

**Sistema de Configuración de Señales en Formación de Haces para 5G,  
5G Avanzado y 6G**



**UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

**TEORIA DE LA INFORMACION**

**Docente: GERARDO ALBERTO CASTANG MONTIEL.**

**Eber Santiago González Castillo - 20232678009**

**Andres Camilio Torres Sossa - 20251678055**

**Juan David Sosa Suarez - 20251678043**

**Universidad Francisco Jose De Caldas**

**Bogota D.C.**

**2025.**

Introducción .....	3
Objetivos.....	3
Objetivo General:.....	3
Objetivos específicos:.....	3
Marco teorico .....	4
Contexto tecnológico .....	4
Parámetros fundamentales (definiciones y unidades) .....	4
Efecto de los parámetros por tecnología .....	5
5G FR1 (sub-6 GHz).....	5
5G FR2 / 5G-Advanced (mmWave).....	5
6G (sub-THz) .....	5
Fórmulas usadas (tu listado, con explicaciones) .....	5
Pérdida en espacio libre (FSPL) .....	5
Potencia recibida (en dBm) .....	6
Piso de ruido.....	6
Relación señal-ruido (SNR).....	6
Conversión a SNR lineal y cálculo de ruidos en amplitud .....	6
2Conversión unidades de potencia .....	6
Presets de sistema (valores de ejemplo para las tres redes) .....	6
Ejemplos numéricos (cálculos paso a paso).....	7
Parámetros de ejemplo .....	7
Tabla con resultados (FSPL, $P_{rx}$ , ruido y SNR) .....	7
Interpretación y análisis comparativo entre las tres redes .....	8
Tendencias generales .....	8
Comportamiento por tecnología .....	8
Tablas comparativas .....	8
Comparativa alta nivel .....	8
Métricas derivadas y cómo interpretarlas.....	9

## Introducción

El avance hacia las redes de quinta generación (5G), su evolución hacia 5G Advanced, y la investigación en sexta generación (6G), demandan sistemas de comunicación inalámbrica capaces de soportar altas tasas de transmisión, baja latencia y alta eficiencia espectral. La formación de haces (beamforming) se ha consolidado como una técnica fundamental para optimizar el uso de recursos radioeléctricos, direccionando la energía hacia los usuarios específicos en lugar de irradiar de manera omnidireccional.

Este proyecto consiste en el diseño e implementación de un sistema software que permite configurar parámetros clave de transmisión y recepción de señales en 5G, 5G Avanzado y 6G, incluyendo:

- Potencia de transmisión
- Frecuencia de operación
- Distancia de alcance (rango)
- Configuración de haces para envío y recepción de señales

Se desarrollan simulaciones y análisis que muestran cómo varían la potencia recibida y las métricas de enlace (SNR, BER, throughput) con esos parámetros.

## Objetivos

**Objetivo General:** Desarrollar un sistema de software que permita configurar, enviar y recibir señales en formación de haces para entornos 5G, 5G Advanced y 6G, optimizando el rendimiento en términos de potencia, frecuencia y distancia.

El objetivo del laboratorio es medir y explicar cómo cambian la potencia recibida y la calidad del enlace (SNR, BER) cuando el estudiante modifica: potencia Tx, frecuencia, distancia y la configuración del haz (ganancia por beamforming). Estos resultados son comparados para tres entornos representativos: **5G (FR1 / sub-6 GHz)**, **5G-Advanced / mmWave** y **6G (sub-THz, simulado)**. El enunciado y alcance del proyecto están descritos en la primera entrega.

## Objetivos específicos:

- Implementar una interfaz de usuario que permita configurar parámetros de transmisión y recepción.
- Diseñar un módulo de simulación para validar el comportamiento de la señal bajo diferentes condiciones.
- Integrar algoritmos de formación de haces (beamforming digital, híbrido y análogo).
- Garantizar compatibilidad con escenarios de multiusuario (MU-MIMO).

- Evaluar el impacto de las configuraciones en métricas como SNR, SINR, throughput y latencia.

