

IMEC2001 Herramientas Computacionales

Proyecto: Modelamiento Energía Eólica

1. INTRODUCCIÓN

La conciencia colectiva respecto a temas ambientales está fomentando iniciativas que incentivan la sostenibilidad energética. Por esta razón, la industria de energía está migrando del uso de recursos fósiles no renovables hacia fuentes limpias que impliquen un impacto medioambiental mínimo, tanto en su generación como en su posterior uso. Este cambio de pensamiento se ratifica al observar la evolución del consumo energético mundial por fuente de generación, donde las energías renovables tienen el mayor índice de crecimiento (12%, aproximadamente) a comparación de las fuentes tradicionales, según el boletín International Energy Outlook 2020 de U.S. Energy Information Administration (EIA) [1].

Modelar computacionalmente un parque eólico permite realizar un análisis tecnológico, económico y de desempeño eficiente. Además, la información proveniente de los modelos computacionales se puede proporcionar de tal manera que es aceptada en las industrias técnicas y financieras, debido a la trazabilidad de los algoritmos [1].

2. OBJETIVOS

Alineados a los objetivos de aprendizaje del curso, el proyecto busca:

- Desarrollar habilidades pertinentes a la implementación de algoritmos computacionales para la solución de problemas de ingeniería.
- Solucionar problemas de ingeniería mediante la utilización de herramientas computacionales de alto nivel utilizando librerías numéricas existentes y plataformas interactivas de programación.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto consiste en **desarrollar un algoritmo computacional que permita modelar un parque eólico** en términos de las variables de entrada (meteorológicas y técnicas) y las variables de respuesta (parámetros de operación), así como evaluar los resultados. Cada pareja de estudiantes debe explorar y utilizar herramientas computacionales modernas para desarrollar un algoritmo ejecutable.

El desarrollo computacional no debe limitarse únicamente con el lenguaje de preferencia del curso, Python. También se invita el uso de aquellas que se manejan en el día a día de la carrera (por ejemplo, Microsoft Excel o MATLAB). Además, se contribuye al desarrollo de código abierto de proyectos.

Estos desarrollos usualmente son valorados por la comunidad en un proceso de evaluación de requisitos y requerimientos (por ejemplo, documentación, entendimiento del algoritmo,

desempeño) para, de esta manera, evaluar la calidad de los trabajos que los autores remiten para su publicación.

Nota: Cada ítem no desarrollado se penaliza con -0.5 en la nota final del proyecto (obtenida a partir de las matrices de calificación).

4. DESARROLLO Y MARCO TEÓRICO

4.1. Planteamiento del Problema

Se dispone de un área de 6 x 1.5 km (Figura 1) en donde se quiere instalar un parque eólico que genere la mayor cantidad de energía eléctrica y, en consecuencia, el mayor ahorro económico posible. El área está dividida en una cuadrícula con el fin de ubicar cada aerogenerador en el centro de cada espacio, el cual es de 1200 x 500 m. Se dispone de nueve aerogeneradores a instalar y su distribución espacial debe ser tal que garantice la mayor generación de energía eléctrica. El aerogenerador escogido es el Enercon E92, el cual tiene una generación de potencia a condiciones óptimas (es decir, potencia nominal) de 2350 kW. Estudios demuestran que el viento libre incide desde el sur (luego, los aerogeneradores miran hacia el sur) e impacta con la misma velocidad a los cinco espacios de la fila inferior de la cuadrícula.

