



DECIMOQUINTA CONVOCATORIA PARA EL FOMENTO DE LA INVESTIGACIÓN Y LA INNOVACIÓN 2020

Título del proyecto			
Análisis numérico del comportamiento termodinámico y económico de sistemas de poligeneración adaptados a las condiciones geográficas y climáticas de tres regiones colombianas diferentes			
Campo de acción		Transdisciplinariedad - Aporte al PIM	
Medio Ambiente		El Proyecto aporta a la línea 3: Proyección social e investigación pertinentes (Focalizar y articular la investigación y la proyección social USTA Colombia con visibilidad e impacto nacional y global), de la misma manera involucra otras disciplinas como la ingeniería ambiental y electrónica.	
Articulación con funciones sustantivas y el sector social y productivo			
El proyecto fomenta la investigación debido a que la poligeneración de energía es un tema novedoso y poco estudiado en Colombia, que permitiría el desarrollo de zonas no interconectadas y vulnerables del país, impactando así a comunidades y regiones poco prósperas para mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Es importante resaltar que, el objeto de estudio de este proyecto es escalable, por lo que aun cuando en este proyecto solo se hace énfasis en comunidades civiles, en futuros trabajos será posible aplicar estrategias similares en el ámbito industrial. Por otra parte, este proyecto contribuye en la formación del recurso humano a través del desarrollo de trabajos de grado, cursos dirigidos y la implementación de estrategias pedagógicas para la formación en CTI.			
Grupo de investigación		Línea de investigación en la que se inscribe el proyecto	
GEAMEC – TermoFluidos			
Nombre del Investigador principal	Enlace CvLAC	Enlace ORCID	Enlace Google Académico
Jesús Ramírez Pastran	http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001585933	https://orcid.org/0000-0002-9729-0993	https://scholar.google.com/citations?user=bcUBfhIAAAAJ&hl=es&oi=ao
División	Facultad	Programa	Grupo de investigación
Ingenierías	Ingeniería Mecánica	Ingeniería Mecánica	GEAMEC



Nombre del Co-investigador	Enlace CvLAC	Enlace ORCID	Enlace Google Académico
Héctor Fabio Montaña	http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/EnRecursoHumano/inicio.do	https://orcid.org/0000-0001-7146-7482	https://scholar.google.es/citations?hl=es&user=6ARxmAEAAAAAJ&scilu=&scisig=AMstHGQAAAAAW4QyQOj1WPUwRexX914IJSqSGBLJFv&qmla=AJsN-F6iINrGi143opdPtwLln6-QqS_A8WrN55CunzDS1EH7LGw9612V7UqfKNFbwFZALBpkVXV7oFn9utwPVwl3AeHGbx58wJSv74NywKSSfKvlsAeLhN07mFYW7Hu2CRj_4Hzwyw&ciund=1021873099101452486
División	Facultad	Programa	Grupo de investigación
Ingenierías	Ingeniería Mecánica	Ingeniería Mecánica	GEAMEC
Nombre del Co-investigador	Enlace CvLAC	Enlace ORCID	Enlace Google Académico
Edwin Francisco Forero	http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000761834	https://orcid.org/0000-0002-3818-7793	https://scholar.google.es/citations?user=pv86djlAAAAJ&hl=es
División	Facultad	Programa	Grupo de investigación
Ingenierías	Ingeniería Electrónica	Ingeniería Electrónica	MEM
Nombre del Co-investigador	Enlace CvLAC	Enlace ORCID	Enlace Google Académico
María Torres	No aplica	https://orcid.org/0000-0002-9813-0326	
División	Facultad	Programa	Grupo de investigación
Externo	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso - Chile	Ingeniería Mecánica	-



