6[\text{bar}]$ ,  $T_b = 150[^\circ\text{C}]$  concentración  $X = 0,212[\frac{\text{KgNH}}{\text{Kg solution}}]$  y  $T_r = 150 [^\circ\text{C}]$ , para



el punto de máxima producción de frío  $P_b = 33,62$  [bar],  $T_b = 150$  [°C] y  $X = 0,52$   $\left[\frac{\text{KgNH}}{\text{Kg solution}}\right]$  y  $T_r = 85,6$  [°C], para el punto de mejor eficiencia  $P_b = 10,56$  [bar],  $T_b = 150$  [°C],  $X = 0,23$   $\left[\frac{\text{KgNH}}{\text{Kg solution}}\right]$   $T_r = 150$  [°C]. Para el caso donde el ciclo es superior las temperaturas de la caldera estuvo entre  $150$  [°C] –  $200$  [°C], por tanto la concentración se mantuvo entre  $0,2$   $\left[\frac{\text{KgNH}}{\text{Kg solution}}\right]$  - y  $0,65$   $\left[\frac{\text{KgNH}}{\text{Kg solution}}\right]$  lo que imposibilitó la producción de frío, por esta razón solo se concentraron en la producción máxima de potencia, y el vector de diseño solo se conforma por la presión de la caldera  $P_b = 48,6$  [bar], la temperatura de la caldera  $T_b = 250$  [°C] y la concentración de la mezcla  $X = 0,2$   $\left[\frac{\text{KgNH}}{\text{Kg solution}}\right]$  logrando una producción de potencia de  $667,5$  [KW], eficiencia de primera ley  $22,61\%$  y eficiencia exergética  $74,22\%$ .

García *et al* [43] realizaron un análisis de exergía para encontrar condiciones óptimas para la operación de un sistema de generación de potencia y frío, para lo cual utilizaron análisis de varianza y el análisis de regresión para calcular el rendimiento termodinámico del ciclo combinado. La simulación se realizó en MATLAB, utilizando Refprop 9,0 para calcular las propiedades termodinámicas. La técnica de superficie de respuesta fue la utilizada para el punto óptimo. Como variables de respuesta se utilizó la relación entre la eficiencia exergética y la destrucción de exergía. Los resultados mostraron que la variable respuesta está influenciada principalmente por la concentración de amoníaco, la relación de presión, la eficiencia de la turbina y el gradiente de temperatura en el intercambiador.

Demirkaya *et al* [44] realizaron un estudio experimental donde se verificaron las tendencias de las predicciones del análisis teórico y además agregaron un expansor de pergamino al ciclo Goswami, las variables que se fijaron para el estudio fue la producción de potencia, frío, la eficiencia en la primera ley y la eficiencia exergética. Se mantuvo la temperatura de la caldera y el absorbedor en  $85$  [°C] y  $35$  [°C] respectivamente, variando la concentración de amoníaco y la presión en la caldera, lo que produjo una eficiencia de primera ley y eficiencia exergética de  $7,2\%$  y  $45\%$  respectivamente. Además, concluyeron que si el ciclo se utiliza para producir máxima potencia no es necesario el uso de rectificadores o sobrecalentadores, lo que reduce el costo inicial.



Hosseinpour *et al* [7] propone un nuevo sistema de cogeneración que consiste en un gasificador de biomasa alimentada por madera, una celda de combustible de óxido sólido (SOFC) que proporciona calor residual para el ciclo Goswami. Lo que produce electricidad adicional y refrigeración, se modela el sistema en el software engineering Equation Solver (EES). El rendimiento del sistema se evalúa con la producción de potencia, eficiencia en la primera ley, y eficiencia exergética. El aumento en la densidad de la corriente de SOFC aumenta la generación de potencia y de frío. Pero disminuye la eficiencia en la primera ley y la eficiencia exergética del sistema. Los valores óptimos encontrados son 481,6 [KW] de potencia, 60,2% de eficiencia de primera ley y 34,7% de eficiencia exergética.

Yin *et al* [8] proponen un novedoso sistema de producción de potencia y frío, combinando un ciclo Goswami con un ciclo de refrigeración por eyector. Esta nueva combinación mejora la capacidad de generación de frío del ciclo Goswami y se puede ajustar la generación de frío a la relación de potencia cambiando el flujo de la mezcla zeotrópica amoníaco agua hacia la turbina y el eyector. La eficiencia de primera ley y la eficiencia exergética combinadas son de 17,49% y de 26,15% respectivamente. También obtuvieron la siguiente conclusión, que la temperatura del absorbedor, la presión máxima del ciclo, la presión baja, la temperatura de la caldera y la división del rectificador, tienen efectos significativos en la producción de potencia, la generación de frío, la eficiencia térmica combinada y la eficiencia exergética combinada.

Guzman *et al* [45] utilizaron un algoritmo genético para optimizar la salida de potencia y refrigeración de un ciclo Goswami con dos turbinas y dos presiones de trabajo. La fuente de calor utiliza temperatura máxima de 150 [°C]. En el estudio teórico obtuvieron como resultado, que la nueva configuración tiene la capacidad de producir mayor potencia que la configuración normal del ciclo combinado de amoníaco y agua. Los resultados de la optimización mostraron que la eficiencia de primera ley oscila entre 9,1% y 13,7%, con salida neta de potencia de 32 [KW] y de refrigeración de 0,38 [KW].



## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Desarrollar un estudio termoeconómico de escenarios que prioricen la generación de potencia, frío o funcionamiento eficiente del ciclo Goswami en diferentes temperaturas ambientales, usando algoritmo genético, criterio multiobjetivo de Pareto, para la evaluación como fuente de energía renovable efectiva.

### 2.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar un programa en Matlab para simular el ciclo Goswami, considerando las generalidades del ciclo y las propiedades termodinámicas de la mezcla de amoníaco y agua, que permita el cálculo de las propiedades de los flujos en el ciclo.
2. Aplicar el criterio de optimización multiobjetivo de Pareto a vectores objetivos obtenidos a través de un algoritmo genético programado en el software MatLab, para la selección de máximos que prioricen la generación de potencia, frío o funcionamiento eficiente del ciclo Goswami.
3. Calcular el costo termoeconómico de los vectores objetivos óptimos para cada escenario priorizado, considerando diferentes temperaturas ambientales, para la evaluación del ciclo Goswami como fuente de energía renovable efectiva.



## 4. Metodología

En este trabajo de investigación se realiza un estudio termoeconómico del ciclo Goswami con el objetivo central de evaluar el costo exergético en escenarios que priorice la generación de potencia, frío o funcionamiento eficiente, considerando diferentes temperaturas ambientales. Para alcanzar este objetivo se lleva a cabo las siguientes actividades:

### 4.1. Programación del ciclo Goswami

En esta etapa se presenta las generalidades del ciclo Goswami y se describe el proceso de programación que se utiliza para la estimación de propiedades termodinámicas de la mezcla amoniaco-agua y el modelo termodinámico del ciclo en el software Matlab. Se realiza una comparación con artículos publicados utilizando parámetros de trabajos similares para validar el modelo. Se utiliza la librería CoolProp para la estimación de propiedades termodinámica para el agua y el aire.

Las siguientes actividades se llevaron a cabo para el desarrollo de la simulación termodinámica:

1. Elaboración de los balances de masa y energía: se desarrollaron los balances de masa y energía necesarios para el ciclo Goswami.
2. Desarrollo de la programación en MatLab: se programa el modelo termodinámico del ciclo en MatLab para la solución de los balances de masa y energía, las generalidades del ciclo y las propiedades termodinámica de la mezcla amoniaco agua.
3. Simulación y comprobación del ciclo Goswami: se lleva a cabo la simulación del ciclo Goswami utilizando el modelo programado en MatLab y se comprobó su respuesta con la de artículos publicados.
4. Análisis de resultados: se analiza los resultados obtenidos en la simulación para entender el comportamiento en diferentes escenarios.

## 4.2. Estrategias de optimización multiobjetivo

Una vez conocidas las condiciones y generalidades del ciclo Goswami, se usa un algoritmo genético para crear al azar parámetros de entrada para el ciclo Goswami, produciendo vectores objetivos. A continuación, se aplica el criterio de optimización multiobjetivo de Pareto a los vectores objetivos, seleccionando aquellos que prioricen la generación de potencia, frío o funcionamiento eficiente.

Las actividades realizadas para lograr este objetivo son las siguientes:

1. Programación del algoritmo genético: se programa el algoritmo genético en MatLab para generar parámetros de entrada al azar para el ciclo Goswami
2. Vectores objetivos: se calculan escenarios de generación de potencia, frío o funcionamiento eficiente, a partir de los parámetros de entrada al azar generados por el algoritmo genético.
3. Programación del algoritmo de optimización: se programa un algoritmo según la optimización multiobjetivo de Pareto en MatLab para optimizar vectores objetivos.
4. Escenarios priorizados: se filtran los vectores objetivos y se eligen los que priorizan la generación de potencia, frío o funcionamiento eficiente.
5. Análisis de resultados: se analizan los resultados obtenidos en la optimización y los vectores objetivos obtenidos.

## 4.2. Estudio Termoeconómico

El estudio termoeconómico se plantea en función del potencial de exergía de la mezcla de amoníaco – agua. Se realiza simulaciones de los escenarios elegidos y se aplican técnicas de filtrado para seleccionar únicamente aquellos relevantes para el estudio.

Por lo que se realiza las siguientes actividades.

1. Balance de masa: se realiza un balance de masa en el ciclo Goswami para determinar las concentraciones de amoníaco en agua, determinar propiedades termodinámicas.



2. Balance económico: se lleva a cabo un análisis económico para evaluar el costo de inversión y retorno.
3. Evaluación de los vectores objetivos: cada vector objetivo es evaluado según la metodología de la evaluación termoeconómica, se aplican técnica de filtrado.
4. Análisis de los resultados: se analizan los resultados obtenidos en las etapas anteriores para evaluar el desempeño del ciclo Goswami desde una perspectiva termoeconómica. Se compara los valores teóricos de artículos de potencia, frío y eficiencia de los ciclos convencionales usados en Colombia, se considera si el ciclo Goswami es una fuente de energía renovable efectiva.

#### **4.3. Análisis termodinámico**

Para la realización de estudio del ciclo Goswami, se consideró a cada dispositivo como un volumen de control en estado estacionario, por lo que se utilizó balance de masa, energía y exergético (Tabla 7) y balance de costo (Tabla 8).



Tabla 7. Ecuación de energía, recurso y producto para cada componente.

Componente	Ecuación de energía	Ecuación de producto y combustible
Bomba	$\dot{W}_p = \dot{m}_1(h_2 - h_1)$ $\eta_{sp} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$	$\dot{E}_{P,gen,P} = \dot{E}_2 - \dot{E}_1$ $\dot{E}_{F,gen,P} = \dot{W}_p$
Intercambiado de calor	$\dot{m}_2(h_3 - h_2) = \dot{m}_9(h_9 - h_{10})$	$\dot{E}_{P,gen,IC} = \dot{E}_3 - \dot{E}_2$ $\dot{E}_{F,gen,IC} = \dot{E}_{10} - \dot{E}_9$
Caldera	$\dot{Q}_b = \dot{m}_3(h_4 - h_3)$	$\dot{E}_{P,gen,C} = \dot{E}_4 - \dot{E}_3$ $\dot{E}_{F,gen,C} = \dot{E}_{3hs} - \dot{E}_{4hs}$
Rectificador 1	$\dot{Q}_{rec1} = \dot{m}_4h_4 - \dot{m}_5h_5 - \dot{m}_6h_6$	$\dot{E}_{P,gen,R1} = \dot{E}_5 - \dot{E}_6$ $\dot{E}_{F,gen,R1} = \dot{E}_4$
Rectificador 2	$\dot{Q}_{rec2} = \dot{m}_5h_5 - \dot{m}_7h_7 - \dot{m}_8h_8$	$\dot{E}_{P,gen,R2} = \dot{E}_7 - \dot{E}_8$ $\dot{E}_{F,gen,R2} = \dot{E}_5$
Turbina	<ul style="list-style-type: none"> <li> <math display="block">\dot{W}_t = \dot{m}_7(h_7 - h_{12})</math> <math display="block">\eta_{st} = \frac{h_7 - h_{12}}{h_7 - h_{12s}}</math> </li> </ul>	$\dot{E}_{P,gen,T} = \dot{W}_T$ $\dot{E}_{F,gen,P} = \dot{E}_{12} - \dot{E}_7$
Evaporador	<ul style="list-style-type: none"> <li> <math display="block">\dot{Q}_E = \dot{m}_{12}(h_{13} - h_{12})</math> </li> </ul>	$\dot{E}_{P,gen,E} = \dot{E}_{12cw} - \dot{E}_{13cw}$ $\dot{E}_{F,gen,E} = \dot{E}_{13} - \dot{E}_{12}$
Cámara de mezclado 1	<ul style="list-style-type: none"> <li> <math display="block">\dot{m}_9h_9 = \dot{m}_6h_6 + \dot{m}_8h_8</math> </li> </ul>	$\dot{E}_{P,gen,CM1} = \dot{E}_6 + \dot{E}_8 - \dot{E}_9$ $\dot{E}_{F,gen,CM1} = \dot{E}_6 - \dot{E}_8$
Cámara de mezclado 2	<ul style="list-style-type: none"> <li> <math display="block">\dot{m}_{14}h_{14} = \dot{m}_{11}h_{11} + \dot{m}_{13}h_{13}</math> </li> </ul>	$\dot{E}_{P,gen,CM2} = \dot{E}_{11} + \dot{E}_{13} - \dot{E}_{14}$ $\dot{E}_{F,gen,CM2} = \dot{E}_{11} - \dot{E}_{13}$
Absorbedor	$\dot{Q}_A = \dot{m}_1(h_{14} - h_1)$	$\dot{E}_{P,gen,A} = \dot{E}_{14} + \dot{E}_1$ $\dot{E}_{F,gen,CM2} = \dot{Q}_A$



Tabla 8. Balance de costo para cada componente del sistema.

Componente	Ecuación
Bomba	$\dot{C}_1 = \dot{C}_2 + Z_B$
Intercambiador de calor	$\dot{C}_2 + \dot{C}_9 = \dot{C}_3 + \dot{C}_{10} + Z_{IC}$
Caldera	$\dot{C}_3 + \dot{C}_{3HS} = \dot{C}_4 + \dot{C}_{4HS} + Z_C$
Rectificador 1	$\dot{C}_4 = \dot{C}_5 + \dot{C}_6 + Z_{R1}$
Rectificador 2	$\dot{C}_5 = \dot{C}_7 + \dot{C}_8 + Z_{R2}$
Turbina	$\dot{C}_7 = \dot{C}_{12} + Z_T$
Evaporador	$\dot{C}_{12} + \dot{C}_{12CW} = \dot{C}_{13} + \dot{C}_{13CW} + Z_E$
Cámara de mezclado 1	$\dot{C}_6 + \dot{C}_8 = \dot{C}_9 + Z_{CM1}$
Cámara de mezclado 2	$\dot{C}_{11} + \dot{C}_{13} = \dot{C}_{14} + Z_{CM2}$
Válvula de expansión	$\dot{C}_{10} = \dot{C}_{11} + Z_{VE}$
Absorbedor	$\dot{C}_{14} = \dot{C}_1 + Z_{AB}$

#### 4.4. Análisis termoeconómico

Los procesos térmicos presentan significativas interacciones de calor y trabajo con su entorno- Los sistemas térmicos son usados en todo tipo de industria y su uso corresponde a la aplicación de principios y leyes de la termodinámica y de la ingeniería económica, debido a que el costo siempre es inherente a su uso. El enfoque donde se combina el costo exergético de los flujos internos de los procesos y productos con los costos económicos de los recursos se denomina análisis termoeconómico. Este análisis se basa en el concepto de exergía y se hace con el fin de reducir costos. Los costos exergético depende del proceso y de los límites del sistema considerado [46].

El análisis termoeconómico ayuda a comprender la generación de costo de proceso y el flujo de costo en el sistema. Para el cálculo de los costos se utilizó el siguiente razonamiento. Se conoce la exergía de los flujos  $\dot{B}$ , los costos de operación e



inversión  $\dot{Z}$  y la matriz incidente de la representación matemática del sistema  $\dot{I}$ , a lo que se procede al cálculo de los costos exergético  $\dot{C}$  y al costo exergético unitario  $\dot{C}^*$ .

$$I * \dot{C} = \dot{C}^*$$

Ecuación 4 Costo exergético unitarios

#### 4.4.1. Matriz de incidencia

Se construye teniendo en cuenta la representación matemática de la representación física de la estructura del sistema, en donde se incluyen las principales corrientes de masa, calor y potencia.

$$A = A_R - A_P - A_{Pe}$$

Ecuación 5 Matriz de incidencia

Donde  $A$  es la matriz de incidencia,  $A_R$  es la matriz de recurso,  $A_P$  es la matriz producto y  $A_{Pe}$  es la matriz de perdidas. Para construir cada matriz se tendrá como base el siguiente formalismo.

Matriz Recurso  $A_R$ : a cada elemento genérico  $a_{R,ij}$  se le asignara uno de los siguientes valores:

- +1 si la corriente  $j$  es recurso que entra en el equipo  $i$
- 1 si la corriente  $j$  es recurso que entra en el equipo  $i$
- 0 si la corriente  $j$  no es recurso del equipo  $i$

Matriz Producto  $A_P$ : a cada elemento genérico  $a_{P,ij}$  se le asignara uno de los siguientes valores:

- +1 si la corriente  $j$  es producto que sale del equipo  $i$
- 1 si la corriente  $j$  es producto que entra en el equipo  $i$
- 0 si la corriente  $j$  no es producto del equipo  $i$



Matriz Perdida  $A_{pe}$ ; a cada elemento genérico  $a_{p,ij}$  se le asignara uno de los siguientes valores:

- +1 si la corriente  $j$  es perdida del equipo  $i$
- 0 si la corriente  $j$  no es perdida del equipo  $i$

#### 4.4.2. Termoeconomía

Para un sistema que funciona con energía térmica y genera poder, el balance de costo se escribe:

$$\sum \dot{C}_{out,k} + \dot{C}_{W,k} = \sum \dot{C}_{in,k} + \dot{C}_{q,k} + \sum \dot{C}_{out,k} + \dot{Z}_{,k}$$

Ecuación 6 Balance de costo

Se formula un balance de costo para el sistema generar

$$\dot{C}_{p,tot} = \dot{C}_{F,tot} + \dot{Z}_{tot}$$

Ecuación 7 Balance de costo sistema general

Donde  $\dot{C}_{F,tot}$  representa todos los gastos totales para producir, siendo  $\dot{C}_{F,tot}$  el costo de los recursos usados y  $\dot{Z}_{tot}$  el gasto en mantenimiento y costo de capital. El balance de costo para  $\dot{Z}_{tot}$  es:

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{Cl} + \dot{Z}_k^{OM}$$

Ecuación 8 Balance de costo componente

La inversión de capital y el costo de operación y mantenimiento para el componente k, se calcula como [47]:

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{Cl} + \dot{Z}_k^{OM} = CRF \times \frac{\varphi_r \times 365 \times 24}{N} \times Z_k$$

Ecuación 9 Balance de costo componente



Donde  $\varphi_r$  es el factor de mantenimiento y tiene un valor de 1,06,  $N$  es el número de hora anual de funcionamiento de la planta (7000 h),  $\dot{Z}_k$  es el costo de compra del  $k$  componente y  $CRF$  es el factor de recuperación de capital [47][48][49]:

$$CRF = \frac{k(1+k)^{n_r}}{(1+k)^{n_r} - 1}$$

Ecuación 10 Factor de recuperación de capital

Donde  $k$  denota la tasa de interés 0,15 y  $n_r$  es el periodo de tiempo de funcionamiento de la planta (20 años)

#### 4.4.3. Preposiciones de costo exergético.

Son proposiciones cuya aplicación sistemática permite determinar el costo exergético de los flujos, recursos y producto del sistema analizado [46]:

P1: El costo exergético es una propiedad conservativa.

- $AxB^* = 0$

P2: En ausencia de información sobre el costo exergético de los flujos de entrada al sistema (recurso), se considera que su costo exergético corresponde al valor de su exergía.

- $B^*_j = B_j$

Si se considera  $\omega_e = (\omega_{e,i})_{i=1,\dots,n}$  con dimensión  $(1, n)$  donde  $\omega_{e,i} = B_j$  y  $\alpha_e$  es la matriz recurso de dimensiones  $(n, e)$  donde  $\alpha_e = (\alpha_{i,j})_{i=1,\dots,n}^{j=1,\dots,e} = \delta_{ij}$ . La matriz se puede escribir de forma resumida:

- $\alpha_e B^* = \omega_e$

P3: si un flujo que sale de un componente es parte del recurso, el costo unitario exergético es el mismo, que el del flujo de donde proviene.



P4: si un componente tiene varios productos, a todos se les asignara el mismo costo unitario y si un producto consta de varios flujos, todos tendrán el mismo costo unitario.