## Marco teorico

### Contexto tecnológico

- **5G (FR1 — sub-6 GHz):** bandas desde ~410 MHz hasta 6 GHz. Buen equilibrio cobertura-capacidad, mayor penetración en interiores, apto para movilidad. Beamforming es útil, pero no siempre crítico.
- **5G FR2 / 5G-Advanced (mmWave):** 24–52 GHz (implementaciones comunes: 24, 26, 28, 39 GHz). Alta capacidad y densificación, baja penetración y corto alcance. Release 18 (5G-Advanced) añade nuevas capacidades de MIMO, beam management y coordinación multi-TRP.
- **6G (sub-THz / THz — investigación):** 90–300 GHz y más alto. Investigación en alta capacidad, sensing integrado y RIS. Requiere arrays altamente direccionales y estudio intenso de canal (atmósfera, absorción, superficies).

### Parámetros fundamentales (definiciones y unidades)

- **Frecuencia (f)** — Hz (usualmente GHz). Determina longitud de onda:  $\lambda = c/f$ . Aumenta FSPL y reduce penetración cuando sube.
- **Potencia de transmisión (P<sub>t</sub>)** — dBm o W. Nivel de potencia en la salida del transmisor. Conversión:  $P(W) = 10(P_{dBm} - 30)/1$
- **Ganancia de antena Tx (G<sub>t</sub>) y Rx (G<sub>r</sub>)** — dBi. Ganancia direccional del elemento o del array.
- **Número de elementos (N)** — entero. Para arrays ULA, afecta ganancia y beamwidth.
- **Espaciado entre elementos (d)** — metros o fracción de  $\lambda$  ( $\lambda$  recomendado). (p. ej.  $0.5\lambda$  recomendado).
- **Ancho de banda (B)** — Hz. Afecta ruido térmico (kTB) y throughput.
- **Distancia (R)** — m. Separación Tx–Rx o segmentos en ruta reflejada (Tx→P<sub>ref</sub>, P<sub>ref</sub>→Rx).
- **Pérdidas misceláneas (L<sub>misc</sub>)** — dB. Conectores, cableado, atenuadores.
- **Coefficiente de reflexión ( $\Gamma$  /  $\Gamma_{dB}$ )** — dB o lineal (potencia reflejada). Ej.:  $\Gamma_{dB} = -6 \text{ dB} \Rightarrow \Gamma = 0.25$  en potencia.
- **Tipo de beamforming** — Digital / Analógico / Híbrido.
- **Tipo de canal** — LoS / NLoS, Rician K-factor, Rayleigh.
- **Temperatura de ruido (T<sub>0</sub>)** — Kelvin (usualmente 290 K).

- **SNR, SINR, BER, Throughput** — métricas de salida derivadas.

## Efecto de los parámetros por tecnología

### 5G FR1 (sub-6 GHz)

- **Frecuencia:** mejor penetración en edificios;  $\lambda$  grande  $\rightarrow$  requiere arrays más grandes para la misma directividad.
- **Potencia:** transmisores UE típicos 20–23 dBm; eNodeB/BS mayor (30–60 dBm). En simulación usar +23 dBm para estaciones de pequeña celda.
- **Distancia:** decenas-hasta-centenares de metros (depende potencia y antena).
- **Beamforming:** útil para mejora SNR y reducción de interferencia; MIMO más limitado en número de elementos comparado con mmWave.

### 5G FR2 / 5G-Advanced (mmWave)

- **Frecuencia:** FSPL mayor; penetración pobre.
- **Potencia y antenas:** se compensa con arrays de alto N y ganancia por elemento moderada.
- **Distancia:** decenas de metros; cuidado con obstrucciones.
- **Beam management:** crítico; Release 18 añade soporte para optimización dinámica (sweeps, mobility).

### 6G (sub-THz)

- **Frecuencia:** absorción atmosférica (H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>) puede imponer ventanas de uso.
- **Distancia:** típicamente muy corta (m–tens m) en aplicaciones indoor o line-of-sight extremadamente direccional.
- **Beamforming/arrays:** esenciales; N muy grande, digital/híbrido para flexibilidad.