Resumen de la propuesta	Palabras clave
En este proyecto se analiza por medio de simulaciones computacionales, el comportamiento termodinámico y los costos operacionales de sistemas de poligeneración o SP adaptados a las condiciones climáticas y ambientales de tres regiones del territorio colombiano. En una primera fase del proyecto se identificarán las tres regiones con mayor potencial energético, para las cuales se desarrollarán los diagramas de proceso de los SP. Seguidamente se construyen los modelos computacionales de cada uno de ellos y se resuelven con ayuda del programa computacional TRNSYS, para así, determinar los rangos de operación de cada uno. Finalmente, se tendrá una caracterización termodinámica del funcionamiento de los SP, así como los costos de operación asociados.	Poligeneración, Simulación Computacional, Energías alternativas, Desarrollo sostenible.
Problema de investigación	
En los últimos años la demanda energía y agua potable a nivel mundial, ha aumentado considerablemente en respuesta a los cambios demográficos y económicos de los países en vías de desarrollo [1]. Al respecto, la mayoría de los sistemas de generación actuales, siguen funcionando con combustibles fósiles, que generan emisiones de CO₂ a la atmósfera y se ha demostrado que estas están directamente relacionadas con el calentamiento global [2], . Por lo que encontrar formas y métodos de generación de energía que evite o genere bajas emisiones de este gas a la atmósfera, se ha convertido en un objeto de estudio de suma importancia para la comunidad científica en los últimos años [3]. El acceso al agua potable se ha convertido en uno de los problemas mundiales actuales a resolver, ya que de acuerdo con datos presentados por la Organización de las Naciones Unidas, alrededor de un billón de personas no tienen acceso a este fluido vital [3]. Por estos motivos, recientemente se han desarrollado investigaciones relacionadas con la generación de energías limpias y potabilización de agua, lo cual ha generado un cambio de paradigma frente al escenario energético mundial [4]. Una de las estrategias para disminuir el impacto que tienen los procesos de generación de energía convencionales, se relaciona con el concepto de sistemas de poligeneración, llamados de ahora en adelante simplemente como SP. Estos son capaces de proveer varios vectores de energía (potencia, calentamiento, enfriamiento) incluso de manera simultánea, además pueden ser utilizados para la producción de agua potable [1]; asimismo, son atractivos si se combinan con el uso de energías renovables. Sin embargo, la implementación de este tipo de sistemas es escaso según reportes que indican que solo el 10% de la generación de energía a nivel mundial es producida mediante poligeneración [1]. Algunas excepciones a esta estadística son Holanda, Dinamarca y Finlandia, países que aumentaron la producción de energía a través de este tipo de sistemas, llegando a producir entre un 30% y 50% del valor total demandado por su población y se plantea que es la tendencia actual en países pertenecientes a la Unión Europea y en Estados Unidos, con el objetivo de reducir los costos de producción energética del sector industrial. [1].	



Con la finalidad de implementar y desarrollar los SP, actualmente se busca establecer configuraciones que permitan el uso de tecnologías y equipos existentes alimentados por fuentes renovables de energía, siendo interesantes las configuraciones que permiten la potabilización de agua; esto último es de gran interés en regiones con escaso o nulo acceso a este recurso [1]–[8]. Así mismo, este tipo de sistemas contribuyen a la mejora en la distribución de energía, mediante la integración de diversas tecnologías de generación a pequeñas escalas en reemplazo de las grandes plantas de generación eléctrica. Mediante los SP la electricidad es producida en zonas cercanas a la ubicación de los usuarios finales lo que disminuye las pérdidas de energía asociadas a los procesos de transmisión. Lo anterior permite que los usuarios tengan una menor dependencia de la red de energía integrada, lo que permitiría el acceso a la energía eléctrica en las zonas no interconectadas (ZNI), evitando emisiones de CO₂.