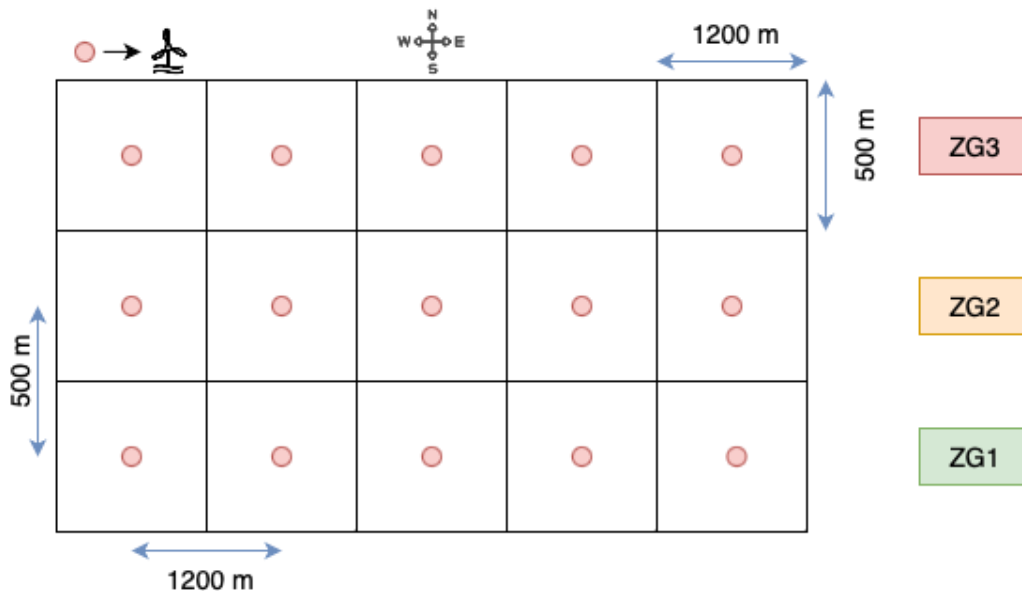


Figura 1. Área disponible para instalación del parque eólico.

Ítem 1

A partir del espacio libre dispuesto y de la cantidad de aerogeneradores disponibles:

1. Realice una optimización para definir la distribución espacial de los nueve aerogeneradores tal que la generación de energía eléctrica esperada sea la

mayor posible. La disposición de los aerogeneradores es libre (es decir, pueden instalarse en cualquier espacio de la cuadrícula). Para esto tenga en cuenta:

- La generación de energía eléctrica es mayor si el aerogenerador produce la potencia nominal.
 - Asuma que en la fila inferior, denominada Zona Generación 1 (ZG1), los aerogeneradores operan al 100% de la potencia nominal.
 - Asuma que en la fila intermedia, denominada Zona Generación 2 (ZG2), los aerogeneradores operan al 85% de la potencia nominal.
 - Asuma que en la fila superior, denominada Zona Generación 3 (ZG3), los aerogeneradores operan al 70% de la potencia nominal.
 - Debe haber al menos un aerogenerador y máximo 4 en la fila inferior (ZG1).
 - Debe haber al menos un aerogenerador en la fila intermedia (ZG2).
 - Debe haber al menos dos aerogeneradores en la fila superior (ZG3).
2. Realice un esquemático (similar a la Figura 1) en el que se muestre la disposición propuesta de los aerogeneradores.

Nota: Si el ejercicio de optimización fue realizado con la herramienta Solver de Microsoft Excel, el procedimiento de solución debe indicarse en la memoria de cálculos y el archivo en Microsoft Excel debe ser cargado junto con los entregables en Bloque Neón.

4.2. Procesamiento Datos

La generación de energía eléctrica inicia con la velocidad del viento y la temperatura del ambiente. En el repositorio del curso en GitHub se encuentra esta información en la ruta [project > data > wind > wind.csv](#). Esta información comprende valores de velocidad del viento (unidades de m/s) y temperatura ambiente (unidades de °C) de los años 2015 a 2017 en resolución horaria.

Ítem 2

Realice los siguientes procesamientos a los datos (velocidad del viento y temperatura ambiente):

1. Asignar a cero los datos faltantes con respecto al tiempo.
2. Los datos de velocidad del viento se igualan a cero cuando la correspondiente temperatura ambiente $\leq 10^{\circ}\text{C}$ y $\geq 27^{\circ}\text{C}$.

4.3. Curvas del Fabricante

La generación de energía eléctrica se define a partir de la potencia obtenida durante la operación del aerogenerador. Matemáticamente, dicha potencia se puede estimar a partir de curvas del fabricante validadas experimentalmente. No obstante, estas relaciones deben

adecuarse a las condiciones meteorológicas de la ubicación en donde los aerogeneradores se instalarán, particularmente a partir de la densidad a la altura del rotor de los aerogeneradores.

