

# Aplicaciones Computacionales en Negocios

Análisis y optimización de la performance operativa y económica de molinos de vientos dedicados a la generación de energía eléctrica



## Modelo Matemático del Viento

$$S_{i+1} = S_i + \kappa (\theta(t_i) - S_i)\Delta + \sigma\sqrt{\Delta}Z_i \longrightarrow \text{Representación de la velocidad del viento para los molinos}$$

$$\theta(t_i) = 6 + 2 \cos(2\pi i/365) \longrightarrow \text{Media estacional}$$

$$D_{i+1} = D_i - \beta D_i \Delta + \lambda\sqrt{\Delta}W_i \longrightarrow \text{Evolución de la diferencia del viento entre los molinos del Norte y del Sur}$$



## Parámetros estimados para las simulaciones del viento

A partir de la estructura conocida de  $\theta(t)$ , los datos históricos para el viento regional y la diferencia del viento entre ambos molinos, estimamos  $\kappa$ ,  $\sigma$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  a través de regresiones lineales

Para la velocidad del viento definimos:

$$X = (\theta(t_i) - S_i)\Delta$$

$$Y = S_{i+1} - S_i$$

Para la diferencia entre los molinos definimos:

$$X = D_i\Delta$$

$$Y = D_{i+1} - D_i$$

Utilizamos el error estándar de la regresión para despejar sigma y gamma porque representan la variabilidad que los modelos no pueden explicar (no incluye a Z y W, ya que es una v.a, ruido no predecible)

Estimadores calculados y utilizados para las simulaciones:

$$\kappa = 107.7736$$

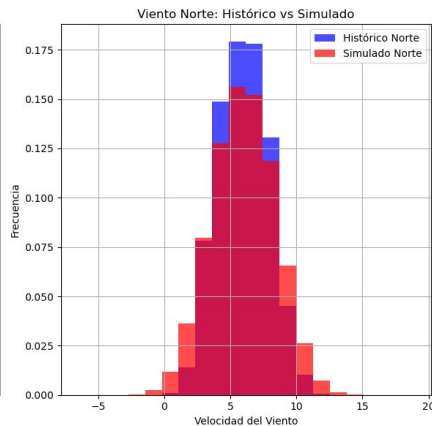
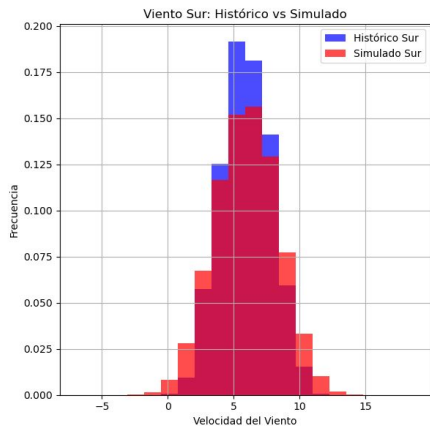
$$\beta = 48.38096$$