Las configuraciones de los SP se consideran casi ilimitadas debido a la gran cantidad de combinaciones posibles; no obstante, tales combinaciones están delimitadas por la disponibilidad de recursos energéticos en la región donde se implemente. Por ejemplo, no es lo mismo realizar un diseño para una región costera que para una zona montañosa. Por tal motivo, se debe analizar cuidadosamente la disponibilidad de recursos energéticos y realizar los estudios termodinámicos y económicos pertinentes para evaluar su factibilidad de operación. En Colombia existen regiones con condiciones climatológicas y geográficas adecuadas para ser utilizadas en la implementación de SP. Al respecto, [9] plantea que es un país con un alto compromiso en el uso de energías renovables, solamente superado en este aspecto por algunos países del continente como Brasil y Costa Rica. Sin embargo, hasta el mayor conocimiento de los autores de este trabajo, existe un único referente de SP en Colombia (parque de poligeneración de la Guajira), por lo que se considera que el avance en desarrollos de esta tecnología en el país es insuficiente.

El desarrollo de SP en Colombia permitiría mejorar la calidad de vida de su población, gracias al desarrollo tecnológico sostenible en áreas consideradas prioritarias por la Organización de las Naciones Unidas. Al respecto, es importante resaltar que se han desarrollado trabajos de investigación asociados al uso e implementación de energías renovables para dar solución a los requerimientos energéticos que demanda el país [9]–[11], e incluso se han desarrollado proyectos de cogeneración y trigeneración para mejorar la eficiencia energética [12], [13]; no obstante, ninguno de estos proyectos se puede catalogar como un SP.

El diseño de SP se puede realizar tanto experimental como numéricamente. Pero, hacer montajes experimentales tiene un alto costo y un requerimiento de espacio considerable. En tal sentido, y en respuesta a estas limitantes, los estudios numéricos o simulaciones computacionales como también son conocidos, han surgido como una alternativa de diseño (F Calise et al., 2017; Francesco Calise, d'Accadia, et al., 2018; Francesco Calise, de Notaristefani di Vastogirardi, et al., 2018; Mohan, 2014; Zhang et al., 2018). Estos trabajos han demostrado que la simulación computacional puede ser usada de forma confiable para predecir el comportamiento de este tipo de sistemas, permitiendo además tener posibilidades de optimizarlos. Así, mediante el uso de simulaciones computacionales es posible evaluar diferentes combinaciones dentro del diseño del SP y, por ende, encontrar una solución adecuada y pertinente a cada situación específica.

De acuerdo con lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación ¿Es posible implementar SP adaptados a las condiciones climáticas y geográficas en Colombia?

Justificación

El presente trabajo de investigación se considera tecnológicamente pionero en Colombia, ya que abarca conceptos y técnicas de modelamiento que, aunque han sido utilizadas en otras partes del mundo, no se tiene evidencia de su uso en el país. Por lo tanto, la USTA sería reconocida como la primera universidad que formalmente utilice técnicas de simulación en el estudio de SP.

Desde el punto de vista ambiental, el desarrollo de este proyecto tiene un impacto importante debido a que los resultados obtenidos servirán como base para una futura implementación de SP, lo que permitiría reemplazar los sistemas actuales de generación, reduciendo los niveles de contaminación e impacto ambiental. Así mismo, se desarrolla conocimiento científico e ingenieril en el área de la generación de energía por medios no convencionales, promoviendo una disminución en el uso de combustibles fósiles y la dependencia en los sistemas de generación centralizados a gran escala. Por otra parte, desde la perspectiva social, los SP que resulten de este proyecto podrán ser la base para que comunidades en ZNI tengan acceso a servicios energéticos confiables y constantes que les permita desarrollar sus regiones de forma sostenible incluyendo la posibilidad de acceder a el suministro de agua potable.

Académicamente, este proyecto involucrará personal investigador con diferentes competencias, dándole así un enfoque transdisciplinario. Durante el desarrollo de este se trabajará con estudiantes de pregrado mediante trabajos de grado o actividades de investigación de apoyo, permitiendo que adquieran competencias pertinentes a este tema, por lo que en un futuro sería posible profundizar en el desarrollo de los SP.

Objetivo general

Analizar mediante el uso de simulaciones computacionales, el comportamiento termodinámico y los costos operacionales de sistemas de poligeneración, adaptados a las condiciones geográficas y climáticas de tres regiones colombianas.