P5: Cuando uno de los componentes tienes bifurcaciones externas, si los flujos son un producto, se aplicará la preposición P4 y si son subproductos, pérdidas o residuos se aplica las siguientes reglas:

Si los dos flujos son productos: se aplica la preposición P4. De forma que la ecuación es:

- $B_1^* - x_{12}B_2^* = 0$

Uno de los flujos es un subproducto: Se le aplica un costo igual como si fuera el producto principal.

- $B_2^* = B_{sub}^*$

Uno de los flujos es una perdida: todo el costo lo asume el producto principal.

- $L^* = 0$

#### 4.4.4. Costo de inversión para la bomba [29][50]

$$Z_p = 2.100 \left( \frac{W_p}{10} \right)^{0,26} \left( \frac{1 - \eta_{is,p}}{\eta_{is,p}} \right)^{0,5}$$

Ecuación 11 Costo de inversión para la bomba

Donde  $Z_{R,p} = \$2.100$  (año 2.000),  $W_{R,p} = 10$  [KW],  $mp = 0,26$ ,  $n_p = 0,50$ ,  $\eta_p = 0,8$

#### 4.4.5. Costo de inversión para el intercambiador de calor [29][50]

$$Z_{IC} = 130 \left( \frac{A_{IC}}{0,093} \right)^{0,78}$$

Ecuación 12 Costo de inversión para el intercambiador de calor



Para el intercambiador de calor el área de referencia en el año 2000 y el costo de referencia se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Costos de referencia para componentes [50].

Componente	Costo de referencia [\$]
Caldera	17.500
Intercambiador de calor	12.000
Absorbedor	16.500
Rectificador	17.000

$$Q_{IC} = U_{IC}A_{IC}\Delta T_{IC}^{lm}$$

Ecuación 13 Calor

$$\Delta T_{IC}^{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)}$$

Ecuación 14 Temperatura medida logarítmica

$$Q_{IC} = h_3 - h_2$$

$$A_{IC} = \frac{Q_{IC}}{U_{IC}\Delta T_{IC}^{lm}}$$

El coeficiente global de transferencia de calor para cada componente se muestra en la Tabla 10.



Tabla 10. Coeficiente global de transferencia de calor [51].

Componente	Coeficiente global de transferencia de calor U [ $W/m^2K$ ]
Absorbedor	600
Caldera	900
Intercambiador de calor	1.000

#### 4.4.6. Costo de inversión para la caldera.

$$Z_C = 130 \left( \frac{A_C}{0,093} \right)^{0,78}$$

Ecuación 15 Costo de inversión para la caldera.

$$Q_C = U_C A_C \Delta T_C^{lm}$$

$$Q_C = h_4 - h_3$$

$$A_C = \frac{Q_C}{U_C \Delta T_C^{lm}}$$

#### 4.4.7. costo de inversión para el rectificador 1.

Para el análisis de rectificadores se supone que hay un intercambio de calor entre la corriente de menor calidad con aire del ambiente.

$$Z_{R1} = Z_{R,R1} \left( \frac{A_{R1}}{100} \right)^{0,6}$$

Ecuación 16 Costo de inversión para rectificador



Donde  $Z_{R,R1}$  es el costo de referencia de la  
Tabla 9. El calor cedido por el rectificador es:

Temperatura de la corriente de aire antes de la transferencia de calor

$$t_{a1} = t_{amb} + 273,15 [K]$$

Temperatura de la corriente de aire después de la transferencia de calor

$$t_{a2} = t_{a1} + 10 [K]$$

Por tanto

$$A_{R1} = \frac{Q_{R1}}{U_{R1} \Delta T_{R1}^{lm}}$$

#### 4.4.8. Costo de inversión para el rectificador 2.

$$Z_{R2} = Z_{R,R2} \left( \frac{A_{R2}}{100} \right)^{0,6}$$

Donde  $Z_{R,R2}$  es el costo de referencia de la  
Tabla 9. El calor cedido por el rectificador es:

$$\dot{Q}_{rec2} = \dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_8 h_8$$

Temperatura de la corriente de aire antes de la transferencia de calor

$$t_{a1} = t_{amb} + 273,15 [K]$$



Temperatura de la corriente de aire después de la transferencia de calor

$$t_{a2} = t_{a1} + 10 \text{ [}^\circ\text{K]}$$

Por tanto

$$A_{R2} = \frac{Q_{R2}}{U_{R2} \Delta T_{R2}^{lm}}$$

#### **4.4.9. Costo de inversión para Cámara de mezclado**

Debido que el costo de la cámara de mezclado es bajo comparado con los de otros componentes, en este estudio se desprecia su costo.

#### **4.4.10. Costo de inversión para Turbina [52]**

$$Z_t = 4.405 \dot{W}_{tur}^{0,7}$$

Ecuación 17 Costo de inversión para la turbina

Donde  $\dot{W}_{tur} = \dot{m}_{12}(h_7 - h_{12})$

#### **4.4.11. Costo de inversión del Evaporador (Intercambiador de calor)**

en la forma que funciona el ciclo Goswami, en la parte de generación de frío, se realiza un intercambio de calor sin evaporación, por tanto, se estudia con un intercambiador de calor simple.

$$Z_E = 130 \left( \frac{A_E}{0,093} \right)^{0,78}$$

Ecuación 18 Consto de inversión evaporador



$$Q_E = U_E A_E \Delta T_E^{lm}$$

$$Q_E = h_{12} - h_{13}$$

$$A_E = \frac{Q_E}{U_E \Delta T_E^{lm}}$$

#### 4.4.12. Costo de inversión para Válvula de expansión

Debido que el costo de la válvula de expansión es bajo comparado con los de otros componentes, en este estudio se desprecia su costo

#### 4.4.13. Costo de inversión absorbedor

$$Z_A = Z_{R,A} \left( \frac{A_A}{100} \right)^{0,6}$$

Ecuación 19 Costo de inversión absorbedor

Donde  $Z_{R,A}$  es el costo de referencia de la

Tabla 9

$$Q_A = U_A A_A \Delta T_A^{lm}$$

$$Q_A = h_{14} - h_1$$

Temperatura de la corriente de aire antes de la transferencia de calor

$$t_{aa} = t_{amb} + 273,15 [K]$$

Temperatura de la corriente de aire después de la transferencia de calor

$$t_{aa2} = t_{aa1} + 10 [K]$$

$$\Delta T_{IC}^{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln (\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

$$A_A = \frac{Q_A}{U_A \Delta T_A^{lm}}$$

El costo obtenido se tasa a valor del año 2.021 utilizando la estimación de costo CEPCI (Chemical Engineerin Plan Cost Index, por sus siglas en inglés) [53]. Para el año 2.000 se utiliza el índice de 394,1 [54] y para el año 2.021 699,97 [55].

$$\text{Costo actual} = \text{Costo referencia} \frac{\text{Indice de costo actual}}{\text{Indice de costo año de referencia}}$$

#### 4.4.14. Costo Exergético.

Para el cálculo del costo de los  $m$  flujos del sistema en estudio, se recurre al planteamiento matricial:

$$A_{(m,m)} B_{(m,1)}^* = Y_{e(m,1)}$$

Ecuación 20

Donde  $A$  es la matriz extendida, que representa la estructura física del sistema,  $B^*$  es el costo exergético de los flujos y  $Y_e$  son los recursos de entrada al sistema.

La matriz  $A$  está constituida por la matriz incidencia  $A_{(n,m)}$ , por la matriz recurso  $\alpha_{e(e,m)}$  de la preposición 2 y por la matriz  $\alpha_{x(m-n-e,m)}$  que se forma de la siguiente manera:

Todos los elementos serán nulos, excepto en las siguientes condiciones:





Subproducto: tendrá valor de 1 para el elemento  $\alpha_{i,S}$  relativo al subproducto S generado por i-ésimo componente.

Residuo: tendrá valor 1 para el elemento  $\alpha_{i,R}$  relativo al residuo R generado por el i-ésimo componente.

Producto: tendrá valor de  $\frac{1}{B}$  en uno de los elementos y de  $-\frac{1}{B}$  en el otro, todas las bifurcaciones generaran ecuaciones de la forma:

- $B_j^* - x_{j,k} B_k^* = 0$

De forma reducida se puede escribir:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{A}{\alpha_e} \\ \alpha_x \end{pmatrix}$$

Ecuación 21

$Y_e$  está constituida por el vector 0 de dimensión  $(n, 1)$  con componentes ceros, y por el vector  $\omega_{ex} = \begin{bmatrix} \omega_e \\ 0 \end{bmatrix}$  de dimensiones  $((m - n), 1)$ , siendo el vector  $\omega_e$  de dimensiones  $(e, 1)$  cuya componente son el valor de la exergía de los flujos de entradas, según la preposición 2. De forma reducida se puede escribir:

$$Y_e = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ex} \end{bmatrix}$$

Ecuación 22

Recurso: es la contribución que el componente necesita para funcional.

Producto: flujo objetivo de ese componente





La solución del sistema matricial arroja como resultado el vector de costo exergético de los flujos. Que se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Costo exergético de los flujos.

$$B^* = \begin{bmatrix} B_1^* \\ B_2^* \\ B_3^* \\ B_4^* \\ B_5^* \\ B_6^* \\ B_7^* \\ B_8^* \\ B_9^* \\ B_{10}^* \\ B_{11}^* \\ B_{12}^* \\ B_{13}^* \\ B_{14}^* \\ B_{15}^* \\ B_{16}^* \\ B_{17}^* \\ B_{18}^* \\ B_{19}^* \\ B_{20}^* \\ B_{21}^* \\ B_{22}^* \end{bmatrix}$$

#### 4.4.15. Costo Termoeconómico

Para calcular el costo termoeconómico se procede con el siguiente arreglo matricial. Donde  $C_{(m,1)}$  es el vector de costo y  $Z_{e(m,1)}$  es el vector de análisis externo, se genera de acuerdo con la inversión inicial, el costo de operación y mantenimiento.

$$A_{(m,m)}C_{(m,1)} = Z_{e(m,1)}$$





Al desarrollar el sistema matricial se obtiene el vector de costo, que lo muestra la Tabla 14.

Tabla 14. Vector de costo.

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \\ C_9 \\ C_{10} \\ C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \\ C_{15} \\ C_{16} \\ C_{17} \\ C_{18} \\ C_{19} \\ C_{20} \\ C_{21} \\ C_{22} \end{bmatrix}$$

#### 4.5. Potencia y frio

De los resultados obtenidos, se da prioridad al análisis de los costos de generación de potencia y frio, por ser los productos objetivos del ciclo Goswami. Por lo tanto, se procede al estudio del costo de los flujos.



## 5. Resultados y análisis

### 5.1. Ciclo Goswami

#### 5.1.1. Balance de masa.

El balance de masa del ciclo Goswami está basado en el ciclo mostrado en la Figura 1, el análisis se efectuó en relación con la calidad de la mezcla. La concentración de la solución define la cantidad de amoníaco presente en la mezcla.

Bomba

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$x_1 = x_2$$

Intercambiador de calor

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

$$x_2 = x_3$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$$

$$x_9 = x_{10}$$

Caldera

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$$

- $x_3 = x_4$

•

Rectificador 1

- $\dot{m}_4 = \dot{m}_5 + \dot{m}_6$

La concentración del amoníaco se puede expresar como

$$\dot{m}_a = \dot{m}_m x$$

En el rectificador se realiza un balance de amoníaco

- $\dot{m}_4 x_4 = \dot{m}_5 x_5 + \dot{m}_6 x_6$

Resolviendo para la mezcla que entra al rectificador y el vapor que sale

- $\dot{m}_4 x_4 = \dot{m}_5 x_5 + (\dot{m}_4 - \dot{m}_5) x_6$



Despejando para  $\dot{m}_5$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_4 \left( \frac{x_4 - x_6}{x_5 - x_6} \right)$$

Rectificador 2

- $\dot{m}_5 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8$

Realizando el mismo procedimiento del rectificador 1 y despejando para  $\dot{m}_7$ , se obtiene

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_5 \left( \frac{x_5 - x_8}{x_7 - x_8} \right)$$

Cámara de mezclado

- $\dot{m}_9 = \dot{m}_6 + \dot{m}_8$
- $\dot{m}_9 x_9 = \dot{m}_6 x_6 + \dot{m}_8 x_8$

Válvula de expansión

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$$

$$x_{10} = x_{11}$$

Turbina

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_{12}$$

$$x_7 = x_{12}$$

Evaporador

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13}$$

$$x_{12} = x_{13}$$

Cámara de mezclado

- $\dot{m}_{14} = \dot{m}_{11} + \dot{m}_{13}$
- $\dot{m}_{14} x_{14} = \dot{m}_{11} x_{11} + \dot{m}_{13} x_{13}$

Absorbedor

$$\dot{m}_{14} = \dot{m}_1$$



$$x_{14} = x_1$$

### 5.1.2. Balance de energía

El balance de energía se realizó basado en la figura 1  
Bomba

$$\dot{W}_P = \dot{m}_1(h_2 - h_1)$$

$$\eta_{sp} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

Intercambiador de calor

$$\dot{m}_2(h_3 - h_2) = \dot{m}_9(h_9 - h_{10})$$

Caldera

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_3(h_4 - h_3)$$

Rectificador 1

$$\dot{Q}_{R1} = \dot{m}_4h_4 - \dot{m}_5h_5 - \dot{m}_6h_6$$

Rectificador 2

$$\dot{Q}_{R2} = \dot{m}_5h_5 - \dot{m}_7h_7 - \dot{m}_8h_8$$

Cámara de mezclado

- $\dot{m}_9h_9 = \dot{m}_6h_6 + \dot{m}_8h_8$

•

Válvula de expansión

- $h_{10} = h_{11}$

Turbina

- $\dot{W}_T = \dot{m}_7(h_7 - h_{12})$





$$\eta_{st} = \frac{h_7 - h_{12}}{h_7 - h_{12s}}$$

Evaporador

- $\dot{Q}_E = \dot{m}_{12}(h_{13} - h_{12})$

Cámara de mezclado 2

- $\dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_8 h_8$

Cámara de mezclado 2

- $\dot{m}_{14} h_{14} = \dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{13} h_{13}$

Absorbedor

$$\dot{Q}_A = \dot{m}_1 (h_{14} - h_1)$$

Trabajo neto

- $\dot{W}_n = \dot{W}_t - \dot{W}_p$

Eficiencia térmica

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_n - \dot{Q}_E}{\dot{Q}_b}$$

### 5.1.3. Propiedades termodinámicas de la mezcla zeotrópica

La mezcla amoníaco agua es el fluido de trabajo que se utiliza en el ciclo Goswami, que está formado por un ciclo de refrigeración por absorción y un ciclo Rankine. Las variables termodinámicas relevantes en un sistema de refrigeración por absorción son la presión, la temperatura, la entalpía, la entropía, la fracción másica y el volumen específico. Las propiedades del fluido de trabajo influyen en la capacidad y la eficiencia del ciclo, por lo que la precisión del modelo depende del cálculo apropiado de las propiedades del fluido.



Las propiedades termodinámicas (Tabla 15) se calculan con base en los trabajos planteados por [5] que utilizan estados termodinámicos del fluido de trabajo y establecen propiedades de la mezcla a través de la energía libre de Gibbs.

Tabla 15. Propiedades de la mezcla amoniaco agua [56].

<b>Propiedad</b>	
<b>Refrigerantes</b>	<b>Amoniaco-Agua</b>
Alto calor latente	Bueno
Presión de vapor moderado	Muy alto
Baja temperatura de congelación	Excelente
Baja viscosidad	Bueno
<b>Absorbente</b>	
Baja presión de vapor	Pobre
Baja viscosidad	Bueno
<b>Mezcla</b>	
Sin fase solida	Excelente
Baja toxicidad	Pobre
Alta afinidad entre el refrigerante y el absorbente	Bueno

#### 5.1.4. Temperatura de estudio

Para el estudio se realizó la selección de las temperaturas características que se muestran en la Tabla 16, estas representan las temperaturas promedio, en las zonas climáticas evaluadas

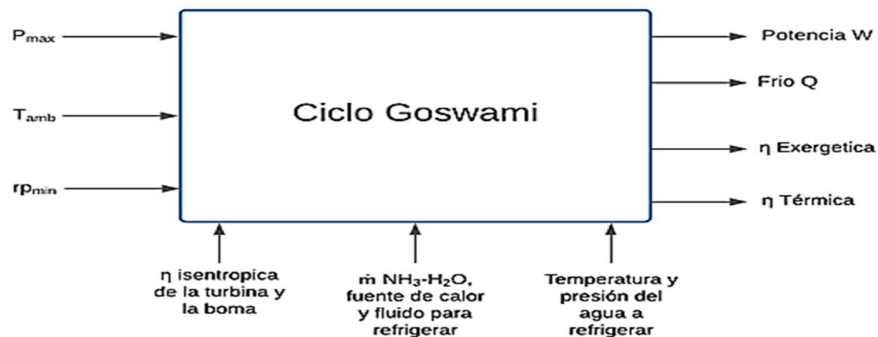
Tabla 16. Climas y temperaturas seleccionadas para el estudio.

Clima	Temperatura [°C]
Cálido	32
Templado	21
Frio	15
Muy frio	9
Extremadamente frio	4

#### 5.1.5. Desarrollo de la simulación del ciclo

Para llevar a cabo la simulación, se procede al estudio de las generalidades del ciclo Goswami, así como sus características y componentes. A continuación, se desarrolla la programación en el software matemático MATLAB (Esquema 1). Debido a que el fluido de trabajo no es una sustancia simple, se requieren tres propiedades intensivas independientes para su estudio.

Esquema 1. Simulación del ciclo Goswami



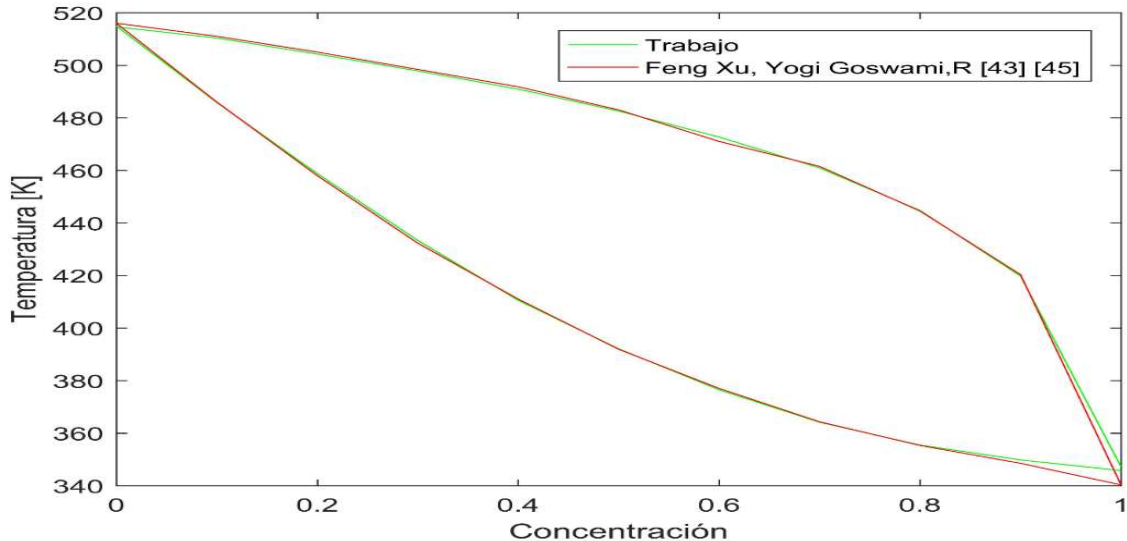


Para el cálculo de las propiedades se utiliza las ecuaciones y relaciones demostrada en el trabajo de referencia [57]. Las ecuaciones de energía libre de Gibbs se emplean para calcular las propiedades del agua y del amoníaco puro, y ecuaciones empíricas para la fase de mezcla. La combinación de estos métodos proporciona soluciones aceptables y rápidas. Para el cálculo de las propiedades de los fluidos de calentamiento (Agua) y fluido a refrigerar (Aire) se utiliza la librería Coolprop [58].

### 5.1.6. Comprobación del ciclo

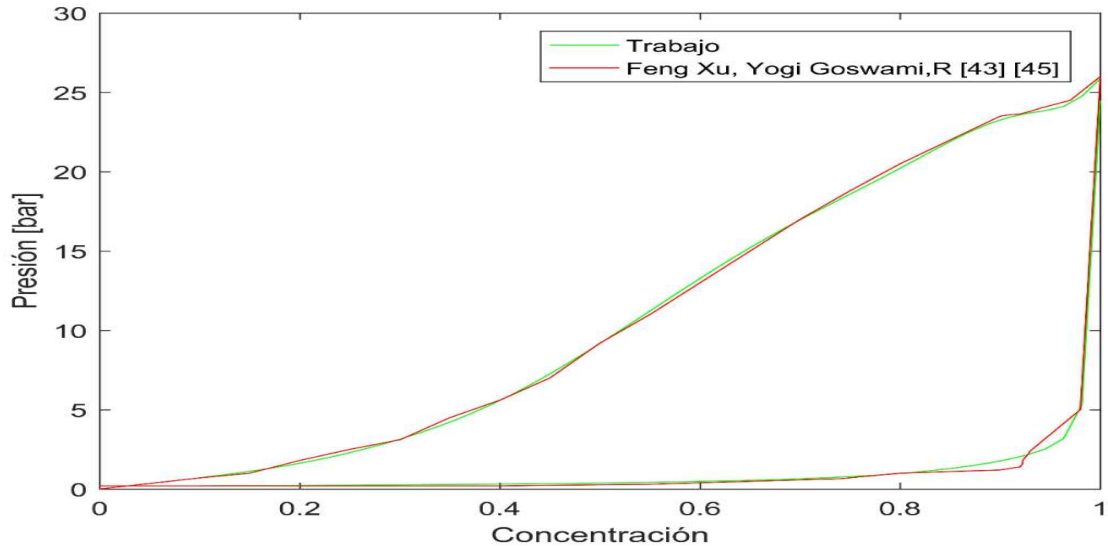
Para la comprobación de la programación, se llevó a cabo una verificación de las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo (Mezcla Amoníaco – Agua), de acuerdo a lo descrito por [57][59]. En las Gráfica 5 y Gráfica 6 se muestra una comparación entre las curvas que limitan las zonas donde el ciclo puede operar, lo que muestra la similitud con la propuesta por los autores mencionados como referencia. Estas gráficas son de fuente propia.

