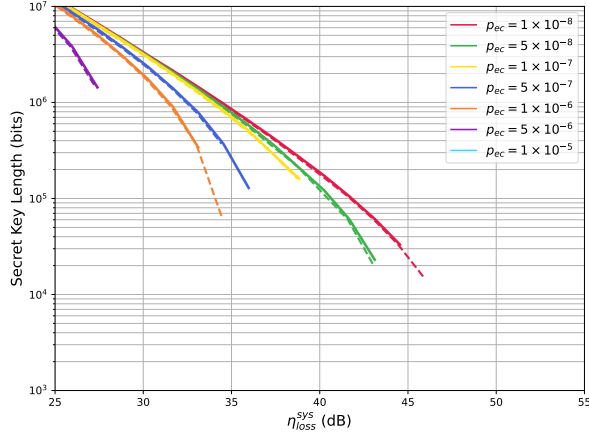


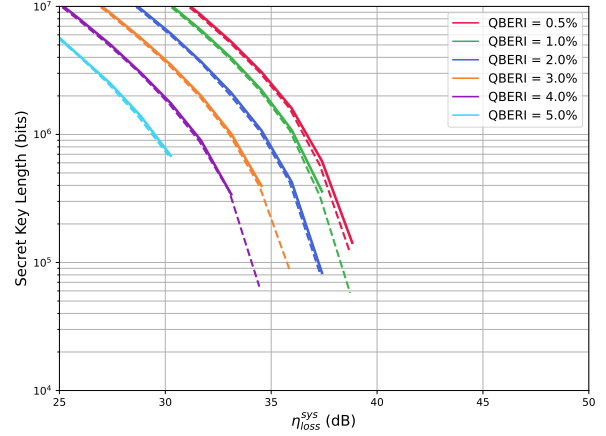
Resultados Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Yo he hecho el analisis con 25 tandas, y de estas tandas se han cogido diferentes Pec que hay 7 y luego hay 5 qber y en total hay 875 combinaciones, y seria para cada tipo de grafico hacer el estudio para cada uno de estas 875 y el numero subiera muchisimo. La solucion que le hemos encontrado a este problema es crear un script aleatorio y este escript lo que hace es darte tres tandas aleatorias por un pec y un qber aleatorio.

Se han hecho muchos analisis de resultados para estar seguros.



(a) Dependencia de la SKL con Pec, considerando un QBERI de 0,4%. Las líneas continuas representan el sistema sin turbulencia; las líneas discontinuas representan el sistema con turbulencia (tanda1_14.05).



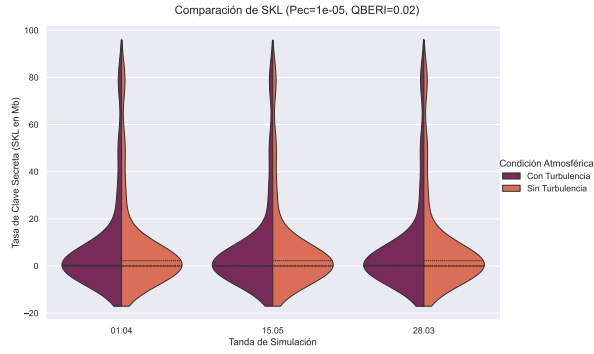
(b) Dependencia de la SKL con el QBERI, considerando un Pec de 1×10^{-6} por pulso. Las líneas continuas representan el sistema sin turbulencia; las líneas discontinuas representan el sistema con turbulencia (tanda1_14.05).

Figure 7. Longitud de clave secreta (SKL) en función de las pérdidas totales del sistema. Los parámetros fijos del sistema son $p_{ap} = 10^{-3}$ y $\theta_{min} = 10^\circ$.

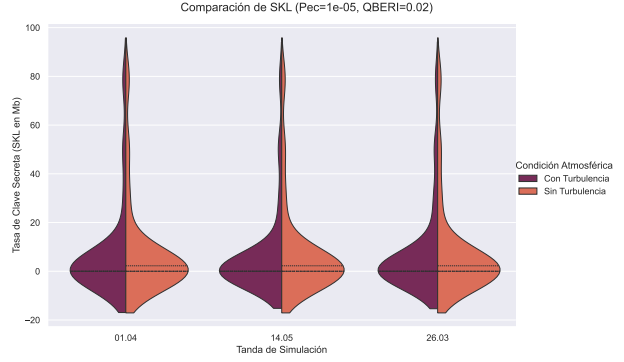
Al analizar la gráfica, observamos que con un valor alto de Pec (probabilidad de conteo espurio), la cantidad de claves secretas generadas disminuye significativamente, dificultando superar pérdidas superiores a 30 dB. Esto se debe a que un Pec elevado incrementa el ruido en el sistema, lo que enmascara la señal útil y reduce drásticamente la tasa de generación de claves.