## Fórmulas usadas

### Pérdida en espacio libre (FSPL)

$$\text{FSPL (dB)} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad \text{con} \quad \lambda = \frac{c}{f}, \quad c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

- $d$ : distancia (m).
- $f$ : frecuencia (Hz).

Nota: versión equivalente usando  $f$ :  $\text{FSPL} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d f}{c} \right)$ .

## Potencia recibida (en dBm)

$$P_{rx} = P_{tx} - \text{FSPL} + G_{\text{sistema}}$$

- $P_{tx}$  en dBm.
- $G_{\text{sistema}}$  es la ganancia neta del sistema (puede incluir ganancia de antena y ganancia por beamforming, en dB).

## Piso de ruido

$$N = -174 \text{ dBm/Hz} + 10 \log_{10}(B) + NF$$

- $B$ : ancho de banda en Hz.
  - $NF$ : figura de ruido del receptor (dB).
- −174 dBm/Hz es la densidad espectral de ruido térmico a 290 K.

## Relación señal-ruido (SNR)

$$\text{SNR (dB)} = P_{rx} - N$$

(ambos en dBm).

## Conversión a SNR lineal y cálculo de ruidos en amplitud

$$\text{SNR}_{lin} = 10^{\text{SNR}_{dB}/10}$$

Si conocemos la amplitud de la señal  $A_{\text{signal}}$  (por ejemplo 1 V en una escala relativa), la amplitud del ruido equivalente:

$$A_{\text{noise}} = \sqrt{\frac{A_{\text{signal}}^2}{\text{SNR}_{lin}}}$$

(Esta es la relación entre potencias; útil para generar ruido AWGN con la relación SNR deseada.)

## 2 Conversión unidades de potencia

$$P_{dBW} = P_{dBm} - 30$$

## Presets de sistema (valores de ejemplo para las tres redes)

- **5G (FR1)**
  - Ancho de banda  $B=20 \text{ MHz}$
  - Ganancia adicional por sistema: **0 dB** (sin ganancia añadida)
  - Potencia Tx ejemplo: **+23 dBm** (valor típico UE/BS pequeño)

- **5G-Advanced (5G-A)**
  - $B=80\text{ MHz}$   $B = 80\text{ MHz}$
  - Ganancia por sistema: **+3 dB** (mejora por beamforming/precodificación)
  - Potencia Tx ejemplo: **+23 dBm**
- **6G (simulado)**
  - $B=200\text{ MHz}$   $B = 200\text{ MHz}$
  - Ganancia por sistema: **+6 dB**
  - Potencia Tx ejemplo: **+10 dBm** (ejemplo para sub-THz experimental)

### Ejemplos numéricos (cálculos paso a paso)

A continuación se muestran ejemplos representativos usando los presets anteriores y distancias típicas para cada entorno. Los cálculos se hicieron con  $c=299\,792\,458\text{ m/s}$  y  $NF=6\text{ dB}$ .

### Parámetros de ejemplo

Escenario	f (GHz)	Pt (dBm)	G_sistema (dB)	B (Hz)	Distancia (m)
5G (FR1)	3.5	23	0	20e6	100
5G-A (mid / mmWave mixed)	3.5 (o 28)	23	3	80e6	100 (o 30 para mmWave)
5G-FR2 (mmWave)	28	23	3	80e6	30
6G (simulado)	100	10	6	200e6	5

### Tabla con resultados (FSPL, $P_{rx}$ , ruido y SNR)

(números calculados con las fórmulas anteriores)

Escenario	FSPL (dB)	$P_{rx}$ (dBm)	Piso ruido $N_{MN}$ (dBm) (NF=6 dB)	SNR (dB)
5G (3.5 GHz, d=100 m)	<b>83.33</b>	<b>-60.33</b>	<b>-94.99</b>	<b>+34.66</b>
5G-A (3.5 GHz, +3 dB, d=100 m)	83.33	-57.33	-88.97	+31.64
5G-FR2 (28 GHz, d=30 m)	<b>90.93</b>	<b>-64.93</b>	<b>-88.97</b>	<b>+24.04</b>
6G (100 GHz, d=5 m)	<b>86.43</b>	<b>-70.43</b>	<b>-84.99</b>	<b>+14.56</b>

### Notas sobre la tabla:

- FSPL aumenta con frecuencia y distancia. A igualdad de distancia, una frecuencia más alta produce mayor FSPL.
- El ruido  $N_{MN}$  depende fuertemente del ancho de banda  $B$ : mayor  $B \rightarrow$  mayor piso de ruido (menor margen SNR para la misma  $P_{rx}$ ).

