

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



**Simulación CFD de una central de chimenea solar para abastecer
parcialmente la demanda de energía eléctrica en una empresa cementera**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

AUTOR

Neyling Yuriko Teresa Macalopu Rimachi

ASESOR

Alejandro Segundo Vera Lazaro

<https://orcid.org/0000-0003-0198-338X>

Chiclayo, 2025

**Simulación CFD de una central de chimenea solar para abastecer
parcialmente la demanda de energía eléctrica en una empresa cementera**

PRESENTADA POR

Neyling Yuriko Teresa Macalopu Rimachi

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

APROBADA POR

Dante Omar Panta Carranza

PRESIDENTE

Rodolfo Arturo Garcia Uchofen

SECRETARIO

Alejandro Segundo Vera Lazaro

VOCAL

Dedicatoria

A Pedro e Irene por ser mi pilar en cada paso que doy, por su amor incondicional, por creer en mí cuando más lo necesitaba y ser mi mayor inspiración. Este logro es tanto mío como de ustedes.

A Jessica, Gina y Catherin por ser mis compañeras de vida y por darme siempre el ejemplo de fortaleza y amor, su compañía ha sido mi mayor motivación.

Agradecimiento

Al culminar esta investigación quiero expresar mi más sincero agradecimiento

A Dios Todopoderoso, por su infinita bondad y misericordia, por guiar mis pasos en este camino académico, dándome fortaleza en los instantes de duda. A la Santísima Virgen María, que bajo su manto protector encontré el coraje para seguir adelante.

A mis padres Pedro e Irene, por ser mi soporte y que me acompañan en cada etapa de mi vida; y a mis hermanas por estar conmigo durante este tiempo de formación académica.

A mi asesor Dr. Alejandro Vera Lázaro y a los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, por compartir sus conocimientos y sabiduría, quienes de manera única han contribuido con mi formación profesional.

A mis amigos de la facultad que, con su compañía, ánimo y consejos me han enseñado que la amistad es un refugio en los momentos de alegría y estrés siendo motivación para seguir adelante.

TURNITIN_MACALOPÚ RIMACHI NEYLING YURIKO TERESA.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

INDICE DE SIMILITUD

16%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

1%

2

tesis.usat.edu.pe

Fuente de Internet

1%

3

qdoc.tips

Fuente de Internet

1%

4

www.hindawi.com

Fuente de Internet

<1%

5

www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1%

6

1library.co

Fuente de Internet

<1%

7

idoc.pub

Fuente de Internet

<1%

8

www.researchgate.net

Fuente de Internet

<1%

9

repositorio.uncp.edu.pe

Fuente de Internet

ÍNDICE

RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Situación Problemática.....	12
1.2. Planteamiento del problema	13
1.3. Justificación.....	14
1.3.1. Justificación tecnológica	14
1.3.2. Justificación económica	14
1.3.3. Justificación ambiental	14
1.3.4. Justificación social	15
1.4. Objetivos	15
1.4.1. Objetivo General	15
1.4.2. Objetivos Específicos	15
II. MARCO TEÓRICO	16
2.1. Antecedentes	16
2.2. Base teórica	20
III. MARCO METODOLÓGICO	42
3.1. Tipo, nivel y enfoque de investigación	42
3.2. Población y muestra	42
3.3. Métodos y técnicas de recolección de datos.....	42
3.3.1. Métodos.....	42
3.3.2. Técnicas.....	43
3.4. Diseño de Investigación	45
3.5. Operacionalización de Variables.....	46
3.6. Formulación de hipótesis	48
3.7. Matriz de consistencia.....	50
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
4.1. Evaluación de las condiciones meteorológicos de la zona norte del Perú para determinar una ubicación óptima para la central de chimenea solar.....	53
4.2. Cálculo de la demanda parcial de energía eléctrica para abastecer parcialmente una empresa cementera.	61

4.3.	Diseño de una central de chimenea solar y selección de componentes	66
4.4.	Evaluación del comportamiento del flujo de aire dentro de la central de chimenea solar para el abastecimiento parcial de la demanda de energía eléctrica.	83
4.5.	Evaluación económica para determinar su viabilidad.....	108
V.	CONCLUSIÓN	117
VI.	RECOMENDACIONES	119
	REFERENCIAS	120
Anexos	127
	Anexo 1. Plano de central de chimenea solar	128
	Anexo 2. Ficha técnica de PK500	129

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Información solar del Perú	54
Tabla 2: Información solar de Piura	56
Tabla 3: Ubicación para central de chimenea solar.....	57
Tabla 4: Datos meteorológicos de la ubicación para la central.....	58
Tabla 5: Datos de la máxima demanda de potencia en horas punta según la actividad económica.....	61
Tabla 6: Datos de la máxima demanda potencia en el día en HFP y HP por empresa cementera	62
Tabla 7: Consumo de potencia en el día de Máxima Demanda (HP)	63
Tabla 8: Demanda de potencia generada por Centrales de Chimenea Solar según autores	64
Tabla 9: Datos de máxima demanda potencia y energía en el día por empresa cementera	65
Tabla 10: Necesidades para el diseño	66
Tabla 11: Métricas para el diseño	67
Tabla 12: Matriz de necesidades - métricas	67
Tabla 13: Evaluación de alternativas	73
Tabla 14: Dimensionamiento de componentes según autores	77
Tabla 15: Datos técnicos y geométricos para el diseño de la Central de Chimenea Solar.....	78
Tabla 16: Propiedades del concreto negro	79
Tabla 17: Propiedades del cobre	79
Tabla 18: Propiedades del vidrio templado transparente	80
Tabla 19: Reporte de diferencia de presión total disponible.....	102
Tabla 20: Reporte de caudal volumétrico	103
Tabla 21: Reporte de tasa total de transferencia de calor.....	104
Tabla 22: Costos de inversión inicial	108
Tabla 23: Costos operativos anuales	109
Tabla 25: Flujo de caja	110
Tabla 24: Ingresos proyectados.....	112
Tabla 26: Valor presente de los costos operativos	114
Tabla 27: Valor presente de la energía generada	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Planta de Chimenea Solar en Manzanares, España	20
Figura 2: Funcionamiento de una Chimenea Solar	21
Figura 3: Irradiación Horizontal Global (GHI)	28
Figura 4: Estructuras del flujo turbulento	36
Figura 5: Enfoques computacionales	39
Figura 6: Modelo de Condiciones de Contorno	41
Figura 7: Mapa de climatización en el Perú	53
Figura 8: Mapa de recurso solar del Perú	54
Figura 9: Mapa de recurso solar de Piura	55
Figura 10: Mapa de recurso eólico de Piura	56
Figura 11: Ubicación para central de chimenea solar	58
Figura 12: Datos meteorológicos	59
Figura 13: Consumo de potencia en el día de Máxima Demanda (HP)	63
Figura 14: Diseño conceptual de alternativa 1	70
Figura 15: Diseño conceptual de alternativa 2	71
Figura 16: Diseño conceptual de alternativa 3	71
Figura 17: Diseño conceptual de alternativa 4	72
Figura 18: Densidad vs conductividad térmica de materiales plásticos y vidrios	74
Figura 19: Densidad vs conductividad térmica de cerámicas no técnicas y metales/aleaciones	75
Figura 20: Densidad vs conductividad térmica del cobre y aleaciones	76
Figura 21: Croquis de chimenea	81
Figura 22: Croquis del colector	82
Figura 23: Croquis del diseño conceptual de la central	82
Figura 24: Vista general del mallado	83
Figura 25: Detalles del mallado	84
Figura 26: Calidad de Mallado según Skewness	85
Figura 27: Calidad de mallado según Aspect Ratio	85
Figura 28: Selección de zonas para estudio	86
Figura 29: Región determinada como colector y chimenea	86
Figura 30: Región de entrada y salida de aire	87
Figura 31: Región tierra de la central de chimenea solar	87

Figura 32: Flujo de aire en la central de chimenea solar.....	88
Figura 33: Configuración de parámetros generales.....	88
Figura 34: Selección del modelo de turbulencia	89
Figura 35: Modelo de radiación solar	90
Figura 36: Condiciones de contorno para la entrada y salida del flujo	92
Figura 37: Métodos de solución para la simulación.....	93
Figura 38: Residuales respecto a las iteraciones simuladas	94
Figura 39: Resultados de temperatura en la central de chimenea solar	95
Figura 40: Resultados de temperatura en la base del sistema	95
Figura 41: Resultados de velocidad del fluido en la central de chimenea solar.....	96
Figura 42: Resultados de velocidad del fluido en la base del sistema	97
Figura 43: Líneas de corriente y distribución de velocidad en la central propuesta	98
Figura 44: Resultados de presión	98
Figura 45: Resultados de presión en la base de la central	99
Figura 46: Perfil de velocidad en la chimenea solar	100
Figura 47: Distribución de presión en la chimenea solar	101
Figura 47: Simulación del sistema en el programaDigSilent Power Factory	107

RESUMEN

La producción de electricidad mediante fuentes no renovables contribuye significativamente a la emisión de gases de efecto invernadero. En 2022, Perú registró emisiones de 55 144 megatoneladas de CO₂, ocupando el puesto 129 de 184 países. Es crucial implementar sistemas de generación de energía sostenible, como las centrales de chimenea solar, que aprovechan la energía solar para producir electricidad y reducir emisiones contaminantes. Por esto, la presente investigación simuló mediante Dinámica de Fluidos Computacional una central de chimenea solar para abastecer parcialmente la demanda energética de una empresa cementera. Se evaluaron las condiciones meteorológicas del norte del Perú con el software RETScreen, seleccionando el distrito de 26 de Octubre (5°11'59"S 80°35'59"O) por su alta irradiación. Estableciéndose como objetivo cubrir el 5% de la demanda energética de la cementera en Piura (8 MW). La metodología incluyó el diseño conceptual basado en criterios de eficiencia y durabilidad, utilizando los métodos de Palh y Beitz, Ulrich y Eppinger y la selección de materiales con el software Granta EduPack. La central diseñada tuvo 200 m de altura y 200 m de radio para el colector. Las simulaciones en ANSYS Fluent utilizaron el modelo de turbulencia k-epsilon y de radiación de Discretas Ordenadas (DO). Los resultados mostraron una velocidad de aire máxima de 10,2 m/s, una potencia máxima 8,7 Pa y una temperatura de 302 K en mayor proporción, teniendo una generación de 547,845 kW. El análisis económico reveló una TIR del 20,92% y una relación Beneficio-Costo de S/3,37, demostrando la viabilidad del proyecto.

Palabras clave: Central de chimenea solar, simulación CFD, generación de energía eléctrica, energía renovable, empresa cementera.

ABSTRACT

The production of electricity from non-renewable sources contributes significantly to greenhouse gas emissions. In 2022, Peru recorded emissions of 55,144 megatons of CO₂, ranking 129 out of 184 countries. It is crucial to implement sustainable energy generation systems, such as solar chimney plants, which take advantage of solar energy to produce electricity and reduce polluting emissions. For this reason, this research simulated a solar chimney plant using Computational Fluid Dynamics to partially supply the energy demand of a cement company. The meteorological conditions of northern Peru were evaluated with the RETScreen software, selecting the district of 26 de October (5°11'59"S 80°35'59"W) due to its high irradiation. The objective was to cover 5% of the energy demand of the cement plant in Piura (8 MW). The methodology included conceptual design based on efficiency and durability criteria, using the Palh and Beitz, Ulrich and Eppinger methods and the selection of materials with Granta EduPack software. The designed plant had a height of 200 m and a radius of 200 m for the collector. The simulations in ANSYS Fluent used the k-epsilon turbulence model and the Discrete Ordered (DO) radiation model. The results showed a maximum air speed of 10.2 m/s, a maximum power of 8.7 Pa and a temperature of 302 K in greater proportion, having a generation of 547,845 kW. The economic analysis revealed an IRR of 20,92% and a Benefit-Cost ratio of S/2,37, demonstrating the viability of the project.

Keywords: Solar chimney plant, CFD simulation, electric power generation, renewable energy, cement company.

I.INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Problemática

Actualmente según registros el mundo genera más del 66% de su electricidad proveniente de combustibles fósiles y otro 8% proveniente de energía nuclear; siendo esta una situación preocupante pues la energía generada proviene de una fuente no renovable o combustible fósil, que en algunos años llegará a su escasez y no podrá reponerse en muchas vidas [1]. Se debe tener en cuenta un segundo desafío, que radica en la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera al quemar combustibles fósiles, lo cual resulta en la retención de calor y contribuye al fenómeno del calentamiento global que vivimos hoy en día. De esta manera, entre los principales combustibles fósiles se encuentra el carbón, petróleo y gas natural [2].

En el Perú, la energía eléctrica se genera de 2 modos, a través de centrales hidroeléctricas y por centrales térmicas [3], la primera según el Instituto Catalán de Ciencias del Clima y el Instituto Nacional de Investigaciones Amazónicas de Brasil, emiten 4 veces más gases de efecto invernadero de lo estimado, encontrándose que producen metano, un gas más potente para el calentamiento global que el CO₂, debido a condiciones tropicales que favorecen su formación en lugar de este último [4]. Por otro lado, las plantas termoeléctricas o térmicas emplean recursos fósiles para generar electricidad a través de un proceso termodinámico de agua-vapor [5].

En el año 2005 según el MEN a nivel nacional se generó aproximadamente 25 500 GWh al año, e indicó que la producción experimentaba un constante crecimiento anual, recalcando que en los últimos 25 años, la capacidad instalada se había incrementado notablemente, pasando de 3 140 MW a 6 200 MW en el año [3]. En 2019, Petroperú en el artículo producido por Our World Data señaló que la fuente de energía a nivel nacional provenía en un 43,61% de petróleo, esto debido a que los medios de transporte emplean este combustible; mientras que la segunda fuente provenía en un 25,73% de gas natural [6].

Así mismo, el país mantiene la meta de aumentar 3 veces su producción de energía renovable entre 2019 y 2030, habiendo logrado alrededor de 15 000 MW de capacidad de generación de energía renovable en 2019, y en 2022 solo el 5,9% de la matriz energética del Perú procedía de fuentes renovables no convencionales a pesar de ser pioneros en América Latina al fomentar la generación de energía solar y eólica [7]. Por otro lugar, la base de datos EDGAR señaló que

durante el 2021 se emitió 55,144 megatoneladas de CO₂ ocupando el puesto 129 del ranking de 184 países que emiten CO₂ (orden de menor a mayor) [8].

Es así como, el aumento de las actividades humanas sin considerar su efecto en el calentamiento global está llevando a un desequilibrio ecológico. De modo, que se han desarrollado diversas herramientas para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero como la huella de carbono, que mide la cantidad de estos gases liberados a la atmósfera debido a la producción o consumo de bienes y servicios. La cuantificación de la huella del carbono se clasifica en tres alcances, el primero abarca las emisiones directas por las organizaciones como el uso de combustibles fósiles y carbón; el segundo se refiere a emisiones indirectas por la electricidad adquirida y el tercero comprende a otras emisiones como el uso de papel [9].

Entre los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial se encuentran los sectores industriales como la generación de energía a partir de combustibles fósiles, la industria del petróleo, cemento, transporte, textil, entre otras. Específicamente la industria del cemento contribuye en promedio con el 5% de las emisiones globales. En el Perú en el año 2016, estadísticas del INEI indicaron que esta industria contribuyó aproximadamente con el 2% de las emisiones de CO₂ equivalentes en el país [9].

1.2. Planteamiento del problema

Ante esto se plantea ¿En qué medida es posible que la simulación CFD de una central de chimenea solar permita predecir la generación de energía eléctrica para el abastecimiento parcial de la demanda en una cementera?

Esta tesis tiene como objetivo la simulación CFD de una central de chimenea solar con el fin de observar el comportamiento del flujo de aire y transferencia de calor, con el objetivo de evaluar el potencial de este sistema de energía renovable para la generación de energía eléctrica en una cementera. Se utilizará el Software RETScreen para evaluar las condiciones meteorológicas; el software SolidWorks para el diseño y el software ANSYS Fluent para modelado de dinámica de fluidos computacional (CFD) con el fin de evaluar el estudio, obtener resultados y posteriormente concluir el trabajo de investigación.

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación tecnológica

A nivel tecnológico la implementación de una central de chimenea solar representa un avance tecnológico significativo en la generación de energía renovable y limpia. Esta tecnología aprovecha los principios de la convección natural y la energía solar de manera innovadora, convirtiéndola en electricidad sin emisiones contaminantes [10]. Además, la simulación CFD permitirá analizar y predecir el comportamiento del flujo de aire y la transferencia de calor dentro de la central, lo cual es fundamental para evaluar el rendimiento y determinar las condiciones óptimas de operación [11]. Esta simulación numérica es una herramienta adecuada para el diseño y validación previa de la central, reduciendo costos y tiempos de desarrollo antes de la construcción real.

1.3.2. Justificación económica

A nivel económico una central de chimenea solar permitirá a una empresa cementera reducir significativamente sus costos de energía eléctrica a largo plazo. Si bien la inversión inicial puede ser considerable, los costos operativos y de mantenimiento son relativamente bajos en comparación con otras fuentes de energía convencionales [12]. Además, al ser una fuente renovable, la central de chimenea solar no estará sujeta a las fluctuaciones de precios de los combustibles fósiles, brindando una mayor estabilidad en los costos energéticos [13]. Así mismo, a medida que los precios de la energía continúen aumentando, la inversión en esta tecnología se volverá aún más atractiva económicamente.

1.3.3. Justificación ambiental

A nivel ambiental una central de chimenea solar contribuirá significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la huella de carbono de la empresa cementera. Al generar electricidad a partir de una fuente renovable y limpia como la energía solar, se evitarán las emisiones asociadas a la combustión de combustibles fósiles utilizados en la generación convencional de electricidad [14]. Esto no solo beneficiará al medio ambiente local, sino que también ayudará a mitigar el impacto del cambio climático a nivel global. Además, la central de chimenea solar tiene un impacto ambiental mínimo durante la construcción y operación, sin producir contaminación del aire, agua o suelo.

1.3.4. Justificación social

A nivel social una central de chimenea solar contribuirá al desarrollo sostenible de la región y a diversificar la matriz energética renovable del país [15]. Al generar energía limpia y renovable, la empresa cementera reducirá su dependencia al 100% de los combustibles fósiles, promoviendo una independencia energética. Además, este proyecto puede servir como modelo y fuente de información para futuros investigadores, con el fin de impulsar a otras industrias y comunidades a adoptar tecnologías renovables y avanzar en la transición hacia una economía más respetuosa con el medio ambiente.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- ✓ Simular una central de chimenea solar para abastecer parcialmente la demanda de energía eléctrica en una empresa cementera mediante Dinámica de Fluidos Computacional.

1.4.2. Objetivos Específicos

- ✓ Evaluar las condiciones meteorológicas de la zona norte del Perú para determinar la ubicación de la central.
- ✓ Calcular la demanda parcial de energía eléctrica para abastecer una empresa cementera.
- ✓ Diseñar una central de chimenea solar y seleccionar sus componentes.
- ✓ Evaluar el comportamiento del flujo de aire dentro de la central de chimenea solar para predecir su capacidad de generación de energía eléctrica.
- ✓ Realizar una evaluación económica para determinar su viabilidad.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Internacional

Suad, Hussein, Ishak y Dhinakaran en su estudio se centraron en el aprovechamiento de energía solar para la generación de eléctricas en la ciudad de Kirkuk. La ciudad de Kirkuk se encuentra en el norte de Irak, presenta condiciones meteorológicas aprovechables para realizar la simulación de la chimenea solar, esto para que pueda cumplir con las necesidades de consumo eléctrico que presentan los habitantes de la ciudad. La central de chimenea solar se dimensionó considerando los datos de la chimenea solar instalada en Manzanares (Ciudad Real, España), la cual contó con una altura y radio de la chimenea de 194,6 m y 10,16 m respectivamente, mientras que para el colector se tuvo un radio y una altura de 122 m y 1,85m respectivamente. La chimenea solar produjo 310 kWh/día y 9 314 kWh/mes para la producción de energía en ciudad de Kirkuk. Además, presentó una variación máxima de 14,424 kWh/mes en Julio esto debido a la alta temperatura climática que presenta en este mes y el incremento de velocidad máxima del aire a 18,28 m/s. La simulación coincidió considerablemente con los resultados de la central de Manzanares, además se verificó su productividad de electricidad para la ciudad de Kirkuk, considerando el adecuado clima que tiene la ciudad. Concluyeron, que la central logra del aprovechamiento de los recursos naturales y contribuye activamente a la disminución de la emisión de contaminantes que se produce al utilizar energías no renovables en la producción de energía [16].

Cuce, Sen y Cuce, en su artículo se centraron en la variación del diámetro del ducto en una central de chimenea solar, cambiando este valor entre 4,865 y 64,886 m; considerando los datos geométricos de la central de Manzanares. Para el diseño geométrico de la nueva central de chimenea solar consideraron medidas de la planta de Manzanares, así como los materiales utilizados; teniendo una altura de la chimenea de 194,6 m, un radio de colector de 122 m y un diámetro de la chimenea de 10,16 m el cual brinda una potencia de 50 kW. Para la simulación CFD utilizaron el algoritmo de rayos solares, el modelo de coordenadas discretas y el modelo de turbulencia $RNG k - \epsilon$. Los resultados mostraron que considerar un diámetro de 24,325 m y una $\theta = 0.8$ la diferencia de presión en la planta era más alta, implicando una máxima potencia de salida. Sin embargo, el aumento del diámetro repercutía en la velocidad del aire del sistema, teniendo que no supera los 2 m/s en la salida del colector, esto debido: al aumento del

caudal másico (de 1 120 kg/s a 2 580 kg/s), lo que conduce a la disminución del aumento de temperatura de aire debajo del colector e implica que la velocidad del aire y la diferencia de presión disminuya, afectando negativamente a la potencia de salida. Por lo que es importante considerar también la ubicación de la turbina, lo cual afecta en la disminución de la diferencia de presión promedio (se tuvo una presión de 88,5 Pa). En este sentido, la nueva planta de chimenea solar alcanzará su máximo punto de generación de energía (potencia de 60 kW) cuando se tenga un diámetro de chimenea de 24,325 m. Concluyeron que el diámetro de la chimenea es un criterio importante al momento de diseñar una central de chimenea solar, pues hace que el sistema sea más o menos eficiente en función a la potencia que brindará, en el estudio la eficiencia alcanzada fue de 0,194% evidenciándose un aumento del 94% a diferencia del caso de la planta de Manzanares [17].

Sen, Cuce y Erdem en su investigación se enfocaron en la consecuencia que tiene la variación de las variables de radio y altura del colector en una central de chimenea solar, pues en estos sistemas el colector es la parte que utiliza directamente la energía solar. La simulación la realizaron en el software ANSYS FLUENT suponiendo un flujo turbulento y para la ecuación de radiación el modelo de radiación no gris de coordenadas discretas (DO). Para la simulación consideraron las dimensiones y materiales de la planta de Manzanares, con una intensidad de calor constante de $1\,000\text{ W/m}^2$ y una temperatura de 293,15 K. En primer lugar analizaron el radio del colector considerando un radio de 122 m como referencia. Los resultados en la simulación mostraron que el aumento del radio del colector conlleva a un incremento de temperatura del aire debajo del colector, lo que supone el incremento de energía cinética del aire debajo del colector y por tanto un aumento del caudal del aire. Teniendo que con un radio de 175 m el sistema brinda una potencia de 100 kW, a diferencia de 55 y 60 kW cuando se tiene un radio del colector de 122 m. Sin embargo al calcular la eficiencia de la central de chimenea solar, no variaba tanto, debido a que el incremento del área del colector se debe ubicar en el denominador de la operación. En segundo lugar analizaron la altura de entrada del colector, teniendo que al disminuirla a 1,1 m la temperatura baja hasta 349,009 K esto se debe al aumento del caudal de aire y de la velocidad debajo del colector; por tanto si se aumenta la altura del colector (1,85 m), la velocidad del aire del sistema disminuye y la temperatura y el caudal másico aumenta (1 100 kg/s), sin embargo la variación respecto al caudal no supera el 15%; además, respecto a la eficiencia, disminuye en 0,1% cuando aumenta la altura del colector. Concluyeron que cuando se incrementa el radio del colector la eficiencia aumenta en un 75%

lo que es 95 kW; mientras que cuando la altura del colector se reduce incrementa la potencia hasta un 13% lo que es 61,77 kW [18].

Hohammed, Zoltan y Janos en su investigación se plantearon desarrollar un modelo utilizando MATLAB/Simulink para el diseño y evaluación de las plantas de chimenea solar (SCPPs) en diferentes ubicaciones. Se aplicó el modelo para evaluar una SCPP en Kufa, Iraq, donde no se había realizado previamente un estudio de evaluación de este tipo de fuentes de energía renovable. Se desarrolló un modelo utilizando MATLAB/Simulink para evaluar las especificaciones físicas y de ingeniería, pérdida de presión, producción de energía y características de las SCPPs, se utilizaron condiciones climáticas experimentales. El modelo mostró que la producción de energía de la SCPP en Kufa alcanzó su punto máximo durante el periodo de verano debido a la alta radiación solar y las altas temperaturas. El mes más productivo fue julio, con una producción promedio de 537,87 kW, un 12% mayor que enero, que fue el mes menos productivo. La producción promedio anual de energía de la SCPP fue de 6 122,3 kW, lo que indica una alta eficiencia para la generación de energía renovable en esta región. Además, se encontró que la radiación solar es la variable que tiene mayor impacto en el sistema. Concluyeron que el modelo es confiable y puede ayudar en el diseño y evaluación de SCPPs en varios lugares. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad y eficiencia de las SCPPs en regiones calurosas y áridas como Kufa, resaltando la necesidad de considerar la radiación solar y la temperatura en el diseño de las SCPPs [19].

Nacional

Vásquez en su investigación se centró en analizar los datos climáticos de la provincia de Chupaca con el fin de generar la energía mensual de 50 kWh a través de una chimenea solar, considerando que la provincia registra una radiación promedio de 6 kWh/m². Investigó los factores climáticos del distrito de Tres de Diciembre para calcular el tamaño óptimo de la chimenea para la generación de los 50 kW necesarios para el autoabastecimiento eléctrico de una vivienda. Los parámetros climatológicos considerados comprendieron una velocidad promedio anual del viento de aproximadamente 9,94 a 10 km/h y una variación en la presión atmosférica de 612 hPa. Además, se determinó que la radiación solar en el distrito oscila entre 5,5 y 6,0 kWh/m², con temperaturas anuales máximas de 20°C y mínimas de 5°C. Siguiendo estas condiciones, se dimensionó la chimenea solar con un diámetro de 1.1 metros y una altura de 6,11 metros, junto con un colector solar que tuvo un radio mínimo de 6,92 metros y una capacidad de almacenamiento de energía de 2 718,45 KJ. Concluyó que la generación de

energía eléctrica es viable, aunque en ciertos días las condiciones climáticas no fueran las más beneficiosas. A pesar de esto, se logró mantener un promedio constante de 2,8 voltios con el prototipo a escala, validando su capacidad para producir electricidad [20].

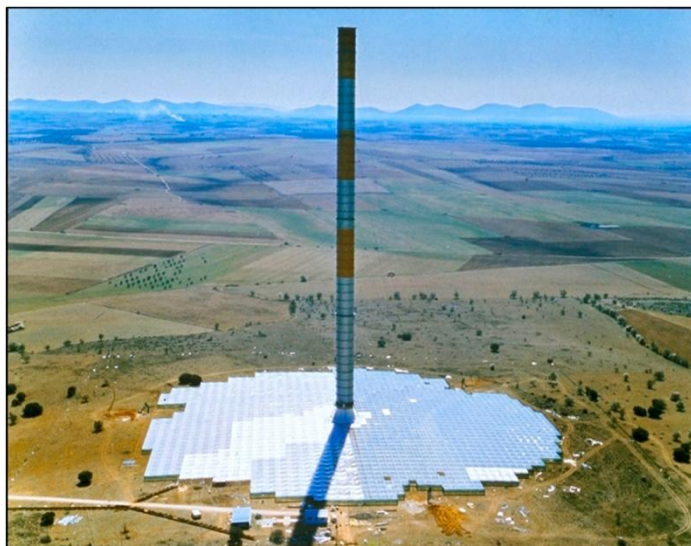
Velazco y Butler en su investigación se centraron en el modelamiento experimental de una chimenea solar y su selección del área geográfica, para esto realizó un estudio de los parámetros climatológicos usando datos del MINEM, adicionalmente añadió al modelo de planta común un subsistema solar térmico, solar fotovoltaico y eólico para la generación eléctrica. Para el diseño consideró 10,5 m de diámetro de colector, 8,7320 m de altura de chimenea y nivel de radiación entre los 115-414 W/m². En la parte exterior del sistema instalaron sensores para la medición de temperatura, caudal y humedad, así mismo, añadieron 4 multímetros para tomar medida de la temperatura. Los resultados mostraron que del subsistema solar térmico se tiene una gradiente de temperatura radial de 5°C/m considerando un nivel de radiación de 277,3913 W/m²; para el subsistema eólico se tiene que con una velocidad media de 2,48 m/s se obtiene una potencia de 1,72 W aproximadamente y tiene una eficiencia eólica-eléctrica de 0,325; respecto al subsistema solar fotovoltaico se obtuvo una eficiencia de 0,07 y una potencia de 2,8983 W. Sin embargo, de los 3 sistemas implementados, el térmico no genera energía pues el dato de irradiación se encuentra entre 115-414 W/m² y para su buen funcionamiento debería tener un nivel medio de 800-910 W/m²; por lo que los valores radiación no son mayores al de la resistencia térmica para comenzar un flujo convectivo. Concluyeron que las ecuaciones modeladas tienen un nivel eficiente de predicción de temperatura en el colector. Además, se observó que el subsistema eólico se aprovecha a mayor altura; y el subsistema solar fotovoltaico no se aprovecha cuando no se tiene buena luminosidad [21].

2.2. Base teórica

2.2.1. Central de Chimenea Solar

La Central de Chimenea Solar conocido por sus siglas en inglés como SCPP se destaca como un sistema solar capaz de proporcionar una fuente de energía limpia y rentable. La energía solar se divide en dos categorías: pasiva y activa. La energía pasiva se emplea sin el uso de sistemas mecánicos y encuentra aplicación en situaciones interiores, como la ventilación de edificios. Por otro lado, el sistema de energía solar activa se vale de la entrada de energía mecánica en aplicaciones que abarcan desde la generación de electricidad hasta la calefacción y refrigeración. La SCPP pertenece al grupo que usa energía solar activa pues genera electricidad mediante convección natural [22].

Figura 1: Planta de Chimenea Solar en Manzanares, España



Fuente. [67]

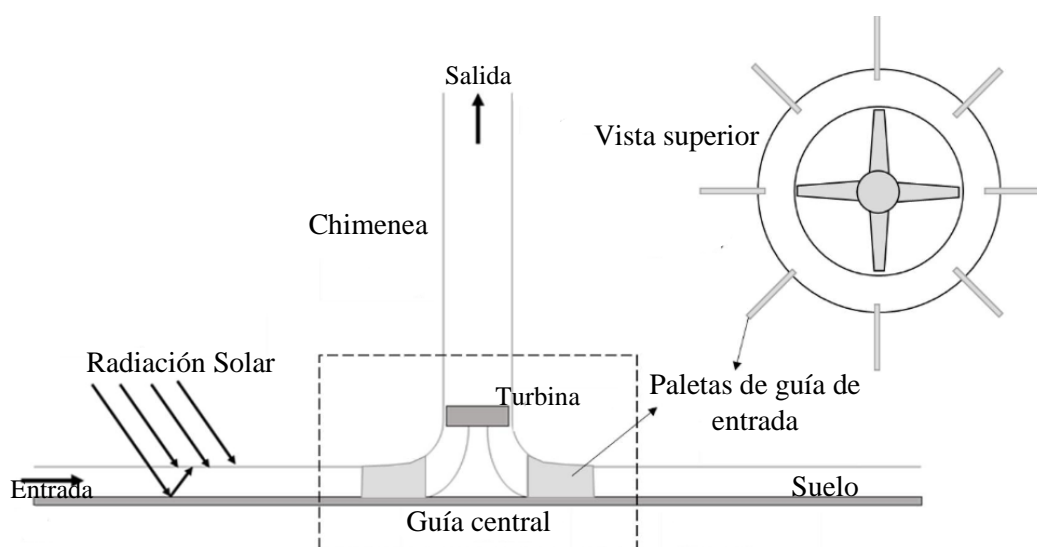
La central de chimenea solar consta de tres elementos clave: un colector solar, una chimenea y una turbina. El diseño de la planta se enfoca en el colector solar, que incluye un techo transparente y una superficie en el suelo debajo del colector. La radiación solar calienta el suelo, provocando el calentamiento del aire que se encuentra debajo del techo del colector. El aire caliente asciende y se libera a través de la chimenea.

2.2.2. Funcionamiento de una SCPP

La central de chimenea solar presenta un colector, que funciona como un invernadero, pues eleva la temperatura del aire en su interior, creando una diferencia de temperatura con el entorno fuera del colector. Esto da lugar a una presión térmica que facilita la flotabilidad del aire caliente

en el colector [23]. Esta flotabilidad, induce la ventilación natural dentro del sistema y el flujo del aire caliente movido por la flotabilidad fluye radialmente por medio de las paletas guía permitiendo el cambio de dirección de horizontal a vertical a través de una guía central (centro del colector). El flujo de aire atraviesa una turbina experimentando una disminución en la presión sin que su velocidad experimente cambios significativos; en esta fase la presión del flujo se transforma en energía. Este proceso se puede repetir de manera cíclica, lo que hace que las paletas guía en la entrada y la guía central, actúen como una zona de transición entre el colector y la chimenea. Las características geométricas de estas paletas pueden influir en la producción total de energía del sistema de chimenea solar [24].

Figura 2: Funcionamiento de una Chimenea Solar



Fuente. [24]

2.2.3. Elementos de una SCPP

Los componentes principales de una central de chimenea solar (también conocida como Solar Chimney Power Plant o SCPP) son el colector, la turbina y la torre (chimenea).