$$\sigma = 16.0811$$

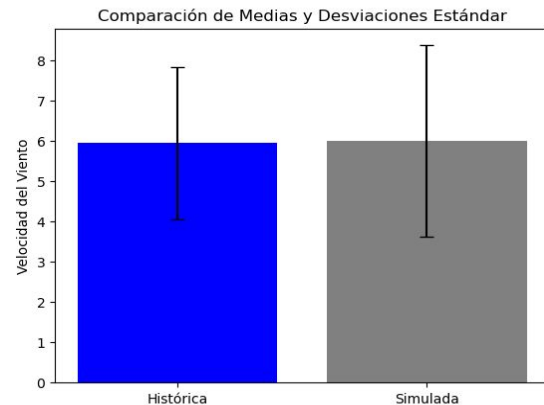
$$\gamma = 10.0934$$



# Validación de Parámetros



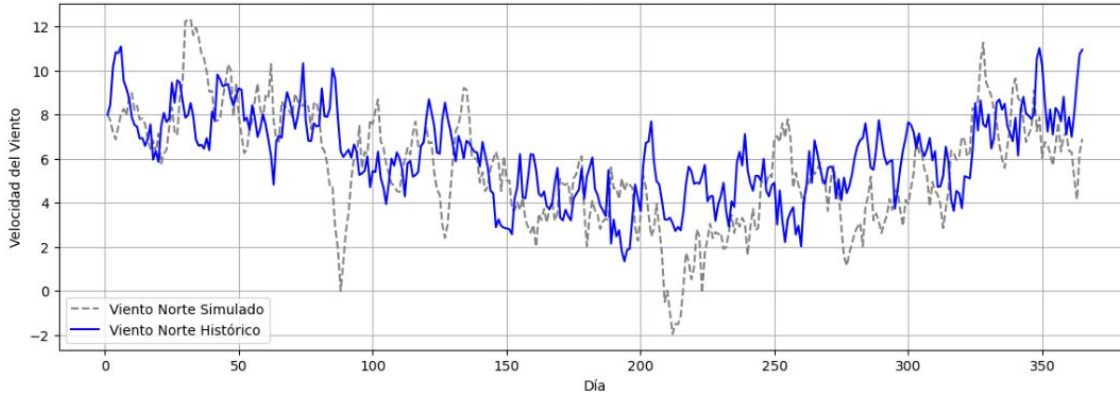
- Ambos presentan una forma acampanada, similar a una distribución normal.
- Datos históricos concentrados alrededor de la media, menor variabilidad y menos extremos.
- Simulaciones, mayor dispersión y valores extremos. Variabilidad debido a su naturaleza aleatoria introducida con los shocks del modelo.



- Medias similares
- Mayor desviación estándar en la Simulación

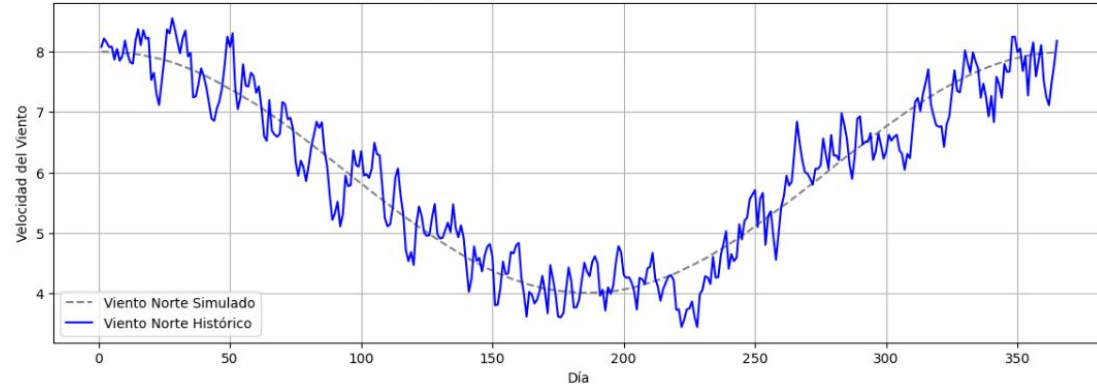
**El modelo captura adecuadamente la estructura básica y la estacionalidad del comportamiento del viento, aunque muestra una tendencia a amplificar los extremos.**

Trayectoria de Viento Norte Simulado vs Viento Histórico de algún año



- Ambas trayectorias muestran un comportamiento cíclico con una tendencia descendente y luego ascendente a lo largo del año.
- Capturan correctamente la estacionalidad del viento.
- Se observan divergencias a corto plazo entre la simulación y los datos históricos.
- Las diferencias reflejan la influencia de shocks aleatorios en la simulación.