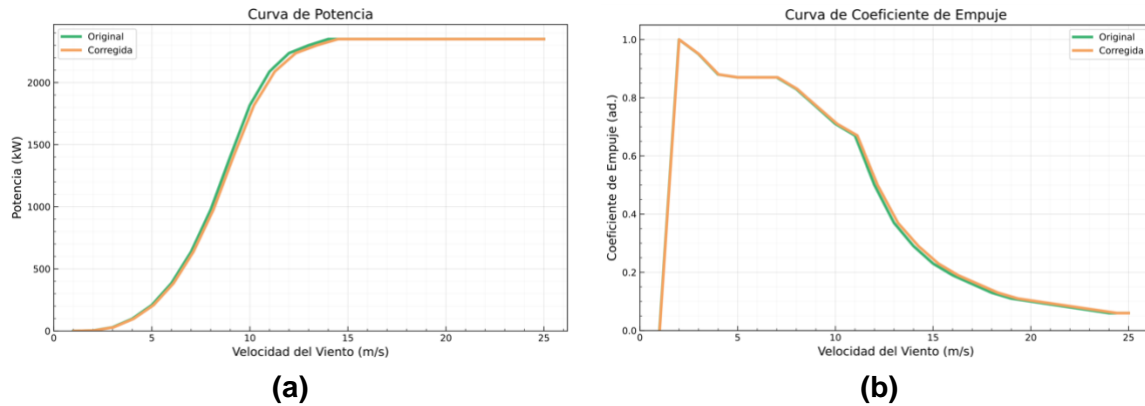


Figura 2. (a) Curva del fabricante que relaciona la velocidad del viento y la potencia. **(b)** Curva del fabricante que relaciona la velocidad del viento y el coeficiente de empuje.

En el repositorio del curso en GitHub se encuentran estas gráficas en la ruta [project > data > wind > curva_potencia.pdf](#) y [project > data > wind > curva_coeficiente_empuje.pdf](#).

Ítem 3

A partir de las curvas del fabricante:

1. Realice un interpolador de grado cúbico a partir de la curva del fabricante de coeficiente de empuje corregida.
2. Realice un interpolador de grado cúbico a partir de la curva del fabricante de potencia corregida.

4.4. Velocidad Incidente

Una vez se conoce la distribución espacial de los aerogeneradores, se debe estimar la velocidad incidente en cada aerogenerador. Para la generación de energía eléctrica a partir de aerogeneradores, la velocidad del viento es el recurso primario.

La velocidad del viento inicial que actuará sobre aerogeneradores ubicados en la fila ZG1 es la velocidad incidente libre. Para conocer la velocidad del viento incidente en las filas posteriores (es decir, aguas abajo en las filas ZG2 y ZG3), se emplea el modelo de estela de Jensen.

$$V(x) = V_0 \left[1 - \frac{2a}{\left(1 + \frac{2kx}{D}\right)^2} \right] \quad (\text{Ec. 1})$$

$$a = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{1 - C_{th}}) \quad (\text{Ec. 2})$$

Siendo:

- $V(x)$ la velocidad del viento en función de una distancia x . Es la velocidad del viento incidente en el aerogenerador ubicado detrás (también llamado a aguas abajo o sotavento).
- V_0 la velocidad incidente en el aerogenerador ubicado adelante (también llamado a aguas arriba o barlovento).
- a el factor de inducción axial (Ecuación 2). Físicamente representa la reducción de velocidad del viento cuando este atraviesa el aerogenerador.
- k es la tasa de crecimiento de la estela, equivalente a 0.04 para los aerogeneradores ubicados en ZG1 y 0.08 para los aerogeneradores ubicados en ZG2 y ZG3.
- x la distancia entre pares de aerogeneradores.
- D el diámetro del rotor del aerogenerador, equivalente a 92 metros.
- C_{th} el coeficiente de empuje determinado a partir de la curva del fabricante.