Colector

El colector es la parte de la instalación donde se recoge y absorbe la radiación solar. Está compuesto por una estructura transparente, como vidrio o plástico, que permite que la luz solar penetre y calienta el aire del sistema. El colector actúa como el iniciador del proceso al calentar el aire que ingresa al sistema. La transferencia de calor desde el colector al aire y el suelo crea un efecto invernadero, lo que aumenta la temperatura del sistema [25]. Esto es esencial para impulsar el flujo de aire ascendente hacia la torre. Debido al calentamiento en el colector, la diferencia de temperatura provoca que el aire debajo del colector se eleve hacia la chimenea

central, lo que resulta en un aumento de la velocidad del aire debido a la flotación y efectos convectivos. Los colectores de las centrales solares de chimenea están diseñados con una elevación gradual desde la entrada hasta la salida para promover este flujo ascendente [26]. El aumento de la temperatura del aire en el canal se puede calcular de la siguiente manera:

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{c_p \dot{m}}$$

Donde Q es la potencia térmica del sistema que está en función de la radiación solar, la ΔT es el incremento de temperatura del aire desde la entrada a la salida del colector (K), c_p capacidad calorífica del aire, \dot{m} es el caudal másico de aire que fluye a través del colector solar (kg/s) [26]. Por otro lado, el coeficiente de absorción (α) resalta la cantidad de luz de solar que penetra en el sistema y la potencia se puede obtener del balance energético:

$$\dot{Q} = \tau\alpha A_{colec} G - h_{conv} A_{colec} (T_{suelo} - T_{amb})$$

$\tau\alpha$ es el producto de transmitancia y absorbencia, A_{colec} es el área del colector (m^2), G es la radiación solar (W/m^2), h_{conv} es el coeficiente de transferencia de calor (W/m^2) [26]. El aire bajo el colector se calienta a medida que interactúa con la radiación solar y el suelo, y este calentamiento se intensifica al moverse desde la entrada hasta la salida del colector. La forma en que fluye el aire puede variar a medida que se acelera hacia la entrada de la chimenea. Para evaluar esto, se utiliza el número de Rayleigh (Ra):

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TH_{colec}^3}{\alpha\nu}$$

β es el coeficiente de expansión térmica (K^{-1}), α es la difusividad térmica (m^2/s), ν es la viscosidad cinemática, H_{colec} es la altura del colector (m) y ΔT es el incremento de temperatura del aire desde la entrada a la salida del colector [18]. El número Ra en sistemas SCPP suele ser mayor que el valor crítico de 10^9 , indicando que el flujo en el sistema es predominantemente turbulento [25]. En la ecuación, β representa el coeficiente de expansión volumétrica.

$$\beta = \frac{1}{\nu} \frac{\partial \nu}{\partial T_p} = - \frac{\partial \rho}{\partial T_p}$$

Como el cambio de densidad dentro del sistema es mínimo, la aproximación de Boussinesq es adecuada, lo que lleva a la siguiente ecuación de densidad [25]:

$$\rho - \rho_a = \rho\beta(T - T_a)$$

T_a es la temperatura al inicio del colector, T es la temperatura del aire al final del colector. Por otra parte, su eficiencia está en función a la radiación solar y al área del colector [18], se expresa:

$$\eta_{colector} = \frac{Q}{GA_{colector}}$$

Turbina

La turbina actúa como el elemento clave en el sistema, transformando la energía cinética del aire calentado en electricidad. Por lo general, se ubica dentro del conducto de la chimenea a una altura determinada del suelo. Esta pieza es esencial en la producción de energía del sistema, ya que es responsable de convertir la energía del aire en movimiento en electricidad práctica y utilizable [25]. De este modo, su rendimiento influye directamente en la eficiencia general del sistema y, por lo tanto, es un componente clave en la producción de energía.

$$\eta_{turbina-generador} = \frac{P_o}{V\Delta P_{turbina}}$$

$$\Delta P_{turbina} = \Delta P_{total} - \Delta P_t$$

$$\Delta P_{turbina} = \rho_{turbina} - i g h_t$$

$$S_{turbina-i} = S_{turbina-o}$$

$$\Delta P_{total} = \rho_{turbina} - i g h_t$$

Torre

La torre, también conocida como chimenea, es una estructura vertical de gran altura ubicada en el centro de la central de chimenea solar. Es un componente crucial pues genera la diferencia de presión necesaria para que el aire caliente se eleve desde el colector hacia arriba, impulsando la turbina [25]. Referido a una chimenea adiabática vertical, la diferencia de presión que se da en la chimenea es:

$$\Delta P_{chimenea} = g (\rho_a - \rho_o) H_{chimenea}$$

Si la diferencia de presión total en la chimenea es proporcional a la altura de la torre, se tiene:

$$\Delta P_{total} = g \int_0^{H_{chimenea}} (\rho_a - \rho_{chimenea}) dz$$

Donde z , hace referencia a la altura, a comparación con la altura de la chimenea. Considerando el punto de vista de Boussinesq la ecuación se expresa:

$$\Delta P_{total} = \rho \beta g H_{chimenea} \Delta T$$

Donde, β es el coeficiente de expansión térmica, ρ es la densidad, ΔT es el aumento de temperatura.

Schaich menciona que la eficiencia de la torre está directamente relacionada con la altura de la chimenea y la temperatura inicial, por lo que:

$$\eta_{chimenea} = \frac{g H_{chimenea}}{C_p T_{inicial}}$$

Considerando la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0$$

La ecuación de momento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_z) + \rho v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g_z + \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}$$

Y el supuesto de Boussinesq la ecuación del momento para la chimenea se resume a:

$$-\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g_z + \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} = 0$$

La chimenea es una estructura de gran tamaño debido a su altura y diámetro. Aunque la altura de la chimenea plantea desafíos estructurales, los avances tecnológicos han permitido la construcción de estructuras más seguras y altas, incluso superiores a 1 000 metros. Los investigadores sugieren que las chimeneas pueden construirse con o sin anillos de refuerzo, brindando opciones de seguridad y economía [27]. Los grosores de las paredes varían según la altura de la chimenea, con diseños que van desde 0,65 metros en la base hasta 0,25 metros en la parte superior [28].

2.2.4. Energía sostenible

La energía sostenible proviene de fuentes que son capaces de mantener el funcionamiento actual sin comprometer las demandas energéticas ni el clima de las generaciones por venir. Entre las fuentes de energía sostenible más destacadas se encuentran la energía eólica y solar [29]. De este modo, la transición hacia la energía sostenible conlleva múltiples beneficios para las

comunidades y el entorno [30]. Entre los principales impactos positivos de la energía sostenible se tiene:

- ✓ Mejora de la Salud Pública: Pues evita los peligros para la salud pública vinculados a la quema de combustibles fósiles, ya que no emite sustancias nocivas al aire y al agua, reduciendo riesgos como daños neurológicos, cáncer y problemas respiratorios.
- ✓ Creación de Oportunidades de Trabajo en la Comunidad: El desarrollo y cuidado de instalaciones de energía renovable en la comunidad local impulsan el empleo y activan el crecimiento económico.
- ✓ Disminución de las Emisiones de Carbono: Al no generar emisiones de carbono, estas infraestructuras apoyan la batalla contra el cambio climático y ayudan a minimizar la polución ambiental, reduciendo la necesidad de depender de los combustibles fósiles.
- ✓ Costos a largo plazo más asequibles: A pesar de los costos iniciales de instalación, la inversión se amortiza en pocos años.
- ✓ Seguridad Energética Es una energía confiable pues no se agota y reduce la dependencia de recursos energéticos costosos [30].

Es importante recalcar que, aunque son conceptos distintos, una fuente de energía renovable puede ser considerada como sostenible si proporciona los cinco beneficios que se mencionaron anteriormente.

2.2.5. Fuentes de energía sostenible

Energía eólica

Rojas y Bolaño mencionan que la energía eólica se deriva del viento, representando la energía cinética generada por movimientos del aire, y posteriormente se transforma en diversas formas de energía beneficiosas para las necesidades humanas [20] .

$$E = \left(\frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot A \cdot V^3 \cdot Cp \right) / 100$$

Considerando que:

E: energía eólica (MW)

A: área de salida

V: velocidad

Cp: coeficiente de potencia (valor máximo a 0,59)

ρ : densidad del aire aproximadamente 1,225 kg/m³

Energía solar

Es una forma de energía producida por el sol, originada a través de un proceso de fusión nuclear que convierte el hidrógeno en helio en su núcleo. Esta fuente de energía es renovable y puede ser aprovechada de diversas maneras para su uso en lugares como hogares, empresas y hospitales. Dentro de las tecnologías más utilizadas para la captura y aprovechamiento de la energía solar, se destacan las células y paneles fotovoltaicos, los cuales transforman la luz solar directamente en electricidad. Adicionalmente, la energía solar concentrada emplea espejos para focalizar la luz solar y producir calor. Por otro lado, la arquitectura solar combina el diseño de edificios con la integración de sistemas de captación solar [31].

Existen dos categorías principales de tecnologías solares: activas y pasivas. Las tecnologías solares activas emplean dispositivos eléctricos o mecánicos para transformar la energía solar en calor o electricidad. Por otra parte, las tecnologías solares pasivas se diferencian por no depender de equipos mecánicos o eléctricos externos. En su lugar, aprovechan estratégicamente el diseño y la ubicación de las estructuras para maximizar el uso de la luz solar natural. Esto incluye calentar espacios de manera eficiente durante los meses fríos y mantenerlos frescos en verano, mediante la reflexión del calor solar, sin necesidad de sistemas activos [31].

2.2.6. Parámetros meteorológicos

Presión Atmosférica

La presión atmosférica se define como la presión ejercida por el peso del aire en la atmósfera terrestre, medida en términos de fuerza por unidad de área [32]. Afecta la densidad del aire, que es un factor crítico en la eficiencia de la chimenea solar, ya que determina la cantidad de masa de aire caliente que puede subir por la chimenea

Temperatura

La temperatura representa la medición del promedio de energía cinética de las partículas dentro de un material. Esta juega un papel crucial en la transformación de energía solar en energía térmica. Cuando la temperatura es más alta en el área debajo del colector solar, se observa un aumento en la eficacia de la producción de energía [33]. Respecto al diseño es necesario seleccionar materiales para el colector que maximicen la retención de calor y considere la variabilidad de la temperatura del diseño.

Velocidad del viento

Se refiere a la rapidez con la que el aire se mueve en la atmósfera y se mide generalmente a 10 metros sobre el nivel del suelo. Esta velocidad, que es un vector compuesto por magnitud y dirección, puede variar significativamente según la topografía local y otros factores ambientales. Además, las mediciones instantáneas de la velocidad y dirección del viento tienden a mostrar una mayor variabilidad en comparación con los promedios calculados por hora [20].

En el estudio realizado por Valdivia, Sánchez y Gamio sobre Huancayo, se destaca que las velocidades del viento muestran pequeñas variaciones estacionales a lo largo del año. Un periodo particularmente ventoso, que dura aproximadamente cuatro meses desde el 23 de julio al 20 de noviembre, se caracteriza por velocidades de viento que superan los 9,9 km/h en promedio. El 5 de septiembre se registra como el día con vientos más fuertes, alcanzando una media de 11,0 km/h. En contraste, el tiempo más calmado abarca 8,1 meses, desde el 20 de noviembre al 23 de julio, con el 30 de mayo marcando el día de menor actividad eólica, presentando velocidades promedio de 8,8 km/h [20].

Estas variaciones en la velocidad del viento son importantes para considerar en el diseño y la operación de proyectos como las centrales de chimenea solar, donde la eficiencia puede verse afectada por las condiciones de viento locales. La velocidad del viento puede influir en el flujo de aire dentro y alrededor de la chimenea. Los vientos fuertes pueden interferir con el flujo de aire ascendente y reducir la eficiencia. Se deben considerar los patrones de viento locales para la ubicación de la central, y diseñar una estructura de chimenea resistente a vientos fuertes.

Irradiación Solar

La irradiación solar se mide en la cantidad de energía solar que recibimos por unidad de área de radiación incidente dada en un período de tiempo específico. Se mide en Wh/m². Se puede medir utilizando 3 componentes GHI, BHI y DHI [34]. La irradiación solar es considerada la fuente primaria de energía para la central de chimenea solar.

Irradiación horizontal global (GHI)

Representa la cantidad energía solar total recibida en una superficie horizontal en la tierra, la cual se divide en el BHI y el DIF [34].

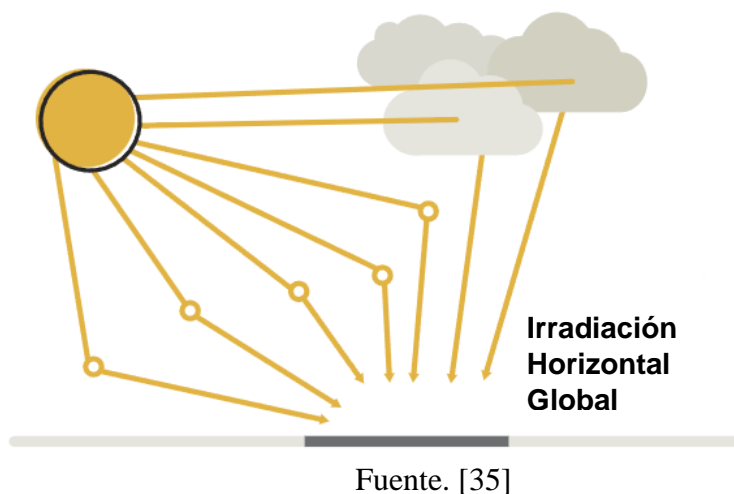
- Irradiación horizontal del haz (BHI)

Son los rayos solares que llegan directamente.

- Irradiación horizontal difusa (DIF)

Es la luz que se debe a la interacción de los rayos solares con la atmósfera y sus componentes como las moléculas de aire, polvo y otros contaminantes [34].

Figura 3: Irradiación Horizontal Global (GHI)



2.2.7. Generación de energía sostenible

Hace referencia a la producción y uso de energía que maximiza la eficiencia energética, incorpora el aprovechamiento óptimo de la potencia de la turbina, utiliza fuentes de energía renovable y minimiza el impacto ambiental, garantizando un balance equilibrado entre el suministro de energía necesaria y la preservación de los ecosistemas naturales [36].

Así mismo, otros autores mencionan que la producción de energía de manera sostenible se refiere a métodos de creación de energía que se mantienen compatibles y beneficiosos para el entorno natural y las comunidades durante un período extenso. Estas prácticas suelen implicar el empleo de alternativas y tecnologías que se sirven de fuentes de energía que se regeneran naturalmente, como el aire, la luz solar y las corrientes acuáticas, las cuales no disminuyen con su uso [37]. Este enfoque de producción energética también prioriza la conservación de energía, procurando reducir al mínimo la pérdida energética en todas las etapas de su generación y distribución. Asimismo, se centra en disminuir las repercusiones negativas en el ambiente, como la contaminación o el deterioro ecológico y el calentamiento global [38].

2.2.8. Generación de energía eléctrica

Es el proceso de convertir diferentes formas de energía, como la solar, eólica, hidráulica o térmica, en electricidad. En un contexto donde las fuentes renovables para generar electricidad se popularizan, los sistemas convencionales de distribución y transformación eléctrica experimentarían un cambio significativo. Su función principal se orientaría hacia la regulación y el equilibrio del suministro eléctrico en comunidades más pequeñas [20].

Este proceso involucra la conversión de la energía contenida en estos recursos naturales o combustibles en una forma de energía que puede ser utilizada para alimentar diversos dispositivos y sistemas eléctricos. La electricidad generada de esta manera se distribuye luego a través de redes eléctricas, llegando a hogares, empresas e industrias para su uso. En el contexto de las energías renovables, este proceso se orienta hacia la utilización de recursos naturales que se regeneran constantemente, como el sol o el viento, minimizando así el impacto ambiental [20].

2.2.9. Demanda máxima

La demanda representa la cantidad promedio de energía consumida durante un período de tiempo específico. De modo que la demanda máxima, conocida también como demanda pico, es el nivel más alto de demanda registrado durante el período de facturación, que generalmente suele ser al final del mes [39].

2.2.10. Potencia demanda

La potencia demandada se refiere a la cantidad de suministro eléctrico (kW) requerida por un usuario en un momento específico. Es la cantidad de energía eléctrica solicitada por el punto de conexión para abastecer un lugar. Esta demanda de potencia tiene un impacto en el costo y la tarifa final del servicio eléctrico para el usuario, pues influye en el tipo de contrato establecido con la compañía distribuidora [40].

2.2.11. Demanda de energía eléctrica

La demanda de energía eléctrica se mide en kWh, para una instalación determina cuánta electricidad debe generarse para satisfacer sus necesidades en un periodo dado, representa la energía generada o consumida a una potencia de 1 kW durante 1 hora [41].

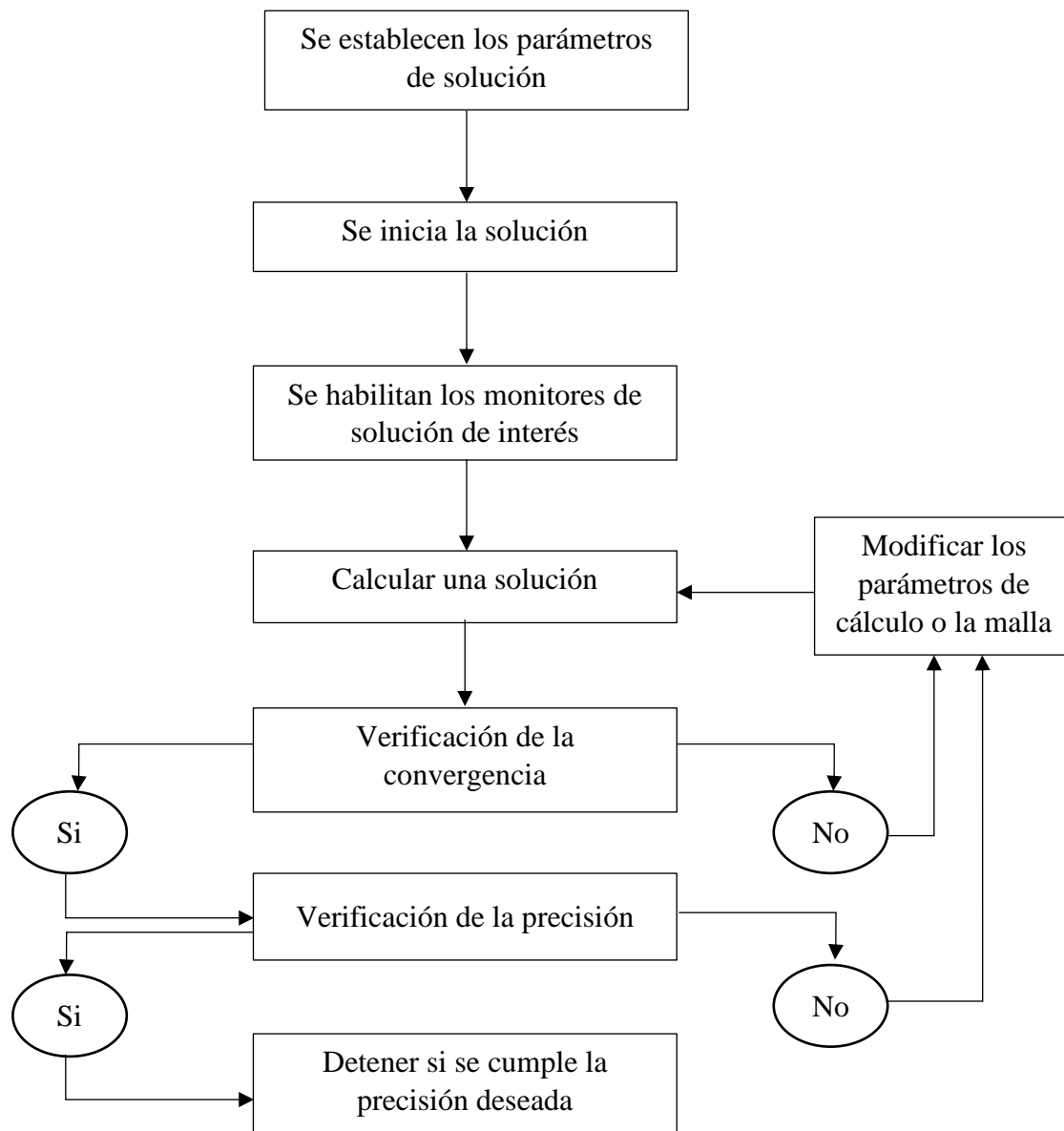
El abastecimiento parcial de demanda implica que la fue de energía renovable no cubre el 100% de la demanda, sino que complementa otras fuentes convencionales para satisfacer los requerimientos totales de energía eléctrica [42].

2.2.12. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional, comúnmente conocida por el acrónimo "CFD", implica la solución de las ecuaciones de movimiento de fluidos en dos o tres dimensiones y se utiliza en aplicaciones no estándar, es decir, aplicaciones para las cuales no se pueden encontrar soluciones (o al menos buenas aproximaciones) en libros de texto o manuales. Estas técnicas se han aplicado en la ingeniería de avanzada, y su optimización en dichos campos puede resultar en significativas reducciones de costes tanto en equipos como en energía, así como en la disminución del impacto ambiental [43].

La dinámica de fluidos computacional (CFD) representa una área de investigación donde se emplean herramientas computacionales para modelar y proporcionar cálculos cuantitativos sobre el comportamiento de los fluidos, basándose en leyes de conservación tales como la de masa, momento y energía, que son esenciales para entender la dinámica de fluidos [44]. En otras palabras, la simulación CFD es un método computacional que utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes para el análisis detallado del comportamiento del fluido y la transferencia de calor [45]. La CFD opera mediante la discretización de ecuaciones diferenciales (o integro-diferenciales) que caracterizan los flujos y fenómenos asociados, convirtiéndolas en un conjunto de ecuaciones algebraicas que posteriormente se solucionan utilizando un ordenador [43].

Proceso de Simulación CFD



Fuente. [46]

2.2.14. Ecuaciones Fundamentales

Ecuaciones de Navier Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que describen el flujo de fluidos incompresibles y son fundamentales en la mecánica de fluidos. Para capturar la esencia del movimiento fluido y construir un modelo matemático adecuado, es crucial definir con claridad las propiedades físicas relevantes, como la velocidad, presión, temperatura, densidad y viscosidad, estas deben ser evaluadas de manera integral para analizar el flujo de fluidos [47].

Los eventos termofluidos son modelados utilizando ecuaciones que se fundamentan en principios de conservación. Las ecuaciones de Navier-Stokes son el modelo matemático esencial para investigar las variaciones de estas propiedades durante las interacciones dinámicas y térmicas [47]. Estas ecuaciones se adaptan al contexto específico de la investigación y se formulan en términos de las leyes de conservación de masa, momento y energía, conocidas respectivamente como la ecuación de continuidad, la segunda ley de Newton para el movimiento y la primera ley de la termodinámica o ecuación de energía.

Ecuación de conservación de la masa

En un volumen de control dado, la masa no puede ser generada ni aniquilada. El principio de conservación de masa dicta que la variación neta del flujo de masa a través del sistema, desde su punto de ingreso hasta su egreso, debe ser nula [47].

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \vec{V}) = 0$$

Donde ρ es la densidad, V es la velocidad y ∇ es el operador gradiente.

$$\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$$

Cuando se considera que la densidad permanece inalterable, se asume que el fluido no se comprime. Bajo esta suposición, la ecuación de continuidad se reduce a una forma más sencilla que refleja un flujo en régimen permanente [48]:

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \rightarrow \nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Ecuación de momento

La derivación de la ecuación de momento de Navier-Stokes comienza con la consideración de la viscosidad, que es la fricción interna experimentada por un fluido. La ecuación de Navier-Stokes es una extensión de la ecuación de Euler que incluye un término para las fuerzas viscosas [49]. La ecuación de Navier-Stokes se expresa como:

$$\frac{Du}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 u + f$$

donde $\frac{Du}{Dt}$ representa la aceleración del fluido, P es la presión, μ es la viscosidad dinámica, u es la velocidad del fluido y f representa otras fuerzas que actúan sobre el fluido.

La ecuación de Navier-Stokes describe el movimiento de los fluidos y es fundamental en la dinámica de fluidos. En la ecuación, la fuerza debido a la presión se manifiesta como un gradiente de presión y se incluye para tener en cuenta la influencia de la presión en el movimiento del fluido.

El término de presión en la ecuación de Navier-Stokes generalmente aparece de la forma ∇P , donde P es la presión y ∇ denota el operador gradiente. La fuerza de presión relacionada con la flotabilidad, especialmente en el contexto del aire, a menudo se debe a diferencias en la densidad del aire, que están directamente relacionadas con diferencias en la presión [49].

Las unidades de presión son pascales (Pa), que equivalen a newtons por metro cuadrado (N/m^2). Por tanto, el gradiente de presión, que es una fuerza por unidad de volumen, se mide en newtons por metro cúbico (N/m^3) [49].

En el caso de flotabilidad, que es una fuerza por unidad de volumen debido a la diferencia en densidad (y por lo tanto en presión) entre dos puntos, se considera en la forma de $-\rho g$ dentro de la ecuación de Navier-Stokes, donde ρ es la densidad del fluido (kg/m^3) y g es la aceleración debido a la gravedad (m/s^2). Así que la flotabilidad también tendría unidades de N/m^3 , ya que es el producto de la densidad y la aceleración [50].

Aproximación de Boussinesq

Respecto al análisis de flujos relacionados por la flotabilidad, el método de Boussinesq ofrece una alternativa más eficiente en términos computacionales que la resolución completa de las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos compresibles. Este enfoque, aplicable a corrientes no isotérmicas, considera las variaciones de densidad únicamente en los componentes afectados por la gravedad, simplificando así el cálculo [51].

Bajo este modelo, se asume que los cambios en la densidad son exclusivamente dependientes de la temperatura, descartando su influencia en los efectos inerciales. El planteamiento de Boussinesq mantiene constante la viscosidad cinemática y es versátil para el estudio de regímenes tanto laminares como turbulentos [51].

La hipótesis central de esta aproximación es una relación lineal entre la densidad y la temperatura. Su precisión es notable en escenarios de convección natural donde las diferencias térmicas son moderadas respecto al ambiente circundante. Esto la hace particularmente útil en campos como la disipación térmica de dispositivos electrónicos, los sistemas de acondicionamiento ambiental y el análisis del confort térmico en rangos de temperatura moderados. Sin embargo, la fiabilidad de este método disminuye en condiciones de velocidades elevadas (superiores a 120 m/s) o temperaturas altas (por encima de 100°C), donde la suposición de linealidad entre temperatura y densidad pierde validez. La teoría indica que las variaciones de densidad son una función de la densidad de referencia, la temperatura y un coeficiente de expansión térmica [51].

$$\rho = \rho_0 - \alpha\rho_0(T - T_0)$$

Donde ρ es la densidad local, ρ_0 densidad de referencia, α coeficiente de expansión térmica, T es la temperatura local y T_0 es la temperatura de referencia.

2.2.15. Ecuaciones de turbulencia (Modelos $\kappa - \epsilon$, $\kappa - \omega$)

Los fluidos se pueden clasificar como

- Laminar (Número de Reynolds bajo)
- Transición (Número de Reynolds creciente)
- Turbulento (Número de Reynolds más alto)

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que relaciona la influencia relativa de las fuerzas inerciales y viscosas en un fluido en movimiento. Este indicador es fundamental para caracterizar el régimen de flujo, permitiendo discernir entre condiciones laminares y turbulentas [52].

El número de Reynolds es el criterio utilizado para determinar si el flujo es laminar o turbulento.

$$Re_L = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu}$$

La transición a la turbulencia varía según el tipo de flujo [52].

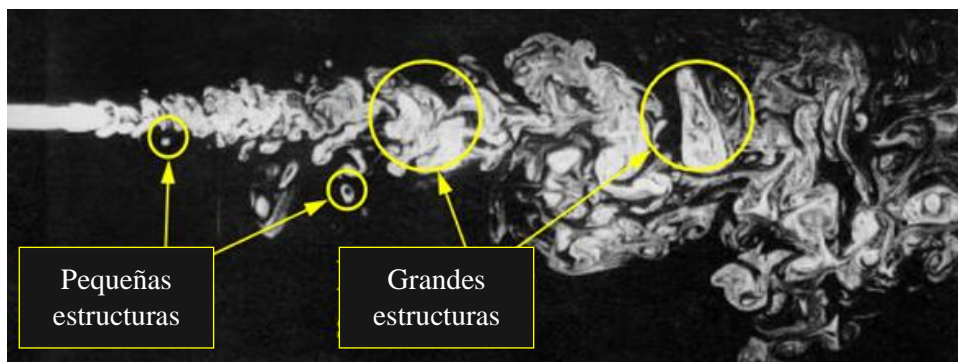
- ✓ Flujo externo
 - A lo largo de una superficie $Re_x > 500000$
 - Alrededor de un obstáculo $Re_x > 20000$
- ✓ Flujo interno $Re_D > 2300$

Estructura de un Flujo Turbulento

El flujo turbulento se caracteriza por una compleja variedad de estructuras vorticales de diferentes dimensiones. Este flujo es un fenómeno dinámico inestable, tridimensional e irregular, con un componente estocástico. En él, las variables de transporte como masa, momento, entre otras, experimentan fluctuaciones tanto temporales como espaciales. Además lo caracteriza su naturaleza inherentemente impredecible en cuanto a los detalles específicos del flujo [53].

Un aspecto fundamental de la turbulencia es la transferencia energética, conocida como cascada de Kolmogorov. En este proceso la energía se transmite desde los remolinos de mayor tamaño hacia los más pequeños. Además, los vórtices de gran escala contienen la mayor parte de la energía cinética turbulenta. Por último, en las escalas más pequeñas, esta energía turbulenta se transforma en energía térmica mediante disipación viscosa [53].

Figura 4: Estructuras del flujo turbulento



Fuente. [53]

Modelos de turbulencia para flujos con flotabilidad

Modelo k-épsilon ($\kappa - \epsilon$)

El modelo de turbulencia k- ϵ es una herramienta muy utilizada en la ingeniería para analizar flujos turbulentos. Este enfoque, que emplea dos ecuaciones, calcula una escala de longitud y una escala temporal turbulentas mediante ecuaciones de transporte independientes [54]

Este modelo es conocido a nivel industrial de flujo y transferencia de calor, debido al equilibrio entre robustez, eficiencia computacional y precisión aceptable, para diversos escenarios de flujo turbulento. En su versión estándar, el k- ϵ utiliza ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación (ϵ). Este modelo asume flujos completamente turbulentos, descartando los efectos de la viscosidad molecular [54]

Por otro lado, el modelo k- ϵ realizable, propone una formulación alternativa para la viscosidad turbulenta. Además, presenta una ecuación de transporte modificada para ϵ , derivada del transporte de fluctuaciones y vorticidad media cuadrática. Este modelo cumple con ciertas restricciones matemáticas sobre los esfuerzos de Reynolds, alineándose con la física de los flujos turbulentos. Buscando mejorar la precisión y aplicabilidad del modelo en situaciones más complejas [54]

La ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta se da mediante

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon + S_k$$

Donde P_k es la producción de energía turbulenta TKE debido al esfuerzo cortante de velocidad media, P_b es la producción de TKE debido a la flotabilidad, S_k es la fuente, σ_k es el número turbulento de Prandtl para k.

La ecuación de transporte para la tasa de disipación turbulenta se da mediante

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - C_{2p} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_1 \frac{\epsilon}{k} C_3 P_b + S_\epsilon$$

Donde C_1, C_2, C_3, C_μ son coeficientes del modelo que varían dentro de $k - \epsilon$ modelos de turbulencia, S_ϵ es la fuente definida por el usuario y σ_ϵ es el número turbulento de Prandtl para ϵ [55].

Modelo k-omega ($\kappa - \omega$)

Los modelos de turbulencia k- ω , en sus variantes estándar y SST (transporte de esfuerzo cortante), comparten una base común al utilizar ecuaciones de transporte para k y ω . Sin embargo, el modelo SST introduce cambios significativos, en primer lugar, implementa una transición gradual desde el modelo k- ω en la zona interna de la capa límite hacia una versión de alto número de Reynolds del k- ϵ en la región exterior. Luego, modifica la formulación de la viscosidad turbulenta para incorporar los efectos de transporte de los principales esfuerzos cortantes turbulentos. El modelo k- ω estándar se fundamenta en las ecuaciones de Wilcox, con adaptaciones para abordar fenómenos de bajo número de Reynolds, compresibilidad y dispersión en flujos cortantes. Aunque este modelo presenta cierta sensibilidad a las condiciones de flujo libre, la implementación de busca mitigar esta dependencia [54].

Por su parte, el modelo k- ω SST, desarrollado por Menter, fusiona las ventajas del k- ω cerca de las paredes con la estabilidad del k- ϵ en el flujo libre. Su principal función, una función de mezcla que combina los modelos k- ω y k- ϵ transformado, activando cada uno en su región óptima. La inclusión de un término de difusión cruzada en la ecuación de ω . Una redefinición de la viscosidad turbulenta para mejorar el cálculo del transporte de esfuerzos cortantes [54].

Estas mejoras proporcionan al k- ω SST de una mayor fiabilidad y precisión en diversos escenarios complejos, como flujos con gradientes de presión adversos, perfiles aerodinámicos y ondas de choque transónicas [54].

La ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta se da mediante [56]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta * k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

La ecuación de transporte para la tasa de disipación específica se da mediante [56]

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial k \omega}{\partial x_i}$$

2.2.16. Modelamiento Matemático

Respecto a una central de chimenea solar, existen modelos matemáticos que tienen como objetivo examinar la transferencia térmica del aire en el interior del sistema, así como el fluido del aire dentro del mismo. Se debe considerar que el fluido se comporta de acuerdo con las leyes de los fluidos newtonianos y es incompresible. Además, se toma en cuenta que el flujo es constante en el tiempo, opera en tres dimensiones y presenta características de turbulencia. Se ignora cualquier efecto significativo debido a la disipación viscosa y se considera que no hay pérdida ni ganancia de calor por medio de la pared de la torre [57].

Se tiene en cuenta que la radiación entra uniformemente y de manera constante, utilizándose el modelo de radiación DO no gris que se emplea para la ecuación de transferencia radiactiva. Se aplica la aproximación de Boussinesq, la cual sostiene que todas las propiedades del fluido permanecen invariables salvo la densidad dentro de la ecuación de cantidad de movimiento. Para describir el comportamiento del fluido, se utilizan las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía. Para resolver las incógnitas presentes en estas ecuaciones, se recurre a modelos de turbulencia apropiados, siendo el modelo RNG k- ϵ el seleccionado, utilizando para ello valores estandarizados para las constantes [57].

2.2.17. Enfoques Computacionales

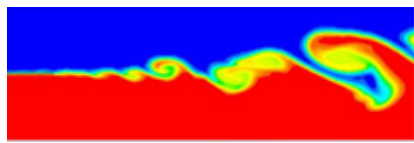
Los métodos computacionales para abordar la turbulencia en la dinámica de fluidos se pueden clasificar en tres categorías principales, cada una con sus propias características y aplicaciones:

En primer lugar la Simulación Numérica Directa (DNS) representa el enfoque más exhaustivo. Este método resuelve las ecuaciones completas de Navier-Stokes sin simplificaciones, capturando todas las escalas de movimiento del fluido. Aunque ofrece resultados de alta fidelidad, su aplicación se ve limitada por el alto costo computacional, haciéndolo impracticable para la mayoría de los escenarios industriales [53].