Gráfica 5. Temperatura de evaporación y condensación Amoníaco – Agua.





Gráfica 6. Presión de evaporación y condensación Amoniaco – Agua.



### 5.1.7. Comportamiento del ciclo

Se lleva a cabo la simulación del ciclo Goswami con los parámetros de funcionamiento mostrada en la Tabla 17, obteniendo las respuestas de las variables de estudio Potencia, frío, eficiencia térmica y eficiencia exergética, en los gráficos que se muestran a continuación.

Tabla 17. Condiciones de funcionamiento iniciales.

Temperatura ambiente [°C]	rp mínima	Presión Máxima [bar]
32	1,01	100
21	1,01	100
15	1,01	100
9	1,01	100
4	1,01	100

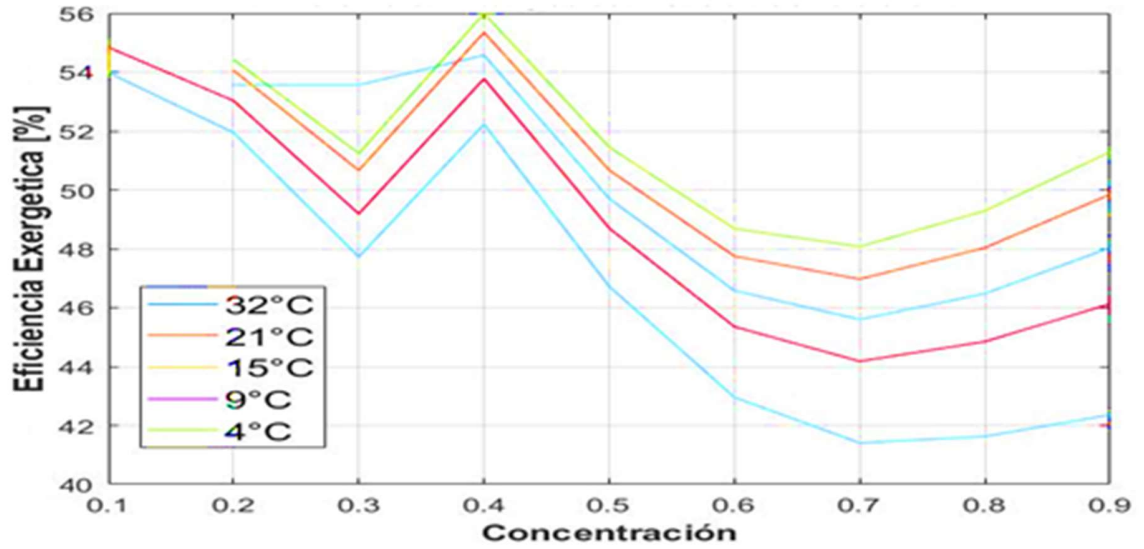


En la **Gráfica 7** se muestra un comportamiento similar de las curvas, la eficiencia exergética se mantiene en un intervalo de entre el 40% y el 56%, se observa una tendencia en la que, a mayor temperatura ambiental, menor eficiencia exergética. Las temperaturas 4 [°C], 9 [°C] y 15[°C] muestran su máxima eficiencia exergética en la concentración de 0,4, con máximos de 55,9%, 55,3% y 54,5% respectivamente. Por su parte, las temperaturas de 21 [°C] y 32[°C] tienen la máxima eficiencia exergética en la concentración de 0,1, con máximos de 54,8% y 53,9%, respectivamente. La máxima eficiencia exergética de toda la simulación es de 55,9% y se encuentra a una temperatura de 4 [°C] y concentración de 0,4, tal como se muestra en la

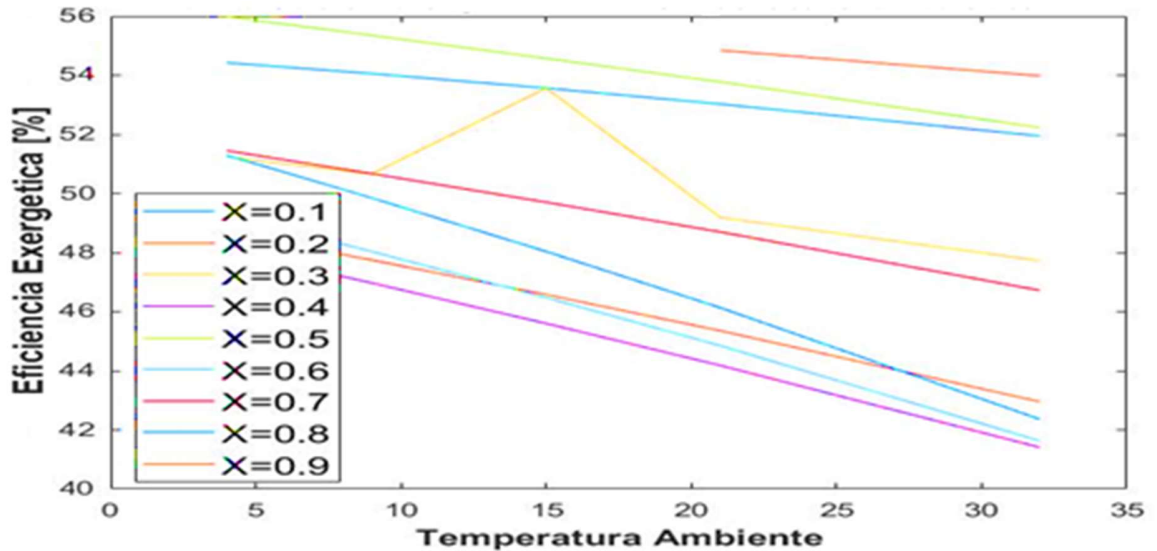


Gráfica 8.

Gráfica 7. Eficiencia exergetica Vs concentración.



Gráfica 8. Eficiencia exergetica Vs Temperatura ambiente.

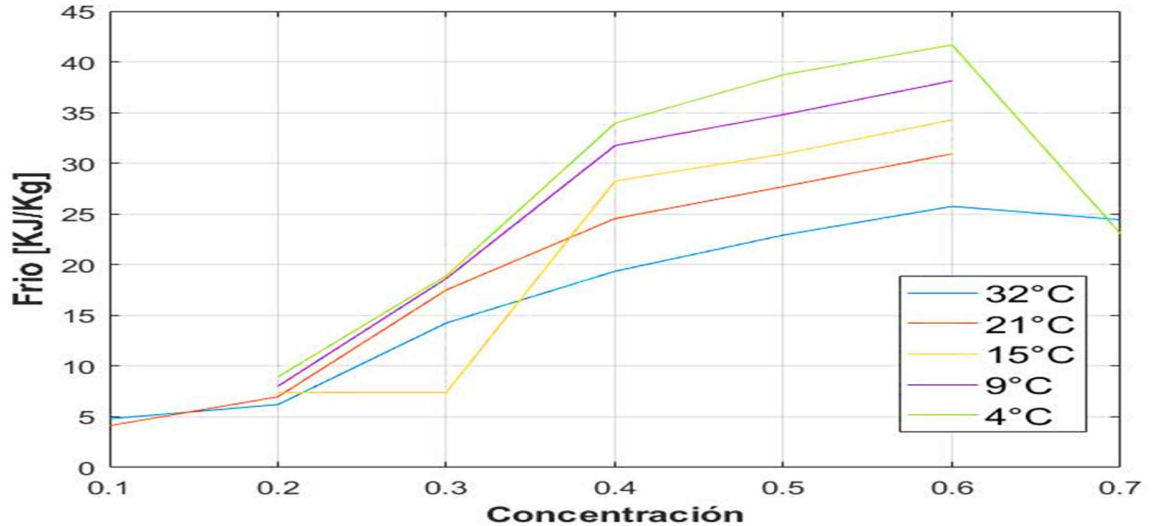


En las Gráfica 10 se observa que las curvas presentan un comportamiento similar en la zona de concentración de 0,2 a 0,6. Además, se aprecia que a medida que aumenta la temperatura ambiente, la capacidad de cogeneración disminuye, tal como lo muestra la Gráfica 9. En cuanto a la producción de frío, se alcanza la mayor producción a una temperatura ambiente de 4 [°C], la cual domina en todo el rango y presenta un punto máximo en la concentración de 0,6 de 41,6 [KJ/Kg]. Este punto también representa el lugar donde se genera mayor refrigeración en toda la simulación. Por su parte, las temperaturas de 9 [°C], 15 [°C], 21 [°C] y 32[°C] presentan máximos de producción de frío de 38,12 [KJ/Kg], 34,28 [KJ/Kg], 30,93 [KJ/Kg] y 25,75 [KJ/Kg] respectivamente, para la misma concentración.

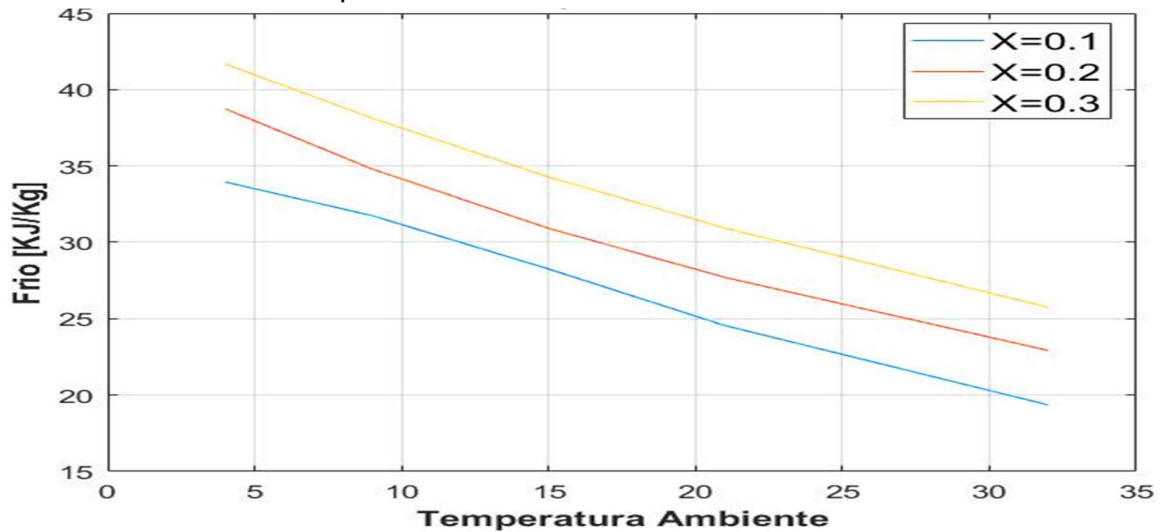




Gráfica 9. Frio Vs concentración.



Gráfica 10. Frio Vs Temperatura Ambiente.

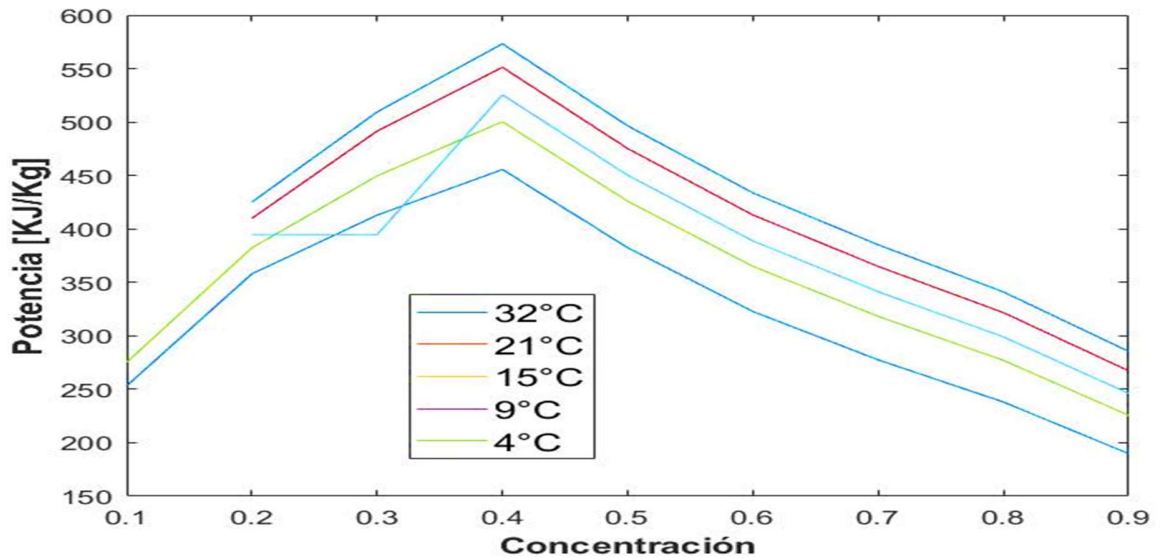


Las Gráfica 11 y Gráfica 12 indican que la generación de potencia disminuye a medida que aumenta la temperatura ambiente. En ambos casos, se observa que el punto de mayor generación de potencia ocurre a la concentración de 0,4. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede notar que la temperatura ambiente de 4 [°C] genera la máxima potencia, con un pico de 573,2 KJ/Kg. Para las temperaturas de 9 [°C], 15 [°C], 21 [°C] y 32 [°C], se registran



máximos de producción de 551,2 [KJ/Kg], 525,4 [KJ/Kg], 500,32 [KJ/Kg] y 455,5 [KJ/Kg], respectivamente. Por otro lado, se alcanza la mínima producción de potencia con una calidad de 0,9 para todas las temperaturas.

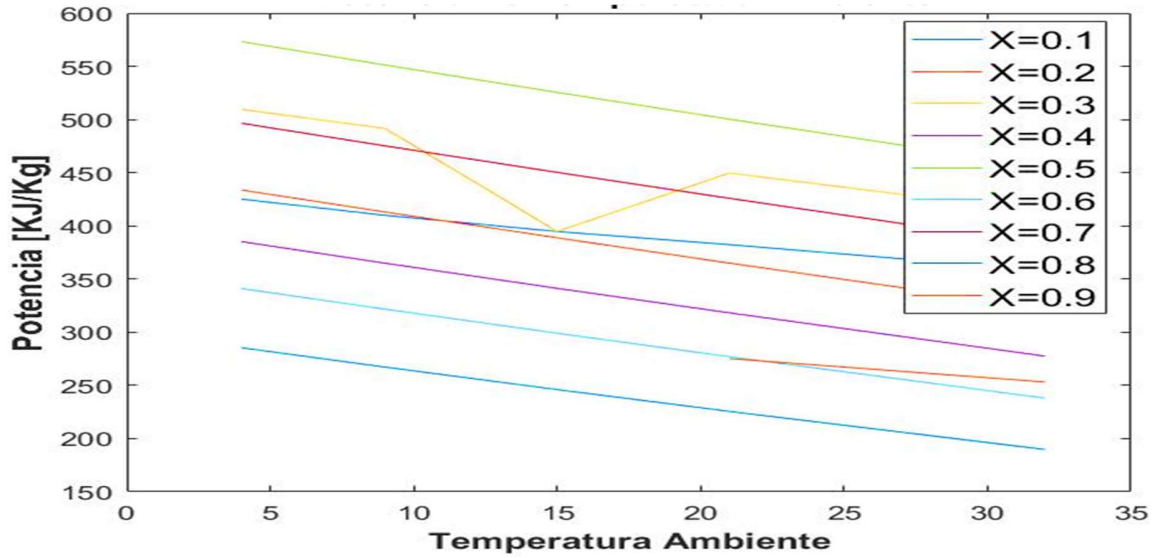
Gráfica 11. Potencia Vs Concentración.



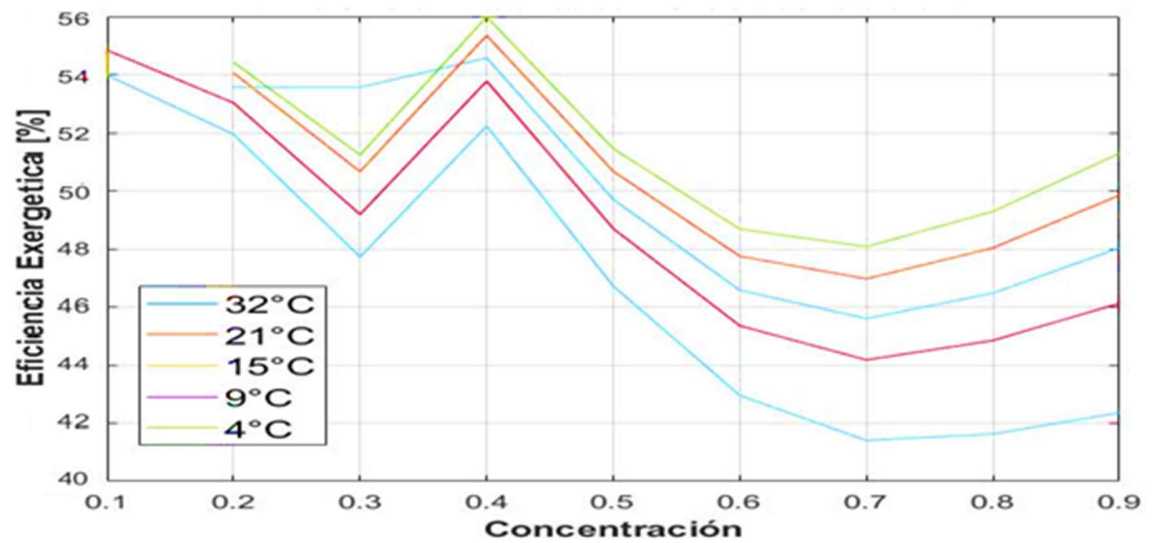
Las Gráfica 13 y Gráfica 14 muestran que la temperatura ambiente que genera la mayor eficiencia térmica es de 4 [°C], con un máximo de 25% a una concentración de 0,2 (Gráfica 13). Dentro del rango de temperatura de 4 [°C] a 15 [°C], la concentración de 0,2 genera eficiencias de 25,1% y 24,2%, respectivamente. Por otro lado, las temperaturas de 21 [°C] y 32 [°C] generan eficiencias máximas de 24,5% y 23%, respectivamente, con una concentración de 0,1. Se puede notar que la tendencia es la misma en ambas gráficas, la eficiencia disminuye al aumentar la temperatura ambiente.



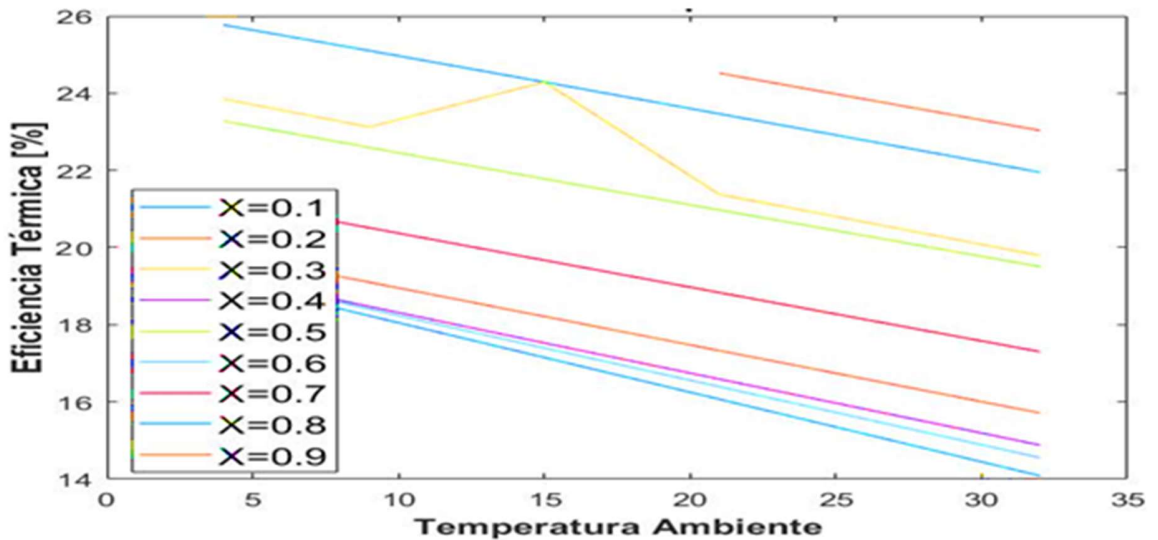
Gráfica 12. Potencia Vs Temperatura Ambiente.