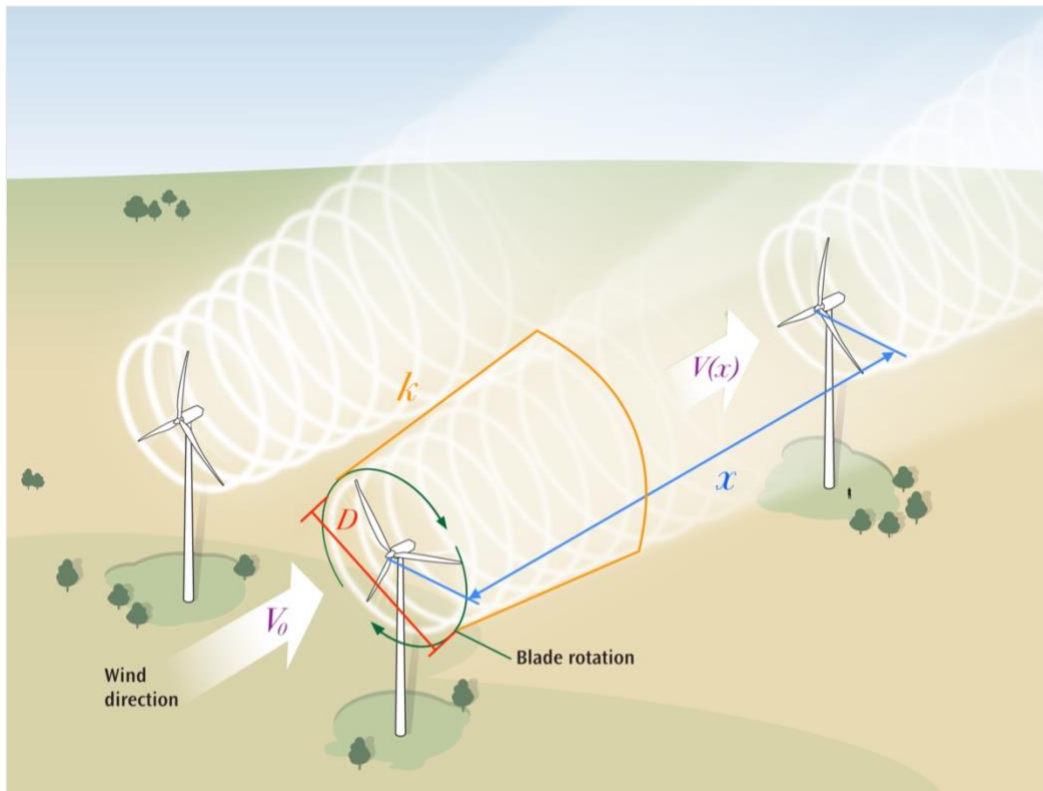


Figura 3. Esquemático de parque eólico y modelo de estela de Jensen. Adaptado de [OffshoreWind](#).

Ítem 4

Estime la velocidad del viento incidente para cada uno de los aerogeneradores que componen el parque eólico para cada estampa de tiempo horaria de los años 2015 a 2017. Para esto, tenga en cuenta:

1. La disposición de los aerogeneradores realizado en el Ítem 1.
2. La velocidad del viento incidente en los aerogeneradores de la fila ZG1 es la velocidad del viento libre del archivo [GitHub > project > data > wind > wind.csv](#).
3. La velocidad del viento incidente en los aerogeneradores de la fila ZG2 se estima con la Ecuación 1 y la Ecuación 2. V_0 es la velocidad incidente en los aerogeneradores de la fila ZG1.
4. La velocidad del viento incidente en los aerogeneradores de la fila ZG3 se estima con la Ecuación 1 y la Ecuación 2. V_0 es la velocidad incidente en los aerogeneradores de la fila ZG2.
5. El valor del coeficiente de empuje C_{th} se estima al evaluar el interpolador realizado en el Ítem 3a con el valor de la velocidad del viento incidente V_0 .

Nota: El resultado de este ítem debe ser un conjunto de datos de dimensiones n filas (estampas de tiempo horaria) y m columnas (aerogeneradores). La información de cada columna indica la velocidad de viento incidente en cada aerogenerador para cada estampa de tiempo horaria de los años 2015 a 2017.

4.5. Potencia AC

Típicamente, para poder aprovechar la potencia eléctrica, esta debe estar en corriente alterna (es decir, potencia AC). La potencia AC se obtiene de un generador ubicado en la parte trasera del rotor (esta ubicación también se conoce como góndola). Matemáticamente, la potencia AC se puede estimar a partir de las curvas del fabricante (adecuadas a las condiciones meteorológicas de la ubicación de interés, si aplica).

El valor del coeficiente de empuje C_{th} se estima al evaluar el interpolador realizado en el Ítem 3 con el valor de la velocidad del viento incidente V_0 .