- En estos ejemplos 5G FR1 muestra SNR muy alto (>30 dB) por la combinación  $P_t$ , distancia y relativamente pequeño  $B$  (20 MHz). 6G, aunque cercano, tiene  $P_t$  menor y un piso de ruido más alto ( $B=200$  MHz), por eso SNR cae.

## Interpretación y análisis comparativo entre las tres redes

### Tendencias generales

- **Frecuencia vs cobertura:** A mayor frecuencia, a igualdad de  $P_t$  y ganancia, la FSPL es mayor  $\rightarrow$  menor  $P_{rx}/P_{tx}$ . Por eso mmWave y sub-THz requieren mayor ganancia de antena (arrays) o distancias más cortas.
- **Ancho de banda y ruido:** A mayor  $B$ , el piso de ruido (en dBm) sube  $10\log_{10}(B)$ . Para el mismo  $P_{rx}/P_{tx}$ , esto reduce el SNR. Por ejemplo, ampliar  $B$  de 20 MHz a 200 MHz aumenta el piso de ruido en 10 dB, lo que puede anular ganancias por beamforming si no se compensa.
- **Beamforming:** la ganancia agregada por direccionamiento ( $G_{\text{sistema}}$ ) compensa la FSPL;  $N$  elementos coherentes aportan aproximadamente  $10\log_{10}(N)$  dB de ganancia (sobre la ganancia del elemento). En prácticas reales la ganancia efectiva depende de la pérdida por alimentación, acoplamiento y calibración.

### Comportamiento por tecnología

- **5G FR1 (sub-6 GHz):** buena penetración y cobertura; menos dependencia de beamforming extremo; anchos de banda moderados (ej. 20 MHz) implican piso de ruido bajo  $\rightarrow$  buen SNR con potencias razonables. Ideal para movilidad y cobertura amplia.
- **5G-Advanced / mmWave (FR2):** altas tasas ( $B=80+$  MHz), pero FSPL pronunciado y peor penetración. Beamforming y antenas con muchos elementos son críticos. El manejo de beams (sweeping, tracking) y gestión de bloqueo (NLOS por reflexión o multi-TRP) son funcionalidades clave de 5G-Advanced.
- **6G (sub-THz):** extremos en capacidad y directividad; alcance corto; altísima sensibilidad al material y a la atmósfera; requiere arrays muy grandes, RIS, y técnicas avanzadas de sincronización y control. En simulación, esperar SNR menores si no se compensa con ganancia y cercanía.

### Tablas comparativas

#### Comparativa alta nivel

Característica	5G (FR1)	5G-A / mmWave	6G (sub-THz)
Frecuencias típicas	0.7–6 GHz	24–52 GHz	90–300+ GHz



Ancho de banda típico	10–100 MHz	100–400 MHz	100s MHz – GHz
Penetración en edificios	Buena	Baja	Muy baja
Vulnerabilidad a bloqueo	Baja-moderada	Alta	Muy alta
Requiere beamforming	Sí (mejora)	Crítico	Esencial
Rango típico	100s de m – km	10s de m	pocos metros – decenas m
Complejidad HW	Baja-moderada	Alta	Muy alta

### Métricas derivadas y cómo interpretarlas

- **Pr (dBm):** potencia recibida — compararla con la sensibilidad del receptor para saber si el enlace es posible.
- **SNR (dB):** indica margen sobre ruido térmico; tablas de MCS o Shannon para throughput.
- **BER:** calidad de la señal;  $BER < 1e-3$  o  $1e-6$  según requisitos.