Gráfica 13. Eficiencia exergética Vs Concentración.



Gráfica 14. Eficiencia térmica Vs Temperatura ambiente.



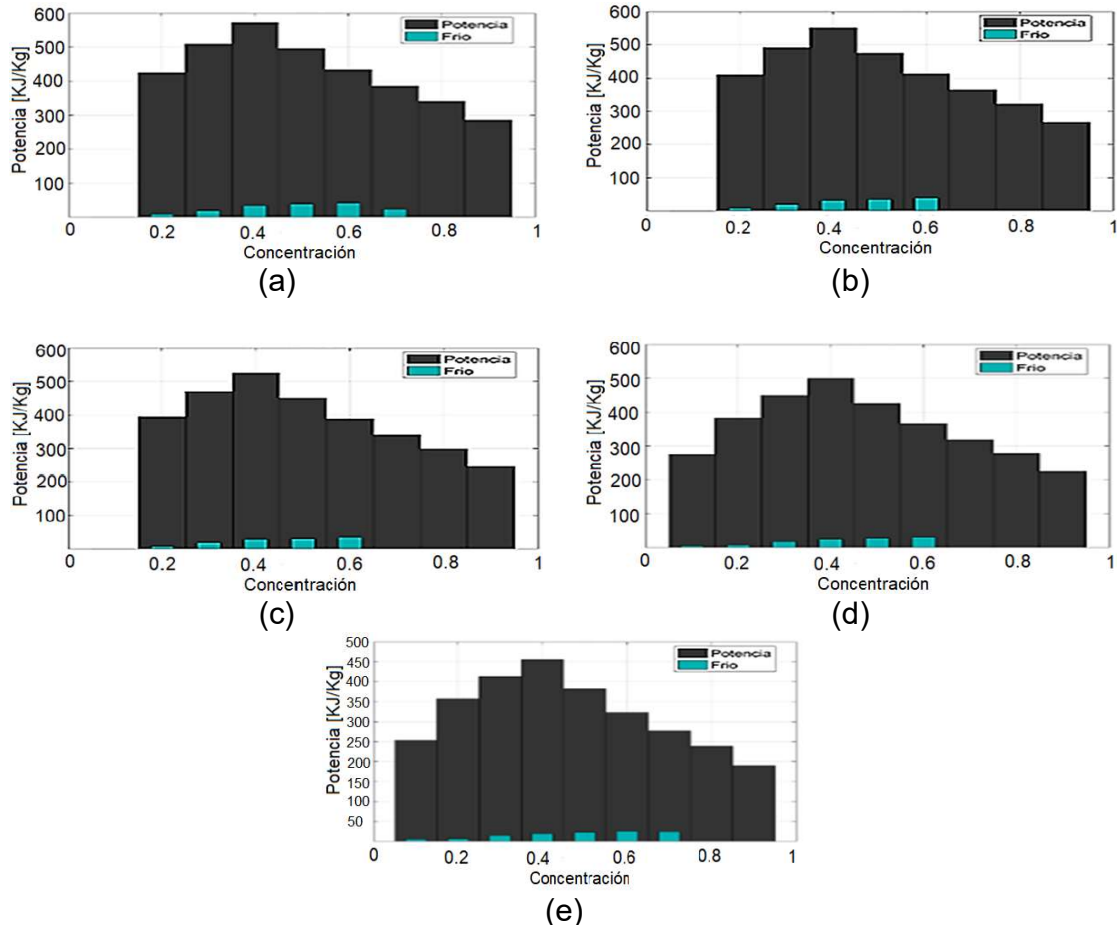
#### 5.1.8. Análisis: Máximos puntos de producción de las variables de estudio.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (a) correspondiente a la temperatura ambiente de 4 [°C], se puede apreciar que la generación de potencia máxima se produce con una concentración de 0,4, mientras que la concentración de 0,1, genera la máxima producción de frío. Por otro lado, en la Gráfica 16 (f) se puede observar que se alcanza la máxima eficiencia exergética y térmica a una concentración de 0,2 y 0,4, respectivamente. Además, la concentración 0,9 genera la mínima eficiencia exergética, mientras que la de 0,7 produce la mínima eficiencia térmica.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (b) se puede observar que la concentración de 0,1 no produce cogeneración. La concentración de 0,4 genera la mayor producción de potencia y la concentración de 0,6 la mayor producción de frío. La Gráfica 16 (g), muestra que, para la temperatura de 9[°C], la concentración de 0,4 produce la máxima eficiencia exergética y la concentración de 0,2 produce la mayor eficiencia térmica.



Gráfica 15 Potencia - Frio Vs Concentración.



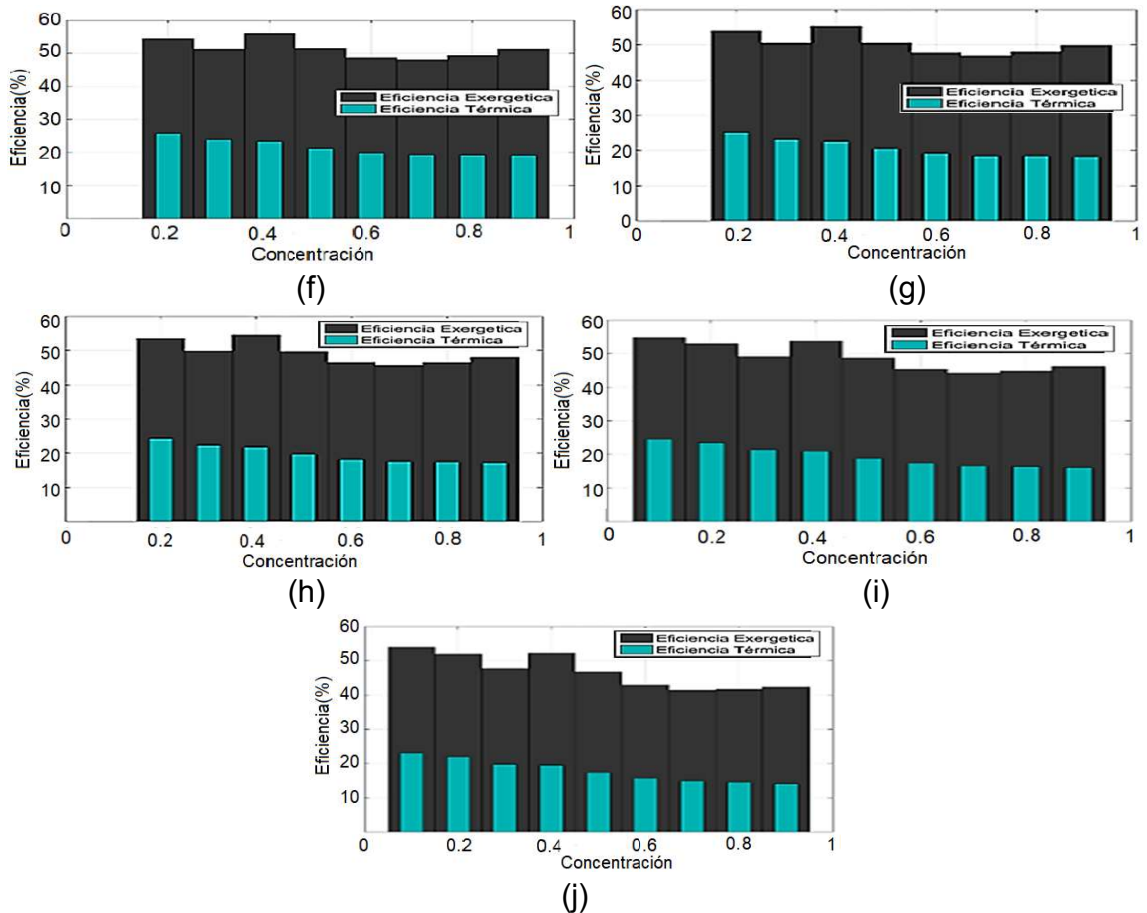
Potencia y frio en kJ/kg, (a)  $T_{amb} = 4[^\circ\text{C}]$ ; (b)  $T_{amb} = 9[^\circ\text{C}]$ ; (c)  $T_{amb} = 15[^\circ\text{C}]$ ; (d)  $T_{amb} = 21[^\circ\text{C}]$ ; (e)  $T_{amb} = 32[^\circ\text{C}]$

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (c) presenta las concentraciones de 0,4 y 0,6, como las que generan la máxima potencia y enfriamiento, respectivamente, a una temperatura de  $15[^\circ\text{C}]$ . En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (d) se muestra que la concentración de 0,4, produce la máxima potencia y la concentración de 0,6 genera el mayor enfriamiento a una temperatura de  $21[^\circ\text{C}]$ . En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (e), se expone que las concentraciones de 0,4 y 0,7, generan la máxima potencia y enfriamiento a una temperatura de  $32[^\circ\text{C}]$ , respectivamente. La mínima generación de potencia y frio se obtiene con una concentración de 0,9.



La Gráfica 16 (h), (i) y (j) presentan el mismo comportamiento, pero con la adición de la eficiencia para la concentración de 0,1 a las temperaturas de 21[°C] y 32[°C]. La concentración de 0,4 produce la mayor eficiencia exergética a una temperatura de 15[°C], mientras que la concentración de 0,1, produce la mayor eficiencia exergética a las temperaturas de 21[°C] y 32[°C]. En cuanto a la eficiencia térmica, la concentración de 0,2 genera la máxima eficiencia a una temperatura de 15[°C], mientras que la calidad de 0,1 produce la máxima eficiencia térmica a las temperaturas de 21[°C] y 32[°C]. Por otro lado, las concentraciones de 0,7 y 0,8 producen la menor eficiencia exergética y térmica, respectivamente, para las temperaturas en mención.

Gráfica 16 Eficiencia – concentración

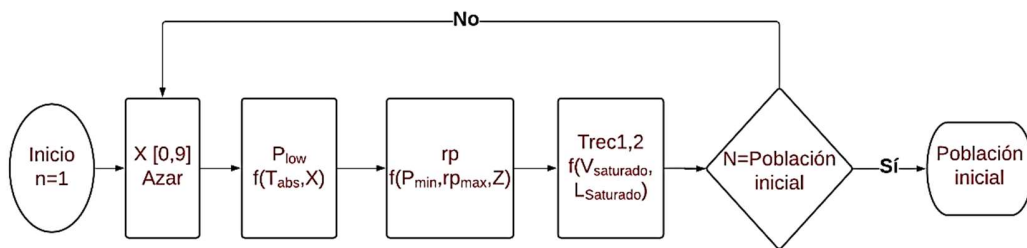


Eficiencia exergética y térmica en %, (f)  $T_{amb} = 4[^\circ\text{C}]$ ; (g)  $T_{amb} = 9[^\circ\text{C}]$ ; (h)  $T_{amb} = 15[^\circ\text{C}]$ ; (i)  $T_{amb} = 21[^\circ\text{C}]$ ; (j)  $T_{amb} = 32[^\circ\text{C}]$

## 5.2. Criterio de optimización.

El algoritmo genético crea un vector con una población inicial al azar de los siguientes parámetros (Esquema 2): temperatura en el rectificador 1, temperatura en el rectificador 2, calidad de la mezcla, presión de baja y relación de presión. La calidad de la mezcla de amoníaco agua, es un número al azar entre 0,1 y 0,9, que representa el rango real de la concentración. La presión de baja está en función de la temperatura del absorbedor y la calidad de la mezcla amoníaco agua, mientras que la temperatura del absorbedor se toma como  $10^\circ\text{C}$  superior a la temperatura ambiente, que es proporcionada previamente.

Esquema 2. Generación población inicial.



La presión máxima del sistema es de 100 bares. Debido a esto, se puede obtener la relación de presión máxima ( $rp_{max}$ ), dividiendo la presión máxima entre la presión mínima, que es de 1,01 bares. El valor de la relación de presión ( $rp$ ) se calcula al azar en función de la presión mínima, un número al azar en el rango de  $[0,1]$  que se simboliza como  $Z$  y la relación de presión máxima, como lo muestra la Ecuación 25.

$$rp = 1.01 + Z(rp_{max} - 1.01)$$

Ecuación 25

Las temperaturas del rectificador 1 y del rectificador 2 se seleccionan al azar dentro de la región limitadas por las curvas de vapor y líquido saturados de la mezcla amoníaco – agua. en esta región cualquier temperatura garantiza el correcto



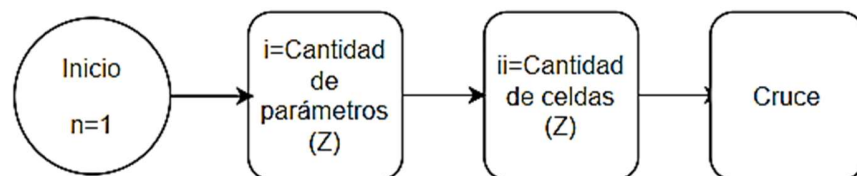
funcionamiento de los rectificadores. Estas operaciones se repiten hasta alcanzar el tamaño de la población inicial, que en esta investigación es de 30 (Esquema 3).

Esquema 3. Generación del vector población.



En el algoritmo genético, el cruce (Esquema 4) se produce seleccionando al azar el número de propiedades a cambiar y los números de parámetros correspondiente. La mutación (Esquema 5) se produce generando nuevos valores de parámetros seleccionados al azar. La cantidad de parámetros a cambiar también es determinada por el algoritmo y los nuevos valores se generan dentro de los rangos de operación permitidos. Finalmente, se genera una nueva población, completando así el vector población. La aleatoriedad asegura que la población generada cubra un mayor espacio de búsqueda de parámetros de entrada, lo que permite obtener una muestra de toda la región de generación.

Esquema 4. Cruce del vector población.



Esquema 5. Mutación del vector población.

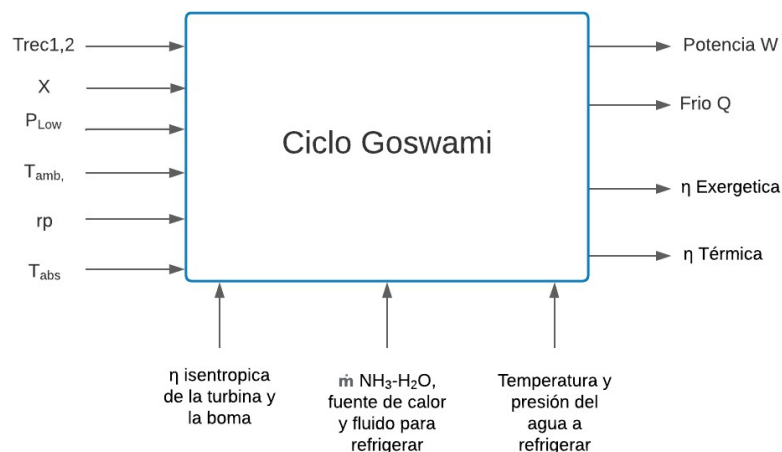




### 5.2.1. Puntos de generación

Una vez que el algoritmo genético haya generado el vector de población, los vectores resultantes son evaluados en la simulación del ciclo Goswami, donde se da como respuesta un vector objetivo (Esquema 6) con los siguientes parámetros: potencia, frío, eficiencia térmica y exergética (como lo muestra el esquema 4). Estos puntos de generación obtenidos representan posibles puntos máximos de generación, los cuales pueden ser utilizados para satisfacer una necesidad en particular, como puede ser el máximo aprovechamiento de los recursos disponibles (mayor eficiencia), o la máxima generación de potencia o frío.

Esquema 6 Generación de vectores objetivos.



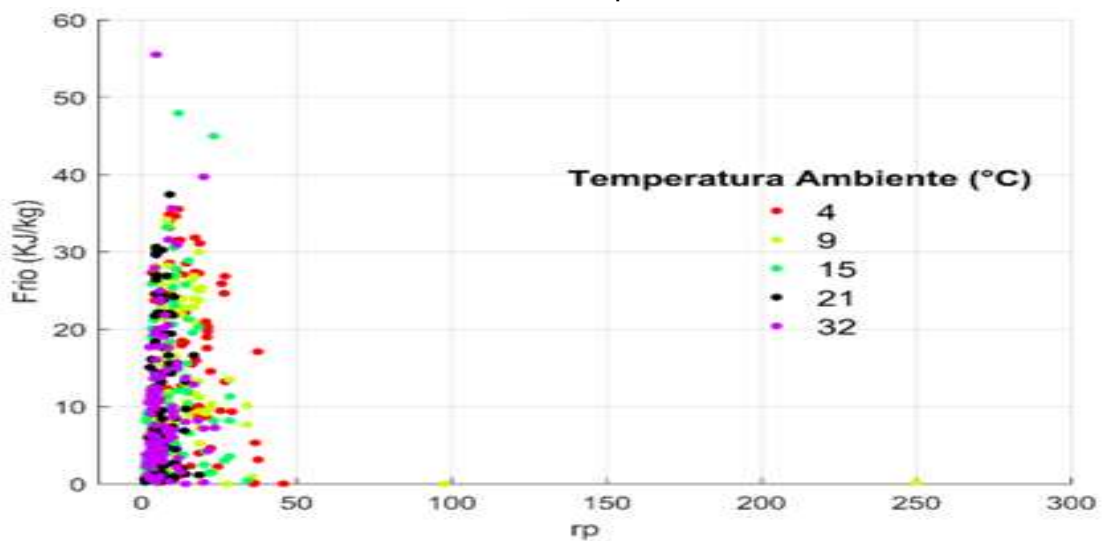
### 5.2.2. Estrategia de optimización.

La estrategia de optimización se fundamentó en el principio del óptimo de Pareto para múltiples objetivos, donde todas las soluciones son aceptables, pero la mejor es la que se acerca más a una condición ya establecida. Para ello, se desarrolla un programa en el software MATLAB que elige condiciones superiores a otras, lo que descarta soluciones donde se mejora una condición, pero se empeoraba otra.

En la Gráfica 17, se presentan los puntos óptimos de generación de frío con relación a las diferentes temperaturas ambientales. Los datos demuestran una tendencia de

generación entre  $r_p$  de 1,01 y 50, lo cual se identifica como el rango de mejor comportamiento para generar condiciones de trabajo. Cabe destacar que la temperatura donde se produce el máximo frío es a  $32[^\circ\text{C}]$ , con un valor de  $55,5 [KJ/Kg]$ , y en ese punto se obtiene una eficiencia la eficiencia térmica y exergética son  $7\%$  y  $26\%$  respectivamente, mientras que la potencia tiene un valor de  $85,56 [KJ/Kg]$ . Este punto de generación se podría utilizar para satisfacer una necesidad de frío, pero es importante tener en cuenta una revisión de la normativa ambiental y legal correspondiente para el funcionamiento de los equipos. Además, las otras temperaturas ambientales de estudio con mayor generación de frío, en su orden son  $15[^\circ\text{C}]$ ,  $21[^\circ\text{C}]$ ,  $4[^\circ\text{C}]$  y  $9[^\circ\text{C}]$ . En particular, a una temperatura de  $15[^\circ\text{C}]$ , se encuentra el punto de mayor eficiencia exergética con un valor de  $243,48 [KJ/Kg]$ ,  $0,1583 [KJ/Kg]$  y  $4,42\%$  respectivamente. Este punto es el que genera la mayor potencia.

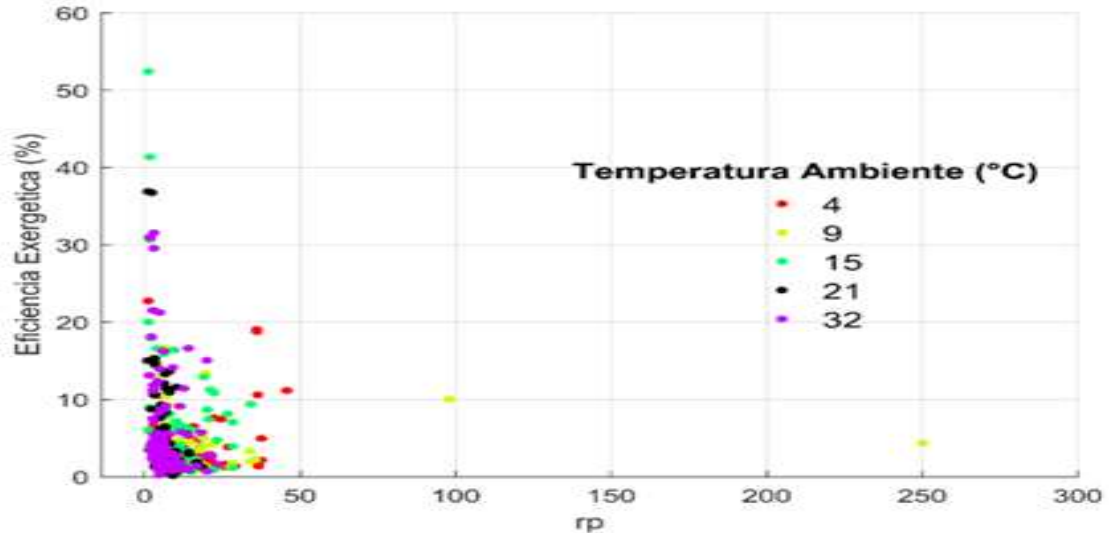
Gráfica 17. Generación de frío a diferente temperatura ambiente



La Gráfica 18 proporciona información acerca de la eficiencia exergética en relación a las diversas temperaturas del estudio. Los resultados indican que la máxima eficiencia exergética se alcanza a una temperatura ambiente de  $15[^\circ\text{C}]$  se alcanza la máxima eficiencia exergética, con un valor de  $53\%$ . Además, las temperaturas de  $21[^\circ\text{C}]$  y  $32[^\circ\text{C}]$  siguen en ese orden en términos de eficiencia exergética. La tendencia se mantiene sobre el rango de relación de presión donde el ciclo genera productos objetivos.