Objetivos específicos

1. Seleccionar tres regiones dentro del territorio nacional que posean las características mínimas requeridas para la implementación de un sistema de poligeneración.
2. Desarrollar modelos computacionales de sistemas de poligeneración para cada una de las regiones seleccionadas.
3. Determinar el comportamiento termodinámico de los sistemas de poligeneración propuestos mediante la solución de los modelos computacionales.
4. Realizar un análisis económico del funcionamiento de los sistemas de poligeneración propuestos.

Estado del arte y marco conceptual

Nit. 860.012.357-6

SEDE PRINCIPAL BOGOTÁ - PBX: (571) 587 87 97 Línea gratuita nacional: 01 8000 111 180
Carrera 9.ª n.º 51-11 / contactenos@usantotomas.edu.co
www.usta.edu.co

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN ABIERTA Y A DISTANCIA
PBX: (571) 595 00 00 ext. 2044 / Carrera 10.ª n.º 72-50 / admisiones@ustadistancia.edu.co
www.ustadistancia.edu.co



Estado del arte

El estudio y desarrollo de SP a nivel mundial está actualmente enfocado en proponer nuevos ciclos termodinámicos acoplados, que permitan satisfacer los requerimientos de energía, agua caliente, acondicionamiento de aire y tratamiento de agua de una comunidad específica [7]. Al respecto, [14] utilizó una combinación que incorpora un ciclo Rankine convencional y un “chiller” de absorción, con la finalidad de mejorar la eficiencia energética del proceso. Así mismo, teniendo en cuenta que los SP son más atractivos cuando se incorporan energías renovables, [15] propuso un sistema de energía solar combinado, para refrigeración, calefacción y producción de 500 kW eléctricos. Este diseño consistió en usar un “chiller” de absorción simple en conjunto con un ciclo Rankine orgánico, del cual obtuvo una eficiencia del sistema del 90%, siendo más eficiente que los sistemas propuestos por [16]–[18].

En el mismo orden de ideas, [19] diseñó y desarrolló un sistema de cogeneración para refrigeración y suministro de agua potable, a partir del uso combinado de procesos de desalinización mediante humidificación y deshumidificación, así como un “chiller” de absorción de etapa simple. Estos investigadores usaron el calor rechazado en el absorbedor y condensador para activar el proceso de desalinización. Mediante este arreglo los investigadores obtuvieron un rendimiento energético más alto que si se usaran los procesos por separado. En este mismo orden de ideas, [20] desarrolló un SP para ser usado bajo condiciones ambientales en Kuwait, este fue diseñado para producir energía eléctrica, agua potable y ambientes refrigerados de manera simultánea, utilizando una combinación de un ciclo de potencia, un sistema de desalinización y un sistema de refrigeración. Particularmente, estos investigadores consideraron procesos de ósmosis inversa y flasheo de múltiples etapas como procesos de desalinización y el sistema de refrigeración fue diseñado mediante un sistema de absorción en conjunto con uno de compresión de aire. Esta combinación generó un ahorro de combustible considerable en comparación a la activación de los mismos sistemas por separado.

Desde el punto de vista de la modelación computacional, cabe destacar que, [21] realizó un modelo computacional para un sistema de trigeneración para la obtención de energía eléctrica, agua potable y acondicionamiento de aire. El sistema consistió en una unidad de desalinización, un “chiller” de absorción y colectores solares térmicos y fotovoltaicos. Las simulaciones se realizaron en régimen transitorio para diferentes condiciones de operación, a fin de encontrar un funcionamiento óptimo en términos de eficiencia energética y viabilidad económica. Finalmente, recientemente se ha desarrollado una cantidad importante de trabajos relacionados con la elaboración de modelos computacionales para simular el comportamiento dinámico de diferentes SP. Dentro de estos trabajos se pueden mencionar los estudios realizados por [1], [22]–[25]. Así, luce evidente que el uso de simulaciones computacionales es visto por la comunidad académica y científica como una herramienta accesible y confiable para realizar estudios de este tipo.