Ítem 5

1. Estime la potencia AC para cada uno de los aerogeneradores que componen el parque eólico para cada estampa de tiempo horaria de los años 2015 a 2017. La potencia AC se estima al evaluar el interpolador realizado en el Ítem 3b con el valor de la velocidad del viento estimado en el Ítem 4. El resultado debe ser un conjunto de datos de dimensiones n filas (estampas de tiempo horaria) y m columnas (aerogeneradores). La información de cada columna indica la potencia

- AC de cada aerogenerador para cada estampa de tiempo horaria de los años 2015 a 2017.
2. Estime la potencia AC total del parque eólico a partir de la suma de la potencia AC de cada aerogenerador. El resultado de este ítem debe ser un conjunto de datos de dimensiones n filas (estampas de tiempo horaria) y una única columna. Esta columna indica la potencia AC total del parque eólico para cada estampa de tiempo horaria de los años 2015 a 2017.
 3. Por consideraciones ambientales y técnicas del parque eólico, agregue un porcentaje de pérdidas equivalente a 2% a la potencia AC total del parque eólico.
 4. Realice una gráfica en donde relacione la medición de velocidad del viento incidente (la dispuesta en el archivo [GitHub > project > data > wind > wind.csv](#)) y el cálculo de la potencia AC total del parque eólico. ¿Qué interpreta de esta información?

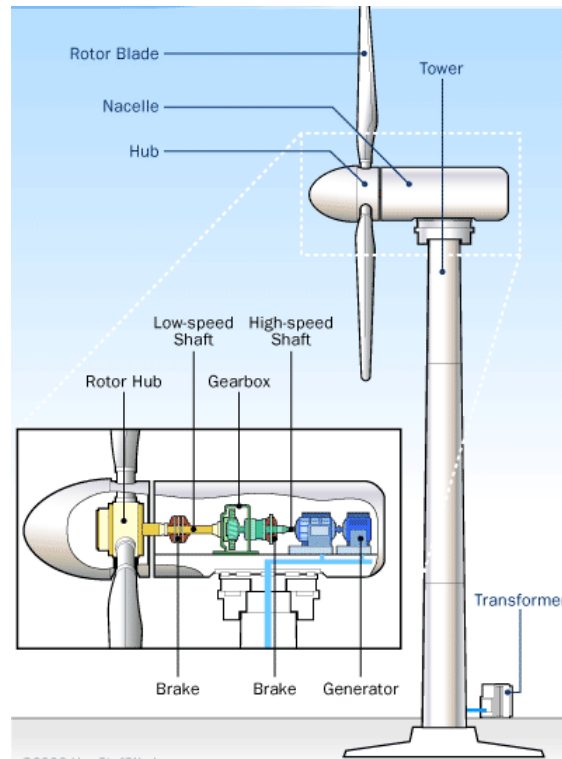


Figura 4. Esquemático de componentes de un aerogenerador. Adaptado de [Tech-Addict](#).

4.6. Energía Eléctrica

Conocida la potencia en corriente alterna, se estima la energía eléctrica producida por el parque eólico a partir de los datos de potencia AC.

$$E = P_{AC} \cdot \frac{t}{60} \quad (\text{Ec. 3})$$

Siendo:

- E la energía eléctrica (en unidades de kWh).
- P_{AC} la potencia AC (en unidades de kW).
- t la resolución de las estampas de tiempo (en unidades de minutos).

El valor de energía eléctrica E obtenida con la Ecuación 3 se interpreta como la energía eléctrica (en kWh) generada en la última hora.

Ítem 6

1. Estime la energía eléctrica para cada estampa de tiempo horaria de los años 2015 a 2017 a partir de la Ecuación 3.
2. Realice una gráfica en donde relacione la medición de velocidad del viento incidente (la dispuesta en el archivo [GitHub > project > data > wind > wind.csv](#)) y el cálculo de E . ¿Qué interpreta de esta información?

4.7. Análisis Financiero

Se debe estudiar la viabilidad financiera del parque eólico. Este estudio debe considerar el tiempo de retorno (Ecuación 4) y el costo nivelado de energía (Ecuación 5), este último conocido como LCoE.

El tiempo de retorno (TR) es la relación entre la inversión inicial y el retorno anual. Para esto, se toma que el precio por unidad de energía eléctrica de 385.44 COP/kWh.

$$TR = \frac{IN}{385.44 \cdot \sum E} \quad (\text{Ec. 4})$$

Siendo IN la inversión inicial, la cual equivale al costo de los aerogeneradores. Asuma que el precio del aerogenerador es de 1.5 millones USD por unidad, y tome la equivalencia de 1 USD corresponde a 4883 COP.