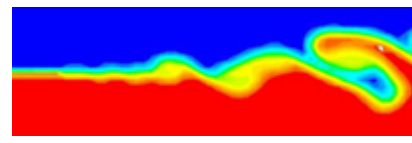
La Simulación de Grandes Remolinos (LES) adopta un enfoque intermedio. Esta técnica resuelve directamente las estructuras turbulentas de mayor escala, mientras que modela las más pequeñas. Aunque menos demandante que DNS, LES aún requiere recursos computacionales significativos, lo que restringe su uso en muchas aplicaciones prácticas [53].

Por último, la Simulación de Navier-Stokes Promediada por Reynolds (RANS) se posiciona como el método más accesible y ampliamente utilizado en entornos industriales. RANS opera sobre las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas temporalmente, modelando todas las escalas de turbulencia. Este enfoque introduce el concepto de tensiones de Reynolds, que requieren modelado adicional para cerrar el sistema de ecuaciones. La versatilidad de RANS se refleja en la variedad de modelos disponibles, adaptados a diferentes tipos de flujos y condiciones [53].

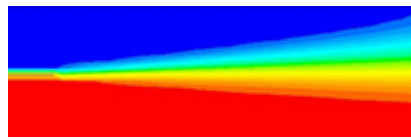
Figura 5: Enfoques computacionales



DNS - Simulación Numérica
Directa



LES - Simulación de Grandes
Remolinos

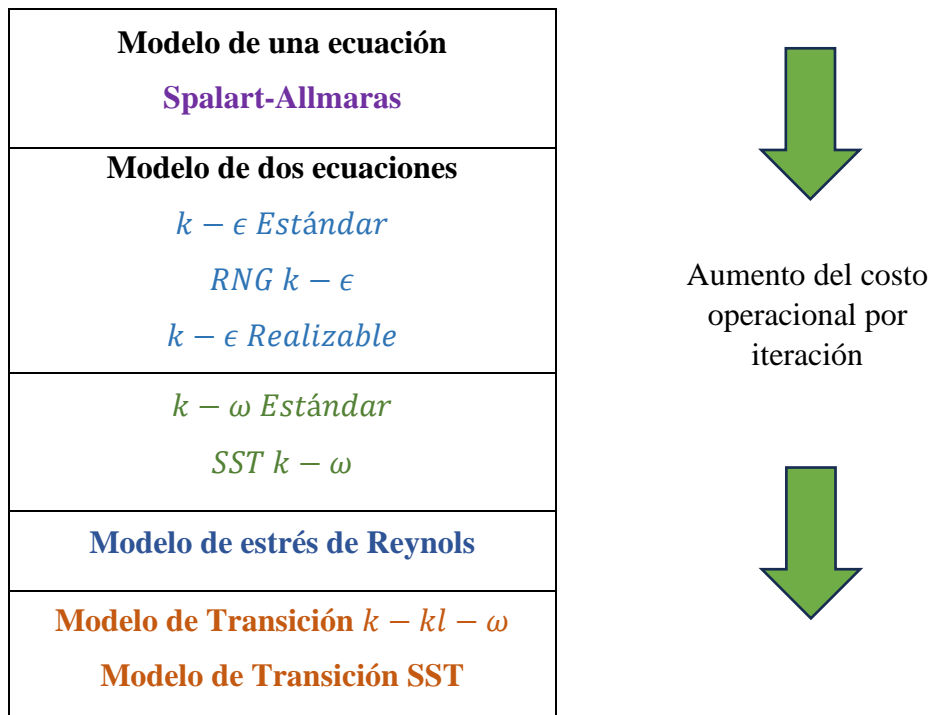


RANS - Simulación de Navier-
Stokes Promediada por Reynolds

Fuente. [53]

2.2.18. Modelos basados en RANS

Los modelos de turbulencia más comunes de encontrar son



Fuente. [53]

2.2.19. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno son parámetros cruciales que definen el comportamiento en los bordes de un área de cálculo, estas son fundamentales para que los métodos numéricos puedan funcionar eficazmente cuando no existen elementos de malla fuera del dominio, asegurando así la exactitud de las simulaciones [58]. Para completar el conjunto de soluciones de una ecuación diferencial, es importante establecer condiciones de contorno, estas reflejan cómo el entorno influye en el modelo de solución [59].

Las condiciones de contorno se categorizan generalmente en tres tipos:

- Condiciones de entrada y salida: En las entradas, se pueden especificar variables como velocidad, temperatura y concentración. Si no es posible medir la velocidad del flujo entrante, se debe indicar la presión. Se debe considerar la compresibilidad y los cambios significativos en la densidad de los fluidos, por lo que la velocidad de entrada debe ser precisa. En cuanto a las salidas, es preferible definir las como superficies con gradiente

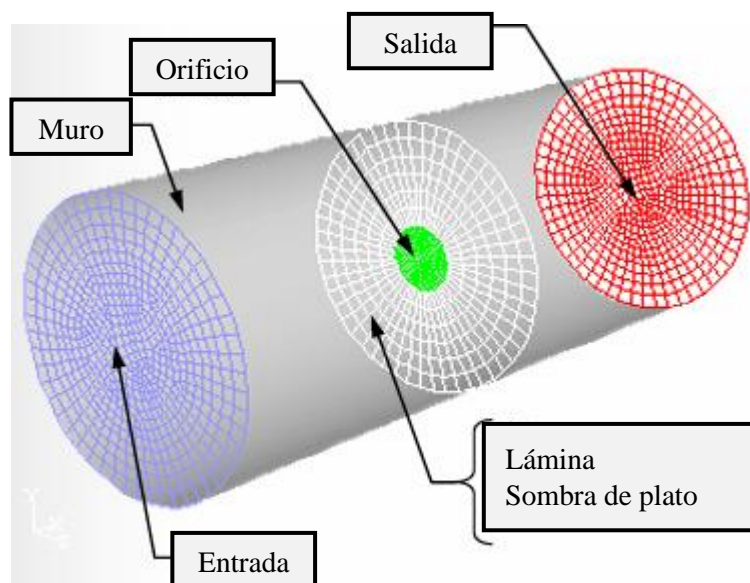
ceros. En casos donde existan gradientes no nulos en la salida, puede ser necesario ampliar el dominio de solución [59].

- Condiciones de pared: Estas pueden ser de dos tipos. La condición de "no deslizamiento" implica que la velocidad del fluido cerca de la pared es igual a la de la pared misma. Por otro lado, la condición de "deslizamiento libre" permite que la componente de velocidad paralela a la pared sea independiente y tenga un valor específico [59].
- Condiciones de simetría y periodicidad: La simetría supone que no hay velocidad normal ni gradientes de transporte en las interfaces, aunque podría ser difícil de cumplir en la práctica. Mientras que, las condiciones periódicas se aplican a flujos que se repiten cíclicamente, pudiendo ser rotacionales o traslacionales, y en algunos casos representan situaciones reales [59].

También se consideran los siguientes tipos de condiciones de contorno:

- Límites externos
 - General: Entrada y salida de presión
 - Incompresible: Entrada de velocidad o salida de aire
 - Compresible: Entrada de flujo másico y presión de campo lejano.
 - Otros: Simetría, muro, eje.
- Límites internos: interior, radiador, muro, etc.

Figura 6: Modelo de Condiciones de Contorno



Fuente. [46]

III.MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo, nivel y enfoque de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada y nivel descriptivo, por un lado, es aplicada debido a que se emplearon conocimientos teóricos y prácticos de la ingeniería, con el fin de diseñar y simular una central de chimenea solar. Por otro lado, es de nivel descriptivo porque se evaluó y describió las condiciones meteorológicas del norte del Perú, para determinar una ubicación óptima, así mismo, se describió el comportamiento del flujo de aire dentro de la central después de realizar la simulación CFD.

Además, es de enfoque cuantitativo, pues la simulación CFD y evaluación económica brindaron datos numéricos y medibles como temperatura, velocidad del fluido, presión, potencia generada y datos de costos.

3.2. Población y muestra

La investigación no presenta población y muestra, pues se trata del diseño y simulación de un sistema, sin embargo, se considerará la demanda de potencia y de energía de una empresa cementera en el norte del país, para plantear la demanda de energía que se desea cubrir.

3.3. Métodos y técnicas de recolección de datos

3.3.1. Métodos

En primer lugar, se usó el Atlas Solar y Eólico Global, así como el software RETScreen Expert – NASA para poder evaluar las condiciones meteorológicas de la zona norte del Perú, con ello se puede determinar la ubicación óptima para la central de chimenea solar.

Seguido, se empleó el COES para obtener datos de máxima demanda de potencia en horas punta según diversas actividades económicas y luego específicamente en cementeras del Perú. Luego, se obtuvieron datos de la máxima demanda en HFP y HP. También, se recolectó datos por empresa cementera de la máxima demanda de potencia y energía en el día (16 mayo 2024), y por último se hizo una revisión de bibliografía previa para poder evaluar la potencia generada por centrales de chimenea solar en investigaciones. Esto para determinar la demanda parcial de energía eléctrica que se puede abastecer con la central.

Se usó el método de diseño conceptual de Palh y Beitz, así como los lineamientos de Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger para el diseño, esta metodología se basa en definir inicialmente las necesidades y métricas importantes para la central, para posteriormente evaluar varias

alternativas de diseño a través de una matriz morfológica en función al cumplimiento de los requisitos planteados. Seguido se utilizó el software Granta EduPack para evaluar los materiales elegidos y se hizo una revisión bibliográfica de investigaciones especializadas para poder evaluar las dimensiones de las centrales en función a la irradiación de las zonas de investigación, así como la potencia que llegaron a generar, con esto se propuso un nuevo diseño y se realizó el modelado en el software SolidWorks.

Se empleó el método de simulación numérica, con el objetivo se observar el comportamiento del flujo de aire y transferencia de calor dentro de la central utilizándose valores de ubicación e irradiación principalmente para poder encontrar valores de variaciones de temperatura, presiones y velocidad del flujo. Considerándose para la simulación el modelo de turbulencia k-epsilon y el modelo de radiación Discretas Ordenas. Adicionalmente se realizó la simulación del sistema propuesto para analizar el diseño del sistema de potencia que se propuso.

Finalmente, para la realizar la evaluación económica se planteó un monto inversión inicial que incluyó costo de la infraestructura, sistema eléctrico, turbina, generador, permisos y licencias, así como contingencias. Se realizó una tabla de costos operativos anuales que considera costos de mantenimiento, seguros, personal, impuestos, entre otros. Se planteó los ingresos proyectados anuales por la venta de electricidad, con un aumento anual del 3%. Con estos valores se realizó un flujo de caja, proyectado a 25 años, para poder encontrar los indicadores financieros VPN, VPB, VPC, VIR y Costo-Beneficio, se utilizó una tasa de descuento del 8% anual.

3.3.2. Técnicas

Se aplicó la recolección de datos, para obtener información relevante, sobre la geografía y condiciones climáticas en la zona del Perú, así como para conocer la demanda de energía eléctrica en diferentes cementeras lo que fue útil para el diseño y simulación de la central.

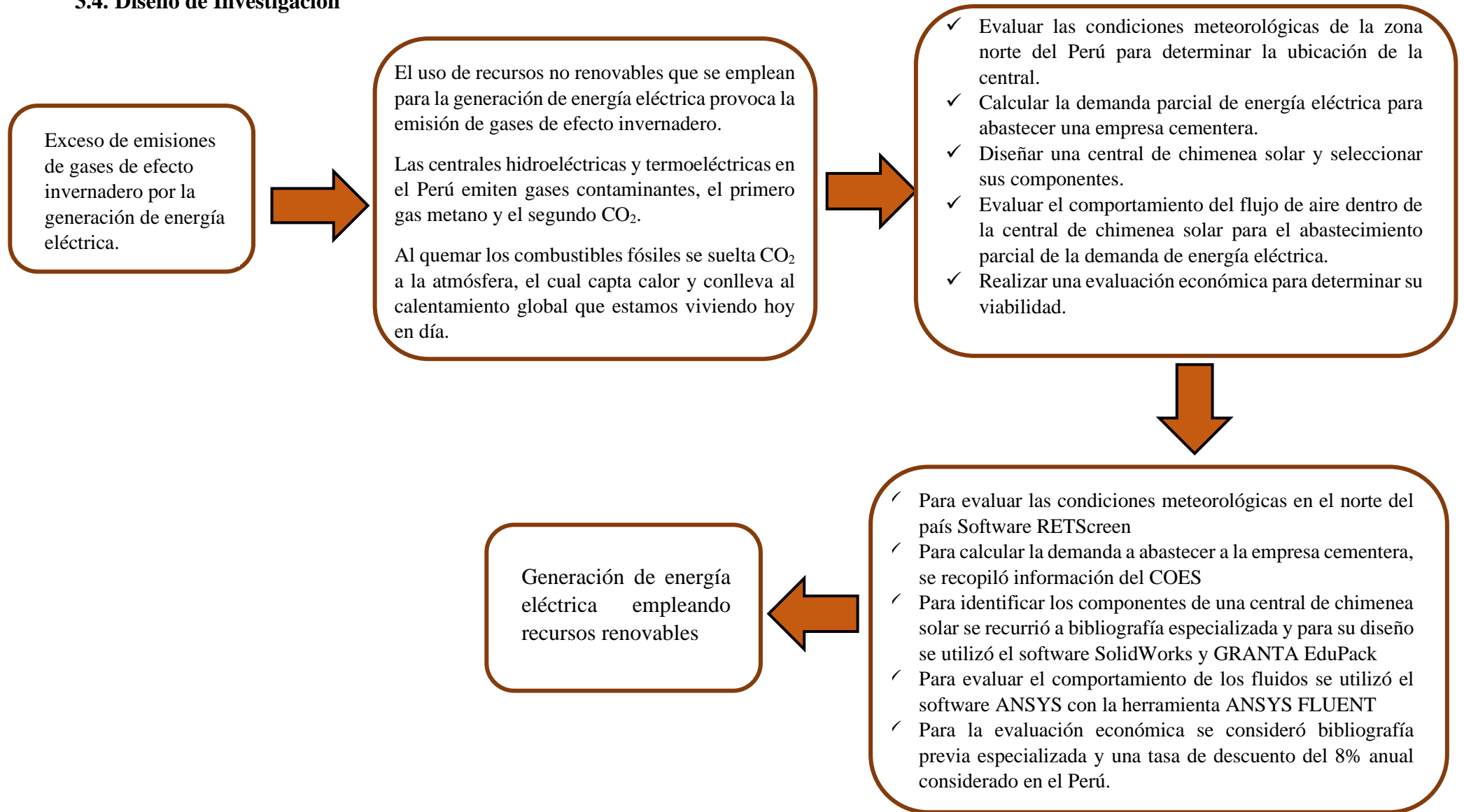
Se usó la técnica de revisión al momento de recopilar investigaciones con el fin de tener información y poder visualizar diseños previos de centrales de chimenea solar, así como la potencia, la irradiación, los materiales y los costos aproximados.

Se usó el software Ansys Fluend con la técnica de Dinámica de Fluidos Computaciones CFD para realizar las simulaciones del flujo de aire y transferencia de calor en la central de chimenea solar, esta técnica brindó datos cuantitativos para la investigación. Adicionalmente se realizó

la simulación del sistema en el software DigSILENT PowerFactory, evaluando el desempeño del sistema de potencia que se propuso en la presente investigación.

Por último, se utilizó la técnica de proyección financiera, con sus respectivos indicadores VPN, VPB, VPC, VIR y la relación Costo-Beneficio, para determinar la viabilidad del proyecto.

3.4. Diseño de Investigación



3.5. Operacionalización de Variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEMS
SIMULACIÓN CFD DE UNA CENTRAL DE CHIMENEA SOLAR	La simulación CFD es un método computacional que utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes para el análisis detallado del comportamiento del fluido y la transferencia de calor dentro de una central de chimenea solar, incluyendo la radiación solar, la velocidad del viento, el diferencial de presión y la potencia de la turbina para predecir la eficiencia energética [45].	La variable se medirá a través de simulaciones utilizando software de CFD para modelar el flujo de aire y los procesos de transferencia de calor en la chimenea solar.	Dinámica de fluidos (CFD)	Ecuación de momento de Navier Stokes	Fuerzas de presión [Pa] Flotabilidad del aire $\left[\frac{N}{m^3}\right]$
				Ecuación de energía de Navier Stokes	Transferencia de calor (K) Turbulencia RNG k-ε k: $\left[\frac{J}{kg}\right]$ ε: $\left[\frac{J}{kg.s}\right]$
				Turbulencia del aire	
				Ecuación de continuidad de Navier Stokes	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$
			Radiación solar	Irradiación horizontal	kWh/m ² (Potencia por área)
			Velocidad de viento	Velocidad promedio del viento	m/s

VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEMS
ABASTECIMIENTO PARCIAL DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA	El abastecimiento parcial de demanda implica que la fuente de energía renovable generada no cubre el 100% de la demanda, sino que su potencia generada complementa otras fuentes convencionales para satisfacer los requerimientos totales de energía eléctrica [42].	La variable se medirá a través de la potencia y energía generada por la central de chimenea solar.	Energía renovable	Energía producida por la chimenea Porcentaje de energía generada (a abastecer)	kWh %
			Potencia generada	Potencia eléctrica nominal	kW o MW (Potencia eléctrica generada)
			Viabilidad económica	VAN	Soles
			Viabilidad económica	TIR	%
			Viabilidad económica	Costo-Beneficio	Soles

3.6. Formulación de hipótesis

OBJETIVOS GENERALES	HIPOTESIS GENERAL
Simular una central de chimenea solar para abastecer parcialmente la demanda de energía eléctrica en una empresa cementera mediante Dinámica de Fluidos Computacional.	Si se simula una central de chimenea solar, empleando el método de Dinámica de Fluidos Computacional entonces se podrá abastecer parcialmente la demanda de energía eléctrica en una empresa cementera.
OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICA
Evaluar las condiciones meteorológicas de la zona norte del Perú para determinar una ubicación óptima para la central de chimenea solar.	Si se evalúan las condiciones meteorológicas en la zona norte del Perú, entonces se podrá garantizar la implementación de una central de chimenea solar.
Calcular la demanda parcial de energía eléctrica para abastecer una empresa cementera.	Si se calcula la demanda parcial de energía eléctrica entonces se podrá dimensionar la central, determinando características y dimensiones para garantizar un suministro significativo a la cementera.
Diseñar una central de chimenea solar y seleccionar sus componentes..	Si se diseña y selecciona los componentes de una central de chimenea solar, entonces se podrá dimensionar y diseñar una central de chimenea solar para su aplicación en el abastecimiento parcial de la demanda de energía eléctrica en una empresa cementera.
Evaluar el comportamiento del flujo de aire dentro de la central de chimenea solar para predecir su capacidad de generación de energía eléctrica.	Si se evalúa el comportamiento del flujo de aire de la central de chimenea solar para el abastecimiento parcial de la demanda de energía eléctrica en una empresa cementera, entonces se podrá garantizar predecir su capacidad de generación eléctrica.

<p>Realizar una evaluación económica para determinar su viabilidad.</p>	<p>Si se evalúa económicamente la viabilidad de la implementar una central de chimenea solar, entonces se espera que el proyecto sea económicamente viable dado la reducción de costos energéticos a largo plazo.</p>
---	---

3.7. Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
	GENERAL	GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN
¿En qué medida es posible que la simulación CFD de una central de chimenea solar permita predecir la generación de energía eléctrica para el abastecimiento parcial de la demanda en una cementera?	<p>Simular una central de chimenea solar para abastecer parcialmente la demanda de energía eléctrica en una empresa cementera mediante Dinámica de Fluidos Computacional.</p>	<p>Si se simula una central de chimenea solar, empleando el método de Dinámica de Fluidos Computacional entonces se podrá abastecer parcialmente la demanda de energía eléctrica en una empresa cementera.</p>	<p>Simulación CFD de una Central de Chimenea Solar</p>	<p>Tipo aplicada-cuantitativa con utilización del software ANSYS FLUENT</p>
	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICAS	INDICADORES	TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS
	<p>Evaluar las condiciones meteorológicas de la zona norte del Perú para determinar una ubicación óptima para la central de chimenea solar.</p>	<p>Si se evalúan las condiciones meteorológicas en la zona norte del Perú, entonces se podrá garantizar la implementación de una central de chimenea solar.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ecuación de momento de Navier Stokes • Ecuación de energía de Navier Stokes • Turbulencia del aire • Ecuación de continuidad de Navier Stokes • Irradiación solar 	<p>Se usará la técnica de recolección de datos climatológicos por medio del Software RETScreen y datos experimentales a partir de investigaciones validadas relacionadas a</p>

- Velocidad promedio del centrales de chimenea viento solar.

Calcular la demanda parcial de energía eléctrica para abastecer una empresa cementera. Si se calcula la demanda parcial de energía eléctrica entonces se podrá dimensionar la central, determinando características y dimensiones para garantizar un suministro significativo a la cementera.

Diseñar una central de chimenea solar y seleccionar sus componentes.. Si se diseña y selecciona los componentes de una central de chimenea solar, entonces se podrá dimensionar y diseñar una central de chimenea solar para su aplicación en el abastecimiento parcial de la demanda de energía eléctrica en una empresa cementera.

**VARIABLE
DEPENDIENTE**

**POBLACIÓN Y
MUESTRA**

Abastecimiento parcial de la demanda de energía eléctrica
Viabilidad económica

La unidad de estudio es simulación de la Central de Chimenea Solar

Evaluar el comportamiento del flujo de aire dentro de la central de chimenea solar para predecir su capacidad de generación de energía eléctrica.

Si se evalúa el comportamiento del flujo de aire de la central de chimenea solar para el abastecimiento parcial de la demanda de energía eléctrica en una empresa cementera, entonces se podrá garantizar predecir su capacidad de generación eléctrica.

Realizar una evaluación económica para determinar su viabilidad.

Si se evalúa económicamente la viabilidad de la implementar una central de chimenea solar, entonces se espera que el proyecto sea económicamente viable dado la reducción de costos energéticos a largo plazo.

INDICADORES

-
- Energía producida por la chimenea
 - Porcentaje de energía generada
 - Potencia eléctrica nominal
-

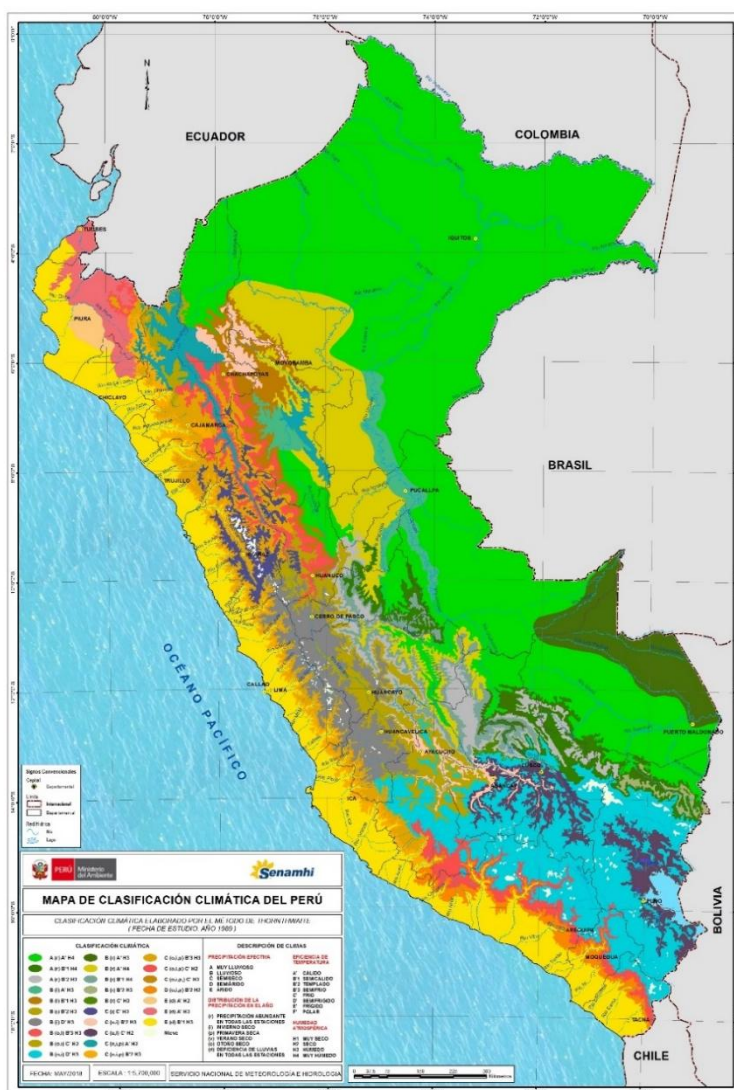
IV.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación de las condiciones meteorológicas de la zona norte del Perú para determinar una ubicación óptima para la central de chimenea solar

4.1.1.Potencial solar en el norte peruano

En el contexto de la política energética nacional establecida por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), cuyo objetivo es lograr una matriz energética diversificada, teniendo un énfasis en el aprovechamiento de fuentes renovables de energía, se observó el Atlas Eólico del Perú por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). El Atlas Eólico nos brindó datos de relieve, suelo, hidrografía y clima, considerando para la investigación en primer lugar datos climáticos. Se muestra lo siguiente

Figura 7: Mapa de climatización en el Perú

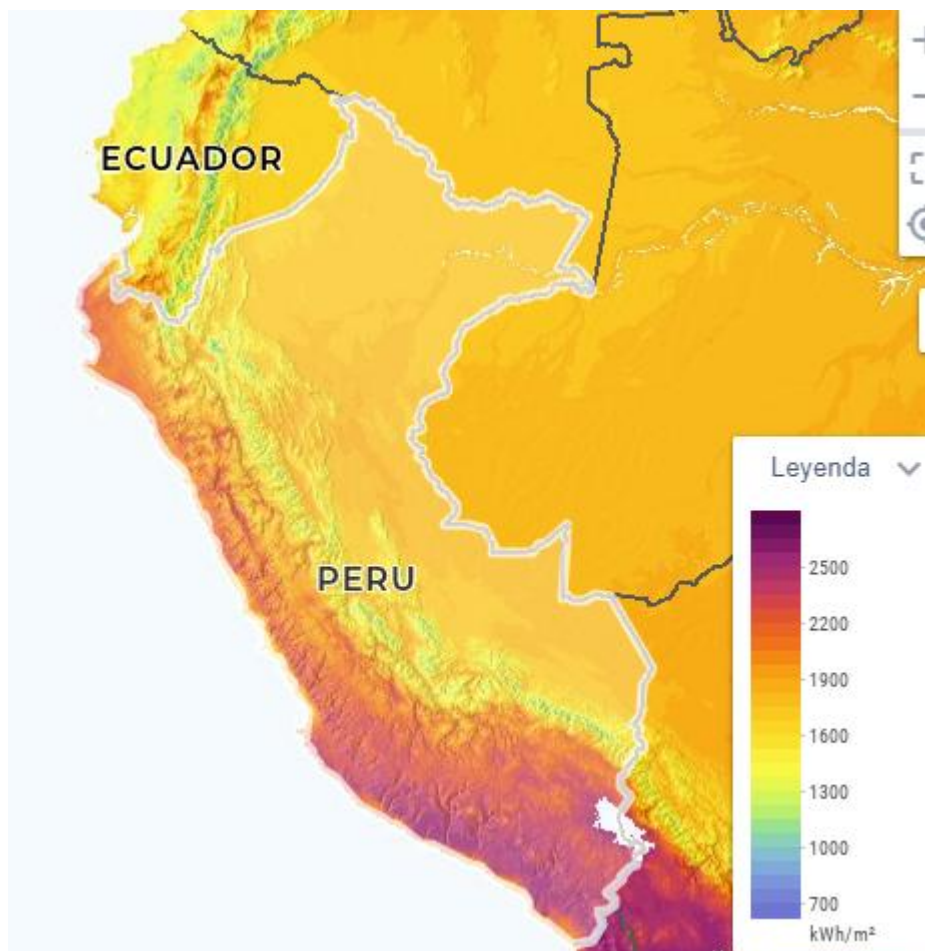


Fuente: Atlas digital peruano

El litoral peruano pertenece al grupo E(d)B'1 H3 dentro de la distribución climática peruana realizada por el IGN, esta zona se caracteriza por ser árida o desértica, con escasas precipitaciones durante el año y una atmósfera caracterizada por su humedad.

Para reconocer el potencial solar peruano, se utilizó el Atlas Solar Mundial, en donde se tiene:

Figura 8: Mapa de recurso solar del Perú



Fuente: Global Solar Atlas

Tabla 1: Información solar del Perú

Datos del Mapa		Rango	Unidad
Irradiación horizontal global	GHI	3,51 – 6,95	kWh/m ²
Irradiación horizontal difusa	DIF	1,41 – 2,58	kWh/m ²
Elevación del terreno	ELE	-34 – 6 768	m

Fuente: Global Solar Atlas

De la figura y tabla anterior se obtuvo que los valores de irradiación global horizontal (GHI) van desde 3,51 hasta 6,95 kWh/m², lo que significó que existen regiones en el Perú con niveles

muy altos de irradiación solar incidente sobre una superficie horizontal, estos niveles son buenos para el aprovechamiento del recurso solar.

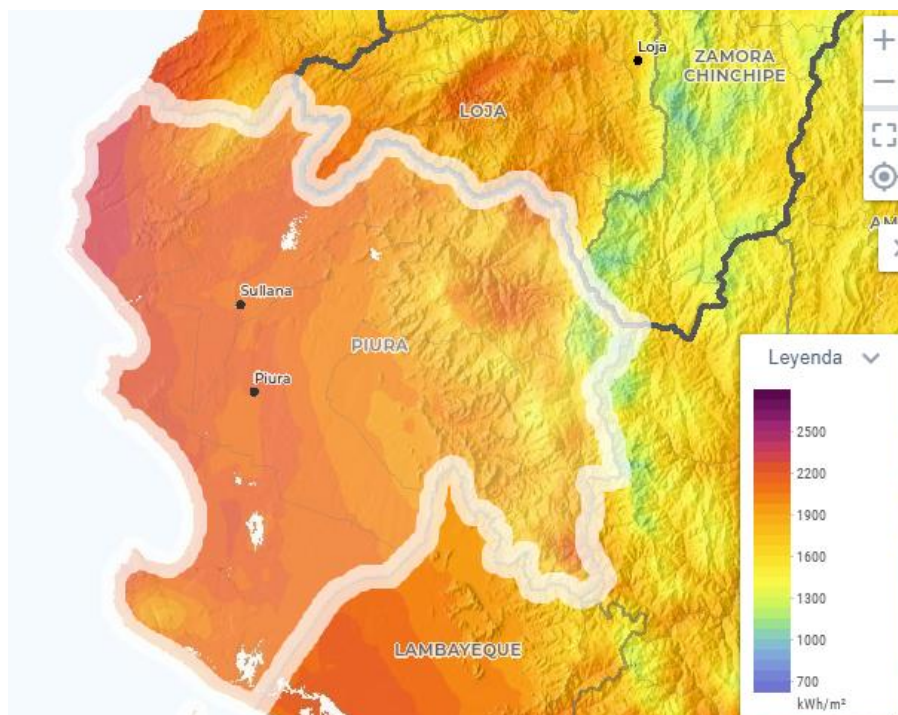
Respecto a los valores de irradiación horizontal difusa (DIF), varían entre 1,41 y 2,58 kWh/m², lo que significó que hay zonas que hay zonas con una importante contribución de este tipo de radiación, este componente es importante para el calentamiento del aire debajo del colector solar.

Con relación a las elevaciones del terreno (ELE) en el Perú varían ampliamente, desde -34 m hasta 6 768 m. Esto permitió considerar ubicaciones con altitudes elevadas, lo cual puede ser beneficioso para el rendimiento de la central, pues a mayor altitud, menor es la densidad del aire y por tanto, mayor es el flujo ascendente generado por el gradiente térmico.

4.1.2. Potencial solar en Piura

Considerando que la investigación está centrada en empresas cementeras en el norte del Perú, se evaluó como ubicación estratégica de la central de chimenea solar a Piura, pues en ella se ubican 2 microempresas y 1 empresa cementera de gran dimensión, además, cuenta con recurso solar disponible.

Figura 9: Mapa de recurso solar de Piura



Fuente: Global Solar Atlas

Tabla 2: Información solar de Piura

Datos del Mapa		Rango	Unidad
Irradiación horizontal global	GHI	3,50 – 6,42	kWh/m ²
Irradiación horizontal difusa	DIF	1,16 – 2,58	kWh/m ²

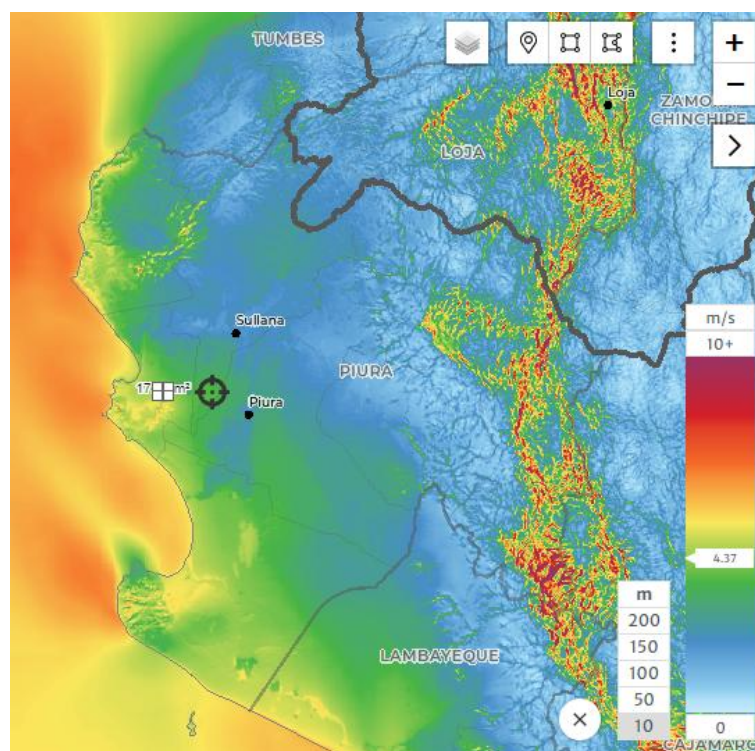
Fuente: Global Solar Atlas

Como se observa en la figura y tabla anterior la región de Piura presenta condiciones favorables para el aprovechamiento de la energía solar, como se evidencia en los valores de GHI oscilan entre 3,50 y 6,42 kWh/m² en la zona. Estos niveles son considerados altos y representan un gran potencial.