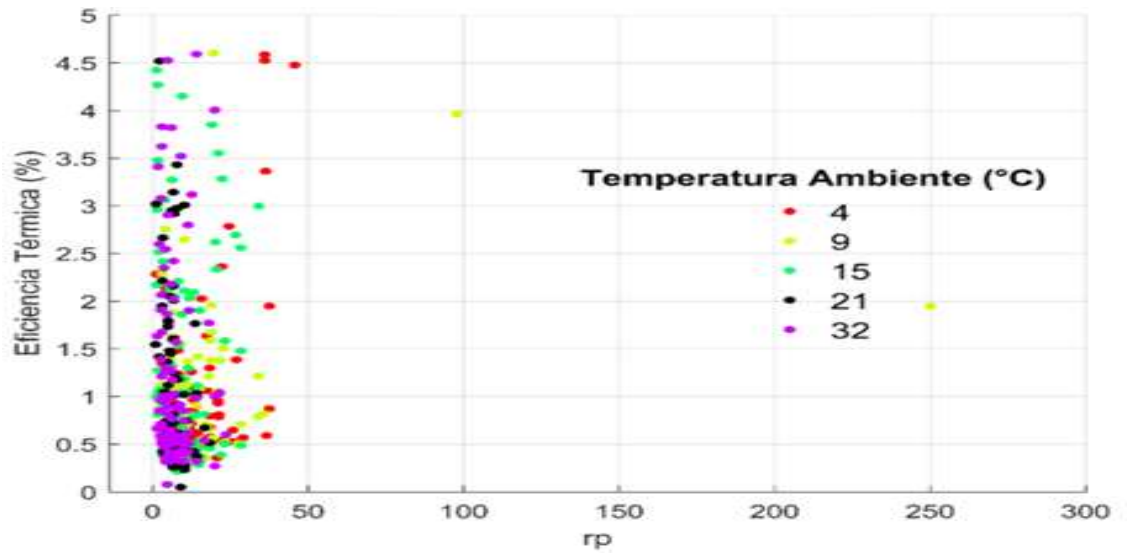
Gráfica 18. Eficiencia exergética a diferente temperatura ambiente.



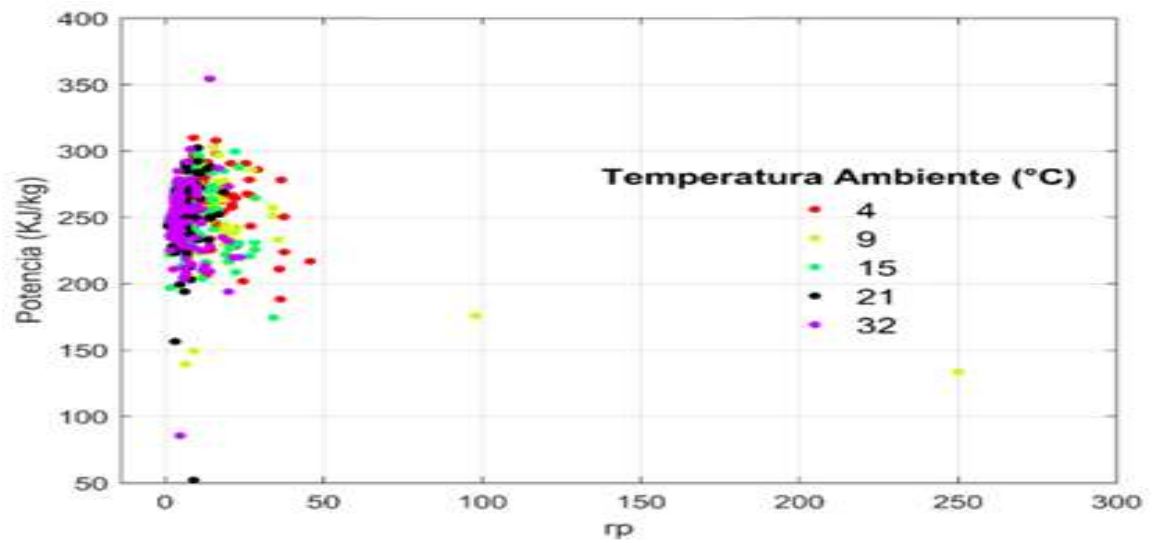
La Gráfica 19 presenta información acerca de la eficiencia térmica con relación a las diversas temperaturas del estudio. En este sentido, los resultados indican que la mayor eficiencia térmica se obtuvo a una temperatura de 9[°C], con un valor de 4,6%. Además, en este punto, se generan valores de potencia, frío y eficiencia exergética de 216 [KJ/Kg], 0,1221 [KJ/Kg] y 13,38% respectivamente. Es importante destacar que, en orden de mejor eficiencia térmica, le siguen las temperaturas de 32[°C], 4[°C], 21[°C] y 15[°C],. además. se mantiene la tendencia que el rango donde se ubican los puntos de generación esta entre 1,01 rp y 50 rp.

La Gráfica 20 presenta información acerca de la generación de potencia en relación con las diversas temperaturas del estudio. Los datos indican que la mayor generación de potencia se obtuvo a una temperatura de 32[°C], con un valor de 352,27 [KJ/Kg]. Además, en este punto de generan valores de frío, eficiencia exergética y térmica de 8 [KJ/Kg], 0,3218% y 5,3%, respectivamente. Las temperaturas con los siguientes puntos de generación fueron 4[°C], 9[°C], 21[°C] y, 15[°C],, en ese orden.

Gráfica 19. Eficiencia térmica a diferente temperatura ambiente.



Gráfica 20. Generación de potencia a diferente temperatura ambiente.

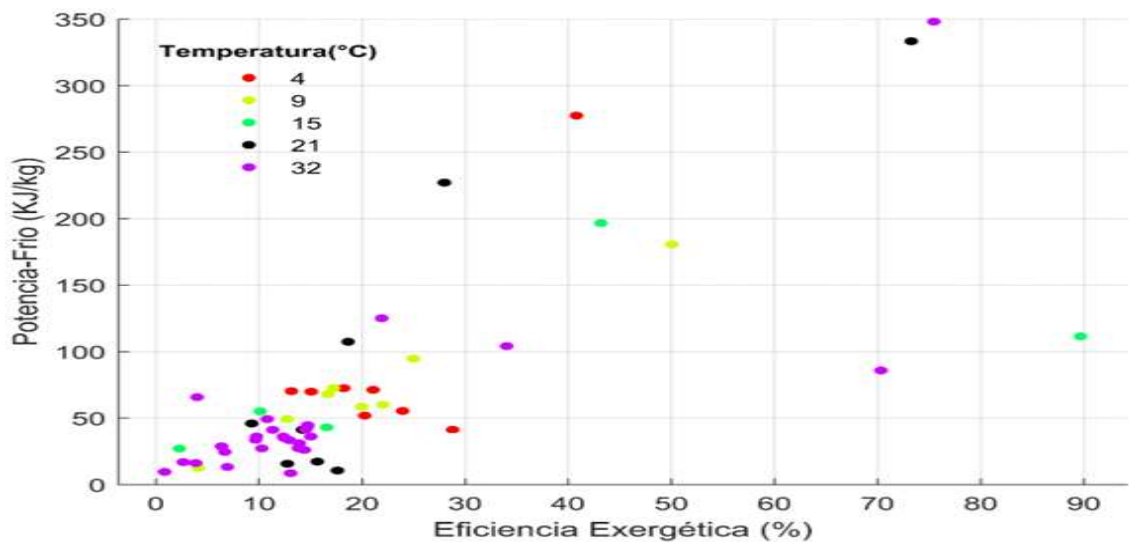


### Análisis; Puntos óptimos de generación.

Para obtener vectores que maximicen los productos objetivos, se aplica una estrategia de filtro, que consiste en descartar los vectores donde por lo menos un parámetro es cero o menor a cero. Como resultado, se obtienen los puntos de generación que se muestran en la Gráfica 21 y Gráfica 22, los cuales cumplen con las condiciones de funcionamiento que puede satisfacer un escenario propuesto. La Gráfica 21 presenta los puntos de generación en función de los productos objetivos Potencia – Frio Vs Eficiencia exergética y muestra todos los puntos de generación para las temperaturas en estudio. Los valores de los productos objetivos potencia – frio alcanzan un máximo valor de producción de  $348 [Kj/Kg]$  a una temperatura de  $32[°C]$ , mientras que la máxima eficiencia exergética se logra a una temperatura de  $15[°C]$  con un valor del 90%.

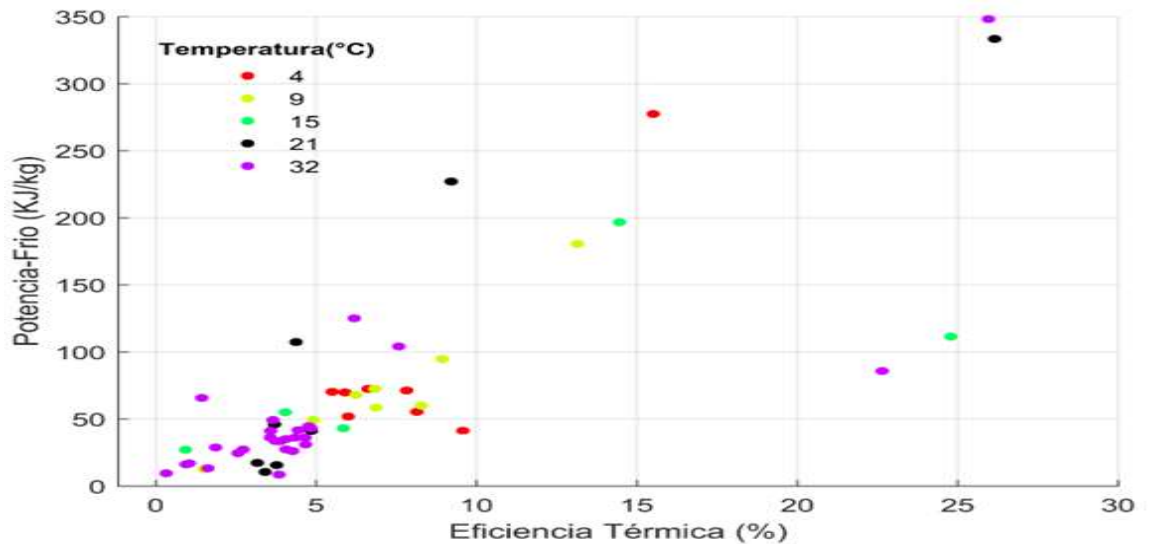
Por otro lado, Gráfica 22 muestra los puntos de generación en función de los productos objetivos Potencia – Frio Vs eficiencia térmica, en un rango de 0% a 45%. Los valores máximos de eficiencia térmica y de producto objetivos son 43,83% y  $333,33 [Kj/Kg]$  respectivamente, a la temperatura de  $21[°C]$ .

Gráfica 21. Potencia-Frio-Vs--eficiencia exergética diferentes temperaturas ambientales.





Gráfica 22. Potencia-Frío Vs--eficiencia térmica diferentes temperaturas ambientales.



## 5.3 Costos

### 5.3.1 Costo exergético

La relación entre los componentes del sistema del ciclo Goswami se expresa mediante tres matrices: la matriz incidencia  $A_{(n,m)}$ , la matriz de costo  $\alpha_{e(e,m)}$  y de bifurcaciones  $\alpha_{x(m-n-e,m)}$ . Estas matrices se representan en la Tabla 19. Matriz extendida.. Para completar el sistema de ecuaciones, se aplican las preposiciones de asignación de costo de la 2 a la 4, las cuales se encuentran en la Tabla 18. El vector extendido se muestra en la Tabla 20 que relaciona las entradas necesarias para el funcionamiento del ciclo. Para el ciclo Goswami la única entrada de energía útil, es el calor de los colectores solares, el cual se transporta por el fluido en la caldera.

Una vez establecidos todos los datos, se procede a realizar la operación matricial que describe la Ecuación 23 Costo exergético de flujo. Los resultados obtenidos para cada una de las temperaturas en las Gráfica 23 a la Gráfica 26. Además de las tablas del anexo 1 (a-d).

Tabla 18. Ecuaciones adicionales

#		Ecuaciones
12		$\dot{Q}_{absorbedor}$
13	$\alpha_e$	$\dot{Q}_{rectificador1}$
14		$\dot{Q}_{rectificador2}$
15		• $\dot{B}_{3hs} = B_{3hs}$
16		• $K_{3hs}^* = K_{4hs}^* \quad B_{3hs}^*/B_{3hs} = B_{4hs}^*/B_{4hs} \quad x_{3hs/4hs} = B_{3hs}/B_{4hs}$
17		• $K_{12cw}^* = K_{13cw}^* \quad B_{12cw}^*/B_{12cw} = B_{13cw}^*/B_{13cw} \quad x_{12cw/13cw} =$ $B_{12cw}/B_{13cw}$
18	• $\alpha_X$	• $K_{(4-5)}^* = K_{(4-6)}^* \quad B_{(4-5)}^*/B_{(4-5)} = B_{(4-6)}^*/B_{(4-6)} \quad x_{(4-5)/(4-6)} =$ $B_{(4-5)}/B_{(4-6)}$
19		$K_{(5-7)}^* = K_{(5-8)}^* \quad B_{(5-7)}^*/B_{(5-7)} = B_{(5-8)}^*/B_{(5-8)} \quad x_{(5-7)/(5-8)} = B_{(5-7)}/B_{(5-8)}$
20		$K_{7}^* = K_{12}^* \quad B_{7}^*/B_{7} = B_{12}^*/B_{12} \quad x_{7/12} = B_{7}/B_{12}$
21		$K_{10}^* = K_{11}^* \quad B_{10}^*/B_{10} = B_{11}^*/B_{11} \quad x_{10/11} = B_{10}/B_{11}$
22		$K_{12}^* = K_{13}^* \quad B_{12}^*/B_{12} = B_{13}^*/B_{13} \quad x_{12/13} = B_{12}/B_{13}$

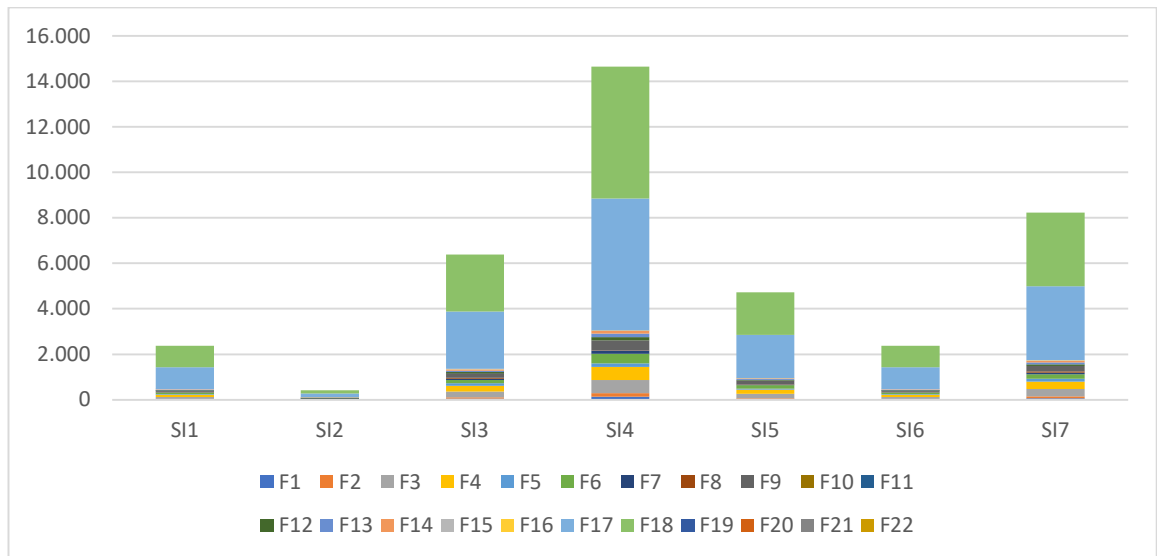
Tabla 19. Matriz extendida.

	Equipos	Flujos																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	3hs	4hs	12cw	13cw	Wt	Qa	Qr1	Qr2	
A	BOMBA	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	IC	0	1	-1	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	GENERADOR	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	
	RECTIFICADOR 1	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
	RECTIFICADOR 2	0	0	0	0	1	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
	TURBINA	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
	EVAPORADOR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0
	ABSORBEDOR	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
	MEZCLADOR 1	0	0	0	0	0	1	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MEZCLADOR 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
αe	VALV. DE EXPANSIÓN	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Qa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	
	Qr1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	
	Qr2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	
αx	B3hs	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	k3hs=k4hs	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	X3hs/4hs	0	0	0	0	0	0	0	
	k12cw=k13cw	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	X12cw/13cw	0	0	0	0	
	k(4-5)=k(4-6)	0	0	0	0	-1	X5/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	k(5-7)=k(5-8)	0	0	0	0	0	0	-1	X7/8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	k7=k12	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	X7/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
k10=k11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	X10/11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
k12=k13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	X12/13	0	0	0	0	0	0	0	0	0		





Gráfica 23. Costo exergético [ $TJ/Kg$ ] temperatura ambiente  $4[^\circ C]$ .

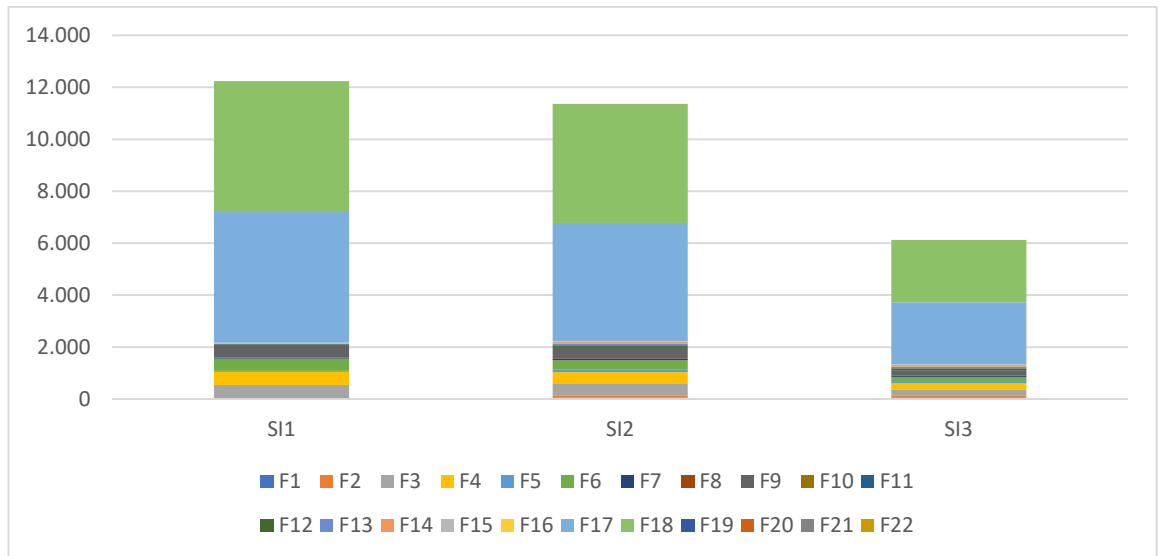


Donde SI es la abreviación de simulación y F es la abreviación de Flujo.