Viento Norte simulado vs Viento Norte promedio de 10 años

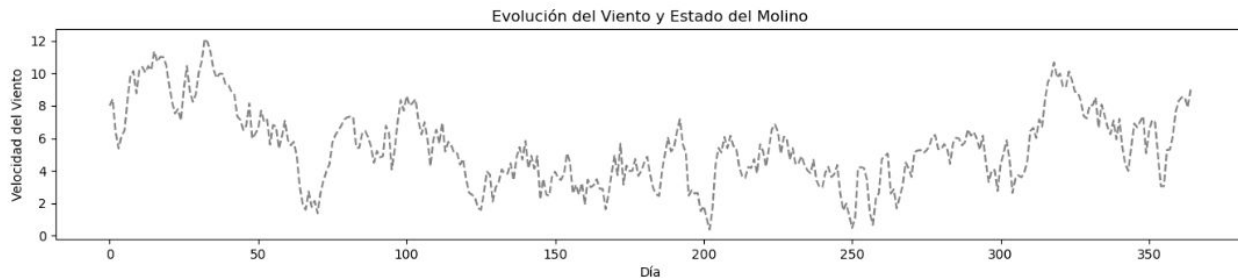


- El promedio de las simulaciones se ajusta bien a los patrones observados en los datos históricos.
- Se concluye que el modelo está correctamente calibrado para capturar la dinámica del viento.
- Esto valida el uso del modelo para simulaciones futuras.
- Variaciones individuales pueden no coincidir exactamente con los datos reales debido a la aleatoriedad del proceso.

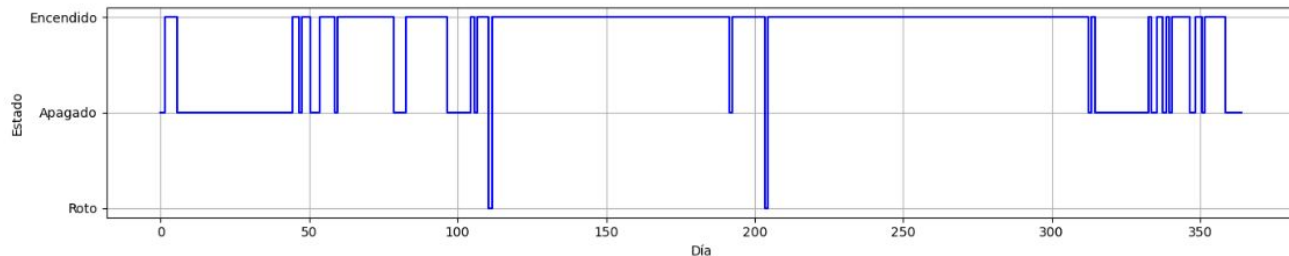


# Simulación de Viento, Estado y Cashflow

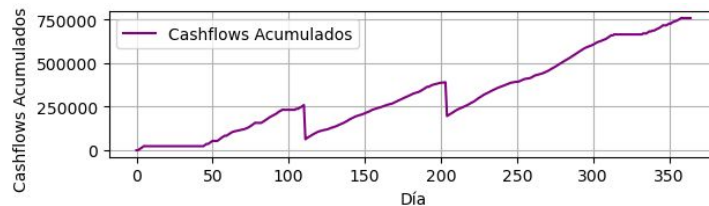
Trayectoria de la evolución del viento del norte