En cuanto a los valores de DIF oscilan entre 1,16 y 2,58 kWh/m², esto indica una importante contribución de radiación solar difusa. Este componente es importante para el funcionamiento de la central, pues es la encargada de calentar el aire debajo del colector solar y generar el flujo ascendente necesario para accionar la turbina.

4.1.3. Potencial eólico en Piura

Figura 10: Mapa de recurso eólico de Piura



Fuente: Global Wind Atlas

En cuanto al potencial eólico el mapa mostró una variación significativa en las velocidades a lo largo de la región, las áreas costeras (hacia el oeste) presentan velocidades de viento más altas, mientras que las zonas interiores y montañosas (hacia el este) muestran velocidades más bajas y variables.

Es así que el Atlas Eólico Mundial, en la figura anterior mostró una velocidad promedio de viento de 4,37 m/s a una altura de 10 m, el cual es un valor relativamente bajo, sin embargo, para una central de chimenea solar, esta velocidad puede ser suficiente, pues el sistema no depende únicamente del viento para su funcionamiento.

4.1.4. Ubicación de la central de chimenea solar

Considerando factores clave para el funcionamiento de la central de chimenea solar, se consideró como ubicación geográfica específica $5^{\circ}11'59''S$ $80^{\circ}35'59''O$, esta zona se caracteriza por ser un terreno completamente despejado, libre de árboles y zona urbana. Los datos de irradiación en esta ubicación mostraron niveles favorables, situándose dentro de los más altos a nivel nacional. Otro aspecto relevante fue la cercanía de esta ubicación a una de las principales cementeras del departamento de Piura.

Se usó el software RETScreen que obtiene datos actualizados de la NASA para evaluar meteorológicamente la ubicación geográfica mencionada.

Tabla 3: Ubicación para central de chimenea solar

	Ubicación de datos meteorológicos	Unidad
Latitud	-5.19999980926514	
Longitud	-80.5999984741211	
Zona Climática	1B – Muy caliente – Seca	
Elevación	50	m

Fuente. RETScreen Expert - NASA

En la tabla anterior se muestran las coordenadas geográficas de latitud y longitud, las cuales corresponden a una ubicación dentro del distrito 26 de Octubre, provincia de Piura. Según los datos climáticos, está ubicado en una zona climática 1B-Muy Caliente-Seca, lo que significa un clima cálido y árido, característico de la zona costera del norte del país.

Figura 11: Ubicación para central de chimenea solar



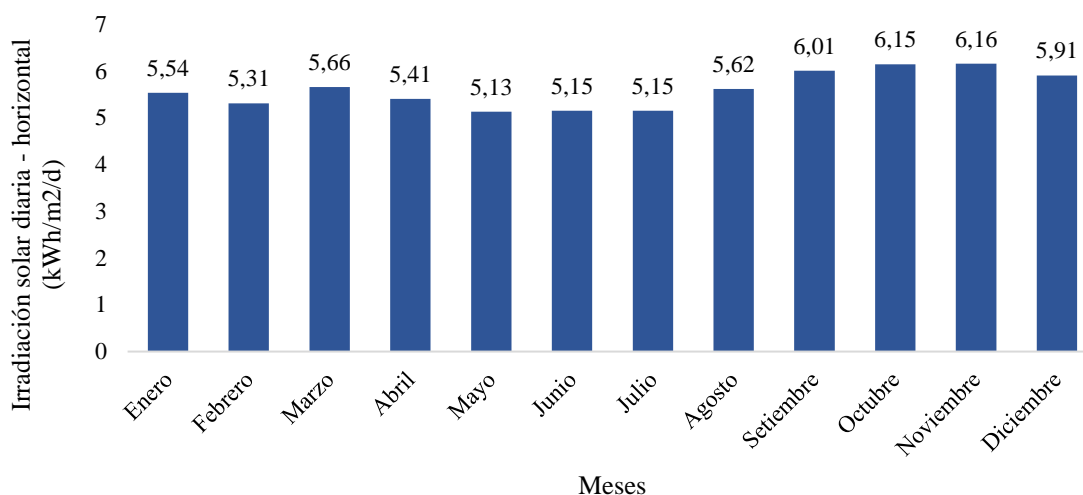
Fuente. RETScreen Expert

Tabla 4: Datos meteorológicos de la ubicación para la central

Mes	Irradiación horizontal diaria (kWh/m ² /d)	Presión atmosférica (kPa)	Temperatura del aire (°C)	Temperatura del Suelo (°C)	Velocidad del viento (m/s)
Enero	5,54	98,5	25,6	28,2	4,2
Febrero	5,31	98,5	26,4	28,6	3,4
Marzo	5,66	98,4	26,6	28,6	3,2
Abril	5,41	98,5	25,9	27,8	3,8
Mayo	5,13	98,5	24,6	26,4	4,7
Junio	5,15	98,6	23,3	24,9	5,0
Julio	5,15	98,6	22,4	24,3	5,2
Agosto	5,62	98,6	22,2	24,4	5,3
Setiembre	6,01	98,6	22,5	25,0	5,5
Octubre	6,15	98,6	22,8	25,6	5,4
Noviembre	6,16	98,6	23,4	26,2	5,2
Diciembre	5,91	98,5	24,5	27,3	4,9
Anual	5,60	98,6	24,2	26,4	4,6

Fuente. RETScreen Expert - NASA

Figura 12: Datos meteorológicos



Fuente. Elaboración propia

La tabla y figura anterior muestra los datos meteorológicos para la ubicación propuesta de la central, en primer lugar, se tiene la irradiación horizontal diaria promedio anual que es de 5,60 kWh/m²/d, este valor representa la cantidad de energía solar que incide por metro cuadrado en la superficie horizontal durante el día, se observa que los niveles más altos de irradiación se registran en los meses de primavera y verano, durante estos meses los valores fluctúan entre 5,66 kWh/m²/d en marzo y 6,16 kWh/m²/d en noviembre.

Por otro lado, los niveles más bajos se registran en los meses de otoño e invierno, que van desde abril hasta agosto, en este periodo los valores oscilan entre 5,13 kWh/m²/d en mayo y 5,62 kWh/m²/d en agosto.

Estos resultados se deben a la declinación solar durante el periodo de verano, donde el ángulo de incidencia de los rayos solares es más perpendicular, lo que significa una mayor irradiación sobre una superficie horizontal, además, las condiciones atmosféricas permiten que en estos meses el cielo esté despejado y presente menos nubosidad, lo que lleva a una mayor transmisión de la irradiación solar directa y difusa hacia la superficie terrestre. En este sentido, los meses de mayor irradiación significarán meses de mayor generación de energía, mientras que los meses con menor irradiación tendrán un rendimiento menor, pero aún aprovechable.

Además, en la tabla se tiene la presión atmosférica, que oscila entre 98,3 kPa y 98,6 kPa a lo largo del año, esta variable es necesaria considerar para observar el comportamiento del flujo de aire ascendente dentro de la chimenea de la central.

Respecto a la temperatura del aire, tiene valores que están en el rango de 22,2°C en agosto y 26,6°C en marzo, por lo que se coincide con los meses de mayor nivel de irradiación. Sobre la

temperatura del suelo, esta oscila entre 24,3 °C en agosto y 28,6°C en marzo, estas temperaturas son propicias para el calentamiento del aire bajo el colector.

También se tienen los resultados de la velocidad de viento, teniendo que son de 3,2 m/s en marzo hasta 5,3 m/s en agosto, esta variable es necesaria considerar pues podría tener un impacto en la transferencia de calor por convección desde el colector solar.

Respecto a la ubicación señalada, se puede fundamentar con la investigación de Semai, Bouhdjar y Larbi, quienes demostraron la viabilidad de la central que funcionaba con una irradiancia solar promedio diaria de 5,49 kWh/m²/d, logrando producir alrededor de 140 kW [60]. Además, Emat et al. en su investigación registró una irradiancia solar diaria de 6.8 kWh/m² con un valor promedio de velocidad de viento de 3,7 m/s, lo cual según destaca tuvo un impacto mínimo en el desempeño de la central, produciendo hasta 170 kW por la mañana [61]. Adicionalmente, Vásquez en su trabajo determinó que la irradiación solar en el distrito Tres de Diciembre oscila entre 5,5 y 6 kWh/m², concluyendo que la generación de energía eléctrica de 50 kW es viable en esa zona aunque en ciertos días las condiciones climáticas no fueron las más beneficiosas [20].

De este modo, las investigaciones de los autores mencionados respaldan la ubicación geográfica elegida, pues se cuenta con condiciones meteorológicas adecuadas para el funcionamiento de la central de chimenea solar.

4.2. Cálculo de la demanda parcial de energía eléctrica para abastecer una empresa cementera.

Para el dimensionamiento y selección de componentes de la central fue necesario conocer en primer lugar la demanda potencia de las cementeras en el Perú, con el fin de señalar que porcentaje de la demanda total se desea cubrir para una empresa.

4.2.1. Demanda de potencia en las cementeras a nivel nacional

Tabla 5: Datos de la máxima demanda de potencia en horas punta según la actividad económica

Actividad Económica	Máxima Demanda Horas Punta (MW)
Agroindustria	0,84
Alimentos	23,36
Bebidas	28,69
Cementos	44,19
Cerámica	7,67
Comercio	121,32
Fundición	84,71
Hidrocarburos	81,32
Industria metalúrgica	1,62
Minería	1 983,04
Papel	43,62
Pesquería	1,78
Químicos	33,08
Textiles	3,34
Transporte	19,54
Vidrios, cauchos y plásticos	28,5
Total	2 506,62

Fuente. COES

La tabla anterior muestra datos sobre la máxima demanda en horas punta para diferentes actividades económicas en el Perú, se tiene que la actividad que de “Cementos” tiene una máxima demanda en hora punta de 44,18 MW, este valor representa una alta demanda energética en comparación con otras actividades mencionadas, como la de vidrios, cauchos y plásticos, pesquería, agroindustria, entre otras.

Tabla 6: Datos de la máxima demanda potencia en el día en HFP y HP por empresa cementera

Usuario Libre	HFP (MW)	HP (MW)
UNACEM Perú S.A.	63,88	5,56
Cementos Pacasmayo Piura	6,54	1,53
Cementos Pacasmayo La Libertad	17,19	19,74
Yura	23,33	12,73
Cal & Cemento Sur S.A.	4,29	4,63
Total	115,23	44,19

Fuente. COES

La tabla anterior muestra los datos de demanda de potencia en horas fuera de punta y horas punta para las empresas cementeras del Perú, considerándose el período de HP desde las 17:00 – 23:00 h y como hora punta las 19:00; mientras que la hora fuera de punta es a las 12:00 h. Se observa que UNACEM Perú S.A. presenta una demanda relevante de 63,88 MW en HFP; para Cementos Pacasmayo Piura la demanda máxima es de 6,54 MW en HFP y para Yura es de 23,33 durante HFP. Mientras que, para Cementos Pacasmayo La Libertad sobresale la demanda máxima en HP con 19,74 MW; de igual modo para Cal & Cemento Sur S.A. resalta la demanda máxima de 4,63 MW durante HP.

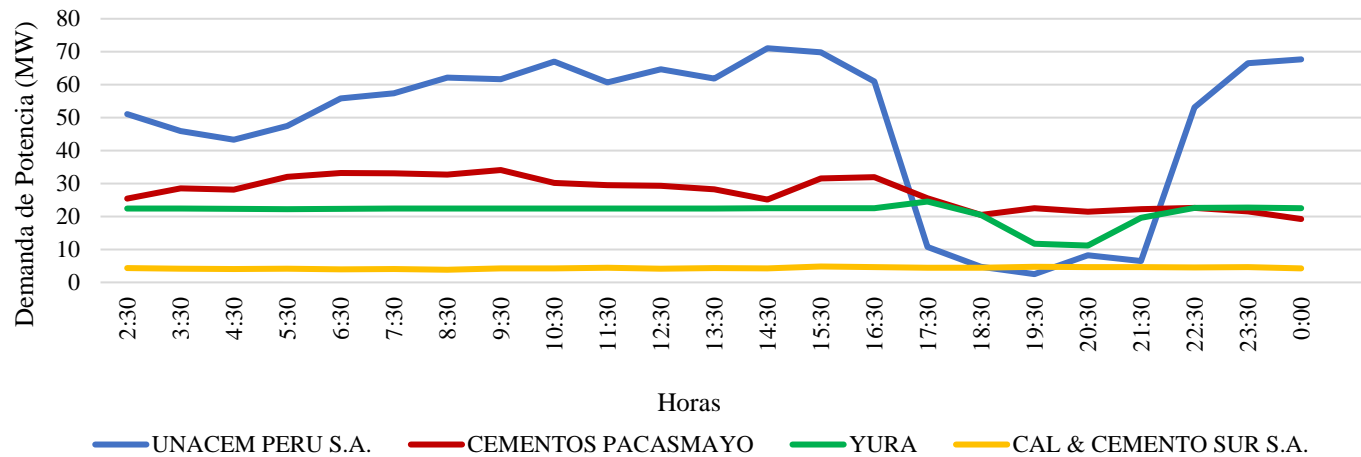
Los resultados indican que la demanda de potencia es más alta durante las HFP que son en el rango de las 24:00 – 16:00 h, esto se debe a los patrones de producción que tiene cada planta y consumo energético.

Tabla 7: Consumo de potencia en el día de Máxima Demanda (HP)

EMPRESA	HORAS																							
	00:15	02:30	03:30	04:30	05:30	06:30	07:30	08:30	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30	17:30	18:30	19:30	20:30	21:30	22:30	23:30	00:00
UNACEM PERU S.A.	43,79	51,11	45,9	43,3	47,46	55,8	57,4	62,13	61,7	66,97	60,64	64,69	61,84	71,05	69,84	61,00	10,73	4,77	2,51	8,26	6,48	53,08	66,5	67,68
CEMENTOS PACASMAYO	22,64	25,41	28,51	28,14	32,06	33,17	33,08	32,71	34,1	30,23	29,55	29,36	28,28	25,13	31,51	31,98	25,56	20,48	22,56	21,43	22,22	22,62	21,53	19,23
YURA	22,23	22,37	22,42	22,36	22,23	22,3	22,37	22,39	22,4	22,46	22,44	22,44	22,46	22,55	22,54	22,54	24,54	20,44	11,7	11,18	19,6	22,58	22,74	22,48
CAL & CEMENTO SUR S.A.	4,29	4,32	4,18	4,09	4,2	4,01	4,1	3,84	4,26	4,27	4,44	4,16	4,36	4,3	4,83	4,63	4,47	4,43	4,76	4,69	4,65	4,58	4,69	4,27

Fuente. COES

Figura 13: Consumo de potencia en el día de Máxima Demanda (HP)



Fuente. Elaboración propia

En la tabla y figura anterior se muestran los datos de consumo de potencia eléctrica en un día de máxima demanda (HP) para las cementeras a nivel nacional. Se observa el consumo en MW para cada empresa cementera en intervalos de media hora, a partir de las 00:15 h hasta las 00:00 del día siguiente. Se tiene que la empresa UNACEM Perú S.A. representa el consumo más alto con un pico máximo cercano a 70 MW alrededor de las 17:30 h. Respecto a Cementos Pacasmayo, se muestra un patrón de consumo más estable respecto a la primera empresa, con un pico más bajo cerca de las 18:30 h. En cuanto a Yura tiene un consumo promedio, alcanzando un pico a las 17:30 h aproximadamente. Por último, Cal & Cemento Sur S.A. presenta un consumo bajo con pico alrededor de las 19:30 h.

Demanda de potencia generada por Centrales de Chimenea Solar según autores

Se realizó una revisión sobre investigaciones previas para poder tener un referente sobre la potencia alcanzada por centrales de chimenea solar.

Tabla 8: Demanda de potencia generada por Centrales de Chimenea Solar según autores

Autor	Radiación Solar Diaría kWh/ m²	Chimenea Altura	Colector Radio	Potencia
1982 - Manzanares	2.01 - 7.20	194.6 m	122 m	50 kW
Xu y Zhou (2018)	2.01 - 7.20	194,6 m	122 m	231,7 kW
A. Tesfaye, T. Solomon, W. Tewodros	3.2 - 6.4	15 m	7.5 m	30 kW
Von Bockstrom, et al. (2008)	4.18 - 7.73	1000 m	-	200 MW
M. Hamdan (2013)	6.312	1000 m	706 m	35 MW
M. Hamdan (2013)	6.312	1000 m	889 m	50 MW
B. Mahmoud (2015)	4.92 - 7.9	445 m	555 m	2,6 - 3,8 MW

Fuente. Elaboración propia

Se analizaron los criterios de diseño y simulaciones, la tabla anterior muestra el impacto que tiene la altura de la chimenea y el radio del colector con la potencia de salida de la central.

Tabla 9: Datos de máxima demanda potencia y energía en el día por empresa cementera

Usuario Libre	Demanda de potencia (MW)	Demanda de energía (MWh)
UNACEM Perú S.A.	69,44	1 666,56
Cementos Pacasmayo Piura	8,07	193,68
Cementos Pacasmayo La Libertad	36,93	886,32
Yura	36,06	865,44
Cal & Cemento Sur S.A.	8,92	214,08

Fuente. Elaboración propia

Respecto a la tabla anterior, se tiene que la empresa cementera con mayor demanda de potencia es UNACEM Perú S.A. con 69,44 MW; mientras que la empresa con menor demanda es Cementos Pacasmayo Piura con 8,07 MW al día. En cuanto a la demanda de energía eléctrica UNACEM Perú S.A. consume 1 666,56 MWh y Cementos Pacasmayo Piura 193,68 MWh. Estos datos fueron la base para plantear que porcentaje de la demanda total potencia y energía se podría cubrir con la central de chimenea solar, pues nos brindó los requerimientos de energía que tienen las diferentes empresas cementeras.

La presente investigación se enfocó en la planta más grandes que se encuentran en el departamento de Piura, la cual registra una demanda máxima de 8,07 MW y una demanda máxima durante las HP de 1,53 MW, por lo que se planteó cubrir el 5% de los 8,07 MW, equivalente a 403,500 kW; en este sentido, la central de chimenea solar se dimensionó para alcanzar esta capacidad de generación. Asegurando, que la central pueda alcanzar su capacidad máxima de generación durante los picos de demanda principales que son alrededor de las 9: 30 h y 16:30 h.

4.3. Diseño de una central de chimenea solar y selección de componentes

4.3.1. Matriz morfológica para diseñar una central de chimenea solar

4.3.1.1. Necesidades y métricas

Se realizó la evaluación de necesidades y métricas pues permitirán observar un marco estructurados para cuantificar y enumerar los requisitos clave para el diseño y operación de la central, de manera que facilitará el proceso de elaboración de diseño.

Necesidades

Tabla 10: Necesidades para el diseño

N°	NECESIDAD	Importancia
1	Central de Chimenea Solar Alta eficiencia de conversión de energía solar a electricidad	5
2	Central de Chimenea Solar Capacidad de almacenamiento de energía térmica	4
3	Central de Chimenea Solar Baja emisión de gases de efecto invernadero	5
4	Central de Chimenea Solar Bajo impacto ambiental durante la construcción	3
5	Central de Chimenea Solar Vida útil prolongada de los componentes	5
6	Central de Chimenea Solar Resistencia a condiciones climáticas adversas	4
7	Central de Chimenea Solar Requerimientos mínimos de mantenimiento	3
8	Central de Chimenea Solar Flexibilidad para adaptarse a diferentes ubicaciones geográficas	3
9	Central de Chimenea Solar Reducción de costos de energía eléctrica	5

Fuente. Elaboración propia

En la tabla anterior se mostraron las necesidades más relevantes que se deben considerar en el diseño y operación de una central de chimenea solar, además como se muestra cada necesidad tuvo asignada una importancia en una escala del 1 al 5, donde el último representa una máxima importancia.

Métricas

Tabla 11: Métricas para el diseño

N°	Necesidad	Valor	Importancia	Unidad
1	1	Eficiencia de conversión de energía	5	%
2	3	Emisiones de CO2 evitadas	5	Ton/año
3	2	Capacidad de almacenamiento de energía térmica	4	MWh
4	4	Área de terreno utilizado	3	ha.
5	5	Vida útil estimada	5	Años
6	7	Horas de mantenimiento anual	3	Horas
7	6,8	Rango operativo de temperaturas	3	°C
8	9	Reducción de costos de electricidad	5	S./año

Fuente. Elaboración propia

En la tabla anterior se muestran las métricas cuantitativas con el fin de evaluar el cumplimiento de cada una de las necesidades mencionadas anteriormente, así mismo, cada uno de los valores tiene asignado una importancia en una escala del 1 al 5.

Matriz general

Tabla 12: Matriz de necesidades - métricas

Necesidades		Métricas							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Alta eficiencia de conversión de energía solar a electricidad	.							
2	Capacidad de almacenamiento de energía térmica			.					
3	Baja emisión de gases de efecto invernadero		.						
4	Bajo impacto ambiental durante la construcción				.				
5	Vida útil prolongada de los componentes					.			
6	Resistencia a condiciones climáticas adversas							.	
7	Requerimientos mínimos de mantenimiento						.		
8	Flexibilidad para adaptarse a diferentes ubicaciones geográficas							.	
9	Reducción de costos de energía eléctrica								.

Fuente. Elaboración propia

4.3.1.2.Criterios de selección

Materiales

Para los materiales seleccionados se priorizará la durabilidad, resistencia a corrosión, conductividad térmica, propiedades ópticas como la reflexión y el costo.

Función

Una central de chimenea solar podrá generar energía eléctrica a partir de la energía solar capturada y convertida.

Diseño

Configuración de la chimenea y colector considerando los aspectos de eficiencia en la captación de energía solar.

Mantenimiento

Se considera la facilidad con la que se realizará el mantenimiento y reparación de los componentes para garantizar un buen funcionamiento a lo largo del tiempo, minimizando los tiempos de inactividad y costos asociados.



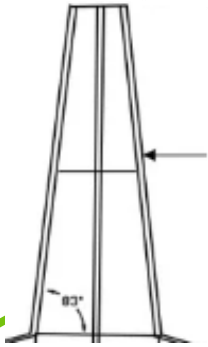

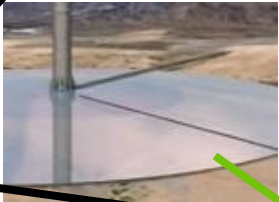
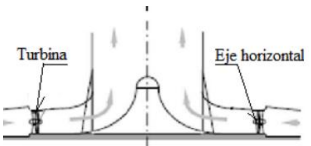
Rendimiento





Capacidad de la chimenea solar para generar electricidad, maximizando la captación de energía solar.

Durabilidad

Capacidad que tendrán los materiales y los componentes para resistir al desgaste, corrosión y deterioro a lo largo del tiempo, mantenimiento su funcionalidad frente a diferentes condiciones ambientales y de operación,

4.3.1.3. Matriz morfológica

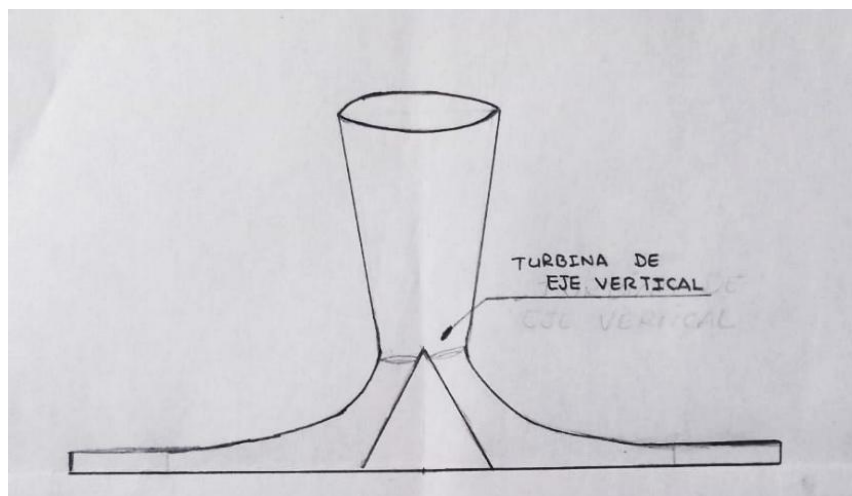
	Opción 1 Lineal	Opción 2 Divergente	Opción 3 Forma cónica
Geometría de la chimenea			
Pendiente del colector	Con pendiente (0.5°) 	Sin pendiente 	
Material de la chimenea	Hormigón y acero	Concreto/hormigón negro	Polycarbonato
Placa absorbente del colector	Metal pintado de negro opaco	Cobre	Placa de aluminio/hierro
Placa transparente del colector	PVF/PVC	Vidrio transparente	Polietileno transparente
Turbogenerador	Una sola turbina de eje vertical	Varias turbinas de eje horizontal 	

Alternativa 1	
Alternativa 2	
Alternativa 3	
Alternativa 4	

A) Diseño conceptual 1

La forma divergente de la chimenea es beneficio para la potencia generada, el colector con pendiente ayuda a canalizar el flujo de aire caliente hacia la chimenea de modo más eficiente, el concreto y hormigón negro son materiales resistentes y duraderos, y el color favorece a la absorción y preservación de calor, respecto a las placas el cobre es un buen conductor térmico y el vidrio minimiza las pérdidas por reflexión, el turbogenerador de eje vertical es perfecto para aprovechar el flujo de aire ascendente en la chimenea. Esta alternativa combina buenas características, por lo que es una opción muy viable.

Figura 14: Diseño conceptual de alternativa 1

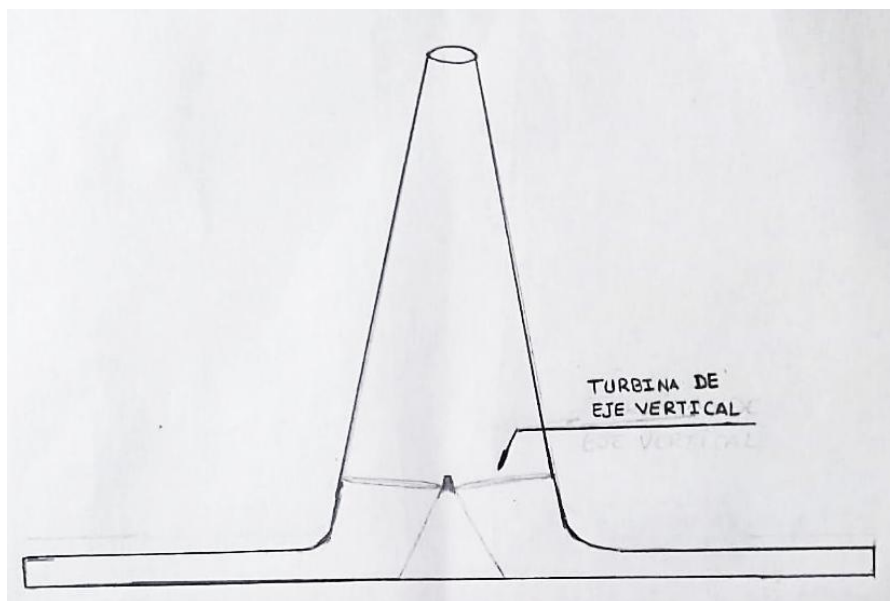


Fuente. Elaboración propia

B) Diseño conceptual 2

La forma cónica de la chimenea es menos eficiente que la divergente para generar energía, un colector sin pendiente no canaliza bien el flujo de aire hacia la chimenea, el policarbonato es menos resistente y duradero respecto al concreto y acero pero es un material más liviano y económico. La placa de metal presenta una conductividad térmica menor que el cobre, la placa transparente de polietileno podría ocasionar mayores pérdidas por reflexión que el vidrio debido a que tienen una estructura molecular desordenada lo que resulta en dispersión y reflexión de luz, respecto al turbogenerador de eje vertical, es adecuado para aprovechar el flujo ascendente de aire en la chimenea. Esta opción presenta varias desventajas en cuanto a materiales y diseño de la chimenea-colector.

Figura 15: Diseño conceptual de alternativa 2

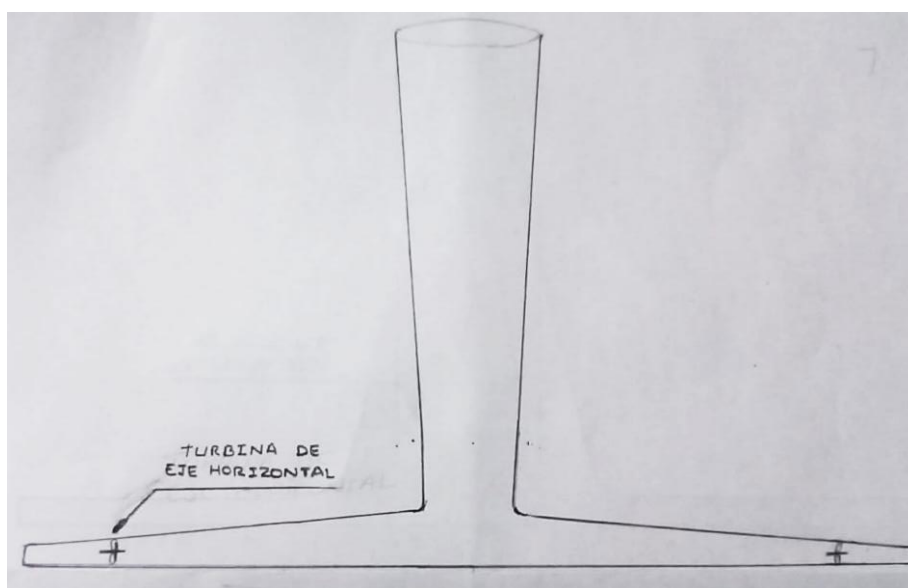


Fuente. Elaboración propia

C) Diseño conceptual 3

Tiene una forma divergente lo que es bueno para la velocidad del flujo y la potencia, el colector presenta una buena pendiente según investigaciones previas, utiliza cobre como placa absorbente. Sin embargo, el policarbonato es menos resistente y duradero que los otros materiales, el uso de PVF/PVC conlleva mayores pérdidas por reflexión. Las múltiples turbinas hacen que el sistema sea más complejo y costosa para alinearlas con el flujo de aire.

Figura 16: Diseño conceptual de alternativa 3

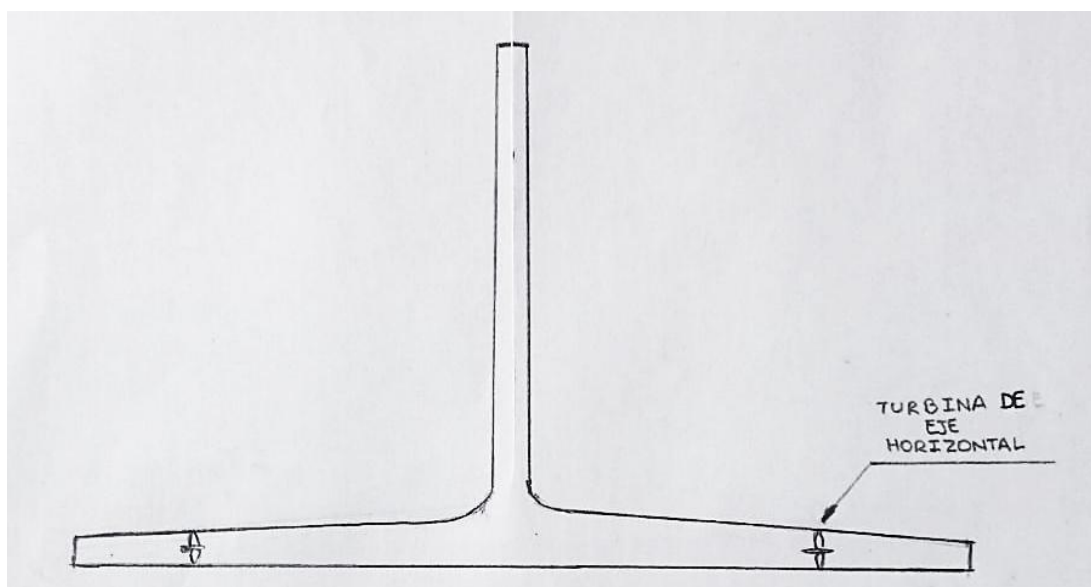


Fuente. Elaboración propia

D) Diseño conceptual 4

La forma lineal de la chimenea es menos eficiente que la divergente, se utiliza hormigón y acero para la chimenea los cuales son resistentes y duraderos y el colector presenta pendiente. Sin embargo, las placas el uso de aluminio/hierro al tener menor conductividad térmica reduce el rendimiento del sistema y uso el PVF/PVC llevaría a una reflexión de luz y ocasionaría mayores pérdidas, además el uso de múltiples turbinas sería menos eficiente que el de una sola turbina de eje vertical.

Figura 17: Diseño conceptual de alternativa 4



Fuente. Elaboración propia

4.3.1.4. Evaluación de los diseños conceptuales

P = Puntaje Pc = Ponderación de criterio

1 = Muy malo

2 = Malo

3 = Regular

4 = Bueno

5 = Muy bueno

Tabla 13: Evaluación de alternativas

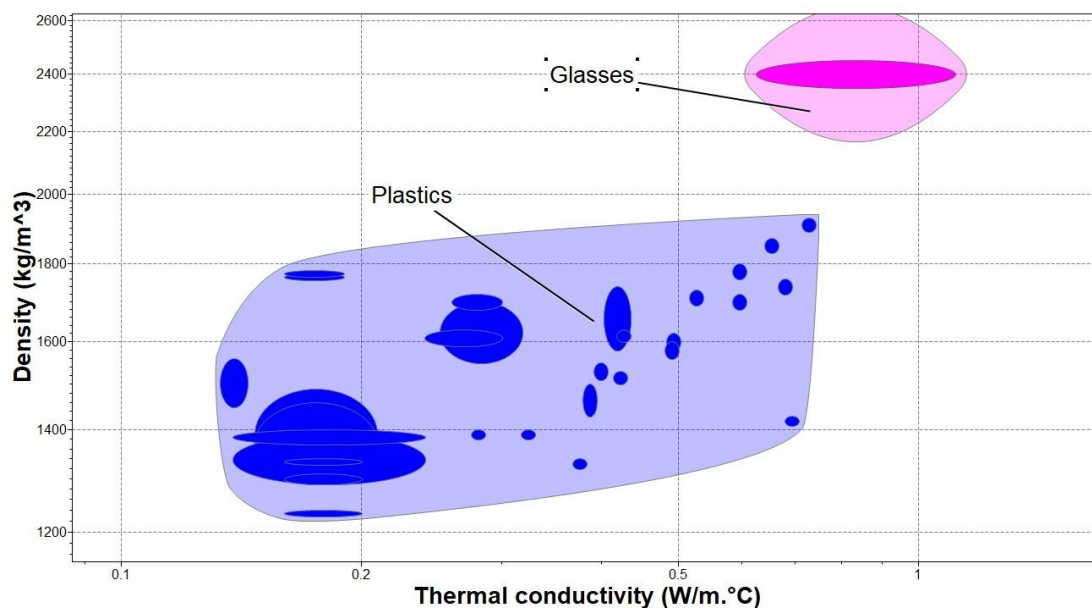
N°	Criterios de evaluación	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3		Alternativa 4		Alternativa Idealizada		
		Pc	P	Pc	P	Pc	P	Pc	P	Pc	P	Pc
1	Materiales	5	5	25	2	10	3	15	4	20	5	25
2	Función	4	5	20	2	8	4	16	4	16	5	20
3	Diseño	5	5	25	2	10	4	20	4	20	5	25
4	Mantenimiento	5	4	20	4	20	2	10	2	10	5	25
5	Rendimiento	5	3	15	2	10	3	15	3	15	5	25
6	Durabilidad	5	4	20	3	15	2	10	2	10	5	25
Puntaje máximo o Pc		29	26	125	15	73	18	86	19	91	30	145
Valor técnico Xi		-	0.86		0.50		0.59		0.63		1.00	
Posición de selección		-	1		2		3		4		-	

Fuente. Elaboración propia

En la tabla anterior se observa la evaluación de cada alternativa respecto a los criterios de evaluación propuestos, en donde después de obtener el puntaje máximo se calcula el valor técnico, en donde podemos observar que el mayor valor lo tiene la alternativa 1, seguido la alternativa 2,3 y 4. Por lo que, estas últimas tres se descartan y se eligió la alternativa 1 para el diseño final de la central de chimenea solar.