Marco conceptual

Ciclos de potencia: Sistemas termodinámicos que permiten la conversión de parte de la energía térmica obtenida de cualquier fuente a energía mecánica o potencia eléctrica de salida.

Sistemas de poligeneración: Son sistemas que permiten suministrar simultáneamente diferentes vectores de energía (Energía eléctrica, calefacción, refrigeración, etc.), así como otros productos (Agua potable, urea, singas, entre otros) usando diferentes fuentes de energía (solar, fósil, eólica, hidráulica, etc.) [1]. Un ejemplo de este tipo de sistemas es mostrado en la Figura 1.

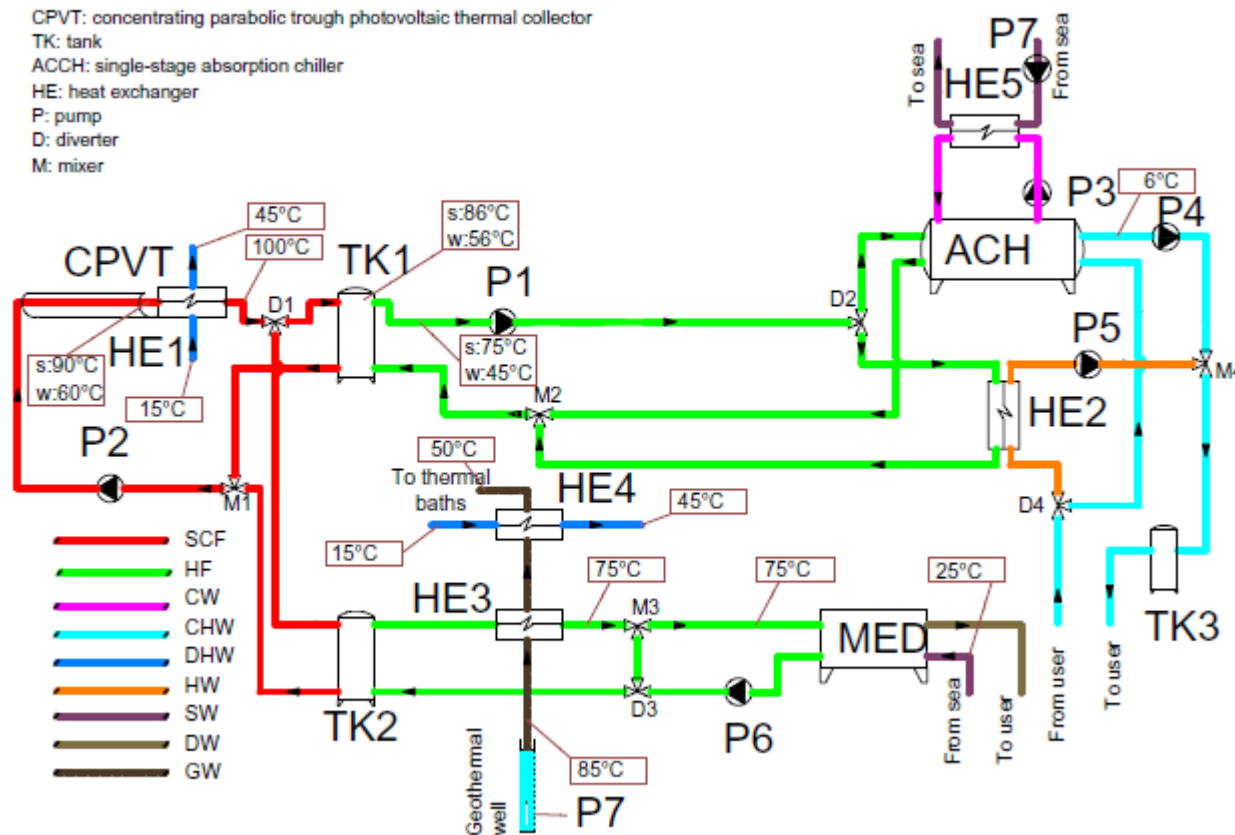


Figura 1. Diagrama de flujo de un sistema de poligeneración geotérmica. Figura tomada de [25]

Energías renovables: Son aquellas que son provistas de forma continua por la naturaleza. Estas energías provienen de la radiación solar, del núcleo de la tierra y de las fuerzas gravitacionales de la luna y el sol sobre los océanos. Particularmente, se pueden clasificar diferentes tipos de energías renovables: energía eólica, energía solar, biomasa, energía hidráulica y geotérmica [26].