Por otro lado, al incorporar la variable T_turb en nuestras simulaciones, la cual modela la turbulencia atmosférica, se observa que la mayoría de las tandas con turbulencia experimentan pérdidas promedio más altas. No obstante, pueden generar una cantidad similar de claves secretas si se cuenta con sistemas intrínsecamente mejores (con menores pérdidas internas). La turbulencia introduce además una variabilidad considerable en la señal: aunque pueden existir breves intervalos favorables, predominan los periodos de desvanecimiento profundo, afectando significativamente la generación total de claves secretas.

En el caso específico de un Pec de $1e-06$, inicialmente las curvas con y sin turbulencia coinciden. Sin embargo, al aumentar las pérdidas, la curva sin turbulencia muestra una reducción notable en la generación de claves. Al reducir aún más el valor de Pec, el sistema es capaz de generar claves para niveles de pérdida más elevados, llegando hasta aproximadamente 45 dB en las condiciones óptimas de Pec y QBERI. En condiciones menos óptimas, aunque el número de claves generadas es menor, inicialmente las curvas con y sin turbulencia se mantienen cercanas, pero con pérdidas crecientes, la turbulencia provoca una mayor disminución en la generación de claves secretas.



(a) Muestra la comparación usando la tanda 4 del día 01.04, correspondiente aproximadamente a la franja horaria de 10:00 a 12:00; la tanda 2 del día 15.05, correspondiente al periodo de 11:00 a 13:00; y la tanda 2 del día 28.03, también de 10:00 a 12:00.



(b) Compara la tanda 1 del día 26.03 entre las 12:30 y 14:34, la tanda 4 del día 14.05 entre las 14:30 y 15:50, y la tanda 2 del día 15.05 de 11:00 a 13:00.

Figure 8. Comparación de SKL con diferentes condiciones atmosféricas. La comparación general considera un Pec de 1×10^{-7} y un QBER de 0.04, destacando cómo la turbulencia influye en la generación de SKL al comparar diferentes tandas con distintos niveles de turbulencia y también frente a condiciones sin turbulencia.

La turbulencia atmosférica es un factor determinante que degrada el rendimiento de la QKD (Quantum Key Distribution) satelital, afectando significativamente la Tasa de Generación de Clave Secreta (SKL). Su principal efecto es una reducción de la SKL promedio y una mayor variabilidad en su generación en comparación con un escenario ideal sin turbulencia. Esto se debe a las fluctuaciones en la transmisividad del canal (T_{turb}), que provocan desvanecimientos significativos y generan distribuciones de SKL con colas pronunciadas hacia valores bajos o nulos.

El factor más crítico que determina el impacto de la turbulencia es su magnitud global, cuantificada por la varianza de Rytov, por encima de la brusquedad o rapidez de sus fluctuaciones. Por ejemplo, la tanda de simulación del 26.03, caracterizada por una turbulencia intensa y sostenida, exhibió la mayor dispersión en los valores de SKL. En contraste, otras tandas con cambios rápidos pero de menor magnitud mostraron una variación mínima respecto a la condición sin turbulencia.

La sensibilidad del sistema a la turbulencia está fuertemente modulada por sus parámetros operativos, principalmente el error cuántico de bit intrínseco (QBER) y el parámetro de eficiencia del protocolo (Pec):

- Con Pec y QBER bajos, el sistema es robusto y la generación de SKL es muy similar tanto en condiciones con y sin turbulencia.
- Sin embargo, al aumentar Pec y QBER, el sistema se vuelve mucho más vulnerable al ruido y a los errores. Esto amplifica drásticamente el impacto negativo de las fluctuaciones turbulentas, resultando en una reducción drástica de la SKL, que llega a anularse con mayor frecuencia.

Cabe destacar una observación particular: en momentos puntuales, la turbulencia puede causar potenciaciones momentáneas de la transmisividad ($T_{\text{turb}} > 1$), permitiendo que la SKL supere brevemente a la del modelo estático sin turbulencia. No obstante, este efecto es esporádico y no compensa el impacto negativo general causado por los desvanecimientos.