4.3.1.5. Propiedades de materiales en Granta EduPack

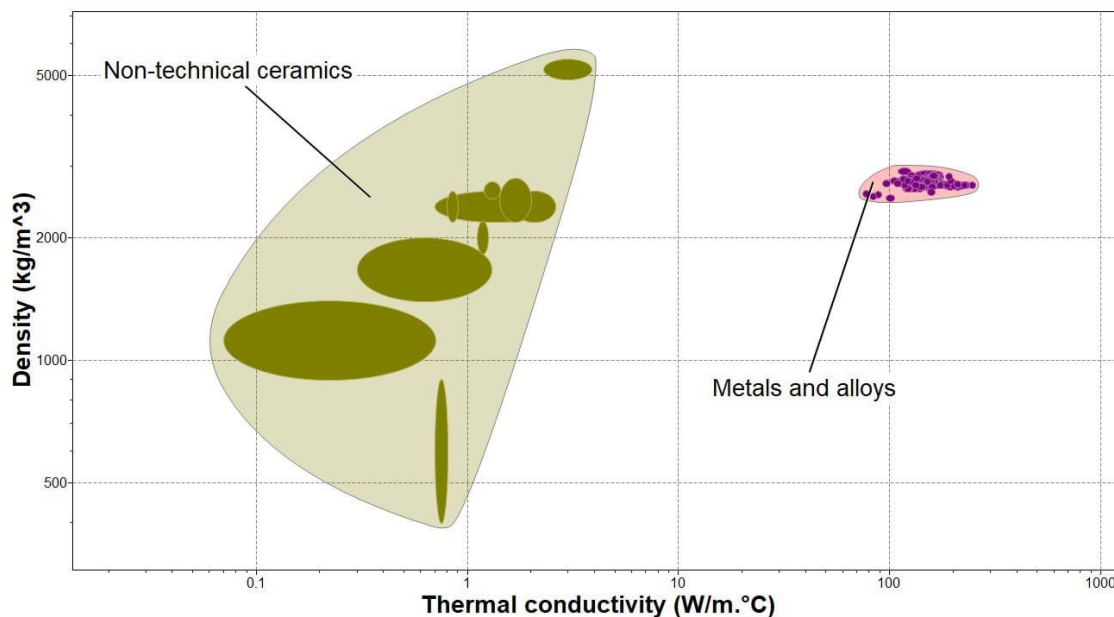
Figura 18: Densidad vs conductividad térmica de materiales plásticos y vidrios



Fuente. Elaboración propia

En esta figura anterior se puede observar la baja conductividad térmica de los plásticos y la de los vidrios en comparación. Los plásticos se presentan con una conductividad térmica menor a $1 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ y densidades entre 1000 y 1600 kg/m^3 . Esto los consolida como buenos aislantes térmicos. El vidrio, ubicado en una zona con densidades de alrededor de 2400 kg/m^3 y conductividad térmica entre $0,8$ y $1 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$, presenta propiedades térmicas intermedias. Aunque su capacidad para conducir calor es baja, se considera un material adecuado para aplicaciones en las que se requiere una transparencia óptica con moderadas propiedades aislantes, como sucede en el caso de los colectores solares de sistemas donde es necesario aprovechar la radiación solar mientras se minimizan las pérdidas por reflexión.

Figura 19: Densidad vs conductividad térmica de cerámicas no técnicas y metales/aleaciones

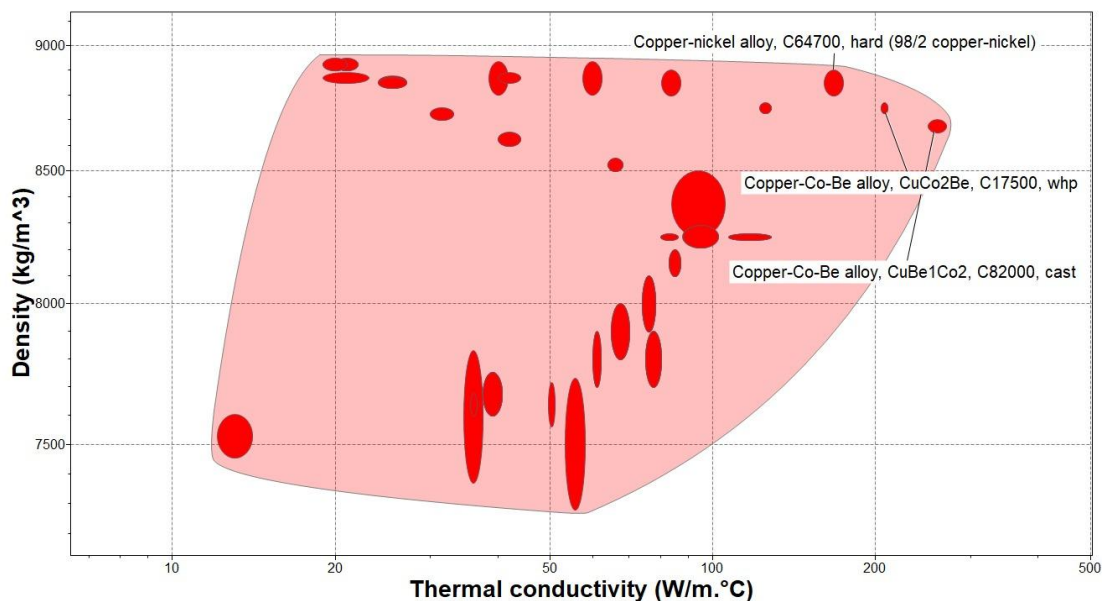


Fuente. Elaboración propia

En la figura anterior se tiene la densidad vs la conductividad térmica, donde se muestra una diferenciación entre dos grupos principales de materiales: las cerámicas no técnicas y los metales/aleaciones. Dentro del grupo de cerámicas no técnicas, que abarca una región de conductividades térmicas entre 0,1 y 1 W/m.°C y densidades entre 500 y 3 000 kg/m³, se encontraron materiales de construcción, incluyendo diversos tipos de concreto. Después, de analizar el grupo de cerámicas no técnicas, el concreto/hormigón negro con una densidad aproximada de 2 400 kg/m³ y una conductividad térmica de 0,8 W/m.°C, fueron propiedades que permitirían un equilibrio óptimo entre almacenamiento térmico y transferencia de calor controlada.

En comparación, en el otro grupo que se observa, los metales y aleaciones, donde se muestra conductividades térmicas significativamente más altas, entre 100 y 1 000 W/m.°C, con densidades similares entre 2 500 y 3 000 kg/m³. Aunque estos materiales se mostraron atractivos por su alta conductividad térmica, su implementación en la chimenea o colector solar de gran escala resultaría desfavorable, esto por sus costos elevados y por su excesiva conductividad térmica, la cual generaría pérdidas significativas de calor durante períodos sin radiación solar. Se seleccionó el concreto dentro del grupo de cerámicas no técnicas por sus propiedades térmicas adecuadas, su capacidad de absorción solar mejorada por su coloración, su durabilidad y costo, estas características son apropiadas para la construcción de la central de chimenea solar.

Figura 20: Densidad vs conductividad térmica del cobre y aleaciones



Fuente. Elaboración propia

Esta figura anterior se observó un rango de aleaciones de cobre y cobre-níquel, materiales con excelente conductividad térmica. El cobre se caracteriza por su alta densidad (entre 7 500 y 9 000 kg/m³) y conductividad térmica que puede variar desde 50 hasta más de 200 W/m·°C. Estas propiedades convierten al cobre y sus aleaciones en materiales ideales para aplicaciones que requieren una transferencia de calor eficiente, como las que ocurren en los colectores solares. Cabe mencionar que las aleaciones de cobre no solo proporcionan una excelente conductividad térmica, sino que también son altamente resistentes a la corrosión, lo que las hace ideales para entornos expuestos a condiciones ambientales adversas, como los que puede enfrentar una central de chimenea solar.

4.3.2. Dimensionamiento de los componentes de una Central de chimenea solar

Para el dimensionamiento de la central se realizó una revisión de diversas investigaciones previas, donde se analizaron los criterios de diseño y simulaciones. Estos estudios mostraron el impacto que tiene la altura y diámetro de la chimenea y el área del colector con la potencia de salida de la central. En la siguiente tabla se muestra los datos recopilados.

Tabla 14: Dimensionamiento de componentes según autores

AUTOR	RADIACIÓN SOLAR DIARIA	CHIMENEA					COLECTOR		POTENCIA
		Altura	Diámetro base	Diámetro medio	Diámetro de salida	Espesor	Radio	Altura	
1982 - Manzanares	2.01 - 7.20 kWh/ m ²	194.6 m	10.16 m	10.16 m	10.16 m	1.6 m	122 m	10	50 kW
Xu y Zhou (2018)	2.01 - 7.20 kWh/ m ²	194,6 m	5.08 m	-	15	-	122 m	1.85	231,7 kW
A. Tesfaye, T. Solomon, W. Tewodros	3.2 - 6.4 kWh/m ²	15 m	0.2 m	0.2 m	0.2 m	-	7.5 m	0.2 m	30 kW
Von Bockstrom, et al. (2008)	4.18 - 7.73 kWh/m ²	1000 m	260 m	133.4 m	145 m	0.25 m	-	-	200 MW
M. Hamdan (2013)	6.312 kWh/m ²	1000 m	100 m	100 m	100 m	-	706 m	-	35 MW
M. Hamdan (2013)	6.312 kWh/m ²	1000 m	100 m	100 m	100 m	-	889 m	-	50 MW
B. Mahmoud (2015)	4.92 - 7.9 kWh/m ²	445 m	54 m	54 m	54 m	-	555 m	-	2,6 - 3,8 MW

Fuente. Elaboración propia

La tabla anterior se muestra diferentes dimensiones propuestas por varios autores, se puede observar que respecto a la chimenea, cuando el diámetro de salida de la chimenea es mayor que el diámetro de entrada (base), se obtiene una mayor potencia. Esto se debe a que un diámetro de salida más grande permite una mayor velocidad del flujo ascendente, lo que aumenta la extracción de energía y por tanto de potencia generada.

Respecto al colector se tiene que el radio mínimo observado es de 122 m y como máximo de 889 m, esta dimensión es importante pues determina el área de captación de radiación solar y por tanto la cantidad de energía térmica que se recolectará. En cuanto a la potencia generada, como mínimo con las dimensiones señaladas se puede obtener 50 kW y como máximo 200 MW.

De este modo, se propusieron las siguientes dimensiones

Tabla 15: Datos técnicos y geométricos para el diseño de la Central de Chimenea Solar

Parámetros	Valor	Unidad
Altura de la chimenea	200	m
Diámetro de entrada de la chimenea	45	m
Diámetro de salida de la chimenea	55	m
Radio del colector	200	m
Altura del colector	2	m
Temperatura promedio	300	K

Fuente. Elaboración propia

En la tabla anterior, se la temperatura promedio de la zona de Piura propuesta para la investigación, así como las dimensiones para el diseño del sistema. Además se consideró la capacidad de generación propuesta, y se espera que los datos geométricos propuestos permitan que la central de chimenea solar pueda abastecer el 5% de la potencia demandada en una empresa cementera.

4.3.3. Materiales seleccionados

Los materiales y sus propiedades para cada uno de los componentes de la central son:

Chimenea

Siendo el componente estructural que canaliza el flujo de aire ascendente, requiere de materiales resistentes y duraderos capaz de soportar las diferentes condiciones ambientales a largo del tiempo, además se consideró que los materiales contribuyan a la absorción de calor solar para incrementar la eficiencia térmica del sistema.

Tabla 16: Propiedades del concreto negro

Propiedad	Valor
Densidad (ton/m ³)	3,02
Calor específico [J/(kg.K)]	1 109 – 1 590
Conductividad térmica (volumétrica) [W/mK]	1,60 – 4,18
Resistencia a la compresión (MPa)	73,5
Resistencia a la tracción (MPa)	6,01
Módulo de elasticidad (GPa)	47,88

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior el concreto presenta alta resistencia a la compresión, resistencia al desgaste, baja conductividad térmica (aislante) y su color oscuro es favorecedor para la absorción de calor solar en la chimenea.

Colector

Es el componente encargado de captar la radiación solar, para luego transferir ese calor al flujo de aire y convertirlo en un flujo ascendente. Por lo tanto, los materiales seleccionados se analizaron principalmente en función de sus propiedades óptimas y térmicas, como la alta absorptividad a la radiación solar, buena conductividad térmica y baja reflectancia.

Tabla 17: Propiedades del cobre

Propiedad	Valor
Densidad (g/cm ³)	8,96
Calor específico [J/ (g.K)]	0,385
Conductividad térmica [W/mK]	400
Resistencia a la tracción (kg/mm ²)	37 - 41
Límite elástico (kg/mm ²)	36
Coefficiente de Poisson	0,34

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla anterior el cobre presenta una alta conductividad térmica, lo cual es importante para una buena transferencia de calor al flujo de aire ascendente, así como su resistencia a la corrosión.

Tabla 18: Propiedades del vidrio templado transparente

Propiedad	Valor
Densidad (kg/m ³)	2500
Calor específico [J/ (g.K)]	0,8
Conductividad térmica [W/mK]	0,8
Módulo de Young	6,6 x 10 ¹³
Índice de Poisson	0,2
Resistencia a la compresión (MPa)	800 - 1000
Resistencia a la tracción (MPa)	100
Resistencia a la flexión (MPa)	45
Transmitancia (%)	80

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al vidrio transparente, se enfatiza su capacidad para transmitir de manera óptima la radiación solar hacia el colector, minimizando las pérdidas por reflexión, es decir tiene muy baja reflectancia y alta transmitancia de la radiación solar, además, se considera un material fácil de limpiar y mantener, así como resistente frente a los rayos UV y condiciones climáticas.

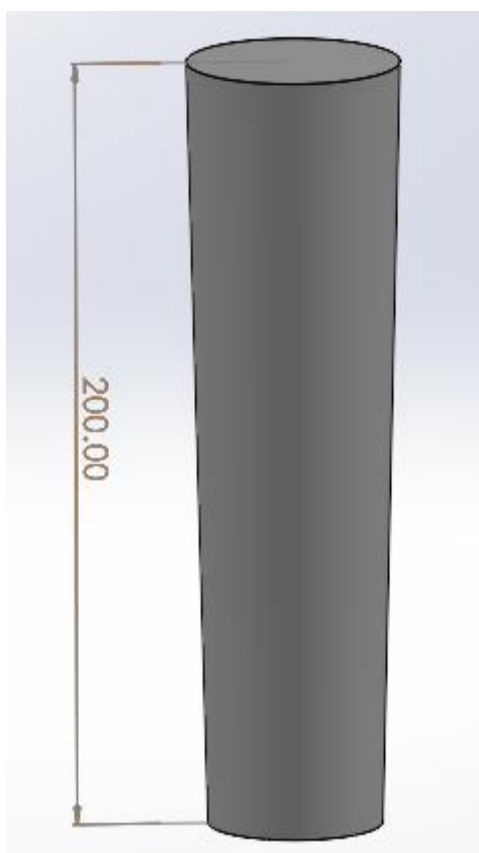
4.3.4. Diseño de los componentes de la central de chimenea solar

Considerando las dimensiones mencionadas anteriormente, se realizó el dimensionamiento de la central en el software SolidWorks. Después, de realizar el diseño CAD en SolidWorks se realizó una simulación computacional de dinámica de fluidos, por lo que solo es necesario representar la geometría interna del diseño.

Chimenea

Se diseñó el CAD considerando como diámetro inferior de la chimenea 45 m y como diámetro de salida 55 m, empleando concreto negro.

Figura 21: Croquis de chimenea

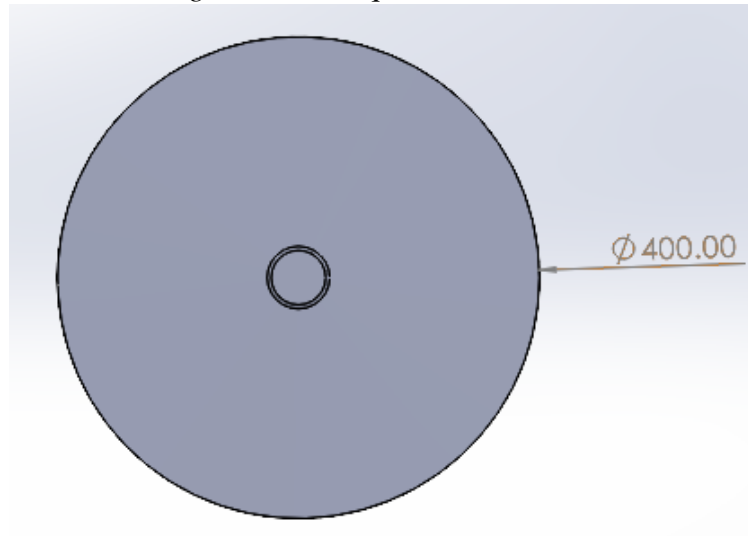


Fuente: Elaboración propia

Colector

En la siguiente figura se muestra el colector, para el que se consideró un radio de 200 m, una altura de la cubierta de 2 m, un ángulo de inclinación de $0,5^\circ$ y una altura de instalación de la turbina/generador de 10 m.

Figura 22: Croquis del colector

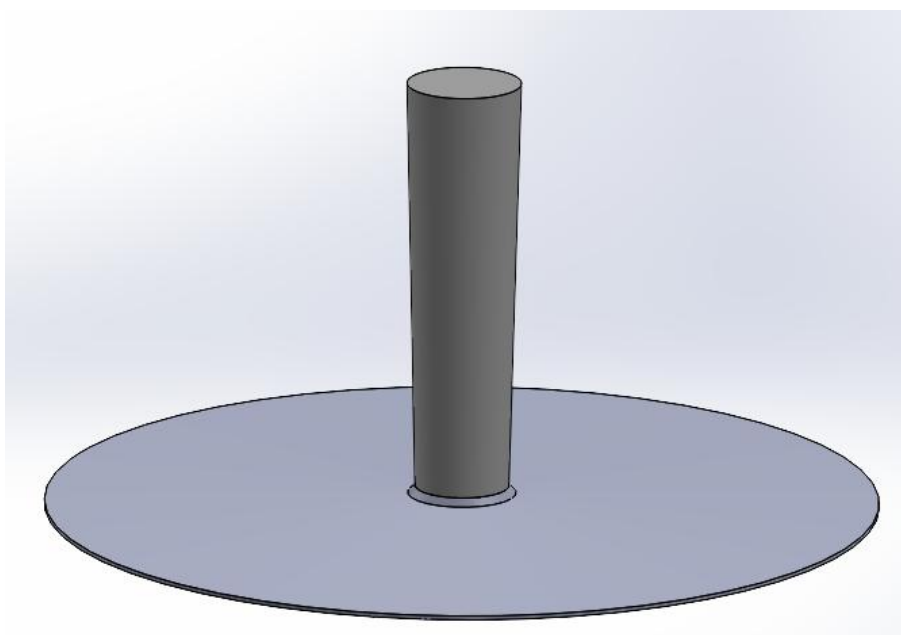


Fuente: Elaboración propia

4.3.5. Diseño conceptual CAD

La siguiente figura muestra el croquis que combina los componentes principales: la chimenea y el colector con forma de disco.

Figura 23: Croquis del diseño conceptual de la central



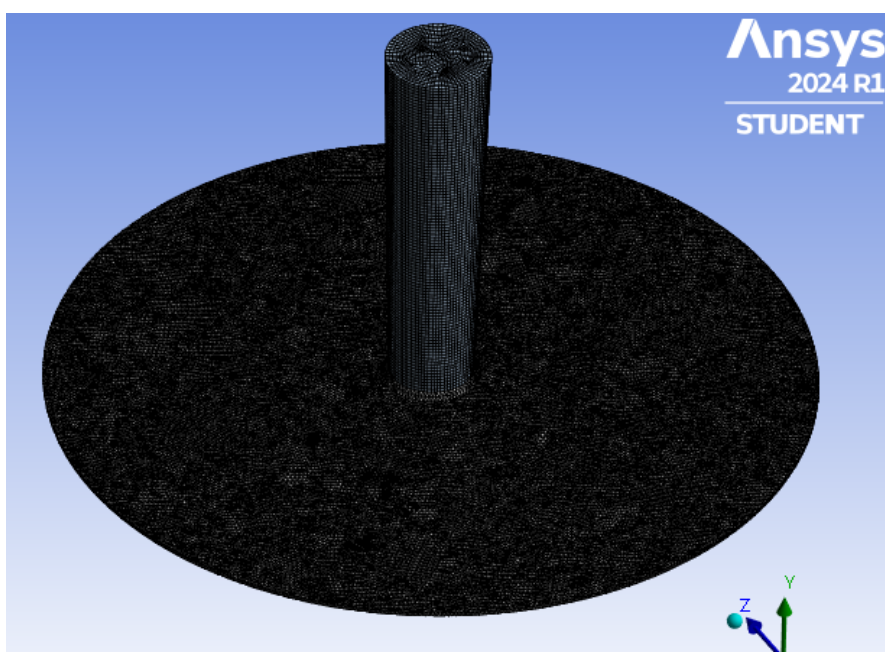
Fuente: Elaboración propia

Las figuras muestran los componentes clave con sus respectivas dimensiones para el diseño conceptual CAD de una central de chimenea solar, en base a esto, el siguiente paso es la simulación CFD, el cual se enfoca únicamente en la geometría interna en donde fluye el aire.

4.4. Evaluación del comportamiento del flujo de aire dentro de la central de chimenea solar para predecir su capacidad de generación de energía eléctrica.

La central de chimenea solar aprovechará de manera eficiente la radiación solar para generar electricidad, este sistema basado en el principio de convección natural utiliza una chimenea de gran altura y un colector solar para crear flujo ascendente de aire caliente que acciona una turbina generadora. Por lo que, se realizó un análisis del comportamiento de flujo de aire dentro del sistema, utilizando el software Ansys Fluent para evaluar el comportamiento del flujo de aire en una central diseñada para abastecer parcialmente la demanda energética de una planta cementera.

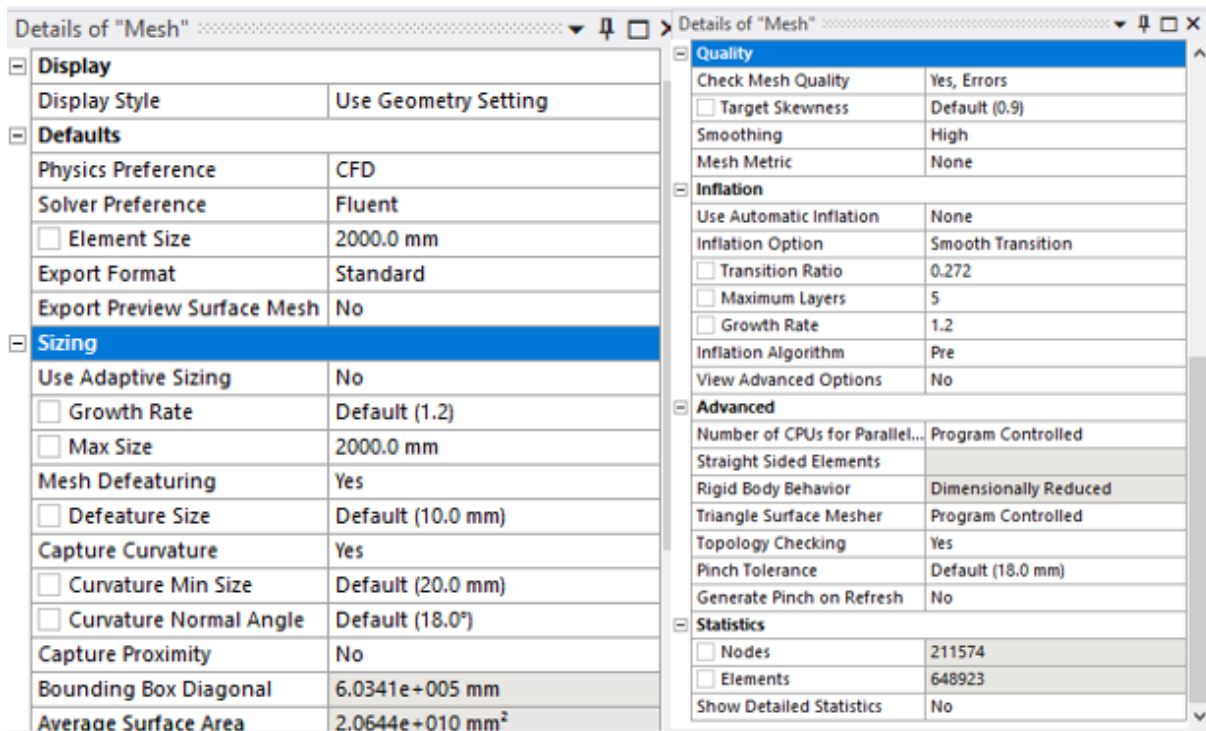
Figura 24: Vista general del mallado



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se presenta la geometría y el mallado de una central de chimenea solar. La estructura principal es la chimenea, ubicada en el centro de un dominio circular. Este amplio dominio del colector es esencial para capturar correctamente el comportamiento del flujo de aire que rodea la chimenea. El mallado mostrado en la imagen es caracterizado por celdas triangulares que se distribuyen alrededor de la chimenea. Se observa que la densidad del mallado es mayor en las cercanías de la base de la chimenea, lo cual es bueno, pues en esa zona se espera una mayor gradiente de velocidad y temperatura del flujo de aire. Este tipo de refinamiento en el mallado permite que la simulación capture con mayor precisión los fenómenos relevantes en las zonas más críticas, donde ocurren los cambios más significativos en el flujo.

Figura 25: Detalles del mallado

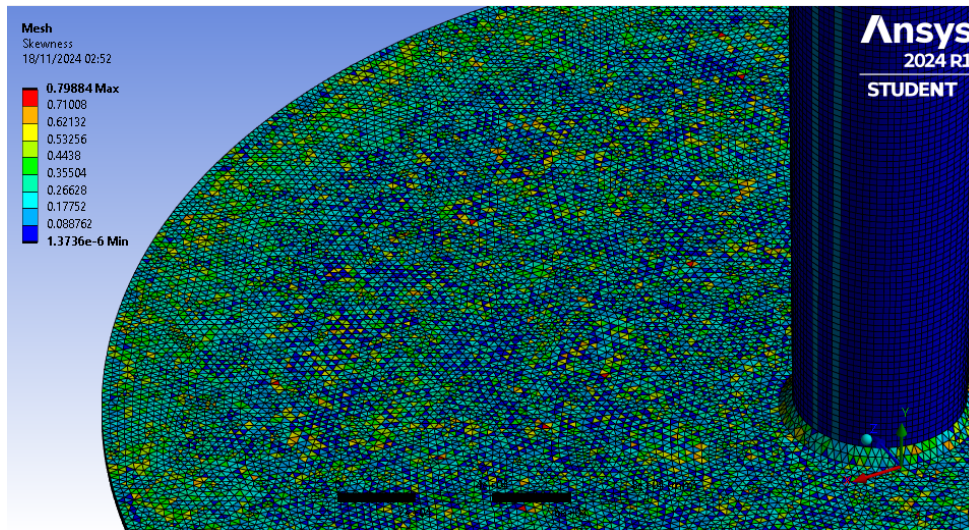


Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se muestran los detalles técnicos del mallado. Respecto al tamaño de las celdas se estableció en 2,0 metros, lo que es adecuado para una simulación de gran escala. Además, el dominio tiene una diagonal máxima de 603,410 metros, lo que refleja las dimensiones amplias del área simulada. En términos de área superficial, el mallado cubre aproximadamente 20 644 m², lo que resalta la extensión de la superficie que está siendo evaluada en la simulación.

En cuanto a la calidad del mallado, se habilitó una verificación para detectar posibles errores, con Skewness objetivo de 0,9, lo que permitía una ligera deformación de las celdas sin comprometer la precisión de la simulación. Asimismo, se configuró hasta 5 capas de inflado para capturar adecuadamente la capa límite cerca de la superficie de la chimenea. Este enfoque fue útil para modelar el comportamiento del flujo en las zonas aledañas a la chimenea, donde los gradientes de velocidad y temperatura son más pronunciados. Por último, en términos de estadística, el mallado contiene 211 574 nodos y 648 923 elementos, lo que significa que se realizó una simulación detallada, este equilibrio entre el número de nodos y elementos permitió mantener la precisión del mallado sin sobrecargar innecesariamente los recursos computacionales.

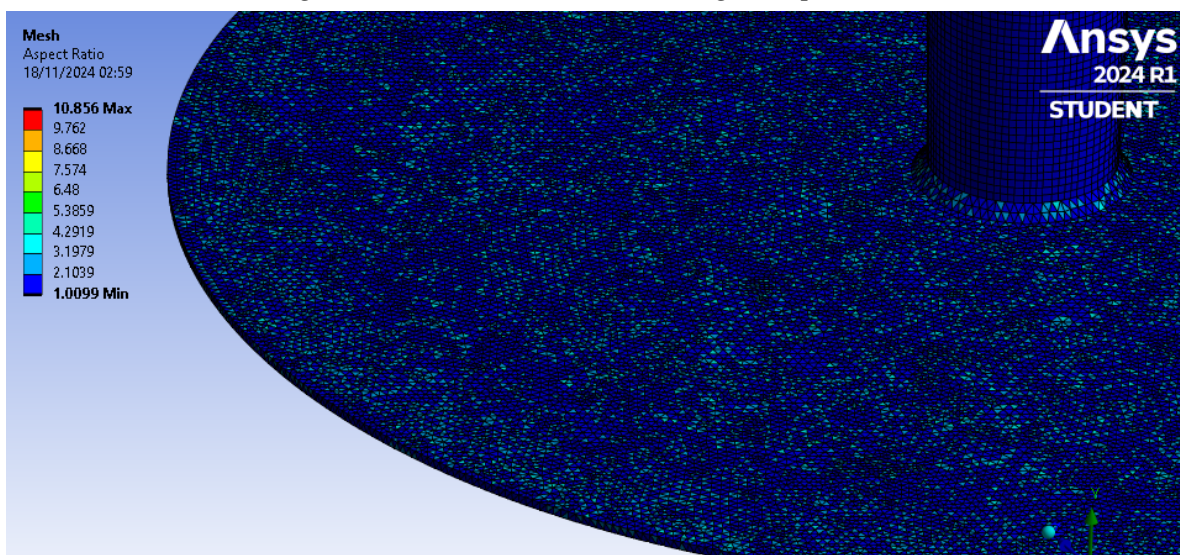
Figura 26: Calidad de Mallado según Skewness



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa la calidad de mallado según Skewness, se tiene un rango de medidas que varía entre $1,37736 \times 10^{-6}$ a 0.79884, este tipo de mallado evalúa la distorsión de los elementos de la malla comparados con su forma ideal. La predominancia de colores azules y verdes es un factor positivo, sugiriere que la mayoría de los elementos tienen una baja distorsión. Esto es favorable para la precisión de la simulación, pues los elementos menos distorsionados tienden a producir resultados más fiables. Aunque hay algunas áreas en amarillo y naranja, especialmente cerca de la chimenea y en los bordes del colector, el hecho de que no lleguen a 1 indica que incluso estas zonas no presentan una asimetría crítica.

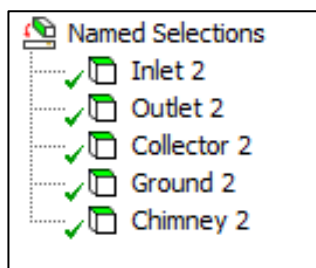
Figura 27: Calidad de mallado según Aspect Ratio



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa la calidad de malla según el Aspect Ratio, con un rango de valores que oscilan entre 1,0099 y 10,856. Esta métrica mide la relación entre la dimensión más larga y la más corta de cada elemento de la malla, donde valores cercanos a 1 indican elementos casi equiláteros, lo cual es ideal. En el diseño predomina el color azul oscuro, lo cual es un buen indicador de calidad, sugiriendo que la gran mayoría de los elementos tienen proporciones muy cercanas a lo equilátero, lo que generalmente significa una mejor precisión numérica y estabilidad en los cálculos. Aunque el valor máximo es 10.856, la predominancia de elementos azules indica que no hay un alto porcentaje de elementos con Aspect Ratios elevados, lo cual es muy favorable para la calidad total de la malla y para obtener resultados confiables en la simulación CFD. En este sentido, la falta de un alto porcentaje de elementos problemáticos en ambos modelos es un indicador clave de que el diseño es confiable.