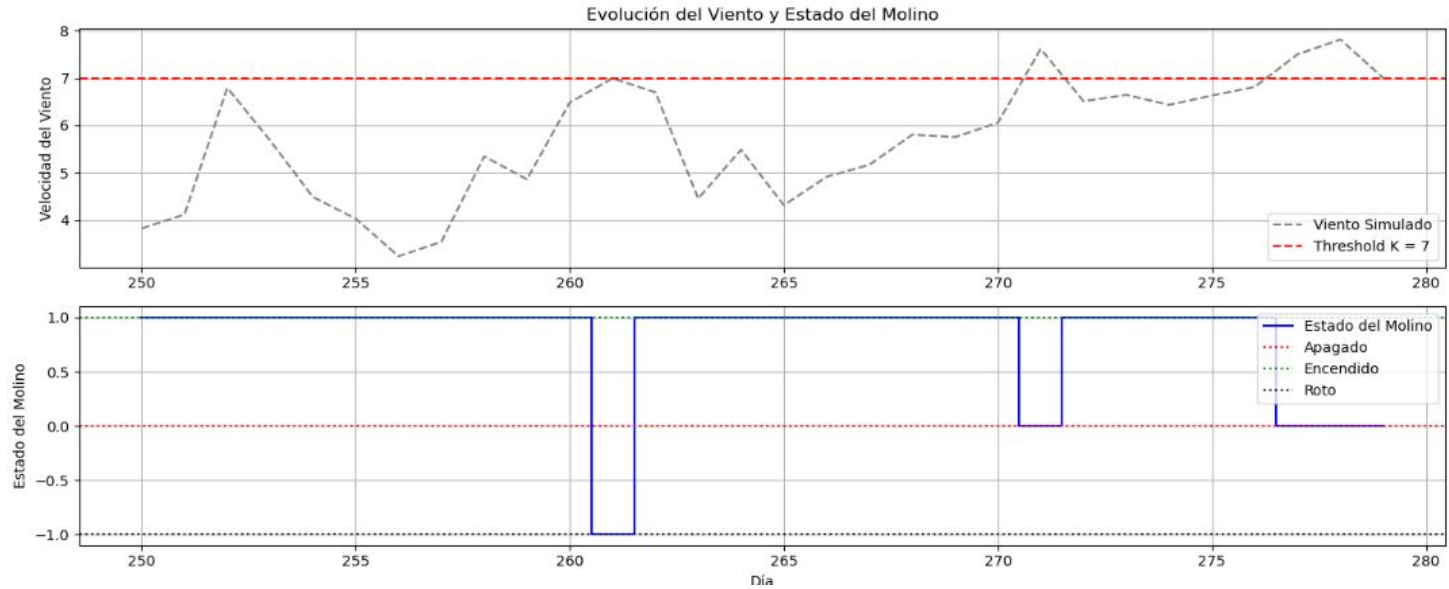
Estados del molino del norte para la trayectoria particular



Acumulacion de Cashflows para el molino del norte en base a sus estados a lo largo del año



# ¿Tiene sentido lo que vemos?





# Estimación del VAN

- $M = 1.000.000$
- $K = 7$

Primer método  
de estimación

$$V\hat{A}N = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M VAN_i$$

- $VAN = 798.840,33$
- Error estándar = 712.5
- IC 95% = (797.443,82, 800.236,85)

Segundo método  
de estimación

$$V\hat{A}N = \frac{1}{2M} \left( \sum_{j=1}^M (VAN_j(Z) + VAN_j(-Z)) \right)$$

- $VAN = 798307.63$
- Error estándar = 502.71
- IC 95% = (797.322,31, 799.292.95)





## Valor óptimo para el umbral de apagado y encendido

```
# Buscar el mejor K
K_values = np.linspace(5, 15, 25) # Rango de valores para K a probar
mejor_VAN_norte = -np.inf
mejor_VAN_sur = -np.inf
mejor_K_norte = None
mejor_K_sur = None

for K in K_values:

    VAN_actual_norte = calcular_VAN_promedio(trayectoria_norte,K, costo)
    VAN_actual_sur = calcular_VAN_promedio(trayectoria_sur,K, costo)
    print(f"VAN para molino norte con K = {K}: {VAN_actual_norte}")
    print(f"VAN para molino sur con K = {K}: {VAN_actual_sur}")
    if VAN_actual_norte > mejor_VAN_norte:
        mejor_VAN_norte = VAN_actual_norte
        mejor_K_norte = K
    if VAN_actual_sur > mejor_VAN_sur:
        mejor_VAN_sur = VAN_actual_sur
        mejor_K_sur = K
```

Implementamos una función para encontrar el k óptimo que maximiza el VAN.