Simulación computacional: Se refiere al hecho de visualizar todo un sistema y su completo comportamiento, mediante herramientas de visualización computacional, con niveles de realismo considerables. También se usa este término para indicar que se utilizan computadores para resolver numéricamente las leyes que gobiernan los procesos y fenómenos asociados al sistema en cuestión [27].

Metodología

Para el desarrollo de esta propuesta se ha dispuesto una metodología que da respuesta al cumplimiento de los objetivos mediante actividades planeadas para cada uno de ellos.

Objetivo específico 1: *Seleccionar tres regiones dentro del territorio nacional que posean las características mínimas requeridas para la implementación de un sistema de poligeneración.*

1. Recopilación de información documental sobre las características geográficas y climáticas del país.
2. Clasificación de las regiones por su potencial energético.
3. Selección de tres regiones con mayor potencial energético.
4. Determinar los requerimientos energéticos de una comunidad asociada a cada región seleccionada.

Objetivo específico 2: *Desarrollar modelos computacionales de sistemas de poligeneración para cada una de las regiones seleccionadas.*

1. Identificar los posibles equipos a utilizar de acuerdo con los potenciales y requerimientos energéticos de cada una de las regiones seleccionadas.
2. Generar los diagramas de proceso de los SP que permitan el aprovechamiento del potencial energético y el suministro de la energía requerida en cada una de las regiones previamente seleccionadas.
3. Construir el modelo matemático para cada SP.
4. Validar la herramienta computacional TRNSYS, la cual se utilizará para la simulación de los modelos computacionales. Esta validación se hará mediante una comparación con datos obtenidos en literatura científica.
5. Desarrollar el modelo computacional para cada uno de los SP propuestos.

Objetivo específico 3: *Determinar el comportamiento termodinámico de los sistemas de poligeneración propuestos mediante la solución de los modelos computacionales*

1. Resolver los modelos computacionales de los SP propuestos.
2. Realizar estudios de sensibilidad en los modelos simulados e implementar ajustes de ser necesarios.
3. Establecer los rangos de operación de los modelos de los SP propuestos.

Objetivo específico 4: Realizar un análisis económico del funcionamiento del sistema de poligeneración propuesto.

1. Determinar el costo de funcionamiento (OPEX) de cada uno de los SP propuestos.
2. Determinar el costo de funcionamiento (OPEX) de cada uno de los sistemas propuestos para el caso en el cual toda la energía requerida se tome de la red de servicios públicos existentes.
3. Comparar los costos de funcionamiento de los sistemas de poligeneración, de acuerdo con los valores obtenidos en los dos pasos anteriores.

Resultados esperados

1. Tres modelos computacionales que sirvan como prototipos virtuales de SP adaptados a las condiciones ambientales y climáticas de regiones diferentes del territorio colombiano. Estos modelos permitirán predecir el comportamiento de los SP, y así, proponer los rangos y modos de funcionamiento. Así mismo, se generará nuevo conocimiento en el área, el cual podrá ser replicable por otros investigadores en el territorio colombiano.
2. Curvas de desempeño dinámico de cada uno de los sistemas de poligeneración propuestos. Con estas será posible predecir la eficiencia de los sistemas, así como cuantificar los ahorros económicos que se puedan obtener en el momento de su implementación, en comparación a los costos generados si se usaran sistemas de generación convencionales.
3. Desde el punto de vista de producción académica se propone lo siguiente:
 - a. Dos (2) artículos Q3 en revistas indexadas internacionalmente
 - b. Dos (2) trabajos de grado de pregrado
 - c. Una participación en evento científico - Internacional
 - d. Informe final de proyecto de investigación.