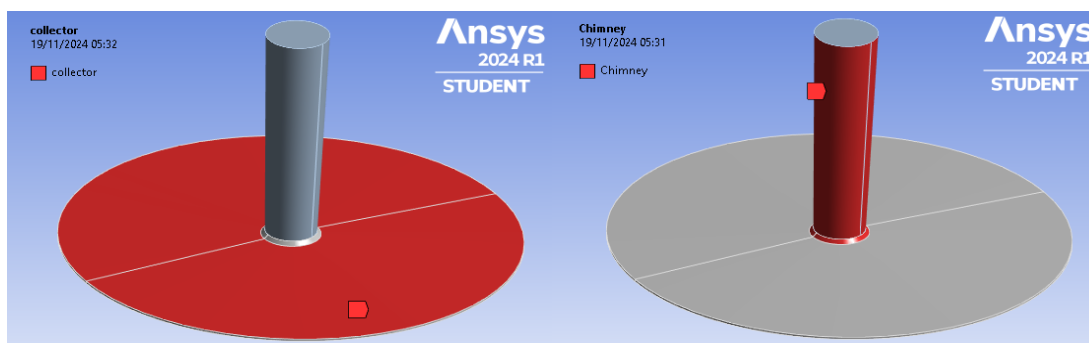
Figura 28: Selección de zonas para estudio



Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la figura anterior se realiza la asignación de nombres a diferentes regiones del dominio para facilitar la aplicación de condiciones de frontera, considerando la entrada y salida del fluido, la pared del colector, la pared del colector y la región que está sobre la tierra.

Figura 29: Región determinada como colector y chimenea

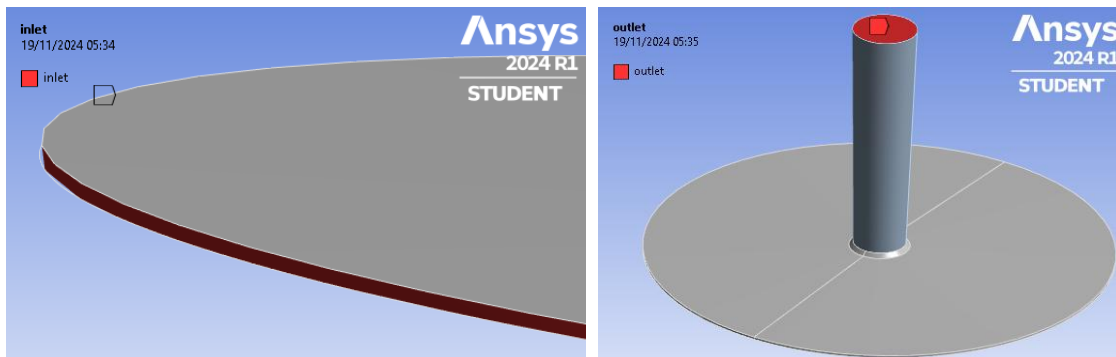


Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior, se destaca la región denominada "Collector 2" correspondiente al colector de aire caliente ubicado en la base de la central, y seguido se tiene la región denominada "Chimney 2" componente donde se produce el efecto de corriente ascendente debido a la

diferencia de densidades entre el aire caliente y el frío, ambas regiones actúan como superficies límite o paredes en el recorrido del fluido.

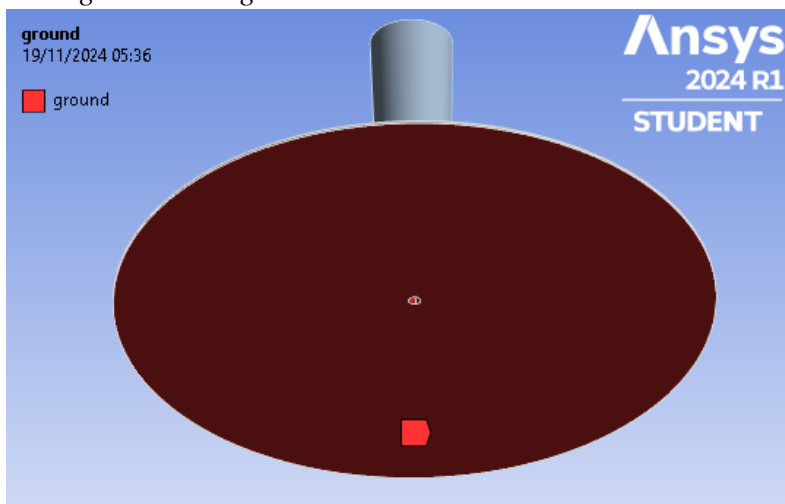
Figura 30: Región de entrada y salida de aire



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se muestra, en primer lugar, la región de entrada denominada "Inlet 2", que corresponde a la zona por donde ingresa el fluido al colector de la chimenea solar. En segundo lugar, se muestra la región de salida "Outlet 2", que corresponde a la parte superior de la chimenea, la cual se establece como condición de frontera para el flujo de aire ascendente generado por la diferencia de temperaturas dentro del sistema.

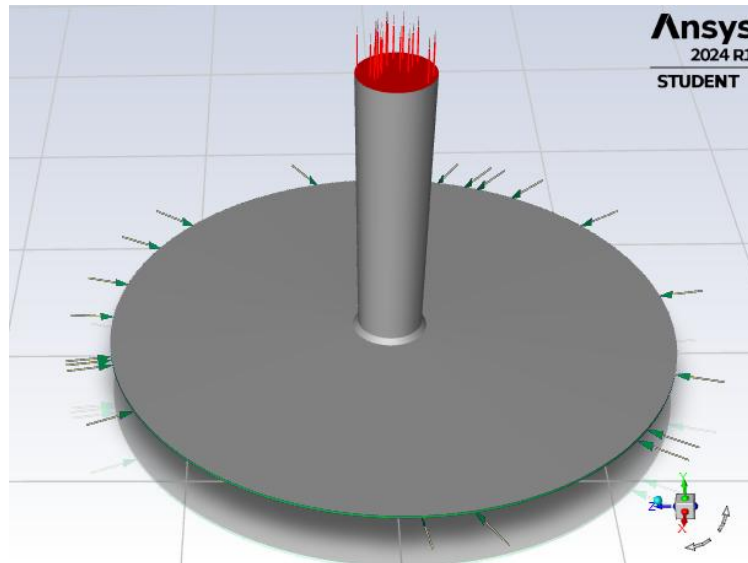
Figura 31: Región tierra de la central de chimenea solar



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se muestra la región paralela a la tierra denominada "Ground 2", la cual será definida como una pared dentro de las condiciones de frontera para simulación de la central de chimenea solar.

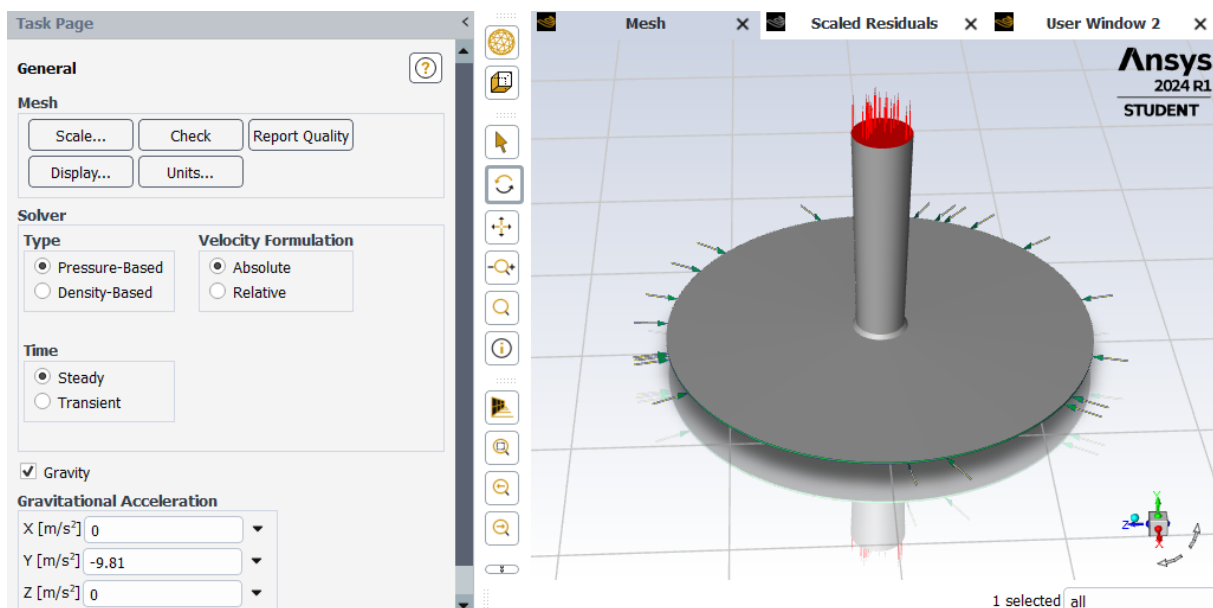
Figura 32: Flujo de aire en la central de chimenea solar



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se muestra un diagrama que permite observar la dirección general del flujo en el diseño propuesto de la central de chimenea solar, las flechas de color azul indican la entrada del flujo de aire frío y las flechas de color rojo representan la salida del flujo de aire caliente que sale por la parte superior de la chimenea, impulsado por la diferencia de densidades generadas por la diferencia de temperatura entre el aire caliente dentro del sistema y el aire más frío del exterior.

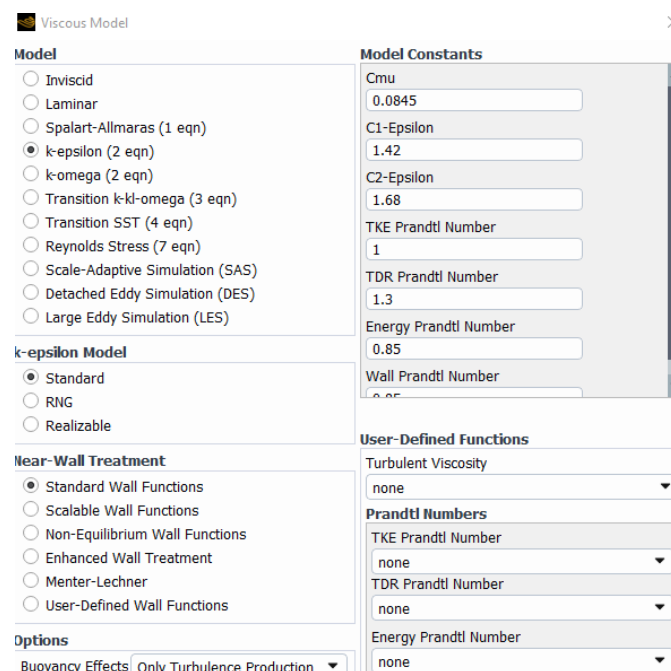
Figura 33: Configuración de parámetros generales



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa la configuración de las condiciones físicas del modelo CFD para la chimenea solar. La solución fue basada en Presión, lo cual es adecuado para resolver simulaciones donde la variación de presión es un indicador clave en el comportamiento del flujo. Además, se seleccionó el estado estacionario, buscando una solución estable que no varíe con el tiempo, ideal para estudiar el comportamiento continuo del sistema de chimenea solar bajo condiciones constantes. Respecto a la velocidad del flujo se evaluó de manera absoluta, lo que significa que las velocidades del flujo se estudiaron en relación con un marco de referencia fijo, es decir, respecto a un sistema de coordenadas global, garantizándose que el movimiento del aire, desde su ingreso en el colector hasta su salida esté basado en las velocidades reales del entorno lo que es importante para evaluar el rendimiento del sistema. Respecto a la gravedad fue de $-9,81 \text{ m/s}^2$ en la dirección del eje Y, con el fin de capturar el efecto de la diferencia de densidades entre el aire frío que entra al sistema y el aire caliente que asciende a través de la chimenea. Esta configuración asegura que el flujo ascendente sea impulsado correctamente por el calentamiento del aire en el colector.

Figura 34: Selección del modelo de turbulencia



Fuente: Elaboración propia

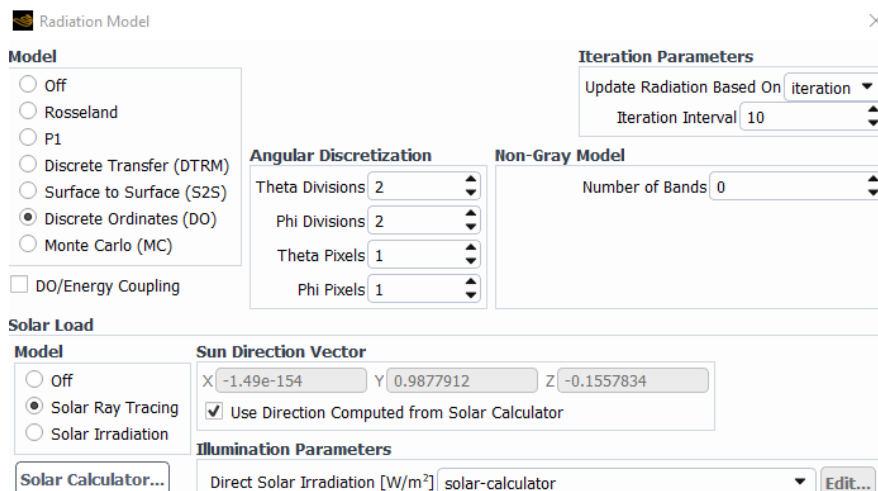
En la figura anterior se muestra el modelado de la viscosidad, donde se seleccionó el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ (k-epsilon) estándar. Este modelo es generalmente utilizado para simular flujos turbulentos en sistemas como el de la central de chimenea solar, donde se presentan gradientes significativas de velocidad y temperatura cerca de las superficies sólidas, como las del colector y la chimenea. Como la central de chimenea solar es un sistema que se basa en la

convección natural, el modelo proporciona una buena aproximación para simular la transferencia de calor y el comportamiento del aire en interacción con las paredes.

Respecto a las constantes del modelo, como C_{mu} (0,0845) y las constantes de disipación $C1$ -Epsilon y $C2$ -Epsilon, fueron predefinidas para garantizar que las ecuaciones de turbulencia se resuelvan de manera precisa. Además, fueron activados los efectos de flotabilidad con el fin de que la producción de turbulencia se genere a partir de las diferencias de densidad provocadas por las variaciones de temperatura. Esto es crucial en la simulación de una chimenea solar, donde el aire caliente sube por la chimenea debido a la diferencia de densidad con el aire más frío en la parte inferior.

La configuración mencionada se corrobora con la investigación de Cuce et al., donde se emplearon el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ para resolver las ecuaciones de momento de un sistema similar, validando que este enfoque es efectivo para sistemas con flujos complejos y variaciones térmicas como el de las centrales de chimenea solar [62].

Figura 35: Modelo de radiación solar



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura anterior, se utilizó el modelo de radiación de Discretas Ordenadas (DO), una técnica utilizada en simulaciones donde la radiación solar es elemental. Este modelo es capaz de manejar flujos de radiación complejos con interacciones entre superficies y medios, permitiendo que la energía térmica del sol sea modelada con precisión mientras atraviesa el aire y golpea las superficies del colector. Además, la utilización del modelo de trazado de rayos solares reforzó la precisión, pues con ello la simulación pudo calcular la trayectoria directa de los rayos solares a través del sistema.

Este enfoque de radiación DO se corrobora con la investigación de Mebarki et al. en donde demostraron su eficacia en un sistema similar, el cual dependía de la radiación solar para generar el calentamiento necesario que impulsaba la elevación del aire, sus resultados mostraron que los parámetros seleccionados son adecuados para modelar con precisión el comportamiento del flujo de aire [63].

Por otro lado, las discretizaciones angulares y de píxeles en las divisiones Theta y Phi fueron predefinidos para optimizar la resolución de la radiación sin sobrecargar los recursos computacionales. Por último, se estableció el vector de dirección solar, utilizando los datos de longitud y latitud que corresponden a un área dentro del distrito 28 de Octubre, Piura que fueron establecidos para la investigación. Lo que permitió una entrada precisa de los parámetros de irradiación solar directa y difusa. Esto aseguró que el sistema sea representado bajo condiciones realistas, proporcionando una simulación precisa del impacto de la radiación en la eficiencia del sistema.

Seguido se realizó la definición de los materiales, donde el aire se estableció como el fluido y como materiales sólidos se tuvo al concreto, el vidrio y la tierra, que representan respectivamente la estructura de la chimenea, el colector solar y el terreno circundante. Se consideró que el sistema está a 293.15 K, una condición ambiental típica como punto de partida para la simulación. Esta temperatura fue importante para los gradientes térmicos que impulsarán el flujo de aire en el sistema, y funcionó como una base realista para evaluar el rendimiento de la central en condiciones operativas normales.

Respecto a las condiciones de contorno, de la chimenea, el colector, el suelo, la entrada y la salida cada una presentó sus propias características y condiciones. Las condiciones de contorno, para el colector y la chimenea, fueron configuradas especificando propiedades como el coeficiente de transferencia de calor y el tipo de material.

Figura 36: Condiciones de contorno para la entrada y salida del flujo

Backflow Reference Frame: Absolute

Gauge Pressure [Pa]: 0

Pressure Profile Multiplier: 1

Backflow Direction Specification Method: Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification: Total Pressure

Prevent Reverse Flow

Radial Equilibrium Pressure Distribution

Average Pressure Specification

Target Mass Flow Rate

Turbulence

Specification Method: Intensity and Length Scale

Backflow Turbulent Intensity [%]: 5

Backflow Turbulent Length Scale [m]: 0,5

Fuente: Elaboración propia

La figura anterior muestra las condiciones de contorno para la entrada y salida del sistema, los valores de presión y velocidad se consideraron en relación con un sistema de coordenadas fijo. Sobre la presión de calibre se consideró 0 Pa, asumiéndose que la presión en la salida de la chimenea es igual a la presión atmosférica, esta suposición es razonable para una chimenea solar abierta a la atmósfera, donde el aire caliente sale libremente. La especificación de presión de reflujo se configura como presión total, esto es importante para manejar cualquier posible reflujo transitorio durante la simulación, proporcionando una condición de contorno robusta.

En cuanto a la turbulencia, se eligió el método de especificación Intensidad y escala de longitud, este enfoque permite definir las características de la turbulencia en la salida de manera más precisa. La intensidad de la turbulencia de reflujo se estableció en un 5%, lo que representa un nivel moderado de turbulencia, típico para flujos en chimeneas solares. Finalmente, la escala de longitud turbulenta de reflujo se configuro a 0.01 m, a pesar de ser pequeña respecto al tamaño de la central, es adecuada para capturar la turbulencia en las zonas donde los gradientes de velocidad son importantes, como en la entrada del flujo frío en el colector o la salida del flujo caliente en la chimenea.

Figura 37: Métodos de solución para la simulación

Solution Methods ?

Pressure-Velocity Coupling

Scheme
SIMPLE

Flux Type
Rhie-Chow: momentum based Auto Select

Spatial Discretization

Gradient
Green-Gauss Cell Based

Pressure
PRESTO!

Momentum
Second Order Upwind

Turbulent Kinetic Energy
Second Order Upwind

Turbulent Dissipation Rate
Second Order Upwind

Energy
Second Order Upwind

Discrete Ordinates
First Order Upwind

Fuente: Elaboración propia

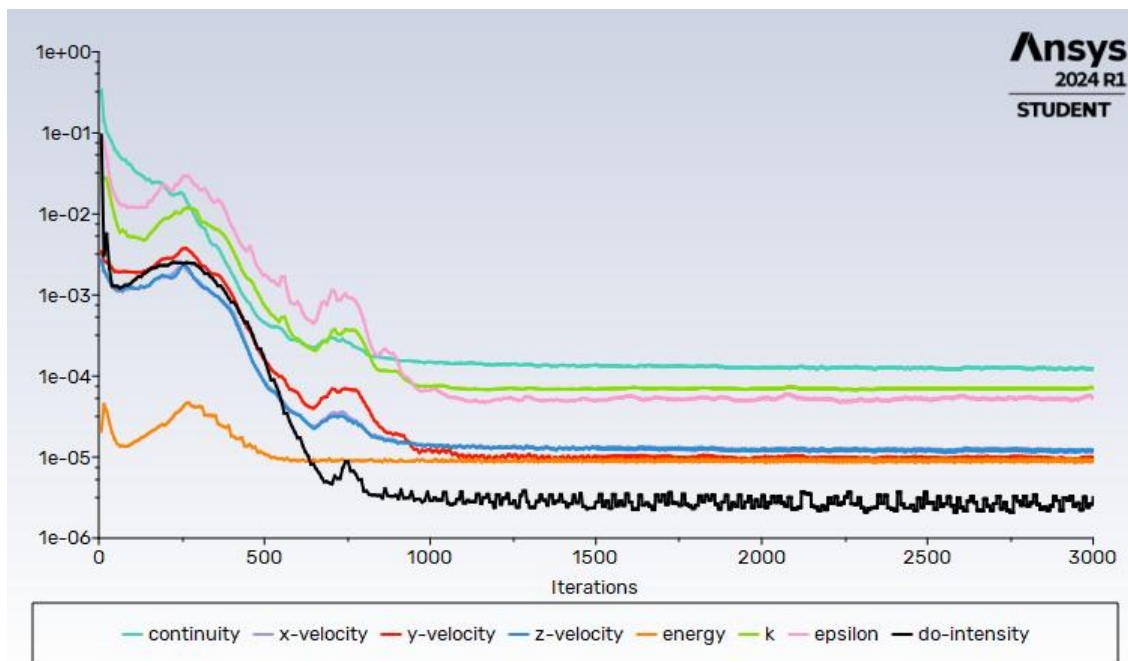
Finalmente, se realiza la configuración de los métodos que se emplearán para resolver las ecuaciones de flujo y transferencia de calor. Se seleccionó para el acoplamiento de presión-velocidad el método SIMPLE, el cual es un esquema común para simulaciones de fluidos y se usa para calcular de manera iterativas las ecuaciones de conservación de masa y momento, para el sistema como el flujo es impulsado por convección natural, este método resolvió de manera eficiente la interacción entre la velocidad del aire y la presión en el sistema.

En la sección de discretización espacial, para la presión se seleccionó un esquema de Segundo Orden, esto para calcular las variaciones de presión en el dominio. También se seleccionó el esquema de Segundo Orden Upwind, el cual fue usado para mejorar la precisión en la simulación, lo que es especialmente importante en simulaciones con turbulencia y donde las variaciones de temperatura y velocidad son significativas. Además, se empleó el esquema First Order Upwind utilizado para las ecuaciones de radiación de las Discretas Ordenadas (DO), por último, se usó la configuración Non-Iterative Time Advancement (NITA), mejorando la velocidad de la simulación sin comprometer su precisión.

Al comparar con investigaciones previas, como la realizada por Cuce et al., se puede corroborar que el uso del esquema SIMPLE y de discretizaciones de segundo orden es empleado con éxito

para resolver este tipo de sistemas impulsados por convección natural. Esto confirma que los métodos seleccionados en esta simulación están alineados con las metodologías para modelar la interacción entre el flujo de aire y la transferencia de calor en este tipo de sistemas [63].

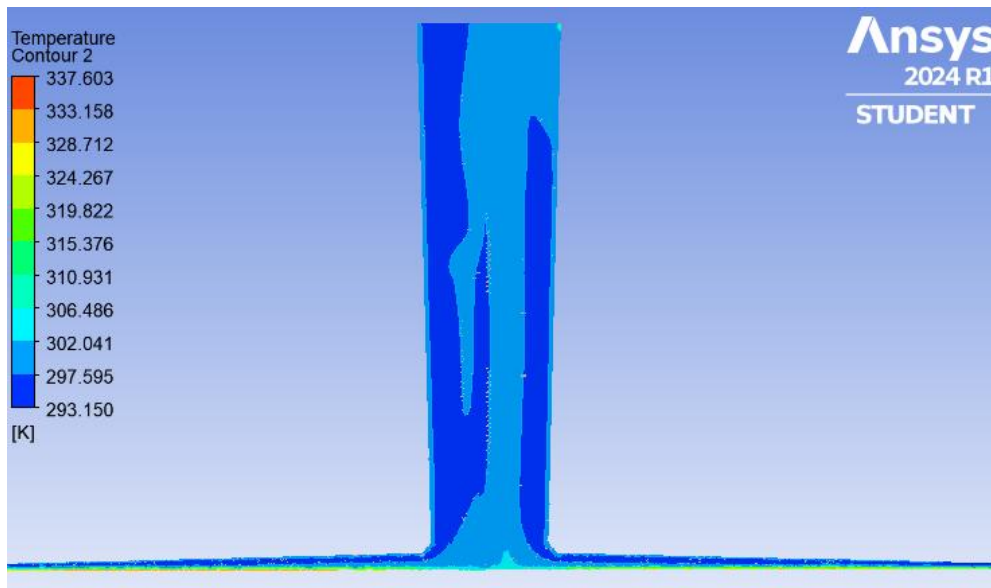
Figura 38: Residuales respecto a las iteraciones simuladas



Fuente: Elaboración propia

En figura anterior se observó la evolución de los residuos a lo largo de las iteraciones de la simulación CFD. Se tiene que la mayoría de los residuos comienzan con valores relativamente altos, en el rango de 10^{-1} a 10^{-2} , y gradualmente disminuyen a partir de la iteración 250, esto a medida que la simulación progresa. Hacia las 3000 iteraciones, los residuos se estabilizan en valores más bajos, entre 10^{-4} a 10^{-5} , indicando una buena convergencia general. Cabe mencionar que se notó un comportamiento particular de todos los residuos, pues se observa un pico repentino en la simulación, antes de volver a estabilizarse. Este pico podría indicar un momento de inestabilidad numérica temporal en el cálculo de las ecuaciones, que luego se resuelve a medida que la simulación continúa.

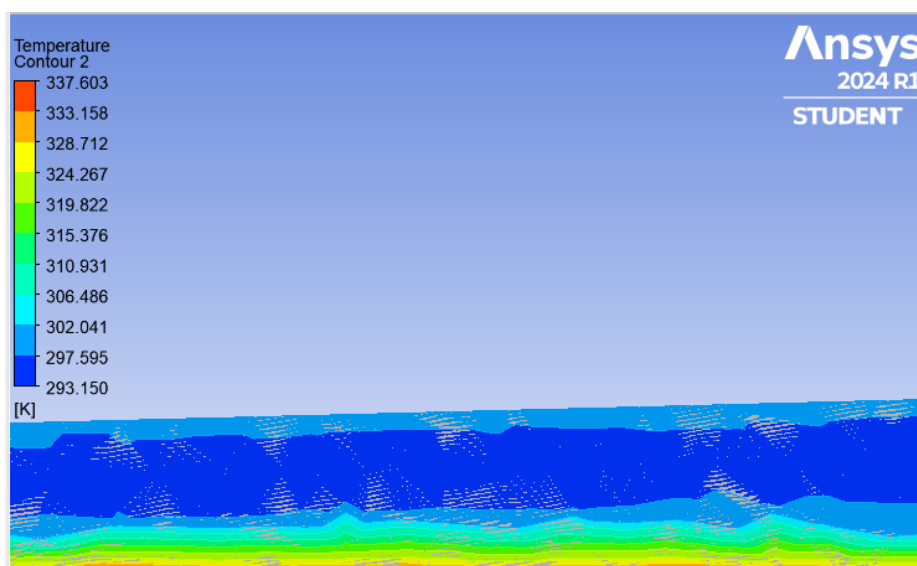
Figura 39: Resultados de temperatura en la central de chimenea solar



Fuente: Elaboración propia

La figura anterior se observó la distribución de temperatura en la central de chimenea solar. Se muestran variaciones de temperatura que van en el rango entre los 293,15 K (20°C) en las zonas de tonos azules, hasta los 337,603 K (64,4°C) en las áreas de tonos rojos. La base de la central mostró las temperaturas más altas, con valores que van desde los 328,712 K y van disminuyendo. Se observó un gradiente térmico, con temperaturas que disminuyen gradualmente hacia la parte superior de la chimenea, donde se registraron valores alrededor de los 306,48 K (33.33°C) - 293,150 K (20°C). Esta distribución de temperatura fue importante para generar el efecto de convección que impulsó el flujo de aire en la central.

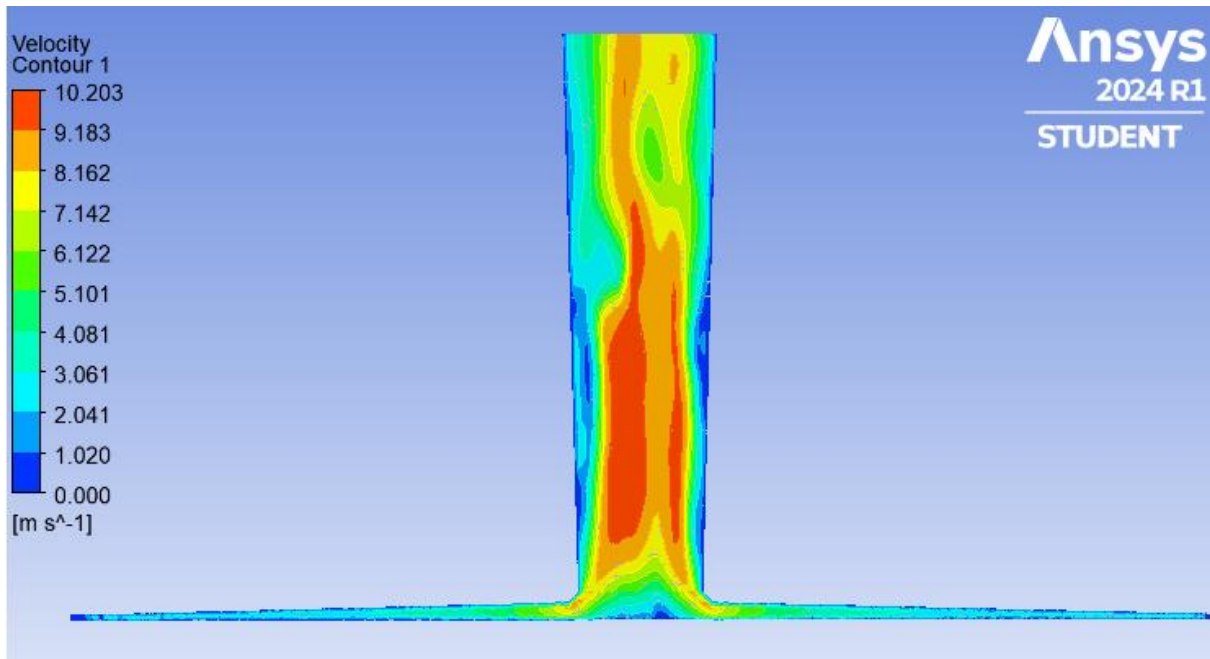
Figura 40: Resultados de temperatura en la base del sistema



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se muestra la perspectiva sobre la base de la central respecto a la distribución de temperatura. Se muestra con más detalle las zonas de transición térmica, específicamente en la base de la central donde la temperatura va cambiando entre 333,158 K a 293,15 K aproximadamente, indicando zonas de gradiente térmico.

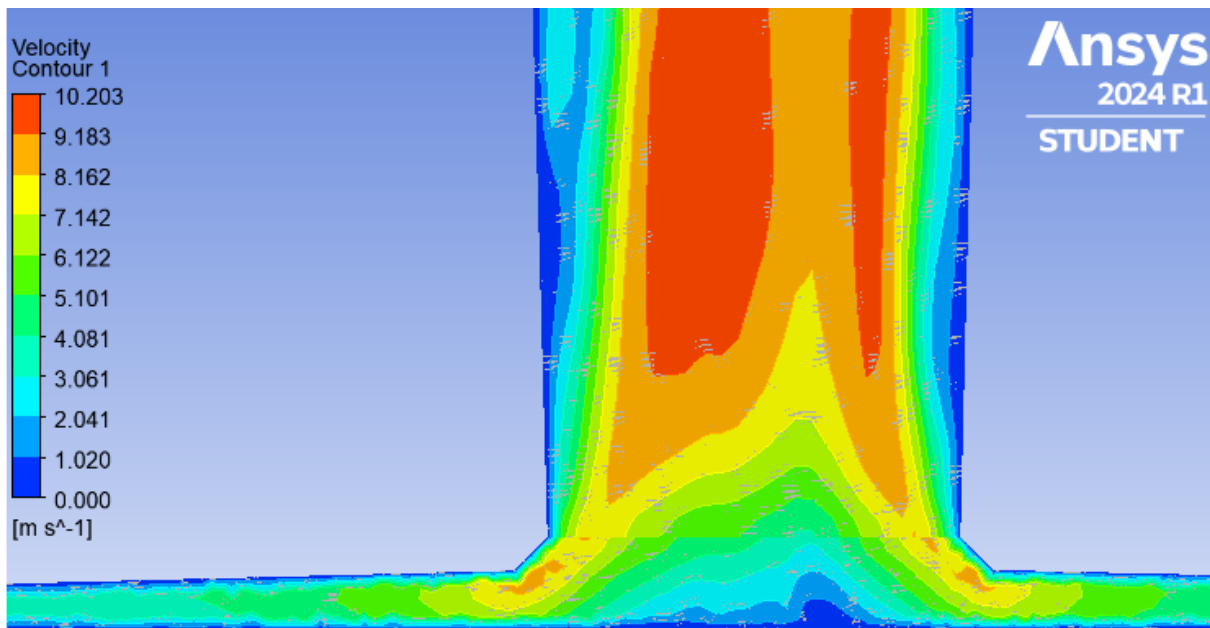
Figura 41: Resultados de velocidad del fluido en la central de chimenea solar



Fuente: Elaboración propia

La figura anterior muestra la distribución de velocidad del flujo de aire en una central de chimenea solar. Se evidenció un comportamiento característico del flujo ascendente, impulsado por el gradiente térmico generado en el colector solar y la chimenea. Los valores de velocidad, representados por la escala de colores ubicada en el lado derecho de la figura, oscilaron entre 0 m/s y un máximo de 10,203 m/s. En la base de la chimenea, donde el aire caliente ingresó después de ser calentado en el colector solar, las velocidades iniciales del flujo se mantuvieron en el rango de 2,04 a 7,142 m/s, como se observa en las tonalidades de turquesa y verde claro. A medida que el aire asciende dentro de la chimenea, las velocidades aumentaron, alcanzando valores entre 8,162 m/s y 10,203 m/s, representados por tonalidades amarillas y rojas. En esta región, el flujo mostró una aceleración constante debido a la disminución de la presión y al efecto de convección natural, producto de la diferencia de densidades entre el aire caliente y frío. Este incremento significativo en la velocidad del aire demostró la eficiencia del sistema para convertir la energía térmica en energía cinética, siendo esta velocidad esencial para la generación de energía en las turbinas instaladas.