Calculamos, para cada valor de k, el VAN promedio de todas las trayectorias simuladas del Norte y del Sur. Almacenamos el k donde se estimó el mayor VAN promedio.

Luego de la experimentación el k óptimo encontrado fue **K = 7.2** para ambas trayectorias.



## Ganancia con nuestra estrategia vs sin apagar

Para comparar la ganancia entre nuestra estrategia y la estrategia naive, implementamos la misma función que para las simulaciones anteriores, solo que sin tener en cuenta la decisión de apagado

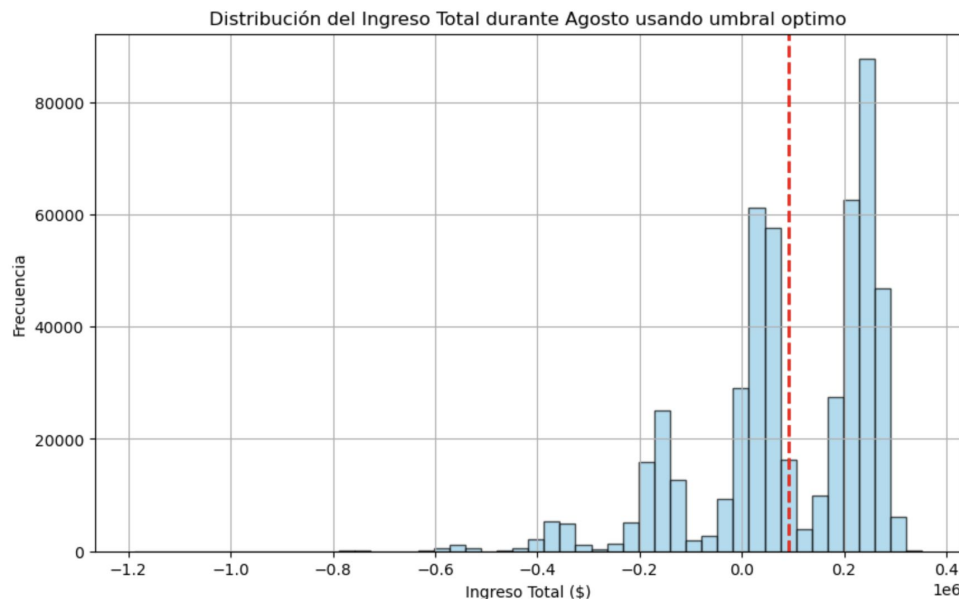
- VAN con el umbral óptimo = 812.310,89
- VAN con la estrategia de no apagar nunca = 237.558,26
- Ganancia de VAN al usar la estrategia óptima vs naive = 574.752,63 (error de estimación = 1.423)

Vemos que la diferencia entre ambas ganancias es muy amplia



# Distribución bajo el umbral de operación óptimo

- **Asimetría a la izquierda:** Cola más larga hacia la izquierda, indicando presencia de valores extremos negativos.
- **Concentración de ingresos:** Mayoría de los ingresos están en la zona positiva, cerca de la media, pero hay una proporción significativa de ingresos negativos, resaltando la asimetría.
- **Valores Negativos y Positivos:** Casos con ingresos negativos, bajo ciertas condiciones, operar los molinos puede resultar en pérdidas netas.
- **Variabilidad:** La amplitud de la distribución refleja la alta variabilidad de los ingresos, influenciada por la aleatoriedad del viento y las decisiones de operación.
- **Impacto de fallas:** Los ingresos negativos destacan el impacto de las fallas y los costos asociados, subrayando la importancia de un umbral de operación adecuado.