Cronograma

ACTIVIDADES	RESPONSABLE	FECHA		FEBRERO				MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO				SEPTIEMBRE				OCTUBRE				NOVIEMBRE			
		Inicio	Fin.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Objetivo 1		01-02	12-04																																								
Recopilación de información documental sobre las características geográficas y climáticas del país.	Jesús Ramírez y Héctor Montaña.	01-02	29-02																																								

Clasificación de las regiones por su potencial energético.	Jesús Ramírez y Edwin Forero	01-03	07-03
Selección de tres regiones con mayor potencial energético.	Jesús Ramírez, Héctor Montaña, Edwin Forero	08-03	15-03
Determinar los requerimientos energéticos de una comunidad asociada a cada región seleccionada.	Jesús Ramírez y Héctor Montaña	16-03	12-04
Objetivo 2		13-04	12-07
Identificar los posibles equipos a utilizar de acuerdo con los potenciales y requerimientos energéticos de cada una de las regiones seleccionadas.	Todos	13-04	30-04
Generar los diagramas de proceso de los sistemas de poligeneración que permitan el aprovechamiento del potencial energético y el suministro de la energía requerida.	Jesús Ramírez y María Torres	01-05	31-05
Construir el modelo matemático para cada sistema de poligeneración.	Jesús Ramírez y María Torres	01-06	14-06
Validar la herramienta (TRNSYS) que se utilizará para la simulación de los modelos computacionales. Esta validación se hará mediante una comparación con datos obtenidos	Héctor Montaña y Edwin Forero	01-05	31-05

[illegible]



	Publicaciones (Artículos, proceso editorial y traducción)			\$6.000.000
TOTAL DEL PROYECTO:				\$43.587.500

Referencias bibliográficas

- [1] F. Calise, G. de Notaristefani di Vastogirardi, M. Dentice d'Accadia, and M. Vicidomini, "Simulation of polygeneration systems," *Energy*, vol. 163, pp. 290–337, 2018.
- [2] J. Amestoy Alonso, *El planeta tierra en peligro : calentamiento global, cambio climatico, soluciones*. Ecu, 2013.
- [3] F. Calise, M. D. d'Accadia, E. Quiriti, M. Vicidomini, and A. Piacentino, *Trigeneration and Polygeneration Configurations for Desalination and Other Beneficial Processes*. Elsevier Inc., 2018.
- [4] F. Calise, R. D. Figaj, and L. Vanoli, "IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Optimization of a novel polygeneration system integrating photovoltaic/thermal collectors, solar assisted heat pump, adsorption chiller and electrical energy storage Optimization of a novel polygeneration system integrating photovoltaic/thermal collectors, solar assisted heat pump, adsorption chiller and electrical energy storage."
- [5] S. B. Ahmad, J. Batista, and A. Sajjad, "Evaluating the Feasibility of Photovoltaic-Based Plant for Potable Water Treatment," in *World Environmental and Water Resources Congress 2017*, 2017, pp. 256–263.
- [6] G. Mohan, "Novel Solar thermal polygeneration system for sustainable production of cooling , clean water and domestic hot water in UAE," 2014.
- [7] R. Zhang, Y. Chen, K. Lei, B. Ye, J. Cao, and D. Liu, "Thermodynamic and economic analyses of a novel coal pyrolysis-gasification-combustion staged conversion utilization polygeneration system," *Asia-Pacific J. Chem. Eng.*, vol. 13, no. 2, p. e2171, Mar. 2018.
- [8] A. Ghasemi, P. Heidarnajad, and A. Noorpoor, "A novel solar-biomass based multi-generation energy system including water desalination and liquefaction of natural gas system: Thermodynamic and thermoeconomic optimization," *J. Clean. Prod.*, vol. 196, pp. 424–437, Sep. 2018.
- [9] C. Alberto Toledo Arias, "Evaluación de la energía solar fotovoltaica como solución a la dependencia energética de zonas rurales de Colombia," 2013.
- [10] A. P. Buendía Yáñez, "Caracterización y evaluación económica para la inversión en plantas menores a 20 MW conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Colombia a partir de fuentes de energías renovables eólica y solar," *Repos. Inst. UN*, 2014.
- [11] H. García, A. Corredor, L. Calderón, and M. Gómez, "Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia," 2013.
- [12] A. P. Becerra Quiroz, A. L. Buitrago Coca, and P. Pinto Baquero, "Sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia," *Ing. Solidar.*, vol. 12, no. 20, pp. 133–149, Oct. 2016.