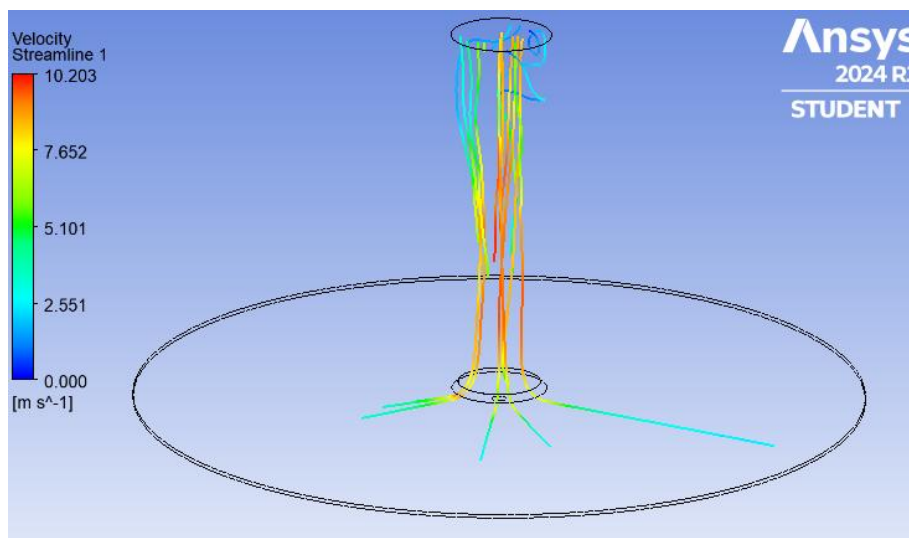
Figura 42: Resultados de velocidad del fluido en la base del sistema



Fuente: Elaboración propia

La figura anterior se muestra una vista ampliada de la base de la central, enfocándose en la distribución de velocidades del flujo. En el colector, antes de que el flujo ingrese a la base de la chimenea, las velocidades se mantuvieron con valores que oscilaron entre 0 m/s y 5,101 m/s, representados por tonalidades azules y verde claro, esto corresponde a la etapa inicial de calentamiento y expansión del aire, donde la energía cinética aún era limitada. Al acercarse a la entrada de la chimenea, se observó un aumento progresivo de las velocidades, que alcanzaron valores entre 7,142 m/s y 8,162 m/s, representados por colores verdes y amarillos. Este incremento se explicó por la aceleración del flujo debido al estrechamiento de la geometría en la entrada de la chimenea y facilitó la canalización del aire caliente hacia el interior de la estructura. En la chimenea, se identificó una zona de máxima aceleración del flujo, con velocidades cercanas al máximo, representados por tonalidades anaranjadas y rojas. Este fenómeno se debió a la conversión eficiente de energía térmica en energía cinética, potenciada por el gradiente de presión y densidad generado en el sistema.

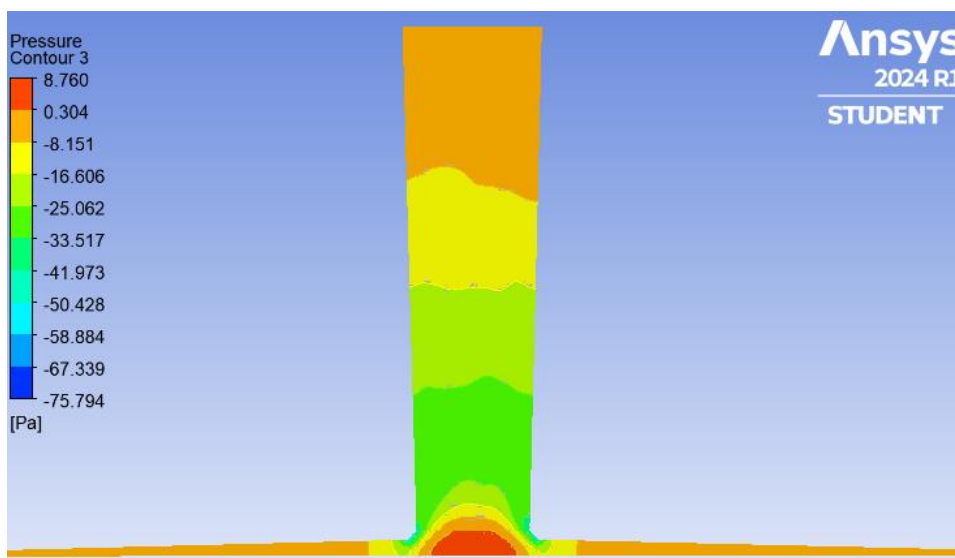
Figura 43: Líneas de corriente y distribución de velocidad en la central propuesta



Fuente: Elaboración propia

La figura anterior muestra las líneas de corriente del flujo de aire dentro de la chimenea solar, junto con la distribución de velocidad asociada. Los colores de las líneas corresponden a un rango de velocidades que va desde 0 m/s (azul) hasta 10,203 m/s (rojo), según la escala. Se observa un flujo continuo y ordenado, con una evidente aceleración del aire a medida que asciende por la chimenea. Esto demostró que el diseño propuesto facilita un movimiento eficiente del aire, maximizando el potencial de generación de energía del sistema.

Figura 44: Resultados de presión

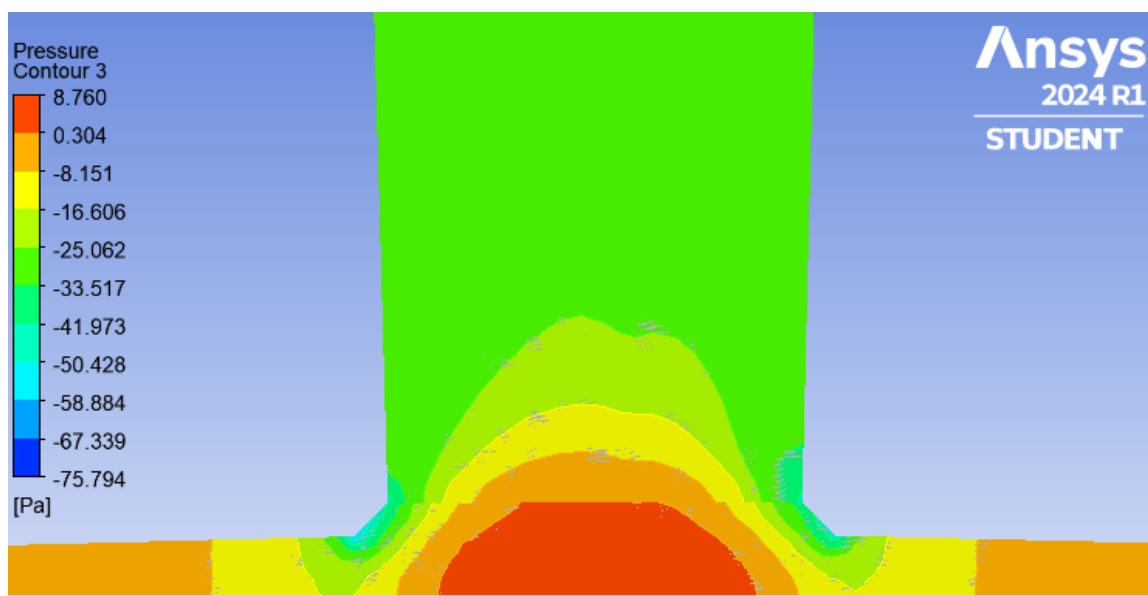


Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa la distribución de presión considerando un rango que varía desde -75,794 Pa hasta aproximadamente -8,760 Pa. En la base de la chimenea, se observa un

área de alta presión, representada en color naranja y rojo. Esta alta presión es resultado del aire caliente que ingresa al sistema debido al calentamiento solar en el colector. A medida que el aire asciende a lo largo de la chimenea, la presión va disminuyendo progresivamente, pasando de color amarillo a verde y turquesa. Este diferencial de presión es clave para generar el flujo de aire ascendente dentro del sistema. En la parte central de la chimenea, la presión alcanza valores bajos, con una caída que llega a $-33,517$ Pa. Este comportamiento se debe a la menor densidad del aire caliente en comparación con el aire frío externo, lo que facilita el movimiento ascendente del flujo y genera succión en la base. Este diferencial de presión aseguró que el aire fluya continuamente desde el colector hacia la chimenea.

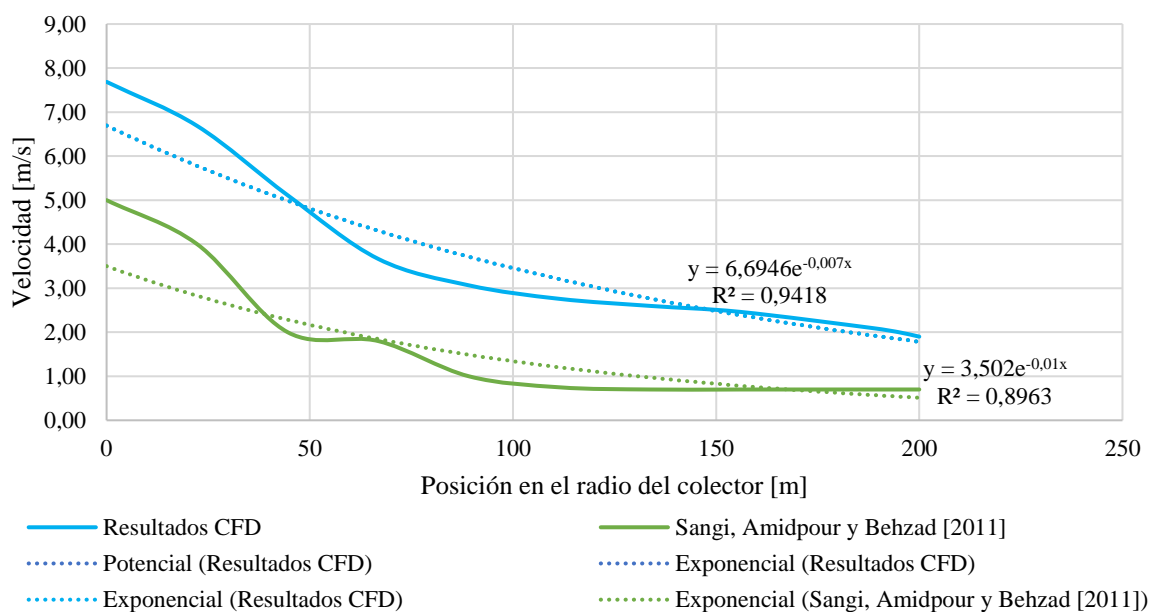
Figura 45: Resultados de presión en la base de la central



Fuente: Elaboración propia

La figura anterior se muestra una vista más cercana sobre la base de la chimenea y el colector, donde se aprecia el comportamiento de los gradientes de presión. El colector muestra zonas de alta presión (rojo y naranja), lo cual indica que el aire se encuentra acumulando energía térmica antes de ingresar a la chimenea. En las zonas de transición, donde el aire pasa del colector a la base de la chimenea, los colores cambian a tonos verdes y celestes, evidenciando una caída significativa de presión. Este cambio sugiere una aceleración en el flujo, impulsada por el gradiente de presión y la diferencia de densidades. La presión más baja se encuentra cerca de las paredes internas de la chimenea y en las zonas más altas, lo cual indica que el diseño del sistema está ayudando a un flujo ascendente eficiente. Este comportamiento permite asegurar el rendimiento de la central, pues la diferencia de presión es el principal mecanismo que impulsa el aire caliente hacia la turbina.

Figura 46: Perfil de velocidad en la chimenea solar

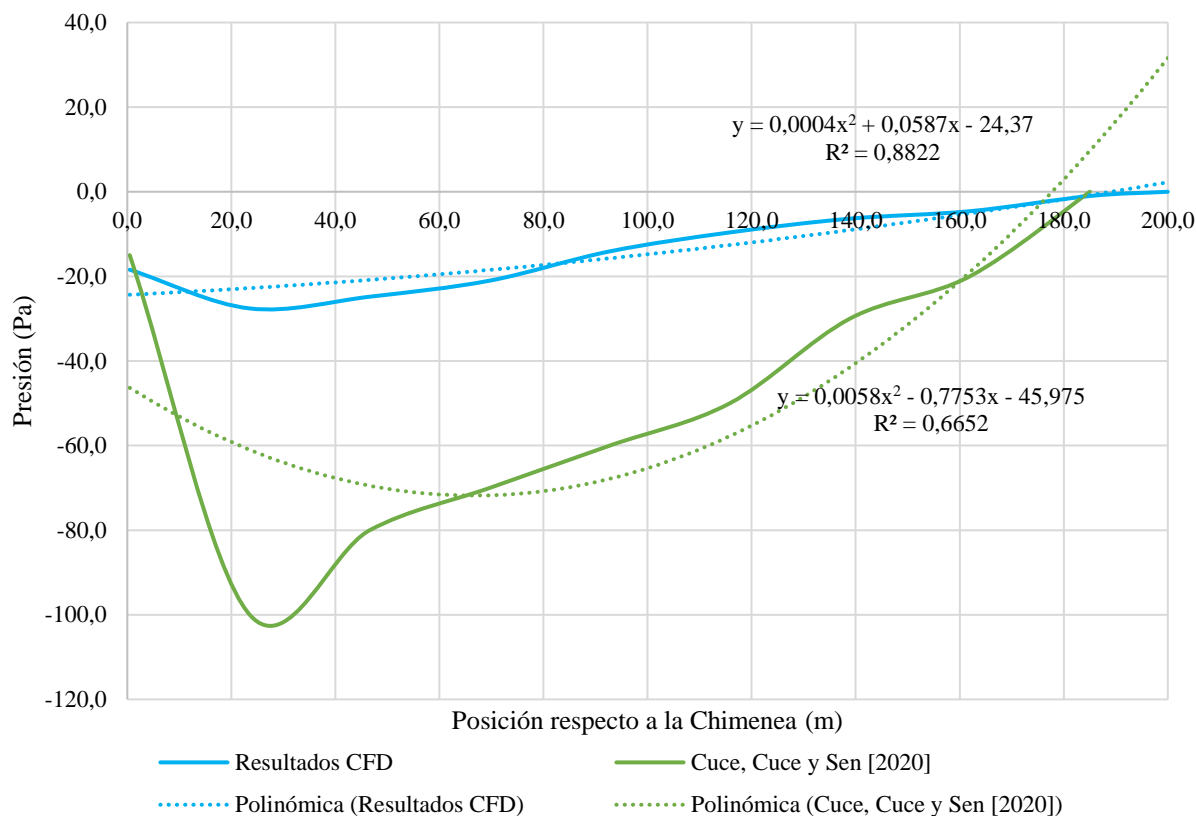


Fuente: Elaboración propia

La figura anterior sobre la velocidad de flujo presenta una comparación entre la simulación CFD y los resultados reportados por Sangi, Amidpour y Behzad [64]. Para ambas simulaciones se observó una caída de la velocidad desde el centro del colector, considerando que los resultados de los autores alcanzaron velocidades de 5 m/s en el centro del colector y entrada a la chimenea. Los resultados de la presente investigación alcanzaron velocidades de 8 m/s aproximadamente, tras lo cual la velocidad del aire comienza a disminuir gradualmente a medida que se acerca a la entrada del colector.

Respecto a los valores de R^2 , la simulación en CFD tuvo un R^2 de 0,9418, mientras que los resultados de los autores muestran un R^2 de 0,8963. Estos valores señalan que ambos conjuntos de datos se ajustan razonablemente bien al modelo exponencial, resaltando que la simulación de la presente investigación mostró un ajuste ligeramente mejor.

Figura 47: Distribución de presión en la chimenea solar



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa la comparación de la distribución de presión a lo largo de la altura de la chimenea entre la simulación CFD y los resultados de Cuce, Cuce y Sen. Ambas simulaciones mostraron una caída de presión en la base de la chimenea, seguida de una recuperación gradual a medida que se asciende. La simulación predijo una caída de presión de aproximadamente -30 Pa aproximadamente a 25 metros de altura, en contraste con -105 Pa de la investigación de referencia. A lo largo de la altura de la chimenea, el diseño propuesto mostró una recuperación más rápida de la presión, llegando a los 0 Pa en la salida, al igual que el estudio de referencia. A pesar de las diferencias numéricas, ambos estudios capturan el fenómeno físico esencial de la recuperación de presión a lo largo de la chimenea, lo que valida la capacidad del diseño para representar correctamente la física del flujo en la central de chimenea solar propuesta. Respecto a la diferencia en los valores de R^2 para los ajustes logarítmicos. La simulación muestra un R^2 de 0,8822 y la investigación de referencia tuvo un R^2 de 0,6652, lo que significa un ajuste relativamente bueno del modelo logarítmico a los datos encontrados. Esto significa que la simulación CFD produce resultados más consistentes y predecibles en términos de la distribución de presión.

Cálculo de potencia y eficiencia del sistema

Para calcular la potencia del sistema se considera la caída de presión y el caudal volumétrico, los cuales son dos parámetros principales que afectan la potencia de salida de este tipo de central [57].

$$P_{CENTRAL DE CHIMENEA SOLAR} = \eta_{turb} \times \Delta P_{turb} \times V$$

Donde

η_t Eficiencia de la turbina

ΔP_t Caída de presión de la turbina

Q_v Caudal volumétrico

Caída de presión de la turbina

La caída de presión representa cómo la presión del aire cambia al pasar por la turbina. Para esto es necesario encontrar la caída de presión que pasa por el turbogenerador, la cual se representa como

$$\Delta P_{turbina} = \frac{2}{3} \Delta P_{total}$$

Se utilizó los reportes de la simulación, para hallar el valor de la variable ΔP_{total}

Tabla 19: Reporte de diferencia de presión total disponible

Informe de integral de superficie	
Promedio ponderado por área	
Presión total [Pa]	
Salida	99,6037
Entrada	0
Neto	99,6037

Fuente. Elaboración propia

La caída de presión en la turbogenerador

$$\Delta P_{turbina} = \frac{2}{3} \Delta P_{total}$$

$$\Delta P_{turbina} = \frac{2}{3} (99,6037)$$

$$\Delta P_t = 66,40246667 \text{ Pa}$$

Cálculo del caudal volumétrico

El caudal de la volumétrico dentro de la central está basado en la velocidad media del aire y en el área de la sección transversal a la salida de la chimenea A_{st} . El caudal volumétrico Q_v como variable clave en el cálculo de la potencia de la central ha sido comprobado, la validación se realizó a través de simulaciones computacionales, demostrando la correlación directa entre el caudal volumétrico y la potencia generada en una central de chimenea solar [62].

Tabla 20: Reporte de caudal volumétrico

Informe de integral de superficie	
Tasa de flujo volumétrico [m^3/s]	
Salida	-9 940,2075

Fuente. Elaboración propia

Respecto a la eficiencia de la turbina diversas investigaciones consideran una eficiencia del 80% o 0,8-0,83, para los siguientes cálculos se empleó un valor de 0,83 [65].

En este sentido la potencia generada por el sistema es

$$P_{CENTRAL DE CHIMENEA SOLAR} = 0,83 \times 66,40246667 Pa \times 9\,940,2075 m^3/s$$

$$P_{CENTRAL DE CHIMENEA SOLAR} = 547\,845,0667 W$$

$$P_{CENTRAL DE CHIMENEA SOLAR} \cong 547,845 kW$$

Respecto a la eficiencia central de chimenea solar de ,

$$\eta_{ch} = \frac{P_{Central de chimenea solar}}{Q_{transferencia de calor}}$$

Respecto a la transferencia de calor se tienen los siguientes resultados brindados por la simulación

Tabla 21: Reporte de tasa total de transferencia de calor

Reporte de flujo	
Tasa total de transferencia de calor [W]	
Colector	31 274 051
Salida	3 483 957,4
Entrada	-51 165 361
Fuente solar total	18 886 639
Neto	2 479 285,9

Fuente. Elaboración propia

Por lo tanto la eficiencia del sistema queda expresada del siguiente modo

$$\eta_{sistema} = \frac{547\,845,0667\,W}{2\,479\,285,9\,W}$$

$$\eta_{sistema} = 0,2209$$

$$\eta_{sistema} = 22,09\%$$

En este sentido, el cálculo de potencia indica que la central de chimenea solar propuesta podrá generar aproximadamente 547,845 kW, un valor ligeramente menor al objetivo inicial de establecido en la investigación..

Selección de turbogenerador

Se debe considerar que las centrales de chimenea solar requieren aerogeneradores diseñados específicamente para adaptarse a las condiciones de este tipo de sistemas. Estas condiciones incluyen flujos de aire canalizados, uniformes y constantes, generados dentro de la estructura de la chimenea, lo que difiere de las aplicaciones convencionales de aerogeneradores. Actualmente, en el mercado no es común encontrar aerogeneradores diseñados específicamente para chimeneas solares, ya que esta tecnología sigue siendo experimental y poco extendida en comparación con otras fuentes renovables como la eólica y la hidráulica. Los aerogeneradores convencionales, como los de eje horizontal y vertical, están optimizados para operar en entornos al aire libre con velocidades y direcciones de viento altamente variables.

Por ello, en las centrales de chimenea solar, los aerogeneradores que se utilizan suelen ser prototipos modificados o desarrollos personalizados, adaptados para flujos canalizados, velocidades uniformes y ajustadas al diseño de la chimenea para evitar pérdidas de energía o problemas mecánicos. En este sentido, la propuesta que se mencionará a continuación deberá de tener una modificación a su modelo existente, para poder aprovechar su capacidad adaptativa y convertirlo en una herramienta eficiente dentro de tu central.

Para la selección del aerogenerador se consideró la potencia encontrada de aproximadamente 547 kW, incluyendo la caída de presión y las dimensiones que tendrá.

La marca sugerida

Es Wind Sail Energy, esta empresa brinda aerogeneradores de eje vertical que son adecuadas para aplicaciones de energía renovable.

Modelo Propuesto

PK500

Especificaciones

Se tomaron en cuenta las siguientes especificaciones técnicas para evaluar el desempeño y viabilidad técnica del sistema utilizando el software DigSILENT Power Factory.

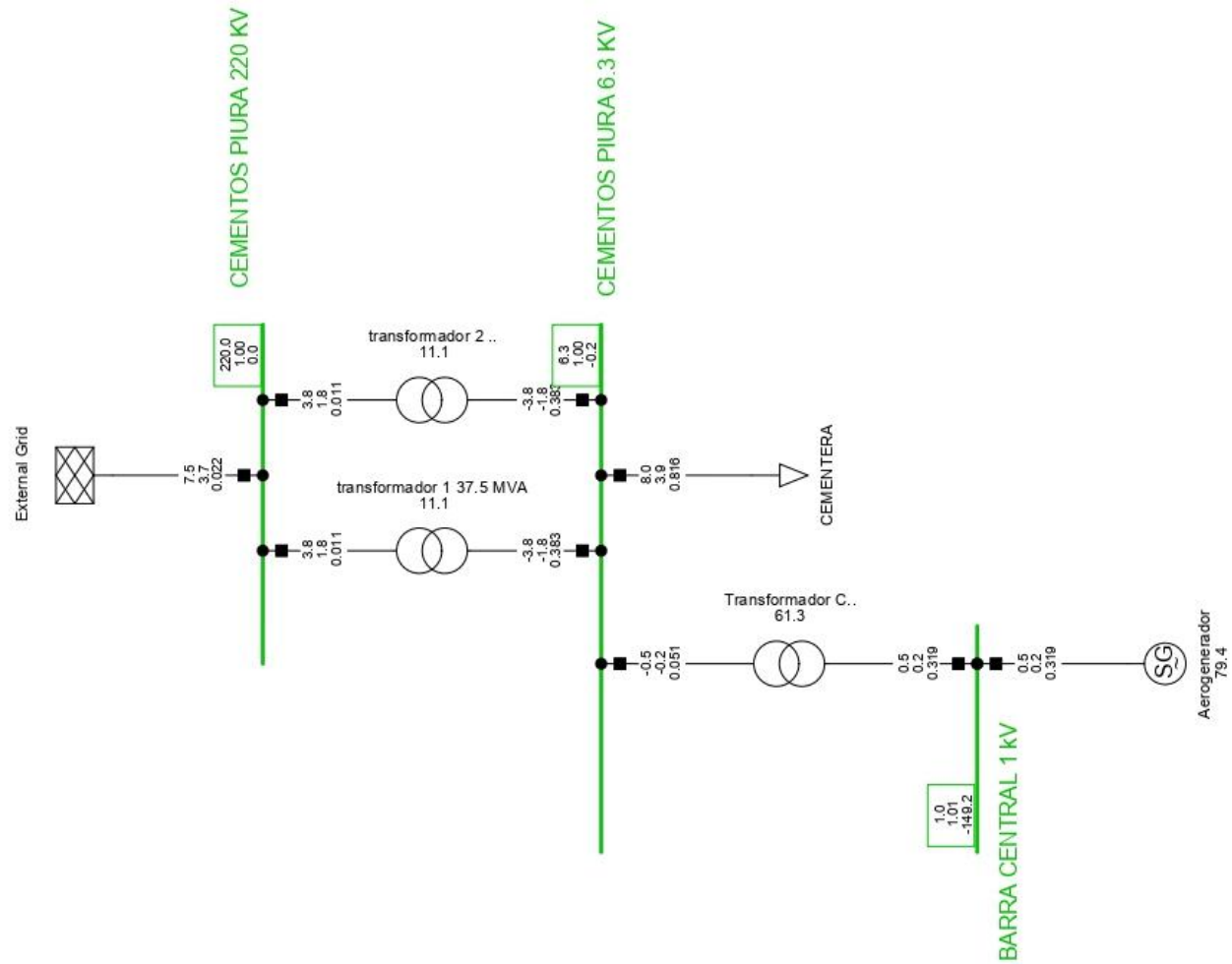
- **Potencia nominal:** 500 kW
- **Potencia máxima:** 600 KW
- **Velocidad nominal del viento:** 12 m/s
- **Velocidad de arranque:** 2 m/s

- **Diámetro del rotor:** 30 m
- **Altura del rotor:** 20 m
- **Número de palas:** 6
- **Material de las palas:** FRP (fibra de vidrio reforzada)
- **Generador:** Generador de imanes permanentes (PMG) trifásico, 690V AC, 418.8A

El modelo PK500, diseñado como un aerogenerador de eje vertical tiene un diseño de álabes optimizado para capturar energía cinética del viento en ambientes naturales abiertos. Sin embargo, en el contexto de una central de chimenea solar, el flujo de aire presenta características específicas que podrían requerir adaptaciones en los álabes para maximizar su eficiencia. Estas características incluyen ajustar el perfil de los álabes para mejorar la interacción con un flujo canalizado y de baja turbulencia. Cambiar el material de construcción de los álabes a uno más liviano, como fibra de carbono o aluminio reforzado, que reduzca la inercia y facilite el movimiento ajustable. Introducir una curvatura específica que se adapte al flujo acelerado en la salida de la chimenea, evitando turbulencias y mejorando la eficiencia.

Con estas modificaciones, se espera que el modelo PK500 logre un mejor rendimiento en las condiciones de flujo uniforme de una chimenea solar.

Figura 48: Simulación del sistema en el programa DigSilent Power Factory



Fuente. Elaboración propia

4.5. Evaluación económica para determinar su viabilidad

La siguiente evaluación económica permitió determinar la viabilidad financiera para construir y operar una central de chimenea solar que brinde 547,845 kW de energía eléctrica para una empresa cementera de Piura, que tiene como requerimiento actual aproximadamente 8 MW. Se consideró que la planta seguirá conectada al Sistema Eléctrico Nacional, pero este sistema permitirá reducir la dependencia a ella, disminuyendo así los costos energéticos de la cementera.

Tabla 22: Costos de inversión inicial

Componente	Costo estimado (S/.)
Terreno	S/ 600 000
Preparación del lugar	S/ 100 000
Estructura de la chimenea	S/ 6 500 000
Estructura del colector solar	S/ 4 500 000
Turbogenerador	S/ 1 000 000
Sistemas eléctricos	S/ 500 000
Ingeniería y diseño	S/ 1 000 000
Permisos y licencias	S/ 500 000
Contingencias (10%)	S/ 500 000
Total	S/ 15 200 000

Fuente: Elaboración propia

Se consideró un costo alto para el terreno debido a la dimensión de la central, respecto a la estructura de la chimenea y del colector, ambos dependen costo del uso de materiales como concreto y vidrio. Además, se consideraron contingencias, que incluye un 10% para cubrir costos imprevistos.

Tabla 23: Costos operativos anuales

Concepto	Costo estimado (S/.)
Mantenimiento	S/ 5 000
Personal operativo	S/ 10 000
Seguros	S/ 5 000
Insumos y materiales	S/ 10 000
Otros gastos operativos	S/ 5 000
Total	S/ 35 000

Fuente: Elaboración propia

El mantenimiento involucraría revisiones y reparaciones de la estructura de la chimenea y el colector solar. Se considera un equipo reducido de personal operativo pues este tipo de centrales requieren poca inversión humana para que pueda operar. Además, se consideró seguros por riesgos estructurales y otros relacionados con eventos inesperados.

Flujo de Caja

Tabla 24: Flujo de caja

Año	Inversión inicial	Ingresos	Depreciación	Costos operativos	Utilidad antes de impuestos	Impuestos	Flujo de caja	Valor Presente Neto (VPN)	Valor Presente de los Beneficios (VPB)	Valor Presente de los Costos (VPC)
0	S/ 15 200 000	0	0	0	0	0	-S/ 15 200 000			
1	0	S/ 4 003 359,63	S/ 5 000,00	S/ 35 000,00	S/ 3 963 359,63	S/ 1 189 007,89	S/ 2 774 352	S/ 2 568 844,20	S/ 3 706 814,47	S/ 35 000,00
2	0	S/ 4 123 460,42	S/ 5 000,00	S/ 36 050,00	S/ 4 082 410,42	S/ 1 224 723,13	S/ 2 857 687	S/ 2 450 006,25	S/ 3 535 202,69	S/ 36 050,00
3	0	S/ 4 247 164,23	S/ 5 000,00	S/ 37 131,50	S/ 4 205 032,73	S/ 1 261 509,82	S/ 2 943 523	S/ 2 336 663,39	S/ 3 371 535,90	S/ 37 131,50
4	0	S/ 4 374 579,16	S/ 5 000,00	S/ 38 245,45	S/ 4 331 333,71	S/ 1 299 400,11	S/ 3 031 934	S/ 2 228 561,71	S/ 3 215 446,27	S/ 38 245,45
5	0	S/ 4 505 816,53	S/ 5 000,00	S/ 39 392,81	S/ 4 461 423,72	S/ 1 338 427,12	S/ 3 122 997	S/ 2 125 459,02	S/ 3 066 583,02	S/ 39 392,81
6	0	S/ 4 640 991,03	S/ 5 000,00	S/ 40 574,59	S/ 4 595 416,44	S/ 1 378 624,93	S/ 3 216 792	S/ 2 027 124,30	S/ 2 924 611,59	S/ 40 574,59
7	0	S/ 4 780 220,76	S/ 5 000,00	S/ 41 791,83	S/ 4 733 428,93	S/ 1 420 028,68	S/ 3 313 400	S/ 1 933 337,22	S/ 2 789 212,90	S/ 41 791,83
8	0	S/ 4 923 627,38	S/ 5 000,00	S/ 43 045,59	S/ 4 875 581,80	S/ 1 462 674,54	S/ 3 412 907	S/ 1 843 887,60	S/ 2 660 082,67	S/ 43 045,59
9	0	S/ 5 071 336,20	S/ 5 000,00	S/ 44 336,95	S/ 5 021 999,25	S/ 1 506 599,78	S/ 3 515 399	S/ 1 758 574,96	S/ 2 536 930,70	S/ 44 336,95
10	0	S/ 5 223 476,29	S/ 5 000,00	S/ 45 667,06	S/ 5 172 809,23	S/ 1 551 842,77	S/ 3 620 966	S/ 1 677 208,08	S/ 2 419 480,20	S/ 45 667,06
11	0	S/ 5 380 180,58	S/ 5 000,00	S/ 47 037,07	S/ 5 328 143,51	S/ 1 598 443,05	S/ 3 729 700	S/ 1 599 604,60	S/ 2 307 467,23	S/ 47 037,07
12	0	S/ 5 541 586,00	S/ 5 000,00	S/ 48 448,19	S/ 5 488 137,81	S/ 1 646 441,34	S/ 3 841 696	S/ 1 525 590,52	S/ 2 200 640,04	S/ 48 448,19
13	0	S/ 5 707 833,58	S/ 5 000,00	S/ 49 901,63	S/ 5 652 931,95	S/ 1 695 879,58	S/ 3 957 052	S/ 1 454 999,94	S/ 2 098 758,56	S/ 49 901,63
14	0	S/ 5 879 068,58	S/ 5 000,00	S/ 51 398,68	S/ 5 822 669,90	S/ 1 746 800,97	S/ 4 075 869	S/ 1 387 674,58	S/ 2 001 593,81	S/ 51 398,68
15	0	S/ 6 055 440,64	S/ 5 000,00	S/ 52 940,64	S/ 5 997 500,00	S/ 1 799 250,00	S/ 4 198 250	S/ 1 323 463,49	S/ 1 908 927,43	S/ 52 940,64
16	0	S/ 6 237 103,86	S/ 5 000,00	S/ 54 528,86	S/ 6 177 575,00	S/ 1 853 272,50	S/ 4 324 303	S/ 1 262 222,68	S/ 1 820 551,16	S/ 54 528,86
17	0	S/ 6 424 216,98	S/ 5 000,00	S/ 56 164,73	S/ 6 363 052,25	S/ 1 908 915,68	S/ 4 454 137	S/ 1 203 814,82	S/ 1 736 266,39	S/ 56 164,73
18	0	S/ 6 616 943,49	S/ 5 000,00	S/ 57 849,67	S/ 6 554 093,82	S/ 1 966 228,15	S/ 4 587 866	S/ 1 148 108,93	S/ 1 655 883,68	S/ 57 849,67
19	0	S/ 6 815 451,79	S/ 5 000,00	S/ 59 585,16	S/ 6 750 866,63	S/ 2 025 259,99	S/ 4 725 607	S/ 1 094 980,07	S/ 1 579 222,40	S/ 59 585,16
20	0	S/ 7 019 915,34	S/ 5 000,00	S/ 61 372,71	S/ 6 953 542,63	S/ 2 086 062,79	S/ 4 867 480	S/ 1 044 309,07	S/ 1 506 110,25	S/ 61 372,71
21	0	S/ 7 230 512,80	S/ 5 000,00	S/ 63 213,89	S/ 7 162 298,91	S/ 2 148 689,67	S/ 5 013 609	S/ 995 982,29	S/ 1 436 382,93	S/ 63 213,89
22	0	S/ 7 447 428,19	S/ 5 000,00	S/ 65 110,31	S/ 7 377 317,88	S/ 2 213 195,36	S/ 5 164 123	S/ 949 891,31	S/ 1 369 883,72	S/ 65 110,31

23	0	S/ 7 670 851,03	S/ 5 000,00	S/ 67 063,62	S/ 7 598 787,41	S/ 2 279 636,22	S/ 5 319 151	S/ 905 932,75	S/ 1 306 463,17	S/ 67 063,62
24	0	S/ 7 900 976,56	S/ 5 000,00	S/ 69 075,53	S/ 7 826 901,04	S/ 2 348 070,31	S/ 5 478 831	S/ 864 007,97	S/ 1 245 978,77	S/ 69 075,53
25	0	S/ 8 138 005,86	S/ 5 000,00	S/ 71 147,79	S/ 8 061 858,07	S/ 2 418 557,42	S/ 5 643 301	S/ 824 022,94	S/ 1 188 294,57	S/ 71 147,79
SUMA TOTAL								S/ 23 334 272,70	S/ 55 588 324,54	16 476 074,25

Fuente: Elaboración propia

Se proyectó un flujo de caja para 25 años, los valores de inversión inicial y los costos operativos están basados en cifras justificadas anteriormente, mientras que la depreciación, costos operativos, utilidad e impuestos se mencionan a continuación.