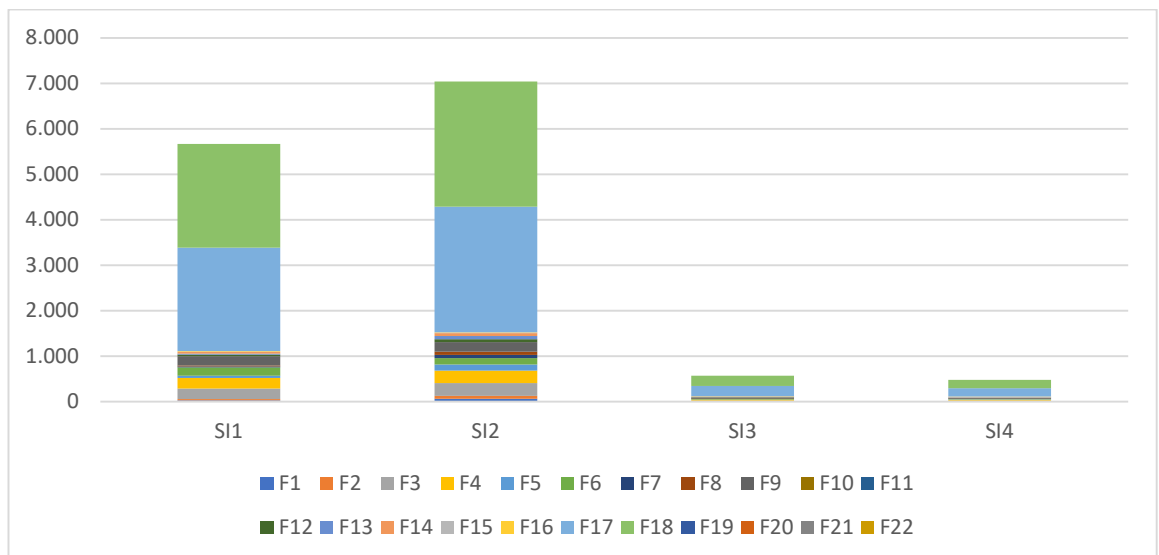
Lo Gráfica 23 muestra que a una temperatura ambiente de  $4[^\circ C]$ , la simulación SI2 obtuvo el menor costo exergético con un valor de  $418,95 [TJ/Kg]$ , seguida por la simulación SI 1 y SI 6, que registraron un costo exergético idéntico de  $942,30 [TJ/Kg]$ . La simulación SI 4 presentó el mayor costo exergético con un valor total de  $5.792,11 [TJ/Kg]$ . En cuanto a la temperatura ambiente de  $9[^\circ C]$  (Gráfica 24), la simulación SI 3 registro el menor costo exergético con un valor total de  $2.402,20 [TJ/Kg]$ , mientras que la simulación SI 1 presento el costo exergético más alto con un valor  $5.038,60 [TJ/Kg]$ .

En la temperatura de  $15[^\circ C]$  (Gráfica 25), la simulación SI 4 obtuvo el mínimo costo exergético con un valor de  $180,50 [TJ/Kg]$ , mientras que el costo exergético máximo fue de  $2.758,86 [TJ/Kg]$ . Por último, en la temperatura ambiente de  $32[^\circ C]$  (Gráfica 26) las simulaciones SI 13 y SI 7 presentaron el costo exergético mínimo y máximo, respectivamente, con un valor de  $1.507 [TJ/Kg]$  y  $7.901,39 [TJ/Kg]$ , respectivamente.

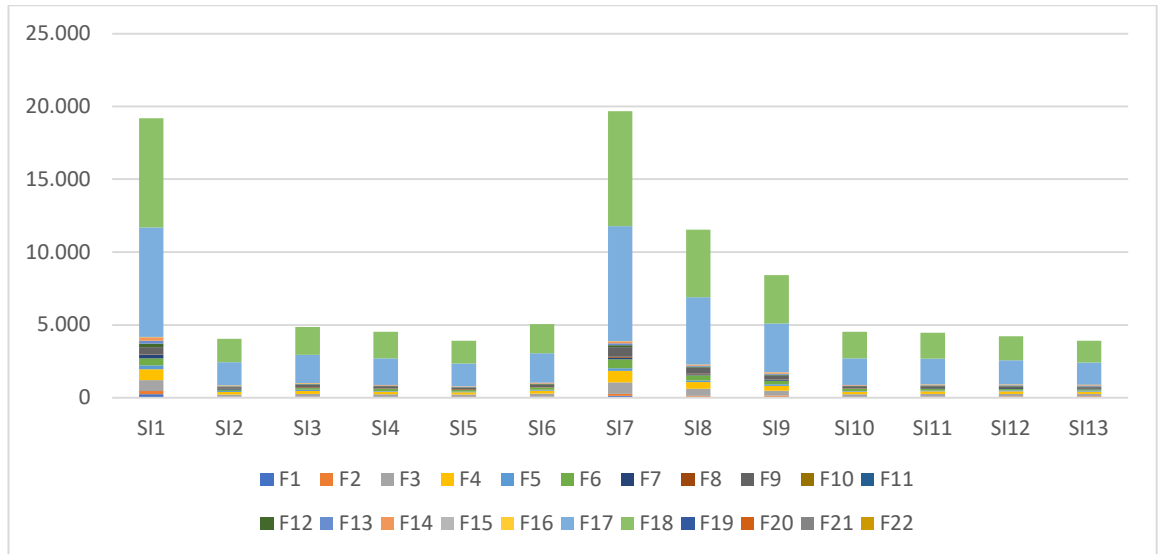
Gráfica 24. Costo exergético [TJ/Kg] temperatura ambiente 9[°C].



Gráfica 25. Costo exergético [TJ/Kg] temperatura ambiente de 15[°C].



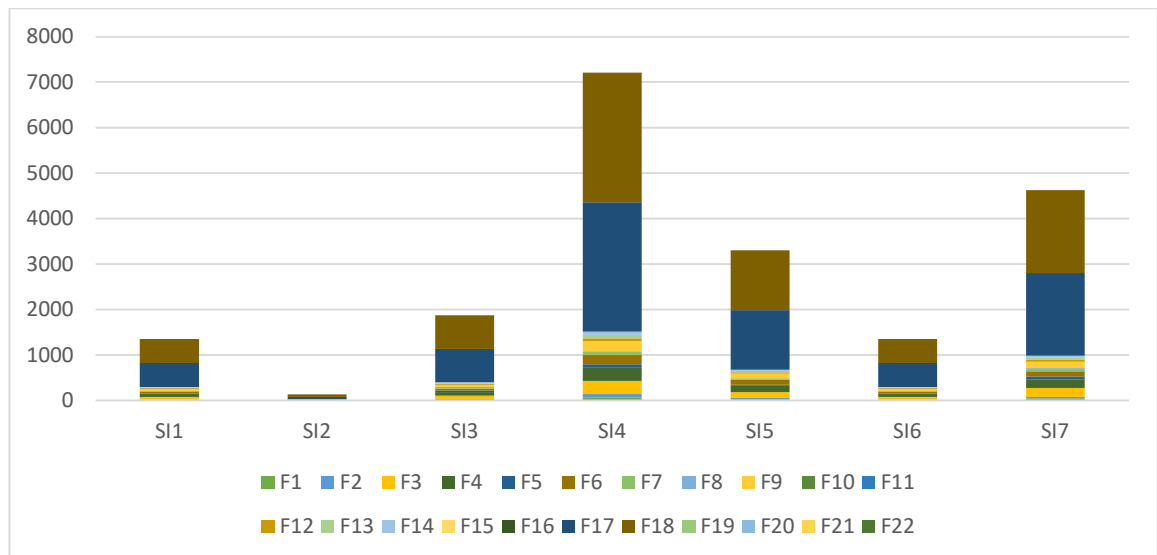
Gráfica 26. Costo exergético [ $TJ/Kg$ ] temperatura ambiente  $32[^\circ C]$ .



### 5.3.2 Costo termoeconómico

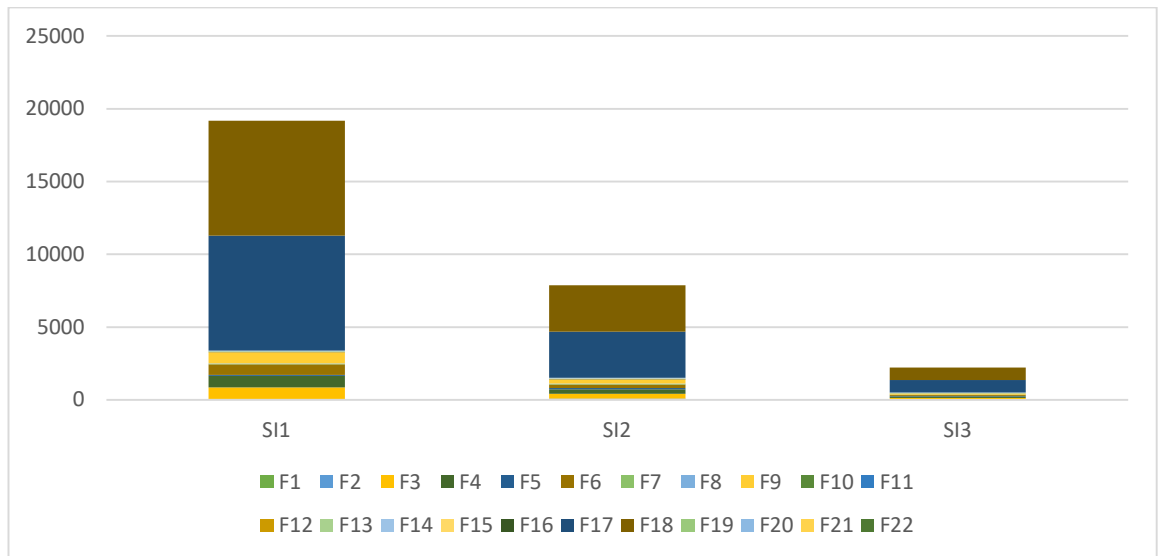
La matriz extendida (Tabla 19), se utiliza para calcular los costos termoeconómico de cada uno de los flujos. Para ello, se aplica la Ecuación 24 Costos termoeconómico de flujo, utilizando el vector de análisis externo de la Tabla 13 y el vector de la Tabla 14. El resultado de la operación matricial proporciona las gráficas de la 27 a la 30, Además de las tablas del anexo 1 (e-g).

Gráfica 27. Costo termoeconómico [ $\$/Kg/TJ$ ] temperatura ambiente  $4[^\circ C]$ .

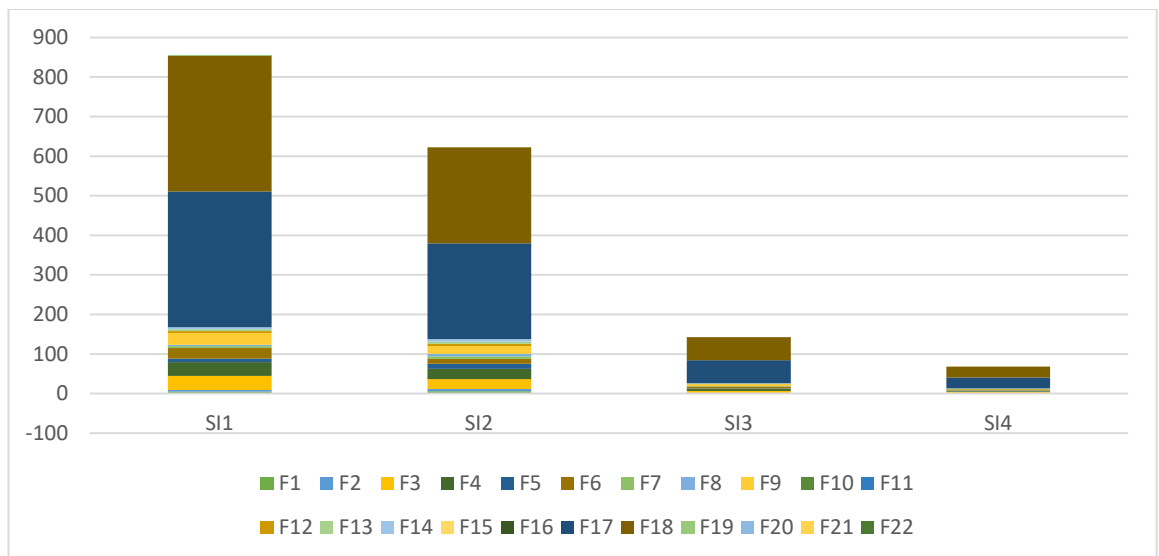


En la temperatura de  $4[^\circ C]$ , de acuerdo con la Gráfica 27, se obtuvo el menor costo termoeconómico en la simulación SI 2, con un valor total de  $134,70 [$/Kg/TJ]$ , mientras que la simulación SI 4 tuvo el valor máximo con  $2.845,58 [$/Kg/TJ]$ . A una temperatura ambiente de  $9[^\circ C]$ , el costo termoeconómico mínimo lo alcanzó la simulación SI 3 con un valor total de  $865,16 [$/Kg/TJ]$ , mientras que la simulación SI 1 tuvo el valor máximo con un valor total de  $7.908,77 [$/Kg/TJ]$ . Para las temperaturas de  $15[^\circ C]$  y  $32[^\circ C]$  las simulaciones SI 4 y SI 3, respectivamente, tuvieron el costo termoeconómico mínimo, con valores de  $27,79 [$/Kg/TJ]$  y  $462,12 [$/Kg/TJ]$ , respectivamente, mientras que el costo máximo para estas temperaturas fue de  $343,79 [$/Kg/TJ]$  y  $7.637,19 [$/Kg/TJ]$ , respectivamente, en las simulaciones SI 1 y SI 17.

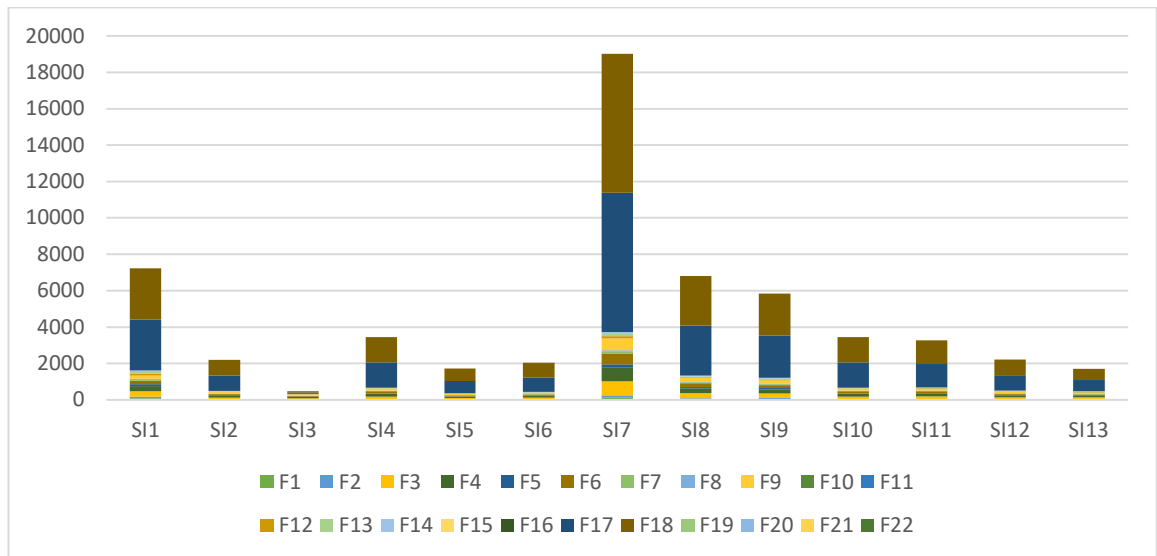
Gráfica 28. Costo Termoeconómico [ $\$/Kg/T$ ] temperatura ambiente de 9[°C].



Gráfica 29. Costo termoeconómico [ $\$/Kg/T$ ] temperatura ambiente 15[°C].



Gráfica 30. Costo termoeconómico [ $\$/Kg/TJ$ ] temperatura ambiente  $32[^\circ C]$ .

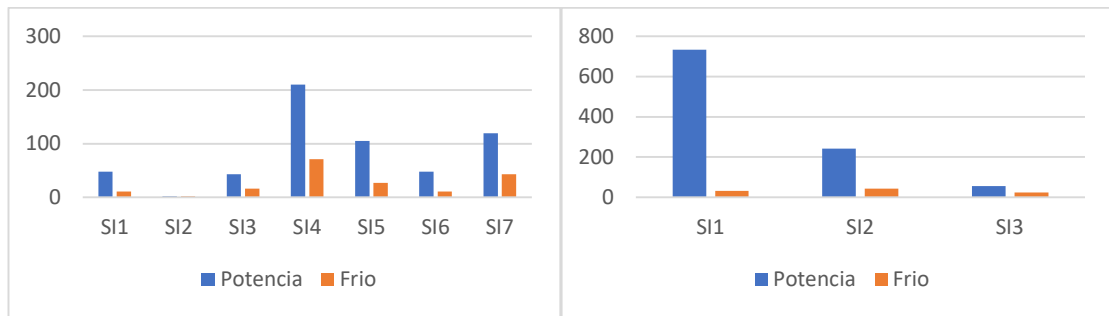


Conociendo los costos de los flujos, se hace énfasis en los costos de los productos objetivos, potencia y frio. Para la temperatura ambiente de  $4[^\circ C]$ , la simulación SI 2, como lo muestra la Gráfica 32 (o), produce la máxima potencia de  $260,5 [KJ/Kg]$ , con un costo termoeconómico mínimo de  $1,96 [\$Kg/TJ]$ , como lo indica la Gráfica 31 y la

Tabla 30, alcanzando eficiencia exergética y térmica de  $45\%$  y  $20,4\%$  (Gráfica 33 s), respectivamente. El máximo frio lo produce la simulación SI 7 con valor de  $36,15$ , con un costo termoeconómico de  $42,90 [\$Kg/TJ]$ , además de producir cogeneración con una potencia de  $33,67 [KJ/Kg]$  y costo de  $119,66 [\$Kg/TJ]$ , con eficiencia exergética y térmica de  $15,1\%$  y  $5,9\%$ , respectivamente.

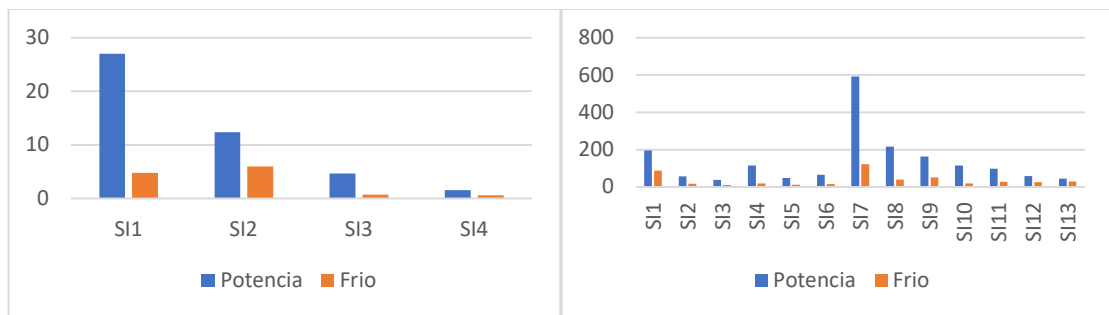
Para la temperatura de  $9[^\circ C]$ , la simulación SI 3 produce la máxima potencia y frio con valores de  $44,51 [KJ/Kg]$  y  $23,52 [KJ/Kg]$  (Gráfica 32 p), respectivamente, y un costo termoeconómico de  $55,64 [\$Kg/TJ]$  y  $23,64 [\$Kg/TJ]$  (Gráfica 31 l), en ese orden. Esta simulación también alcanza eficiencia exergética y térmica de  $16,7\%$  y  $6,24\%$  (Gráfica 33 t), respectivamente. Por otro lado, la simulación SI 2 produce el máximo frio y potencia con valores de  $27,61 [KJ/Kg]$  y  $21,64 [KJ/Kg]$ , respectivamente, y un costo termoeconómico de  $241,89 [\$Kg/TJ]$  y  $43,93 [\$Kg/TJ]$ , en ese orden. Esta simulación alcanza eficiencia exergética y térmica de  $12,73\%$  y  $4,83\%$ , respectivamente.

Gráfica 31. Costo termoeconómico [ $\$/Kg/TJ$ ] potencia-Frio.



(k)

(l)



(m)

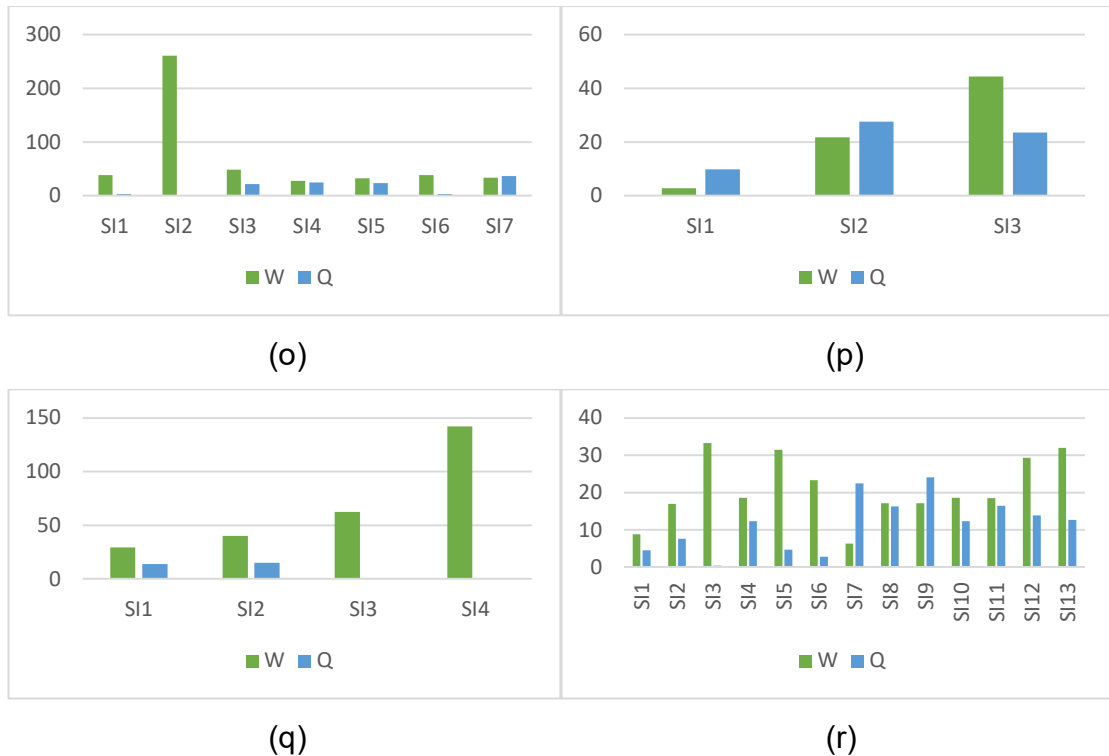
(n)

Costo termoeconómico [ $\$/Kg/TJ$ ] Potencia y frio en  $\$/Kg$ , (k)  $T_{amb} = 4[^\circ C]$ ; (l)  $T_{amb} = 9[^\circ C]$ ; (m)  $T_{amb} = 15[^\circ C]$ ; (n)  $T_{amb} = 32[^\circ C]$





Gráfica 32. Potencia - frio [ $KJ/Kg$ ].