- [13] F. R. P. Arrieta, F. N. Teixeira, E. Yáñez, E. Lora, and E. Castillo, "Cogeneration potential in the Colombian palm oil industry: Three case studies," *Biomass and Bioenergy*, vol. 31, no. 7, pp. 503–511, Jul. 2007.
- [14] S. M. Sadrameli and D. Y. Goswami, "Optimum operating conditions for a combined power and cooling thermodynamic cycle," *Appl. Energy*, vol. 84, no. 3, pp. 254–265, Mar. 2007.
- [15] F. A. Al-Sulaiman, F. Hamdullahpur, and I. Dincer, "Performance assessment of a novel system using parabolic trough solar collectors for combined cooling, heating, and power production," *Renew. Energy*, vol. 48, pp. 161–172, Dec. 2012.
- [16] F. A. Al-Sulaiman, I. Dincer, and F. Hamdullahpur, "Exergy modeling of a new solar driven trigeneration system," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 2228–2243, Sep. 2011.
- [17] F. A. Al-Sulaiman, I. Dincer, and F. Hamdullahpur, "Thermoeconomic optimization of three trigeneration systems using organic Rankine cycles: Part II – Applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 69, pp. 209–216, May 2013.
- [18] F. A. Al-Sulaiman, I. Dincer, and F. Hamdullahpur, "Thermoeconomic optimization of three trigeneration systems using organic Rankine cycles: Part I – Formulations," *Energy Convers. Manag.*, vol. 69, pp. 199–208, May 2013.
- [19] A. Picinardi, "Cogeneration of cooling energy and fresh water," Apr. 2011.
- [20] H. J. Hussain, "Development of a Hybrid Powerplant for Kuwait: The Simultaneous Production of Power, Fresh Water and Cooling," 2010.
- [21] F. Calise, M. Dentice d'Accadia, and A. Piacentino, "A novel solar trigeneration system integrating PVT (photovoltaic/thermal collectors) and SW (seawater) desalination: Dynamic simulation and economic assessment," *Energy*, vol. 67, pp. 129–148, Apr. 2014.
- [22] F. Calise, A. Macaluso, A. Piacentino, and L. Vanoli, "A novel hybrid polygeneration system supplying energy and desalinated water by renewable sources in Pantelleria Island," *Energy*, vol. 137, pp. 1086–1106, Oct. 2017.
- [23] A. Buonomano, F. Calise, M. Dentice d'Accadia, and L. Vanoli, "A novel solar trigeneration system based on concentrating photovoltaic/thermal collectors. Part 1: Design and simulation model," *Energy*, vol. 61, pp. 59–71, Nov. 2013.
- [24] F. Calise, M. D. d'Accadia, and L. Vanoli, "Design and dynamic simulation of a novel solar trigeneration system based on hybrid photovoltaic/thermal collectors (PVT)," *Energy Convers. Manag.*, vol. 60, pp. 214–225, Aug. 2012.
- [25] F. Calise, A. Cipollina, M. Dentice d'Accadia, and A. Piacentino, "A novel renewable polygeneration system for a small Mediterranean volcanic island for the combined production of energy and water: Dynamic simulation and economic assessment," *Appl. Energy*, vol. 135, pp. 675–693, Dec. 2014.
- [26] B. Robyns, A. Davigny, B. François, A. Henneon, and J. Sprooten, *Electricity Production from Renewable Energies*. John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [27] H. Charles, *Numerical Computation of internal and external flows*, Second. Elsevier, 2007.