La inversión inicial se lleva a cabo en el año 0, el monto señalado incluye costos de construcción, terreno, sistemas eléctricos, turbinas y otros componentes clave, como permisos, licencias y contingencias.

$$Energía\ anual = 547\ 845,0667\ W \times 24 \frac{horas}{días} \times 365 \frac{días}{año} = 4\ 799,122784\ MWh/año$$

$$Energía\ anual = 4\ 799\ 122,784\ kWh/año$$

Respecto a los ingresos, se enfocó a los ingresos por la venta de electricidad, encontrándose que la central generará aproximadamente 4 799 122,784 kWh al año, que se venden a una tarifa de S/.0,73 por kWh, entonces el ingreso total por venta de electricidad en el primer año es:

$$Ingresos\ (Año\ 1) = 4\ 799\ 122,784\ kWh \times S/0,73\ kWh$$

$$Ingresos\ (Año\ 1) = S/ 3\ 503\ 359,632\ por\ año$$

Proyectándose un aumento anual del 3%.

Tabla 25: Ingresos proyectados

Concepto	Ingreso anual (S/.)
Venta de electricidad	S/ 3 503 359, 63
Créditos de carbono	S/ 300 000, 00
Otros ingresos	S/ 200 000, 00
Total	S/ 4 003 359, 63

Fuente: Elaboración propia

Se consideró una producción de 547,845 kW con precios de electricidad de aproximadamente S/ 0,73 por kWh. Además, los ingresos adicionales provienen de la venta de certificados de reducción de emisiones de CO₂ como parte de los incentivos gubernamentales y programas internacionales.

Respecto a los costos operáticos se incluye el costo por mantenimiento de la planta, personal operativo y seguros e impuestos. El costo operativo en el primer año es S/ 35 000, y aumenta ligeramente cada año en 3%, considerando situaciones de inflación en el país, desgaste de la central o ajuste de los salarios. En cuanto a la depreciación de la inversión inicial se consideró S/ 5 000, esta depreciación será lineal durante los años indicados.

Sobre los impuestos, estos se calcularon sobre la ganancia bruta o utilidad y se consideró una tasa de impuesto a la renta del 30%.

$$Utilidades = Ingresos - Costos Operativos - Depreciación$$

$$Impuestos = Utilidades \times Tasa de impuesto a la renta$$

Seguido se calculó el flujo neto desde el año 0 hasta el año 25, este dinero es el queda después de restar los costos operativos, la depreciación e impuestos a los ingresos.

$$Flujo neto = Ingresos - (Costos operativos - Depreciación - Impuestos)$$

Luego, se calcularon los indicadores financieros clave para evaluar la viabilidad económica del proyecto, considerando el VPN, VPB, VPC, VIR y Costo-Beneficio. Para el cálculo del Valor Presente Neto – VPN, se consideró una tasa de descuento del 8% anual.

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0$$

$$VPN = S/ 23 334 272,70$$

Donde F_t son los flujos de caja netos en el año t , r es la tasa de descuento, t es el número de años y I_0 es la inversión inicial.

$$TIR = 20,92\%$$

Esto significa el proyecto generará un retorno del 20,92% anual sobre la inversión anual, como el TIR es mayor a la tasa de descuento, significa que el proyecto es rentable, bajo las condiciones señaladas, el proyecto es viable y genera un valor positivo.

Finalmente se halló la relación Beneficio – Costo el cual compara los beneficios y los costos netos del proyecto, la fórmula:

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Valor presente de los beneficios VPB}}{\text{Valor presente de los costos VPC}}$$

El valor presente de los beneficios son los ingresos futuros del proyecto ajustados al valor presente, esto incluye la venta de electricidad. Mientras que el valor presente de los costos incluye todos los costos operativos anuales y la inversión inicial.

$$VPB = \sum \frac{\text{Ingresos anuales}}{(1 + \text{Tasa de Descuento})^t}$$

$$VPB = S/55\,588\,324,54$$

Donde t es el número de años y la tasa de descuento es del 8%

$$VPC = \sum \frac{\text{Costos Operativos}}{(1 + \text{Tasa de Descuento})^t} + \sum \frac{\text{Inversión Inicial}}{(1 + \text{Tasa de Descuento})^0}$$

$$VPC = S/16\,476\,074,25$$

$$\frac{B}{C} = \frac{S/48\,645\,615,23}{S/16\,476\,074,25} = 3,373881647$$

Esto significa que, por cada sol invertido, el proyecto generará 2,37 soles de beneficio, lo que indica que el proyecto altamente rentable.

Además, se realizó el cálculo del costo nivelado de energía (LCOE)

$$LCOE = \frac{(\text{Suma de costos durante la vida útil en valor presente})}{(\text{Suma de energía generada durante la vida útil en valor presente})}$$

$$LCOE = \frac{\sum CVP}{\sum EGVP}$$

Para calcular los costos totales en valor presente se consideró la inversión inicial (S/ 15 200 000,00) y el valor presente de los costos operativos.

Tabla 26: Valor presente de los costos operativos

Año	Costos operativos (CO)	Factor de descuento 8%	Valor Presente CO
1	S/ 35.000,00	0,925925926	S/ 32.407,41
2	S/ 36.050,00	0,85733882	S/ 30.907,06
3	S/ 37.131,50	0,793832241	S/ 29.476,18
4	S/ 38.245,45	0,735029853	S/ 28.111,54
5	S/ 39.392,81	0,680583197	S/ 26.810,08
6	S/ 40.574,59	0,630169627	S/ 25.568,88
7	S/ 41.791,83	0,583490395	S/ 24.385,13
8	S/ 43.045,59	0,540268885	S/ 23.256,19
9	S/ 44.336,95	0,500248967	S/ 22.179,51
10	S/ 45.667,06	0,463193488	S/ 21.152,69
11	S/ 47.037,07	0,428882859	S/ 20.173,39
12	S/ 48.448,19	0,397113759	S/ 19.239,44
13	S/ 49.901,63	0,367697925	S/ 18.348,73
14	S/ 51.398,68	0,340461041	S/ 17.499,25
15	S/ 52.940,64	0,315241705	S/ 16.689,10
16	S/ 54.528,86	0,291890468	S/ 15.916,45
17	S/ 56.164,73	0,270268951	S/ 15.179,58
18	S/ 57.849,67	0,250249029	S/ 14.476,82
19	S/ 59.585,16	0,231712064	S/ 13.806,60
20	S/ 61.372,71	0,214548207	S/ 13.167,41
21	S/ 63.213,89	0,198655748	S/ 12.557,80
22	S/ 65.110,31	0,183940507	S/ 11.976,42
23	S/ 67.063,62	0,170315284	S/ 11.421,96
24	S/ 69.075,53	0,157699337	S/ 10.893,16
25	S/ 71.147,79	0,146017905	S/ 10.388,85
Σ TOTAL			S/ 485.989,65

Fuente: Elaboración propia

Para calcular el valor presente de los CO se utilizó la tasa de descuento del 8%.

Entonces el total de costos en valor presente es S/15 685 989,653, este valor indica lo que realmente cuesta generar la energía, en términos económicos actualizados:

$$\sum CVP = S/ 15 200 000,00 + S/ 484 989,65$$

$$\sum CVP = S/ 15 685 989,653$$

Luego, para encontrar la EGVP se consideró que la central generará aproximadamente 4 799 122,784 kWh al año durante 25 años, entonces el valor presente es:

Tabla 27: Valor presente de la energía generada

Año	Energía generada (EG)	Factor de descuento 8%	Valor presente de la EG
1	4 799 122,784	0,925925926	4 443 632,207
2	4 799 122,784	0,85733882	4 114 474,266
3	4 799 122,784	0,793832241	3 809 698,395
4	4 799 122,784	0,735029853	3 527 498,513
5	4 799 122,784	0,680583197	3 266 202,327
6	4 799 122,784	0,630169627	3 024 261,414
7	4 799 122,784	0,583490395	2 800 242,05
8	4 799 122,784	0,540268885	2 592 816,713
9	4 799 122,784	0,500248967	2 400 756,216
10	4 799 122,784	0,463193488	2 222 922,422
11	4 799 122,784	0,428882859	2 058 261,502
12	4 799 122,784	0,397113759	1 905 797,687
13	4 799 122,784	0,367697925	1 764 627,488
14	4 799 122,784	0,340461041	1 633 914,341
15	4 799 122,784	0,315241705	1 512 883,649
16	4 799 122,784	0,291890468	1 400 818,193
17	4 799 122,784	0,270268951	1 297 053,883
18	4 799 122,784	0,250249029	1 200 975,817
19	4 799 122,784	0,231712064	1 112 014,646
20	4 799 122,784	0,214548207	1 029 643,19
21	4 799 122,784	0,198655748	953 373,3245
22	4 799 122,784	0,183940507	882 753,0782
23	4 799 122,784	0,170315284	817 363,9613

24	4 799 122,784	0,157699337	756 818,4827
25	4 799 122,784	0,146017905	700 757,8543
TOTAL			51 229 561,62

Fuente: Elaboración propia

Para calcular el valor presente de la energía generada se consideró un factor de descuento del (8%), encontrando que al sumar los valores presentes de energía generada (EGVP) se obtiene 51 229 561,62 kWh.

Entonces el valor del LCOE es

$$LCOE = \frac{\sum CVP}{\sum EGVP} = \frac{S/ 15 685 989,653}{51 229 561,62 \text{ kWh}}$$

$$LCOE = S/ 0,30 /kWh$$

$$LCOE = 30 \text{ ctm } S//kWh$$

Este costo representa el precio al que se tendría que vender cada kWh de electricidad generada por la central de chimenea solar para cubrir todos los costos durante la vida útil del proyecto, considerando el valor del dinero en el tiempo. Como se observa el LCOE calculado fue 30 ctm S//kWh, este monto se encuentra por encima del precio promedio ponderado del mercado en barra para usuarios en Perú (24,58 ctm S//kWh) [66], sin embargo, la desventaja es mínima. Además, las cementeras a gran escala como la que nos enfocamos en el presente estudio es considerado un usuario libre, se debe tener en cuenta que los precios regulados pueden aumentar con el tiempo y que el LCOE incorpora costos estables a largo plazo. Además, al ser una tecnología renovable con baja operación y mantenimiento, sin consumo de combustibles y con vida útil que supera los años evaluados, el proyecto asegura beneficios económicos y refuerza la sostenibilidad de la empresa, mejorando su independencia energética y lo ubica como referente ambiental en el sector industrial del Perú.

V.CONCLUSIÓN

- La ubicación seleccionada de la empresa cementera se encuentra en el distrito 26 de Octubre ($5^{\circ}11'59''\text{S}$ $80^{\circ}35'59''\text{O}$), la cual presentó condiciones meteorológicas óptimas para la instalación de una central de chimenea solar, con altos niveles de irradiación horizontal global 3,50-6,42 kWh/m² e irradiación horizontal difusa 1,16-2,58 kWh/m², y una zona climática 1B-Muy caliente-Seca característico de la región, los cual garantiza un buen rendimiento para central de chimenea solar.
- La demanda total de la empresa cementera ubicada en Piura asciende a 8 MW. Esta investigación demostró que se puede obtener una potencia de 547,845 kW valor que supera al objetivo planteado y que equivale aproximadamente al 6,5% de la demanda total de la cementera.
- El diseño de la central de chimenea solar fue basado en criterios de eficiencia y durabilidad utilizando los métodos de diseño conceptual de Palh y Beitz, así como los lineamientos de Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger. Para la selección de materiales usó el software Granta EduPack, en base a artículos científicos indizados en Scopus lo cual permitió seleccionar al concreto/hormigón negro y vidrio templado, reconocidos por su resistencia térmica y estructural. Con esta información se dimensionó una central de chimenea solar, el cual tuviera las siguientes medidas, 200 m de altura y un colector de radio de 200 m, además, se optimizó la geometría diseñando una chimenea de forma divergente y un colector ligeramente inclinado, lo que garantizó un flujo aire ascendente continuo y estable, mejorando la eficiencia térmica de todo el sistema.
- Se evaluó el comportamiento del flujo de aire dentro de la central a través de simulaciones CFD demostrando que el comportamiento del flujo de aire dentro de la central es adecuado, con velocidades que están entre los 0 m/s a 10,203 m/s en la chimenea, con una temperatura 302,041 K en mayor proporción y una presión máxima de 8,760 Pa en la base de la chimenea, que aseguró el efecto de convección que impulsó el flujo de aire caliente hacia arriba, favoreciendo la conversión de energía térmica en energía cinética y eléctrica, lo que permitió generar 547,845 kW de potencia, superando ligeramente el objetivo inicial.

- La evaluación económica indica que el proyecto es viable, con un Valor Presente Neto (VPN) DE S/ 23 334 272,70 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 20,92% anual, superior a la tasa de descuento, además, se tuvo una relación Beneficio-Costo de S/3,37. Esto indica que por cada sol invertido hay una utilidad de 2,37 soles, adicionalmente, el Costo nivelado de energía (LCOE) se estimó en 30 ctm S//kWh, siendo competitivo frente a los precios de energía vigentes en el sistema eléctrico peruano. Esto demuestra que la central de chimenea solar es rentable y representa una solución sostenible y eficiente para diversificar la matriz energética de la industria cementera.

VI.RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio de optimización geométrica de la central de chimenea solar, variando parámetros como la altura de la chimenea y el radio del colector, para maximizar la eficiencia y potencia de salida en diferentes condiciones climáticas
- Implementación de materiales compuestos en el colector solar para mejorar la absorción térmica y la durabilidad del sistema, potencialmente aumentando la eficiencia global de la central.
- Desarrollar un modelo matemático de predicción de rendimiento a largo plazo que incorpore variaciones estacionales y cambios climáticos, permitiendo una planificación más precisa de la producción energética y mantenimiento preventivo.
- Integración de sistemas de almacenamiento de energía térmica en la central de chimenea solar para estabilizar la producción eléctrica durante períodos de baja radiación solar, mejorando así la confiabilidad y constancia del suministro energético.

REFERENCIAS

- [1] E. Morse, «Nonrenewable Energy,» National Geographic Society, 10 Agosto 2023. [En línea]. Available: <https://education.nationalgeographic.org/resource/non-renewable-energy/>.
- [2] T. Brown, «Nonrenewable Resources,» National Geographic Society, 20 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://education.nationalgeographic.org/resource/nonrenewable-resources/>.
- [3] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riesgo, «La energía eléctrica,» Ministerio de Desarrollo Agrario y Riesgo, 12 Febrero 2021. [En línea].
- [4] iAgua, «Las hidroeléctricas contaminan cuatro veces más de lo estimado, según un estudio de IC3 e INPA,» iAgua, 25 Octubre 2011. [En línea]. Available: <https://www.iagua.es/2011/07/las-hidroelectricas-contaminan-cuatro-veces-mas-de-lo-estimado-segun-estudio-de-ic3-e-inpa#:~:text=Seg%C3%BAn%20el%20IC3%2C%20las%20condiciones,que%20el%20di%C3%B3xido%20de%20carbono..>
- [5] Fundación Endesa, «Central térmica convencional,» Fundación Endesa, 2023. [En línea]. Available: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educacion/recursos/centrales-electricas-convencionales/central-termica-convencional#:~:text=Las%20centrales%20t%C3%A9rmicas%20convencionales%2C%20tambi%C3%A9n,ciclo%20termodin%C3%A1mico%20de%20agua%20vapor..>
- [6] H. Ritchie, M. Roser y P. Rosado, «Energy,» Our World in Data, 2016. [En línea].
- [7] Global Energy Monitor, «Perfil energético: Perú,» Global Energy Monitor, Julio 2022. [En línea]. Available: https://www.gem.wiki/Perfil_energ%C3%A9tico:_Per%C3%BA.
- [8] Expansión Datos Macro, «Perú - Emisiones de CO₂,» Expansión Datos Macro, 2021. [En línea]. Available: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/peru#:~:text=En%20Per%C3%BA%20se%20incrementan%20las%20emisiones%20de%20CO2>

20de%20CO2&text=Las%20emisiones%20de%20CO2%20en%202021%20han%20si do%20de%2055%2C144,de%20menos%20a%20m%C3%A1s%20contam.

- [9] J. Bautista, Y. Sierra y J. Bermeo, «Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en las Instituciones de Educación Superior,» *Producción Limpia*, vol. 17, n° 1, pp. 169-186, 2022.
- [10] J. Qusay, M. Wahby y N. Mohammed, «Photovoltaic Solar Chimney System: A Review,» *Journal of Global Scientific Research in Mechanical and Materials Engineering*, vol. 7, n° 6, pp. 2358-2396, 2022.
- [11] Neural Concept, «Applying Machine Learning in CFD to Accelerate Simulation,» Neural Concept, 2023. [En línea].
- [12] N. Biswas, D. Kumar, S. Bose, N. Manna y A. Benim, «Experimental Treatment of Solar Chimney Power Plant—A Comprehensive Review,» *Energies*, vol. 16, n° 17, p. 6134, 2023.
- [13] IRENA, Rise of renewables in cities: Energy solutions for the urban future (Auge de as energías renovables en las ciudades: soluciones energéticas para el futuro urbano), Abu Dhabi: Agencia Internacional de Energías Renovables, 2020.
- [14] S. Ghorai, R. Chandra y T. Choudhury, «Comparative Analysis of Solar Chimney Power Plant Chimney Design: Performance Evaluation and Material Cost Comparison,» *International Journal for Multidisciplinary Research*, vol. 5, n° 6, pp. 1-27, 2023.
- [15] Swissinfo, «Ministro de Energía de Perú afirma que el país necesita diversificar la matriz energética,» Swissinfo, 04 Octubre 2024. [En línea].
- [16] H. Suad, A.-b. Hussein, H. Ishak y V. Dhinakaran, «CFD Simulation of a 3D Solar Chimney Integrated with an Axial Turbine for Power Generation,» *Energies*, vol. 14, n° 18, p. 5771, 2021.
- [17] P. M. Cuce, H. Sen y E. Cuce, «Güneş Bacası Güç Santrallerinde Kule Çapının Çıkış Gücüne Etkisi,» *Gazi Akademik Yayıncılık*, vol. 7, n° 3, pp. 253-263, 2021.

- [18] P. M. Cuce, H. Sen y E. Cuce, «Impacts of Collector Radius and Height on Performance Parameters of Solar Chimney Power Plants: A Case Study for Manzanares, Spain,» *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 2, n° 2, pp. 83-104, 2021.
- [19] A. Mohammed , K. Zoltan y B. Janos, «Modelling and simulation of solar chimney power plants in hot and arid,» *International Journal of Thermofluids*, 2023.
- [20] K. Vasquez, «Estudio de los parámetros climáticos para generar energía mediante la chimenea solar en el distrito de Tres de Diciembre - Junin,» Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2019.
- [21] D. Velazco y J. Butler, «Desarrollo de un modelo experimental de una chimenea solar-eólica para suministro eléctrico,» *Tecnia*, vol. 32, n° 1, pp. 13-27, 2022.
- [22] A. Atia, S. Bouabdallah, B. Ghernaout, M. Teggat y T. Benchatti, «Investigation of various absorber surface shapes for performance improvement of solar chimney power plant,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 235, 2023.
- [23] L. Zuo, L. Huang, P. Dai, Y. Chen, S. Chen, S. Liu y Y. Ge, «Experimental research on night heat loss and dust effect of distillation-solar chimney power plant,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 234, 2023.
- [24] H. Xue y M. Esmailpour, «Power generation using solar energy: The effect of curved-guide vanes on the performance of a turbine in a solar chimney power plant,» *Solar Energy*, vol. 247, pp. 468-484, 2022.
- [25] E. Cuce, P. Mert, S. Carlucci, H. Sen, K. Sudhakar, M. Hasanuzzaman y R. Daneshzarian, «Solar Chimney Power Plants: A Review of the Concepts, Designs and Performances,» *Sustainability* , vol. 14, n° 3, p. 1450, 2022.
- [26] A. Dhahri, A. Omri y J. Orfi, «Numerical Study of a Solar Chimney Power Plant,» *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 8, n° 18, pp. 1953-1956, 2014.

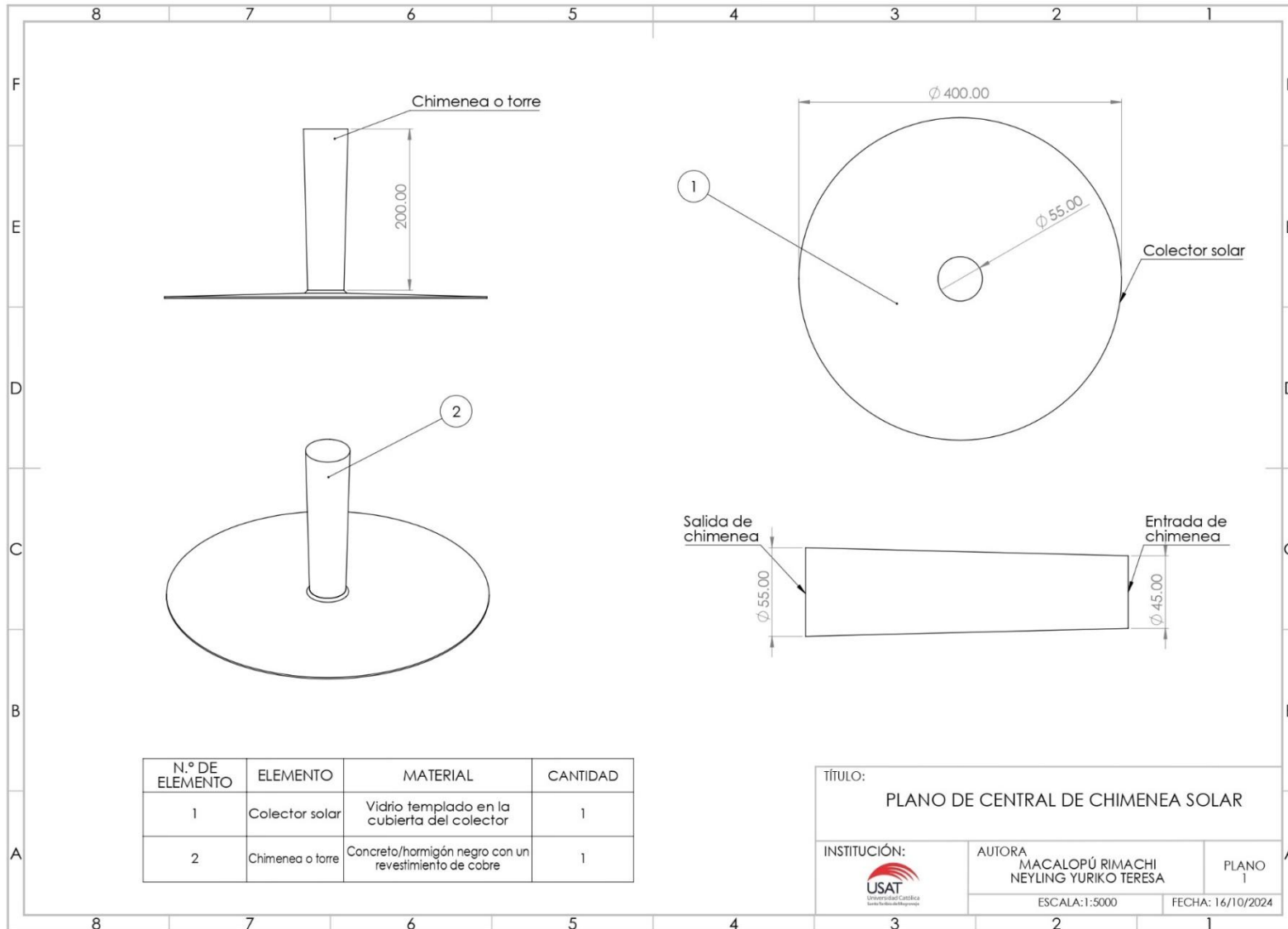
- [27] V. Backström, R. Harte, R. Hoffer, W. Kratzig, D. Kroger, H. Niemann y G. Zijil, «State and Recent Advances in Research and Design of Solar Chimney Power Plant Technology,» *VGB PoweTech*, vol. 88, 2008.
- [28] A. EI-Ghonemy, «Solar chimney power plant without collector,» *OSR J. Electron. Commun. Eng.*, vol. 11, pp. 67-76, 2016.
- [29] Universidad Johns Hopkins, «Renewable Energy vs Sustainable Energy: What's the Difference?,» Universidad Johns Hopkins, 2 Julio 2021. [En línea]. Available: <https://energy.sais.jhu.edu/articles/renewable-energy-vs-sustainable-energy/>.
- [30] Routledge , «What is Sustainable Energy and Why Do We Need It?,» Routledge Taylor & Francis Group, 24 Marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.routledge.com/blog/article/what-is-sustainable-energy-and-why-do-we-need-it#:~:text=Sustainable%20energy%2C%20such%20as%20wind,change%20and%20polluting%20our%20earth..>
- [31] A. Turgeon y E. Morse, «Solar Energy,» National Geographic Society, 19 Octubre 2023. [En línea]. Available: <https://education.nationalgeographic.org/resource/solar-energy/>.
- [32] I. Ravelo y V. Silvera, «Análisis de las aplicaciones matemáticas existentes para un sistema de generación de energía eléctrica utilizando tecnología tipo chimenea,» Corporación Universitaria de la Costa CUC, Barranquilla, 2011.
- [33] J. Conesa, «Mecanismos de transferencia de calor,» Universidad de Alicante, 2013.
- [34] N. Opie, «The importance of solar irradiance and meteorological data for PV design,» Rated Power, 2022. [En línea]. Available: <https://ratedpower.com/blog/solar-irradiance-meteorological-data/>.
- [35] Solar Anywhere, «Definitions,» Solar Anywhere, 2023. [En línea]. Available: <https://www.solaranywhere.com/es/support/data-fields/definitions/>.
- [36] Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia, «La energía sostenible: una guía para jóvenes,» UNICEF, Nueva York, 2022.

- [37] A. Cubillos y F. Estenssoro, *Energía y medio ambiente. Una ecuación difícil para América Latina : los desafíos del crecimiento y desarrollo en el contexto del cambio climático*, Santiago de Chile: Colección Idea, 2011.
- [38] S. Rovira, J. Patiño y M. Schaper, *Ecoinnovación y producción verde*, Santiago: CEPAL, 2017.
- [39] Clou Electronics, «¿Qué es la medición de demanda máxima?,» Clou Electronics, 2022. [En línea]. Available: <https://clouglobal.com/es/que-es-la-medicion-de-demanda-maxima/>.
- [40] Energía Colectiva, S.L, «¿Qué es la potencia demandada?,» Pepe energy, 2020. [En línea]. Available: <https://www.pepeenergy.com/blog/glosario/definicion-potencia-demandada/>.
- [41] J. Parker, «What is Energy Demand?,» Autocase, 6 Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://autocase.com/what-is-energy-demand/#:~:text=Well%2C%20energy%20demand%20is%20a,consumed%2025%20kWh%20of%20electricity..>
- [42] J. T. W. Twidell, *Renewable Energy Resources*, USA: Taylor & Francis, 2006.
- [43] J. H. Ferziger y M. PeriC , *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Stanford: Springer , 2002.
- [44] H. Howard, «Chapter 10 - Computational Fluid Dynamics,» *Fluid Mechanics (Fifth Edition)*, pp. 421-472, 2012.
- [45] L. Meneses, L. Díaz y G. González, «Dinámica de fluidos computacional en el análisis de intercambiadores de calor de coraza y tubos,» *Revista UIS Ingenierías*, vol. 18, n° 2, pp. 237-244, 2019.
- [46] D. Sofialidis, «Boundary Conditions and Solver Settings,» ANSYS, 2013.
- [47] SIMSCALE, «What Are the Navier-Stokes Equations?,» SIMSCALE, 2020. [En línea]. Available: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/numerics-background/what-are-the-navier-stokes->

- [59] E. Manely, K. Rainer y K. Ulrich, «Computational Fluid Dynamics,» *Comprehensive Biotechnology (Third Edition)*, vol. 2, pp. 95-107, 2019.
- [60] A. Bouhdjar, H. Semai y S. Larbi3, «Solar Chimney Power Plant with Heat Storage Analysis in the South Region of Algeria,» In Proceedings of the 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Marrakech, Morocco, 2015.
- [61] A. Emad, A. Tarifas, K. Feras, A. Eyad, T. Muhammad, K. Asma, H. Dareen, O. Abdullah y A. Malek, «A New Sustainable and Novel Hybrid Solar Chimney Power Plant Design for Power Generation and Seawater Desalination,» *Sustainability*, vol. 13, n° 21, 2021.
- [62] E. Cuce, A. Saxena, P. M. Cuce, H. Sen, S. Guo y K. Sudhakar, «Performance assessment of solar chimney power plants with the impacts of divergent and convergent chimney geometry,» *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 16, n° 3, pp. 704-714, 2021.
- [63] A. Mebarki, A. Sekhri, A. Assassi, A. Hanafi y B. Marir, «CFD analysis of solar chimney power plant: Finding a relationship between model minimization and its performance for use in urban areas,» *Energy Reports*, vol. 8, pp. 500-513, 2022.
- [64] R. Sangi, M. Amidpour y H. Behzad, «Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants,» *Solar Energy*, vol. 85, n° 5, pp. 829-838, 2011.
- [65] M. Tingzhen , K. Renaud , M. Fanlong , P. Yuan y L. Wei , «Chimney shape numerical study for solar chimney power generating systems,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*, 2011.
- [66] Osinergmin, «Cálculo de Precios a Nivel Generación y Mecanismo de Compensación entre Usuarios Regulados del SEIN periodo febrero – abril 2025,» Organismo de Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, Lima, 2025.
- [67] M. J. Saleh , F. Atallah, S. Algburi y O. Ahmed, «Enhancement methods of the performance of a solar chimney power plant: Review,» *Results in Engineering*, vol. 19, p. 101375, 2023.

Anexos

Anexo 1. Plano de central de chimenea solar



Anexo 2. Ficha técnica de PK500



WIND SAIL ENERGY

226-377-5633
windsailenergy.com

500kw

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

Performance

Rated Power	500kW
Max Power	600kW
Rated Wind Speed	12m/s
Cut-In Speed	2m/s
Cut-Out Speed	25m/s
Survival Wind Speed	60m/s

Physical Parameters

Mill Diameter	30m
Mill Height	20m
Mill Weight	80 ton
Blade Number	6
Blade Material	FRP
Tower Height & Weight	25m
Tower Style	Truss Structure

Generator Parameters

Type	PMG 3 Phase
Rated Voltage	AC 690V
Rated Current	AC 418.8A

Protection & Braking System

Speed Control Style	Active Hydraulic Pitch Control
Brake Style	Automatic Press Air Brake
Protection Level	IP54
Remote Monitoring System	

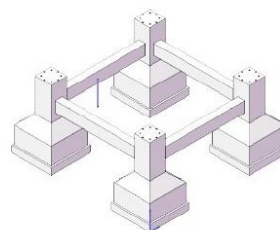
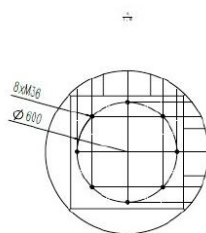
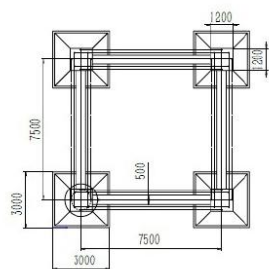
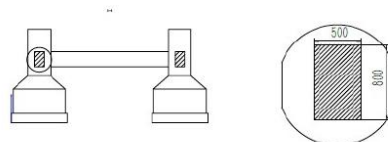
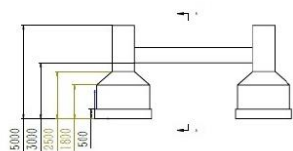
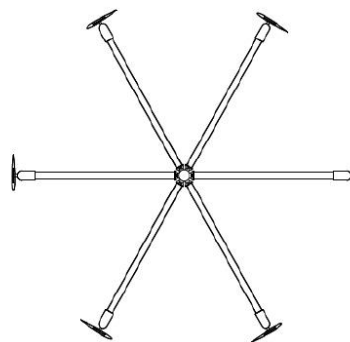
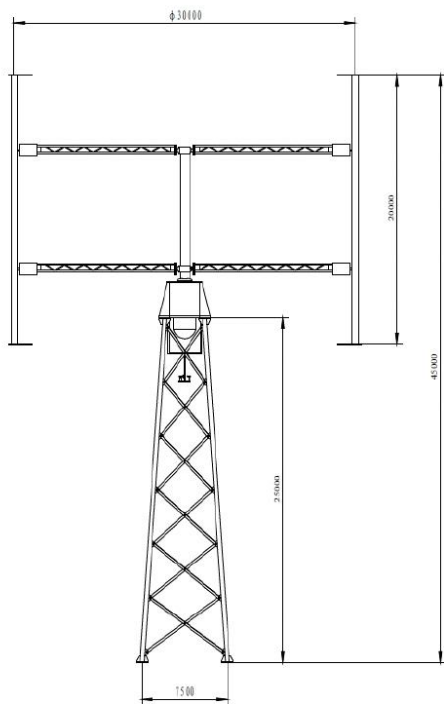


Advantages

- Nearly Quiet
- Birds Friendly
- More Safety Features
- Wonderful Performance at Lower Wind Speed
- Captures Wind from All Directions
- Higher Efficiency
- Longer Working Life
- Less Maintenance
- Less Requirements on Foundation
- Lower Supporting Tower



500kw structure & Foundation





WIND SAIL ENERGY

226-377-5633
windsailenergy.com

500kw Annual power generation at different average wind speed

Average Wind Speed(m/s)	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>7</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>10</u>
Production (kWh)	44,000	140,000	313,000	572,000	902,000	1,271,000	1,643,000	1,991,000	2,292,000

Protected by US Patents 7967569; 8272840; 8322035; 8390142; 8496433; 8567038; EU Patents 2098726; 2039929
Korea Patents 10-1039915; 10-1115740; 10-1296785 and China patents