El costo nivelado de energía permite conocer cuánto cuesta producir cada unidad de energía eléctrica.

$$LCoE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{IN + OM + F}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Siendo:

- t el año de estudio.

- n la cantidad de años de estudio (a partir de las estampas de tiempo dadas en los archivos iniciales).
- IN la inversión inicial (numerador de la Ecuación 4).
- OM los gastos en operación y mantenimiento, equivalente a 250000 COP por año.
- F los gastos en fuentes externas, equivalente a 0 COP por año.
- r la tasa de descuento, equivalente a 4%.
- E_t la energía eléctrica del año de estudio t .

Ítem 7

1. Estime el tiempo de retorno a partir de la Ecuación 4. ¿Qué interpreta de esta información?
2. Estime el costo nivelado de electricidad a partir de la Ecuación 5. ¿Qué interpreta de esta información?

5. COMPETENCIAS ABET

El proyecto evalúa el desarrollo de las siguientes competencias:

1. Habilidad para identificar, formular y resolver problemas complejos de ingeniería aplicando principios de ingeniería, ciencias y matemáticas.

1.2. Escoge y aplica modelos cuantitativos, conceptuales y/o cualitativos para la solución de problemas mecánicos o térmicos.

1.3. Resuelve problemas de ingeniería.

6. Habilidad para desarrollar y conducir apropiadamente experimentación, analizar e interpretar datos, y usar el juicio de ingeniería para elaborar conclusiones.

6.3. Analiza e interpreta datos, desarrolla los cálculos necesarios y tabula/gráfica los resultados.

6.4. Elabora conclusiones basadas en datos experimentales y modelos disponibles.

7. Habilidad para adquirir y aplicar nuevo conocimiento según sea necesario, utilizando estrategias de aprendizaje apropiadas.

7.1. Busca e identifica fuentes relevantes de información haciendo uso de los recursos disponibles (libros, internet, journals, estándares, normas técnicas, tutoriales) para adquirir nuevo conocimiento.

7.4. Demuestra la habilidad de aplicar conocimiento adquirido para proponer e implementar una solución a un problema de Ingeniería Mecánica.

6. ENTREGAS

La duración del proyecto es de cuatro (4) semanas. La fecha **domingo 28 de mayo** es el plazo límite para **enviar la carpeta del proyecto en formato P_NombreApellido_NombreApellido.zip** con los entregables solicitados:

1. Documentación y memoria de cálculos.
2. Código ejecutable.
3. Demostración práctica a partir de un video de máximo 10 minutos, explicando el detalle de la solución de los ítems y presentando el código ejecutable. Si algún integrante no está presente, se penaliza con -0.5 en la nota final del proyecto (obtenida a partir de las matrices de calificación).

Nota 1: En Bloque Neón > Contenido > Foros > Proyecto se encuentra el medio centralizado para la resolución de preguntas con el equipo docente. También, se incentiva a que este sea un espacio colaborativo entre todos los integrantes del curso.

Nota 2: Un formato diferente a **P_NombreApellido_NombreApellido.zip** se penaliza con -0.5 en la nota final del proyecto (obtenida a partir de las matrices de calificación).

7. CALIFICACIÓN

La calificación del proyecto tiene en cuenta los valores porcentuales:

Tabla 1. Sistema de evaluación.

Entregable	Peso Porcentual
Documentación y Memoria de Cálculos	35%
Código Ejecutable	40%
Demostración Práctica	25%

8. MATRICES DE EVALUACIÓN

El proyecto se califica con base en las matrices de evaluación Documentación y Memoria de Cálculos, (ii.) Código Ejecutable, y (iii.) Demostración Práctica. Estas rubricas se disponen en Bloque Neón > Contenido > Introducción > Rúbricas, y también en el siguiente enlace: <https://github.com/salazarna/ua-imec2001-hc-202310-s2/tree/main/rubrics>.

9. REFERENCIAS

1. Consejo Nacional de Operación y Universidad de los Andes (2028). Protocolos correspondientes a la resolución 167 de 2017. Bogotá, D.C., Colombia.