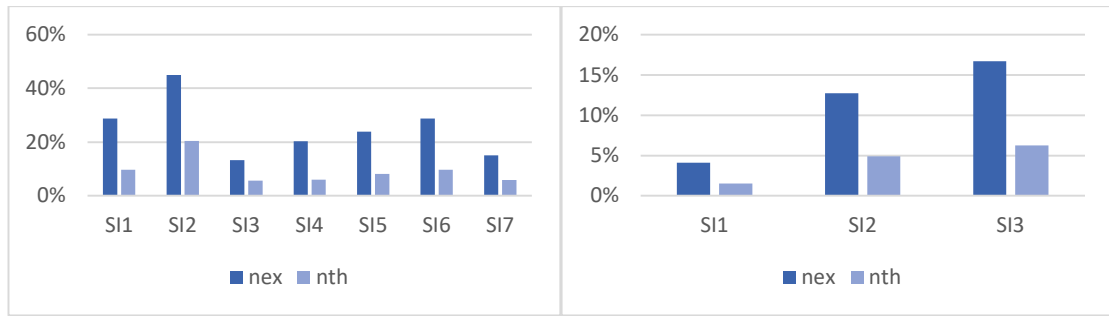


Potencia y frio en [ $kJ/kg$ ], (o)  $T_{amb} = 4[^\circ C]$ ; (p)  $T_{amb} = 9[^\circ C]$ ; (q)  $T_{amb} = 15[^\circ C]$ ; (r)  $T_{amb} = 32[^\circ C]$

A la temperatura ambiente de  $15[^\circ C]$  la simulación SI 4 (Gráfica 32 q) produce la máxima potencia con un valor de  $142,1 [KJ/Kg]$ , un costo termoeconómico de  $1,59 [\$Kg/TJ]$  (Gráfica 31 m) y una eficiencia exergética y térmica de  $39,5 \%$  y  $17,7\%$  (Gráfica 33 u), respectivamente. La simulación SI 2, por su parte, genera cogeneración con el valor máximo de frio de  $15,1 [KJ/Kg]$  y una producción de potencia de  $39,9 [KJ/Kg]$ , con una eficiencia exergética y térmica de  $10,1\%$  y  $4\%$ , respectivamente. En cuanto a la temperatura ambiente de  $32 [^\circ C]$  la simulación SI 3 produce cogeneración con el valor más alto de potencia de  $33,21 [KJ/Kg]$  y frio de  $0,42 [KJ/Kg]$  con un costo termoeconómico de  $36,64 [\$Kg/TJ]$  y  $10,25 [\$Kg/TJ]$ , respectivamente, y una eficiencia exergética y térmica de  $9,7\%$  y  $3,7\%$ , respectivamente. La simulación SI 9, en cambio, produce el valor máximo de frio de  $24,05 [KJ/Kg]$  y presenta cogeneración con un valor de potencia de  $17,08 [KJ/Kg]$ ,

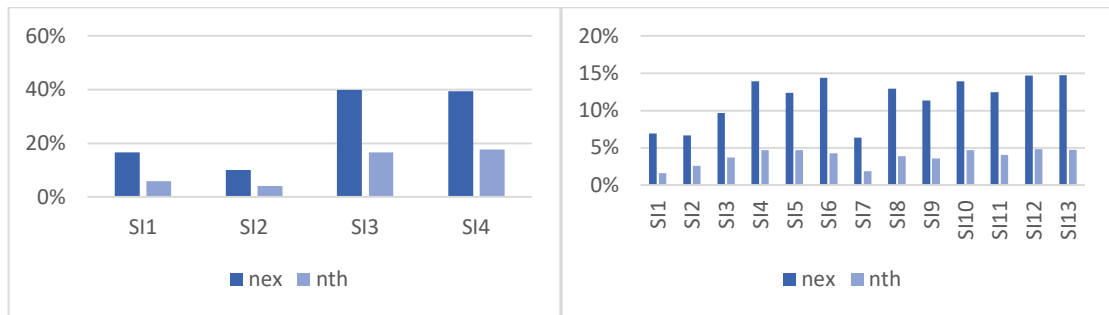
con un costo termoeconómico de 162,79 [\$Kg/TJ] y 51,18 [\$Kg/TJ], respectivamente, y una eficiencia exergética del 11,3 % y térmica del 3,6%.

Gráfica 33. Eficiencia exergética y térmica [%].



(s)

(t)



(u)

(v)

Eficiencia exergética y térmica en (%), (s)  $T_{amb} = 4^{\circ}\text{C}$ ; (t)  $T_{amb} = 9^{\circ}\text{C}$ ; (u)  $T_{amb} = 15^{\circ}\text{C}$ ; (v)  $T_{amb} = 32^{\circ}\text{C}$



## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1. Conclusiones

La investigación tiene como objetivo realizar un estudio termoeconómico para establecer las condiciones de producción de potencia y frío en diferentes escenarios. Como resultado, se obtuvo una muestra de datos de grandes dimensiones. Durante la simulación, el algoritmo genético generó vectores de población en diferentes temperaturas ambientales con el potencial de ser condiciones que satisfagan los requerimientos de los escenarios preestablecidos. La Tabla 21 muestra el número de simulaciones que se estudiaron, donde cada vector alcanza una dimensión de  $1 \times 149$  datos.

Tabla 21. Números de simulaciones por temperatura ambiente.

Simulaciones por temperatura ambiente		
	Sin filtro	Con filtro
4 [°C]	19	7
9 [°C]	8	3
15 [°C]	4	4
21 [°C]	0	0
32 [°C]	135	13

### 6.2. Escenarios de funcionamiento (Discusión).

A una temperatura de 4[°C], en un escenario donde la prioridad técnica es la generación de máxima potencia, este estado de funcionamiento coincide con los valores máximos de eficiencia exergética y térmica. La potencia generada tiene un valor de 260.5  $KJ/Kg$ , con una eficiencia exergética y térmica de 44,9% y 20,43%, respectivamente, tal como se muestra en la Tabla 22. Este escenario alcanza el valor más bajo de costo exergético de las simulaciones, con un valor de 418,95  $TJ/Kg$  y un costo termoeconómico de 134,7  $\$/Kg/TJ$ . En este escenario, no se presenta cogeneración.

En un escenario técnico donde se prioriza la generación de frío, este alcanzaría valores de 36,14  $KJ/Kg$  y se produciría cogeneración, con un valor de potencia de 33,67  $KJ/Kg$  y una eficiencia exergética y térmica de 15% y 5,9%, respectivamente. Los costos exergético y termoeconómico son de 8.234,72  $TJ/Kg$  y 1.352,45  $\$/Kg/TJ$ , como lo indica la Tabla 23. Estos son los

segundos costos más altos a esta temperatura. La producción de potencia a temperatura ambiente de 4[°C] representa entre el 81% y el 50% de los costos termoeconómico de los productos objetivos, como se muestra en la Gráfica 34.

Tabla 22. Escenario de Máxima producción de potencia a diferentes temperaturas ambientales.

$T_{amb}$ [°C]	W [KJ/Kg]	Q [KJ/Kg]	$\eta_{Ex}$	$\eta_{Th}$	Costo Exergético [TJ/Kg]	Costo termoeconómico [\$Kg/TJ]
4	260,5	0	44,9%	20,43%	418,95	134,70
9	44,5	23,51	16%	6,2%	6.130,24	2.215,78
15	142,11	0	39,5%	17,7%	477,24	68,36
32	32,21	0,42	10%	4,0 %	4.526	3.439,26

Tabla 23. Escenario Máxima producción de frio a diferentes a temperaturas ambientales.

$T_{amb}$ [°C]	W [KJ/Kg]	Q [KJ/Kg]	$\eta_{Ex}$	$\eta_{Th}$	Costo Exergético [TJ/Kg]	Costo termoeconómico [\$Kg/TJ]
4	33,67	36,14	15%	5,9%	8.234,72	1.352,45
9	21,64	27,11	12,72%	4,9%	11.362,81	7.864,88
15	39,94	15,08	10,13%	4%	7.043,97	622,09
32	24,65	14,08	11%	4%	8.421	5.839,40

Para una temperatura ambiente de 9[°C], en un escenario donde se priorice la producción de potencia se obtiene un valor de 44,5KJ/Kg, y de máxima eficiencia exergética y térmica de 16% y 6,2% (Tabla 22), respectivamente, se produce cogeneración con una producción de frio de 23,51KJ/Kg. Los costos resultantes son los mínimos para esta temperatura, con un costo exergético de 6.130,24 TJ/Kg y un costo termoeconómico de 2.215,78 \$Kg/TJ.

En cambio, si la prioridad del escenario es la producción de frio, se alcanza un valor de 27,11KJ/Kg (Tabla 23), se presenta cogeneración con una potencia de 21,64KJ/Kg y eficiencia exergética y térmica de 12,72% y 4,9%, respectivamente. El costo exergético es de 11.362,281TJ/Kg y

termoeconomico de 7.864.88 \$Kg/TJ. Estos son los segundos costos más altos. Es importante destacar que la producción de potencia representa entre el 96% y 70% del costo termoeconómico de los productos objetivos Gráfica 34.

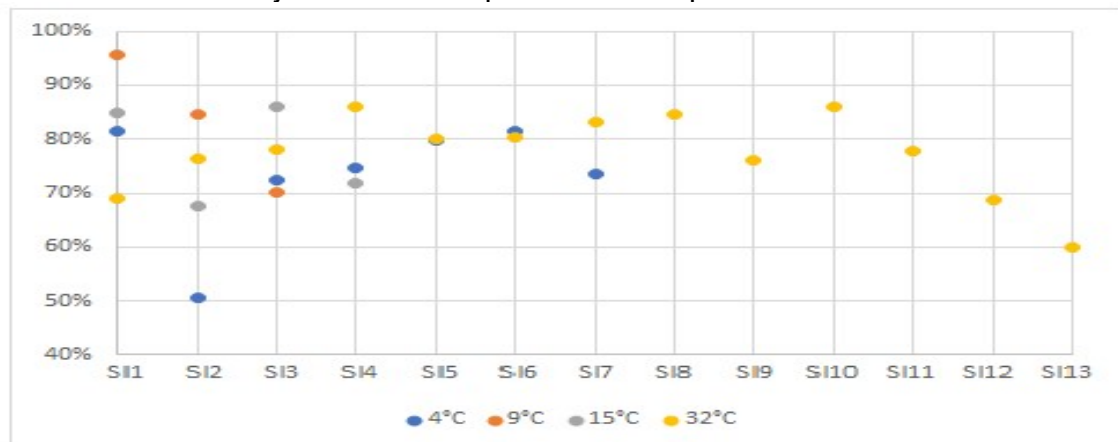
Tabla 24. Escenario Máxima eficiencia exergetica a diferentes temperaturas ambientales.

$T_{amb}$ [°C]	W [KJ/Kg]	Q [KJ/Kg]	$\eta_{Ex}$	$\eta_{Th}$	Costo Exergetico [TJ/Kg]	Costo termoeconomico [\$Kg/TJ]
62,46	260,5	0	44,9%	20,43%	418,95	134,70
9	44,5	23,51	16%	6,2%	6.130,24	2.215,78
15	62,46	0	39,9%	16,6%	575,67	142,23
32	31,99	12,67	15%	4,68%	3.923	1.693,98

Tabla 25. Escenario Máxima eficiencia térmica a diferentes temperaturas ambientales.

$T_{amb}$ [°C]	W [KJ/Kg]	Q [KJ/Kg]	$\eta_{Ex}$	$\eta_{Th}$	Costo Exergetico [TJ/Kg]	Costo termoeconomico [\$Kg/TJ]
62,46	260,5	0	44,9%	20,43%	418,95	134,70
9	44,5	23,51	16%	6,2%	6.130,24	2.215,78
15	142,11	0	39,5%	17,7%	477,24	68,36
32	29,29	13,9	14,3%	4,8%	4.219	2.207,35

Gráfica 34 Porcentaje del costo de producción de potencia.





En el escenario a una temperatura ambiente de  $15[^\circ C]$ , donde se prioriza la producción de potencia, esta alcanza un valor de  $142,11 \text{ KJ/Kg}$  y la máxima eficiencia térmica de  $17,7\%$ . En esta condición, no se presenta cogeneración y la eficiencia exergética es de  $17,7\%$ . Los costos exergético y termoeconómico para esta condición son de  $477,24 \text{ TJ/Kg}$  y  $68,36 \text{ $Kg/TJ}$ , respectivamente.

En caso de que la prioridad técnica sea la generación de frío, se obtiene valores de  $15,08 \text{ KJ/Kg}$  para esta variable, mientras que la potencia, la eficiencia exergética y térmica toman valores de  $39,94 \text{ KJ/Kg}$ ,  $10,13\%$  y  $4\%$ , respectivamente. En este escenario, los costos exergético y termoeconómico son de  $7.043,97 \text{ TJ/Kg}$  de y  $622,09 \text{ $Kg/TJ}$ , respectivamente. Si se busca maximizar el aprovechamiento de los recursos y reducir la huella de contaminación, la prioridad térmica es la eficiencia técnica, la cual alcanza un valor máximo del  $39,9\%$ . En este caso, la potencia y la eficiencia térmica alcanzan valores de  $62,46 \text{ KJ/Kg}$  y  $16,6\%$ , respectivamente, sin presentarse cogeneración. Los costos exergético y termoeconómico para este escenario son de  $575,67 \text{ TJ/Kg}$  y  $142,23 \text{ $Kg/TJ}$ , respectivamente.

Es importante mencionar que la producción de potencia representa entre un  $85\%$  y un  $67\%$  del costo termoeconómico de los productos objetivos.

A temperatura ambiente de  $32[^\circ C]$ , si el escenario es la prioridad técnica de producción de potencia, esta alcanza un valor de  $32,21 \text{ KJ/Kg}$ , el frío, la eficiencia exergética y térmica tienen un valor de  $0,42 \text{ KJ/Kg}$ ,  $10\%$  y  $4\%$ , respectivamente, con costo exergético de  $4.526 \text{ TJ/Kg}$  y termoeconómico de  $3.439,26 \text{ $Kg/TJ}$ .

En caso de que se priorice la generación de frío, este alcanza un valor de  $14,08 \text{ KJ/Kg}$ , la potencia, la eficiencia exergética y térmica toman valores de  $24,65 \text{ KJ/Kg}$ ,  $11\%$  y  $4\%$ , los costos exergético y térmico para este caso son de  $8.421 \text{ TJ/Kg}$  y  $5.839,40 \text{ $Kg/TJ}$ , respectivamente. En caso de que la prioridad sea el máximo aprovechamiento de los recursos, la eficiencia exergética alcanza un valor de  $15\%$ , la potencia de  $31,99 \text{ KJ/Kg}$ , el frío de  $12,67 \text{ KJ/Kg}$  y a eficiencia térmica de  $4,68\%$ , con costo exergético y termoeconómico de  $3.923 \text{ TJ/Kg}$  y  $1.693,98 \text{ $Kg/TJ}$ .



En caso de que la prioridad sea el máximo rendimiento de los equipos, el valor de la eficiencia térmica alcanza un 4,8%, la potencia, el frío y la eficiencia térmica tienen valores de 29,29  $KJ/Kg$ , 13,9  $KJ/Kg$  y 14,3%, respectivamente, con costo exergético de 4.219  $TJ/Kg$  y termoeconómico de 2.207,35  $\$/Kg/TJ$ .

Es importante indicar que la producción de potencia representa entre un 85% y un 60% del costo termoeconómico de los productos objetivos

La temperatura ambiente de 21[°C] muestra los datos que indican un costo exergético negativo, lo que surge de que la energía requerida es menor que la energía disponible en el proceso. Por lo tanto, al realizar el filtrado, fueron excluidos debido a que los resultados no eran coherentes.

### **6.3. Recomendaciones**

Se recomienda un estudio de detalle, donde se discriminen los valores individuales de mercado de cada uno de los componentes. Además, un estudio que incluya como cambian las condiciones ideales de producción con la fluctuación de la temperatura. Además, de un estudio que discrimine el costo real de producción con el costo teórico.

## Referencias

- [1] F. Scott and E. David, “El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible | Naciones Unidas.” [Online]. Available: <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>. [Accessed: 31-Mar-2021].
- [2] (National Technical University of Athens) Zervos, Arthouros, *Renewables 2018 global status report*. Paris, 2018.
- [3] D. Kim, R. M. Montañés, L. Riboldi, L. O. Nord, J. Spale, and V. Novotny, “Design optimization of small-scale ORC cycles for fluctuating heat source,” *Proc. 63rd Int. Conf. Scand. Simul. Soc. SIMS 2022, Trondheim, Norway, Sept. 20-21, 2022*, vol. 192, pp. 204–209, 2022.
- [4] A. K. Nassir and H. A. K. Shahad, “Effect of Operating Conditions on Modified Kalina Cycle Performance,” *Int. J. Heat Technol.*, vol. 40, no. 5, pp. 1186–1195, 2022.
- [5] D. Y. Goswami, S. Vijayaraghavan, S. Lu, and G. Tamm, “New and emerging developments in solar energy,” *Sol. Energy*, vol. 76, no. 1–3, pp. 33–43, 2004.
- [6] M. N. Karimi, A. Dutta, A. Kaushik, H. Bansal, and S. Z. Haque, “A Review of Organic Rankine, Kalina and Goswami Cycle,” *Int. J. Eng. Technol. Manag. Appl. Sci. www.ijetmas.com*, vol. 3, no. October, pp. 2349–4476, 2015.
- [7] J. Hosseinpour, A. Chitsaz, B. Eisavi, and M. Yari, “Investigation on performance of an integrated SOFC-Goswami system using wood gasification,” *Energy*, vol. 148, no. February, pp. 614–628, 2018.
- [8] M. Tian, J. Yin, J. Han, Z. Yu, and C. Zhang, “Thermodynamic analysis of a novel combined cooling and power system driven by low-grade heat sources,” *Energy*, vol. 156, no. 51541604, pp. 319–327, 2018.
- [9] C. A. Coello Coello, “Evolutionary multi-objective optimization: Some current research trends and topics that remain to be explored,” *Front. Comput. Sci. China*, vol. 3, no. 1, pp. 18–30, 2009.
- [10] S. D. E. Energia, O. D. E. Gestion, D. E. P. D. E. Fondos, S. D. E. Demanda, and S. D. E. Hidrocarburos, “2020 upme Informe\_de\_Gestion\_2020V2.”
- [11] ““Las energías limpias no superan el 1% en la matriz energética del país”: Asoenergía | Asoenergía.” [Online]. Available: <https://www.asoenergía.com/es/prensa/las-energias-limpias-no-superan-el-1->