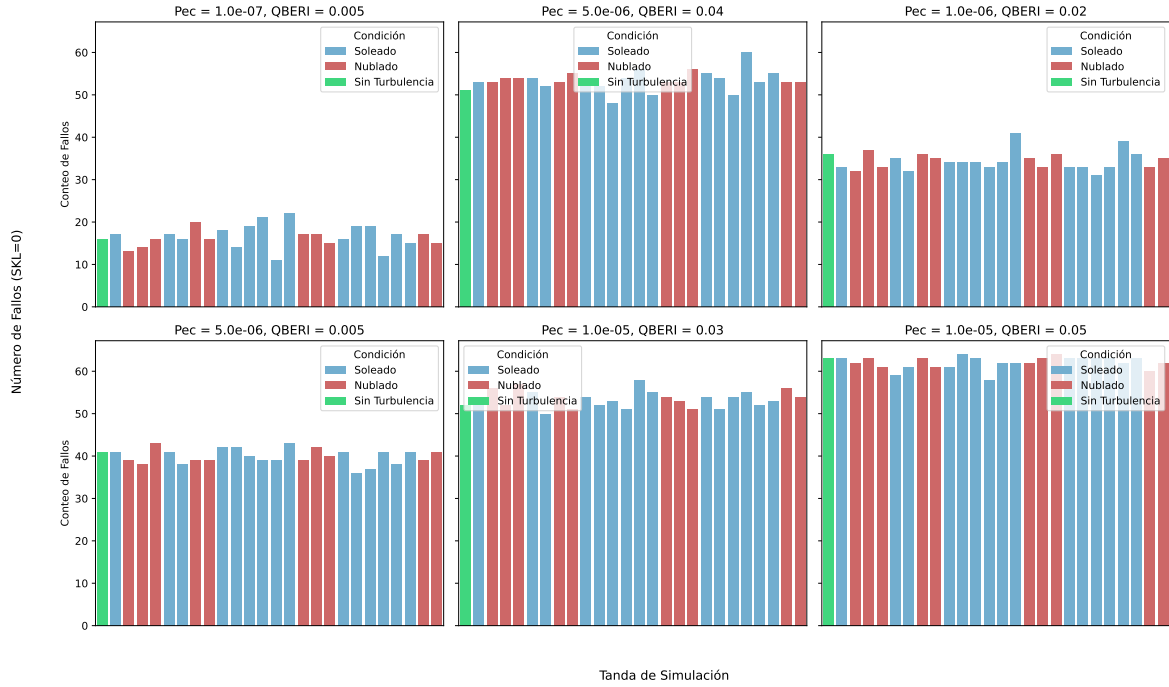


Figure 9. Distribución del número de ejecuciones fallidas ($SKL = 0$) en diferentes tandas y escenarios de turbulencia, ordenadas por hora del día. El histograma muestra el conteo de ejecuciones en las que no se generó clave secreta ($SKL = 0$), agrupadas por tanda y clasificadas según el régimen atmosférico: **Soleado**, **Nublado**. Las tandas están ordenadas cronológicamente, lo que permite analizar la evolución temporal de la probabilidad de fallo a lo largo del día.

Cada fichero de resultados se compone de múltiples *tandas*, que representan ejecuciones independientes del protocolo BB84. Cada fila de un fichero corresponde a una única ejecución bajo condiciones específicas y constantes de hora del enlace, pérdidas ópticas y turbulencia instantánea, a la que se aplica la cadena completa de post-procesado: *sifting*, corrección de errores y *privacy amplification*. La columna **SKL (b)** registra la longitud final de la clave secreta (*Secret Key Length*) obtenida en dicha ejecución, medida en bits.

Cuando las condiciones operativas —principalmente las pérdidas totales, la probabilidad de conteo oscuro (P_{ec}) y la tasa de error cuántico intrínseco ($QBER_i$)— exceden los umbrales de seguridad que el protocolo impone, la clave potencial se descarta. En estos casos, se registra una longitud de clave nula, $SKL = 0$. Por consiguiente, el recuento de filas con $SKL = 0$ dentro de una tanda proporciona una estimación directa de la probabilidad de fallo del enlace, P_{fallo} . Un mayor número de ceros implica una menor fiabilidad del sistema bajo ese conjunto de condiciones.