Ingreso medio en agosto: 92.098,08  
Desviación estándar del ingreso en agosto: 168.401,51



## Número medio de roturas por año

Bajo la estrategia óptima:

- Roturas promedio = 6,566
- Error estándar: 0.0035

Bajo la estrategia naive:

- Roturas: 19,58
- Error estándar: 0.0058

## Días promedio de inactividad por año

Molino Norte:

- Inactividad: 143,80
- Error estándar: 0,002

Molino Sur:

- Inactividad: 101,756
- Error estándar: 0,002

## Probabilidad de inactividad simultánea

El 9 de julio:

- $p = 3.5 \times 10^{-5} = 0.000035$
- Error estándar =  $8.49 \times 10^{-6} = 0.00000849$

Algún día del año:

- $p = 1$  (asumimos que hay un error)
- Error estándar = None



# Correlación entre los ingresos totales mensuales de mayo de los dos molinos

La correlación entre los ingresos de mayo de los dos molinos es: **0.002644 (aproximadamente cero)**

¿A que creemos que se debe esta relación casi nula entre los ingresos totales de mayo entre los dos molinos?

- **Fallas:**
  - Los eventos de falla tienen probabilidades distintas para cada molino.
  - Dependen de la velocidad del viento en un momento dado para cada uno.
  - Un molino puede estar en reparación mientras el otro sigue generando ingresos.
  - Esto reduce la correlación entre los ingresos de ambos molinos.
- **Variabilidad Estacional y Local:**
  - Ambos molinos comparten un componente estacional relacionado con la media del viento a lo largo del año.
  - La variabilidad a corto plazo es introducida por shocks locales.
  - Las decisiones operativas también influyen en la descoordinación de los ingresos.
- **Días Inactivos Diferentes:**
  - Los molinos pueden tener días inactivos en momentos diferentes.
  - Los ingresos de un molino pueden verse afectados en días distintos a los del otro.
  - Esto reduce la sincronización en los impactos sobre los ingresos.



# Sensibilidad del VAN al Costo de Rotura y a la Media Estacional

## Sensibilidad al costo de rotura:

- La sensibilidad es de aproximadamente  $-7,2$ , lo que indica que por cada unidad monetaria adicional en el costo de reparación, el Valor Actual Neto (VAN) del negocio se reduce en  $7,2$  unidades.
- Esto refleja el impacto negativo que un aumento en los costos de reparación tiene sobre la rentabilidad. Por ejemplo, si los costos de reparación aumentan en  $50.000$  dólares, el VAN disminuiría en  $50.000 * -7,2 = -360k$ .
- Realizamos una nueva exploración con distintos valores de  $k$  para ver cómo varía el umbral óptimo según el costo de reparación. Con un costo de  $250.000$  dólares, el umbral óptimo sería aproximadamente  $k = 6,5$ .
- Tiene sentido que, si reparar es más caro, se sería más precavido y se establecería un umbral de apagado menor para evitar roturas.

## Sensibilidad a la media estacional:

- La sensibilidad es de  $-118.377,20$ , lo que significa que un aumento de una unidad en la media estacional decrece el VAN en aproximadamente  $118.377,20$  unidades.
- Similar al análisis del costo de reparación, esta sensibilidad nos permite ajustar el umbral óptimo. En escenarios de alta media estacional, podríamos establecer un umbral más estricto para proteger la rentabilidad frente a variaciones significativas en la demanda estacional.



# Conclusiones

Utilizando nuestra estrategia de  $K = 7,2$ , te garantizamos que:

- **Maximizarás tus ganancias**, aprovechando al máximo la producción de los molinos.
- **Optimizarás tus decisiones de apagado**, eligiendo los momentos adecuados para minimizar las pérdidas.
- **Minimizarás los costos**, tanto de arreglo como de prender los molinos
- **Reducirás el riesgo de roturas**, minimizando el dinero utilizado en arreglos y también asegurando un funcionamiento más eficiente y prolongado de los molinos.