- en-la-matriz-energetica-del-pais-asoenergia. [Accessed: 16-May-2023].
- [12] H. Ritchie and M. Roser, "Colombia: Energy Country Profile - Our World in Data." [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/energy/country/colombia#what-sources-does-the-country-get-its-electricity-from>. [Accessed: 30-Jan-2023].
- [13] "Reservas y autosuficiencia de hidrocarburos: El precio del mañana." [Online]. Available: [https://investigaciones.corficolombiana.com/analisis-sectorial-y-sostenibilidad/perspectiva-sectorial-petroleo-y-gas/reservas-y-autosuficiencia-de-hidrocarburos-el-precio-del-manana/informe\\_1328243](https://investigaciones.corficolombiana.com/analisis-sectorial-y-sostenibilidad/perspectiva-sectorial-petroleo-y-gas/reservas-y-autosuficiencia-de-hidrocarburos-el-precio-del-manana/informe_1328243). [Accessed: 16-May-2023].
- [14] "IMPORTACIÓN DE CRUDO Y GAS: CRISIS ECONÓMICA U OPORTUNIDAD DE CAMBIO – Crudo Transparente." [Online]. Available: <https://crudotransparente.com/2020/04/17/importacion-de-crudo-y-gas-tesis-economica-u-oportunidad-de-cambio/>. [Accessed: 16-May-2023].
- [15] D. Contreras, "El impacto de El Niño en Colombia," *Fasecolda*, pp. 42–46, 2016.
- [16] A. C. Mateus Valencia, "Crisis energética en Colombia," *Tecnol. Investig. y Acad.*, vol. 4, no. 2, pp. 74–81, 2016.
- [17] UPME and BID, *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. 2015.
- [18] C. R. A. D. E. Senadores, "ESTATUTO DE LA AGENCIA INTERNACIONAL PARA LAS ENERGÍAS RENOVABLES (IRENA)," 2011.
- [19] A. Fontalvo *et al.*, "ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UN CICLO PARA LA PRODUCCIÓN SIMULTÁNEA DE POTENCIA Y REFRIGERACIÓN A PARTIR DE FUENTES TÉRMICAS DE BAJA TEMPERATURA Conference," no. July, 2013.
- [20] G. Figueredo, N. Vizcaino, S. Perna, and S. Benitez, "Cogeneración de trabajo y refrigeración mediante un ciclo basado en una mezcla de amoníaco y agua," *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 15, no. 2004, pp. 17–24, 2011.
- [21] Y. Castillo, M. Castrillón Gutiérrez, M. Vanegas-Chamorro, G. Valencia, and E. Villicaña, "Rol de las Fuentes No Convencionales de Energía en el sector eléctrico colombiano," *Prospectiva*, vol. 13, no. 1, p. 39, 2015.
- [22] C. Alfaro, I. Alvarado, W. Quintero, V. Hamza, C. Vargas, and L. A. Briceño,



- “Mapa preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia,” *XII Congr. Colomb. Geol.*, no. 1, pp. 1–24, 2009.
- [23] M. B. López, L. C. R. Sarmiento, and P. J. R. Sánchez, “Análisis de costos de la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables en el sistema eléctrico colombiano.,” *Costs Anal. Electr. Gener. from Renew. sources Colomb. Electr. Syst.*, vol. 34, no. 2, pp. 394–419, 2016.
- [24] “ESWINDOWS.” [Online]. Available: <https://eswindows.com/es/tecnoglass-trabaja-en-parque-de-energia-solar-para-autoabastecerse/>. [Accessed: 16-May-2023].
- [25] “El Grupo Éxito instaló la planta fotovoltaica más grande del país en uno de sus almacenes | Grupo Éxito.” [Online]. Available: <https://www.grupoexito.com.co/es/noticias-grupo-exito/el-grupo-exito-instalo-la-planta-fotovoltaica-mas-grande-del-pais-en-uno-de-sus-almacenes>. [Accessed: 16-May-2023].
- [26] “Energías renovables, ¿una opción ante la crisis de Electricaribe? – CCENERGÍA | Cámara Colombiana de la Energía.” [Online]. Available: <https://www.ccenergia.org.co/energias-renovables-una-opcion-ante-la-crisis-de-electricaribe/>. [Accessed: 16-May-2023].
- [27] Ó. AHUMADA, “En Colombia, 9 de cada 10 proyectos de energía usarán paneles solares - Sectores - Economía - ELTIEMPO.COM,” 2017. [Online]. Available: <http://www.eltiempo.com/economia/sectores/en-colombia-9-de-cada-10-proyectos-de-energia-usaran-paneles-solares-162616>. [Accessed: 24-Jul-2018].
- [28] J. Ahrendts, “Reference States,” 1980.
- [29] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. Moran, “Thermal Design and Optimization- John Wiley & Sons.” pp. 1–542, 1996.
- [30] G. Demirkaya, G. P. Systems, R. V. Padilla, and D. Y. Goswami, “Multi-Objective Optimization of a Combined Power and Cooling Cycle for Low-ES2011-54,” no. December 2015, 2012.
- [31] M. Majumder and A. K. Saha, *Feasibility model of solar energy plants by ANN and MCDM techniques*, no. January 2018. 2016.
- [32] J. A. Aranda Pinilla and J. A. Orjuela Castro, “Optimización multiobjetivo en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles TT - Una revisión de la literatura Multiobjective optimization in biofuel supply chain management. A



- review of the literature,” *Ingeniería*, vol. 20, no. 1, pp. 21–47, 2015.
- [33] J. López, *Optimización multiobjetivo: aplicaciones a problemas del mundo real*. Buenos Aires, 2013.
- [34] IDEAM, “Clasificaciones climáticas.” [Online]. Available: [http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/clasificacionClimatica\\_texto.pdf](http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/clasificacionClimatica_texto.pdf).
- [35] P. M. Casta and T. Ing, “ZONIFICACIÓN CLIMATOLÓGICA SEGÚN EL MODELO CALDAS – LANG DE LA CUENCA RIO RIO NEGRO MEDIANTE EL USO DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA SIG.”
- [36] I. del T. Cortolima; SENA, “Proyecto plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica mayor del rio Saldaña cuenca Amoya,” pp. 55–76.
- [37] IDEAM, “Clasificación de los climas.”
- [38] IDEAM, “Clasificaciones climaticas colombia.” [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/climas+%5BModo+de+compatibilidad%5D.pdf/d8c85704-a07a-4290-ba65-f2042ce99ff9>.
- [39] J. Espejo, “Plan regional integral de cambio climatico región Capital Bogota-Cundinamarca.”
- [40] Hirus.eus, “La presión atmosférica - hiru.” [Online]. Available: <https://www.hiru.eus/es/fisica/la-presion-atmosferica>. [Accessed: 19-May-2019].
- [41] IDEAM, “VISOR METEOROLOGICO - IDEAM.” [Online]. Available: <http://www.meteoaeronautica.gov.co/visor-meteorologico>. [Accessed: 19-May-2019].
- [42] D. C. Montgomery, “Diseño y Analisis de Experimentos.” .
- [43] J. M. García, M. E. Sanjuan M., and R. V. Padilla, “Response Surface Based Optimization of Solar Collector Integrated With an Ammonia-Water Combined Power/Cooling Cycle Supported by Exergy Analysis,” *Vol. 2 Photovoltaics; Renewable-Non-Renewable Hybrid Power Syst. Smart Grid, Micro-Grid Concepts; Energy Storage; Sol. Chem. Sol. Heat. Cool. Sustain. Cities Communities, Transp. Symp. Integr. Buil*, no. June, p. V002T15A010, 2015.
- [44] G. Demirkaya, R. Vasquez, A. Bula, and D. Y. Goswami, “Experimental and Theoretical Analysis of the Goswami Cycle Operating at Low Temperature Heat Sources,” no. March, 2018.



- [45] G. Guzmán, L. D. L. Reyes, E. Noriega, and H. Ramírez, “Thermal Optimization of a Dual Pressure Goswami Cycle for Low Grade Thermal Sources,” pp. 1–28.
- [46] J. M. P. Sala Lizarraga and A. Picallo-Perez, *Exergy analysis and thermoeconomics of buildings: Design and analysis for sustainable energy systems*. 2019.
- [47] H. Ghaebi, T. Parikhani, H. Rostamzadeh, and B. Farhang, “a novel combined cooling and power ( CCP ) cycle by integrating of,” *Energy*, 2017.
- [48] H. Ghaebi, T. Parikhani, and H. Rostamzadeh, “A novel trigeneration system using geothermal heat source and liquefied natural gas cold energy recovery: Energy, exergy and exergoeconomic analysis,” *Renew. Energy*, 2018.
- [49] H. Ghaebi, T. Parikhani, and H. Rostamzadeh, “Energy , exergy and thermoeconomic analysis of a novel combined cooling and power system using low-temperature heat source and LNG cold energy recovery,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 150, no. May, pp. 678–692, 2017.
- [50] R. D. Misra, P. K. Sahoo, and A. Gupta, “Thermoeconomic evaluation and optimization of an aqua-ammonia vapour-absorption refrigeration system,” *Int. J. Refrig.*, vol. 29, no. 1, pp. 47–59, 2006.
- [51] C. E. Campos Rodríguez *et al.*, “Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 52, no. 1, pp. 109–119, 2013.
- [52] S. Quoilin, S. Declaye, B. F. Tchanche, and V. Lemort, “Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 14–15, pp. 2885–2893, 2011.
- [53] “Chemical Engineering - Chemical Engineering essentials for the global chemical processing industries (CPI).” [Online]. Available: <https://www.chemengonline.com/>. [Accessed: 22-Feb-2023].
- [54] T. Brown, *ENGINEERING ECONOMICS AND ECONOMIC DESIGN FOR PROCESS ENGINEERS*. 2014.
- [55] “2021 CEPCI updates: April (prelim.) and March (final) - Chemical Engineering | Page 1.” [Online]. Available: <https://www.chemengonline.com/2021-cepci-updates-april-prelim-and-march-final/>. [Accessed: 22-Feb-2023].
- [56] W. Fluids, *Absortion chillers and heat pumps*. 2012.



- [57] F. Xu and D. Y. Goswami, "Thermodynamic properties of ammonia-water mixtures for power-cycle applications," *Energy*, vol. 24, no. 6, pp. 525–536, 1999.
- [58] "Interfaz de alto nivel: documentación de CoolProp 6.4.1." [Online]. Available: <http://www.coolprop.org/coolprop/HighLevelAPI.html#high-level-api>. [Accessed: 11-Mar-2021].
- [59] B. Z. C. Trepp, "Equation of state for ammonia-water," *J. Appl. Phys.*, vol. 64, no. 8, pp. 4236–4238, 1988.



## Anexos

### 6.4. Anexo 1. Tablas costo exergetico y termoeconomico

a)

Tabla 26 Costo exergetico temperatura ambiente 4°C. (TJ/Kg)

	SI1	SI2	SI3	SI4	SI5	SI6	SI7
F1	17,32	7,21	54,37	142,22	36,96	17,32	74,52
F2	17,32	7,21	54,37	142,22	36,96	17,32	74,52
F3	94,26	15,11	251,91	579,23	188,42	94,26	325,02
F4	94,26	15,11	251,91	579,23	188,42	94,26	325,02
F5	18,71	7,70	109,56	156,56	41,99	18,71	117,09
F6	75,55	7,41	142,35	422,67	146,42	75,55	207,93
F7	17,30	7,21	54,30	142,30	36,97	17,30	74,54
F8	1,42	0,48	55,26	14,26	5,03	1,42	42,55
F9	76,97	7,89	197,61	436,93	151,45	76,97	250,48
F10	0,02	0,00	0,07	0,00	0,00	0,02	0,00
F11	0,02	0,00	0,07	0,00	0,00	0,02	0,00
F12	17,30	7,21	54,30	142,30	36,97	17,30	74,54
F13	17,30	7,21	54,30	142,30	36,97	17,30	74,54
F14	17,32	7,21	54,37	142,22	36,96	17,32	74,52
F15	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80
F16	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80
F17	942,30	151,19	2518,27	5792,11	1883,90	942,30	3249,93
F18	942,30	151,19	2518,27	5792,11	1883,90	942,30	3249,93
F19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	2369,25	418,95	6390,90	14646,24	4730,93	2369,25	8234,72



b)

Tabla 27. Costo exergetico temperatura ambiente 9°C. (TJ/Kg)

	Si1	Si2	Si3
F1	20,70	63,04	63,57
F2	20,70	63,04	63,57
F3	505,78	458,07	240,33
F4	505,78	458,07	240,33
F5	38,69	111,06	90,63
F6	467,09	347,01	149,70
F7	20,69	63,02	63,59
F8	18,00	48,05	27,03
F9	485,09	395,05	176,73
F10	0,01	0,02	0,00
F11	0,01	0,02	0,00
F12	20,69	63,02	63,59
F13	20,69	63,02	63,59
F14	20,70	63,04	63,57
F15	9,80	9,80	9,80
F16	9,80	9,80	9,80
F17	5038,60	4573,85	2402,20
F18	5038,60	4573,85	2402,20
F19	0,00	0,00	0,00
F20	0,00	0,00	0,00
F21	0,00	0,00	0,00
F22	0,00	0,00	0,00
Total	12241,45	11362,81	6130,24



c)

Tabla 28. Costo exergético temperatura ambiente 15°C. (TJ/Kg)

	SI1	SI2	SI3	SI4
F1	31,46	65,24	3,11	4,68
F2	31,46	65,24	3,11	4,68
F3	229,00	276,24	22,43	17,99
F4	229,00	276,24	22,43	17,99
F5	52,68	140,73	3,24	5,97
F6	176,32	135,51	19,19	12,02
F7	31,46	65,26	3,11	4,68
F8	21,22	75,46	0,13	1,29
F9	197,54	210,98	19,32	13,31
F10	0,00	0,00	0,00	0,00
F11	0,00	0,00	0,00	0,00
F12	31,46	65,26	3,11	4,68
F13	31,46	65,26	3,11	4,68
F14	31,46	65,24	3,11	4,68
F15	9,80	9,80	9,80	9,80
F16	9,80	9,80	9,80	9,80
F17	2279,23	2758,86	225,33	180,50
F18	2279,23	2758,86	225,33	180,50
F19	0,00	0,00	0,00	0,00
F20	0,00	0,00	0,00	0,00
F21	0,00	0,00	0,00	0,00
F22	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	5672,53	7043,97	575,67	477,24



d)

Tabla 29 Costo exergetico temperatura ambiente 32°C. (TJ/Kg)

	SI1	SI2	SI3	SI4	SI5	SI6	SI7	SI8	SI9	SI10	SI11	SI12	SI13
F1	225,22	29,99	30,84	23,88	25,66	36,13	123,60	65,52	72,58	23,88	36,29	46,58	54,19
F2	225,22	29,99	30,84	23,88	25,66	36,13	123,60	65,52	72,58	23,88	36,29	46,58	54,19
F3	750,92	160,75	193,40	183,69	155,99	202,11	792,61	468,56	334,45	183,69	176,77	164,84	150,72
F4	750,92	160,75	193,40	183,69	155,99	202,11	792,61	468,56	334,45	183,69	176,77	164,84	150,72
F5	249,25	64,51	83,16	37,13	52,45	53,10	183,22	105,32	103,60	37,13	49,51	61,91	69,49
F6	501,67	96,24	110,23	146,56	103,55	149,00	609,39	363,25	230,85	146,56	127,26	102,93	81,23
F7	225,26	29,98	30,84	23,88	25,65	36,16	123,61	65,55	72,58	23,88	36,29	46,58	54,19
F8	23,99	34,52	52,32	13,25	26,79	16,95	59,61	39,77	31,03	13,25	13,23	15,33	15,29
F9	525,66	130,76	162,55	159,81	130,34	165,95	669,00	403,02	261,87	159,81	140,48	118,26	96,52
F10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F12	225,26	29,98	30,84	23,88	25,65	36,16	123,61	65,55	72,58	23,88	36,29	46,58	54,19
F13	225,26	29,98	30,84	23,88	25,65	36,16	123,61	65,55	72,58	23,88	36,29	46,58	54,19
F14	225,22	29,99	30,84	23,88	25,66	36,13	123,60	65,52	72,58	23,88	36,29	46,58	54,19
F15	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78
F16	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78
F17	7507,74	1604,11	1934,10	1819,56	1549,55	2010,46	7901,39	4638,43	3335,01	1819,56	1762,39	1645,80	1507,00
F18	7507,74	1604,11	1934,10	1819,56	1549,55	2010,46	7901,39	4638,43	3335,01	1819,56	1762,39	1645,80	1507,00
F19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	19189	4055	4868	4526	3898	5047	19670	11538	8421	4526	4446	4219	3923



e)

Tabla 30 Costo termoeconómico temperatura ambiente 4°C. (\$Kg/TJ).

	SI1	SI2	SI3	SI4	SI5	SI7	SI8
F1	10,96	1,90	16,34	70,81	26,47	10,96	42,88
F2	10,96	1,90	16,34	70,81	26,47	10,96	42,88
F3	59,65	3,99	75,73	288,39	134,95	59,65	187,03
F4	59,65	3,99	75,73	288,39	134,95	59,65	187,03
F5	11,84	2,03	32,93	77,95	30,08	11,84	67,38
F6	47,81	1,96	42,79	210,44	104,87	47,81	119,66
F7	10,95	1,90	16,32	70,85	26,48	10,95	42,90
F8	0,90	0,13	16,61	7,10	3,60	0,90	24,48
F9	48,70	2,08	59,40	217,54	108,47	48,70	144,14
F10	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00
F11	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00
F12	10,95	1,90	16,32	70,85	26,48	10,95	42,90
F13	10,95	1,90	16,32	70,85	26,48	10,95	42,90
F14	10,96	1,90	16,34	70,81	26,47	10,96	42,88
F15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F17	529,08	54,55	735,44	2845,58	1313,09	529,08	1819,03
F18	529,08	54,55	735,44	2845,58	1313,09	529,08	1819,03
F19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	1352,45	134,70	1872,11	7205,93	3301,94	1352,45	4625,11



f)

Tabla 31 Costo termoeconómico temperatura ambiente 9°C. (\$Kg/TJ).

	SI1	SI2	SI3
F1	32,57	43,94	23,63
F2	32,57	43,94	23,63
F3	795,54	319,30	89,32
F4	795,54	319,30	89,32
F5	60,85	77,42	33,68
F6	734,68	241,89	55,64
F7	32,55	43,93	23,64
F8	28,31	33,49	10,05
F9	762,99	275,38	65,68
F10	0,02	0,01	0,00
F11	0,02	0,01	0,00
F12	32,55	43,93	23,64
F13	32,55	43,93	23,64
F14	32,57	43,94	23,63
F15	0,00	0,00	0,00
F16	0,00	0,00	0,00
F17	7908,77	3167,24	865,16
F18	7908,77	3167,24	865,16
F19	0,00	0,00	0,00
F20	0,00	0,00	0,00
F21	0,00	0,00	0,00
F22	0,00	0,00	0,00
Total	19190,83	7864,88	2215,78



g)

Tabla 32. Costo termoeconómico temperatura ambiente 15°C. (\$Kg/TJ)

	SI1	SI2	SI3	SI4
F1	4,82	5,95	0,75	0,62
F2	4,82	5,95	0,75	0,62
F3	35,06	25,21	5,41	2,38
F4	35,06	25,21	5,41	2,38
F5	8,07	12,84	0,78	0,79
F6	27,00	12,37	4,63	1,59
F7	4,82	5,96	0,75	0,62
F8	3,25	6,89	0,03	0,17
F9	30,24	19,25	4,66	1,76
F10	0,00	0,00	0,00	0,00
F11	0,00	0,00	0,00	0,00
F12	4,82	5,96	0,75	0,62
F13	4,82	5,96	0,75	0,62
F14	4,82	5,95	0,75	0,62
F15	0,00	0,00	0,00	0,00
F16	0,00	0,00	0,00	0,00
F17	343,74	242,30	58,40	27,79
F18	343,74	242,30	58,40	27,79
F19	0,00	0,00	0,00	0,00
F20	0,00	0,00	0,00	0,00
F21	0,00	0,00	0,00	0,00
F22	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	855,05	622,09	142,23	68,36

h)

Tabla 33 Costo termoeconómico temperatura ambiente 32°C.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
F1	87,04	17,20	10,25	18,44	11,85	15,41	120,17	38,92	51,19	18,44	27,50	25,80	28,66
F2	87,04	17,20	10,25	18,44	11,85	15,41	120,17	38,92	51,19	18,44	27,50	25,80	28,66
F3	290,21	92,18	64,29	141,86	72,05	86,18	770,63	278,35	235,85	141,86	133,97	91,30	79,71
F4	290,21	92,18	64,29	141,86	72,05	86,18	770,63	278,35	235,85	141,86	133,97	91,30	79,71
F5	96,33	36,99	27,64	28,67	24,22	22,64	178,14	62,56	73,06	28,67	37,52	34,29	36,75
F6	193,88	55,19	36,64	113,19	47,83	63,54	592,49	215,79	162,79	113,19	96,44	57,01	42,96
F7	87,06	17,19	10,25	18,44	11,85	15,42	120,18	38,94	51,18	18,44	27,50	25,80	28,66
F8	9,27	19,80	17,39	10,23	12,37	7,23	57,96	23,63	21,88	10,23	10,02	8,49	8,09
F9	203,15	74,99	54,03	123,42	60,20	70,76	650,45	239,41	184,67	123,42	106,47	65,50	51,05
F10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F12	87,06	17,19	10,25	18,44	11,85	15,42	120,18	38,94	51,18	18,44	27,50	25,80	28,66
F13	87,06	17,19	10,25	18,44	11,85	15,42	120,18	38,94	51,18	18,44	27,50	25,80	28,66
F14	87,04	17,20	10,25	18,44	11,85	15,41	120,17	38,92	51,19	18,44	27,50	25,80	28,66
F15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F17	2812,28	860,33	68,16	1384,69	675,61	801,66	7637,19	2737,78	2309,10	1384,69	1294,21	852,34	611,89
F18	2812,28	860,33	68,16	1384,69	675,61	801,66	7637,19	2737,78	2309,10	1384,69	1294,21	852,34	611,89
F19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	7229,89	2195,16	462,12	3439,26	1711,07	2032,34	19015,72	6807,24	5839,40	3439,26	3271,81	2207,35	1693,98