A continuación, se analiza el comportamiento del sistema en diferentes regímenes operativos.

Régimen de alta fidelidad (P_{ec} bajo y $QBER_i$ bajo):

En este escenario, el umbral de error tolerado es mínimo y el ruido intrínseco del sistema (generado por conteos oscuros o defectos ópticos) es prácticamente despreciable. Bajo estas circunstancias, un fallo en la generación de clave ($SKL = 0$) se puede atribuir con alta fiabilidad a las fluctuaciones de transmitancia inducidas por la turbulencia atmosférica. Como resultado, la diferencia de rendimiento entre un día **Soleado** (turbulencia intensa) y uno **Nublado** (turbulencia moderada) se manifiesta con máxima claridad: las tandas con un coeficiente de turbulencia C_n^2 más elevado acumulan un número significativamente mayor de ceros. Empíricamente, estos picos de fallos ($SKL = 0$) se concentran en las horas de mediodía y primera tarde, coincidiendo con el máximo calentamiento solar que intensifica los gradientes térmicos y, con ello, la varianza de Rytov. La simulación de referencia *Sin turbulencia* actúa como una cota inferior, mostrando una tasa de fallos casi nula.

Régimen de operación al límite (P_{ec} bajo y $QBER_i$ alto):

En este caso, el ruido de fondo sigue siendo despreciable, por lo que la tasa de error cuántico global ($QBER_{total}$) es casi idéntica a la intrínseca ($QBER_i$). Dado que el protocolo BB84 tolera un máximo teórico del 11 % de error, un $QBER_i$ del 4–5 % ya sitúa al sistema en el límite de su umbral de seguridad. Las cotas estadísticas de Chernoff, utilizadas en la estimación de parámetros, introducen fluctuaciones en cada tanda. Así, una ejecución puede estimar un $QBER_{total} = 9.5\%$ (generando clave, $SKL > 0$), mientras que la siguiente, bajo idénticas condiciones físicas, podría arrojar un $QBER_{total} = 10.1\%$ (fallando, $SKL = 0$). Esta extrema sensibilidad a las fluctuaciones estadísticas evidencia la precariedad de operar en un punto tan crítico.

Régimen dominado por ruido de detector (P_{ec} alto y $QBER_i$ bajo):

Aquí, la señal cuántica es intrínsecamente limpia, pero queda enmascarada por la alta tasa de conteos oscuros de los detectores. El método de estados *decoy*, que se basa en comparar las tasas de detección para pulsos de diferente intensidad (señal, *decoy* y vacío), pierde su efectividad al no poder distinguir la señal genuina del ruido. Esto impide acotar correctamente la contribución de los fotones únicos y su correspondiente tasa de error de fase. El resultado es un fallo sistemático del protocolo: incluso sin turbulencia, aproximadamente un 70 % de las ejecuciones ya resultan en $SKL = 0$. Un incremento en el C_n^2 apenas añade unos pocos puntos porcentuales a esta ya elevada tasa de fallos. En consecuencia, el fenómeno atmosférico queda enmascarado y las diferencias de rendimiento entre los escenarios **Soleado**, **Nublado** y **Sin turbulencia** se vuelven prácticamente indistinguibles.

Régimen de fallo sistémico (P_{ec} alto y $QBER_i$ alto):

En el escenario más desfavorable, donde tanto el ruido de fondo como la tasa de error intrínseca son elevados, el ruido interno se convierte en la causa dominante de fallo. Una porción sustancial de las ejecuciones (en torno al 70 %) fracasa antes de considerar el canal atmosférico. La turbulencia adicional solo contribuye marginalmente a la probabilidad de fallo total. Al igual que en el caso anterior, el efecto de la atmósfera queda completamente enmascarado, y las diferencias entre las condiciones de turbulencia son insignificantes.

El análisis demuestra que incrementar cualquiera de los dos parámetros, P_{ec} o $QBER_i$, degrada el rendimiento y eleva la P_{fallo} . Sin embargo, su impacto combinado es considerablemente más severo y puede llegar a enmascarar por completo los efectos del canal cuántico que se pretende estudiar. Por lo tanto, para maximizar la fiabilidad del enlace y, simultáneamente, preservar la sensibilidad a las condiciones atmosféricas, **es imperativo optimizar ambos umbrales de forma conjunta.**