

Protección de estaciones terrenas de los servicios fijo por satélites en Norte América

Protection of earth stations of the fixed-satellite service in North-American

Rainel Sánchez Pino, Randy Verdecia Peña

Abstract— This work presents a mathematical model for determining a limiting mask for equivalent power flux density produced by the North American region's downlinks of non-GSO satellite systems. This mask protects earth stations from the interference generated by non-GSO satellites. The mathematical model is employed to generate an EPPD_↓ mask. An analysis of two systems is made to compare the behavior of the mask in the North American region.

Index Terms—Mathematical model, Limiting mask, Earth stations

Resumen—En este trabajo es desarrollado un modelo matemático para determinar una máscara límite para la densidad de flujo equivalente producida por el enlace de bajada en sistemas de satélite N-GSO en la región de Norte América. Esta máscara es usada para la protección de estaciones terrenas de interferencias generadas por satélites N-GSO. El modelo matemático fue empleado para generar una máscara EPPD_↓. Un análisis de dos sistemas fue realizado para comparar el comportamiento de las máscaras en la región de Norte América.

Palabras Claves—Modelo matemático, Máscara límite, Estaciones terrenas

I. INTRODUCCIÓN

EN décadas atrás, los sistemas de comunicaciones por satélites utilizaban específicamente satélites geostacionario (GSO, Geostationary Orbit) para brindar servicios terrestres. La principal organización reguladora de los servicios de telecomunicaciones, Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, International Telecommunication Union) en el artículo 22 del reglamento de radiocomunicaciones [1] establece los límites máximos para la densidad de flujo de potencia ocasionada en la superficie de la tierra por satélites GSO, de forma de garantizar la protección de los servicios fijos por satélites (FSS, Fixed Service Satellite). En el artículo 22 no es considerado la protección FSS contra interferencias generadas por los sistemas no-geostacionarios (N-GSO, Non-Geostationary Orbit).

A finales de los años 90, con el propósito de proteger estos

sistemas frente a las interferencias generadas por los sistemas de satélites N-GSO se realizó la Conferencia Mundial de Radio-Comunicaciones (WRC-97, World Radio communication Conference) [2], donde se recomendó el estudio para la asignación de los límites de potencia que estos tipos de satélites deben tener para garantizar la protección de los sistemas fijos. Años después fueron realizados estudios y análisis sobre diferentes sistemas de constelación N-GSO que son descritos en [3] – [7], donde las interferencias generadas por los satélites N-GSO fueron obtenidas por medio de simulaciones.

Producto del desarrollo tecnológico de los últimos tiempos, donde los requerimientos de los sistemas de comunicaciones en término de ancho de banda son más exigentes, la ampliación de las bandas de frecuencias que pueden ser utilizadas por los sistemas de comunicaciones por satélites N-GSO fue aprobada mediante la Resolución 127 [8] en la (WRC-15), por lo que es necesario el estudio de las técnicas y operacionales que envuelven estos sistemas satelitales al operar en estas nuevas bandas de frecuencias. Fue observado en el artículo 22 que los límites de potencias para las bandas de 3.7- 4.2 GHz fueron tratados solo para sistemas de satélites de órbita elípticas (HEO, Highly Elliptical Orbit).

En este sentido, el estudio de los límites de potencias para sistemas N-GSO es un tema importante en el desarrollo de los sistemas satelitales. Por tanto, el objetivo de esta investigación es realizar un análisis de los límites de la densidad de flujo de potencia equivalente para la protección de estaciones terrenas del servicio fijo por satélites en la región de Norte América.

La presente investigación tiene la siguiente estructura: la Sección II, revisa los modelos matemáticos de densidad de flujo de potencia, relacionamiento entre densidad de flujo y relación entre la razón potencia interferente, y potencia de ruido y determinación de la Función Distribución de Probabilidad Complementaria. La Sección III proporciona el desenvolvimiento para la obtención de los límites de la densidad de flujo de potencia equivalente en el enlace descendente. Los resultados de las simulaciones se presentan en la Sección IV para examinar y analizar el cumplimiento de la máscara dados dos sistemas de satélites N-GSO. La Sección V es concluida la investigación

R. S. Pino and R. V. Peña are with the Telecommunication Center (CETUC), Pontifical Universidade Católica de Rio de Janeiro PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil (e-mail: rainel.sanchez@cetuc.puc-rio.br, randy.verdecia@cetuc.puc-rio.br).

II. MODELO MATEMÁTICO

A. Densidad de Flujo de Potencia equivalente en el enlace descendente

La Fig. 1 muestra el i -ésimo satélite de una constelación N-GSO, que está localizado en la posición x_i y la interferencia producida sobre una estación terrena receptora posicionada en P_{et} , donde su antena receptora apunta en la dirección del satélite GSO y es caracterizada por el vector b .

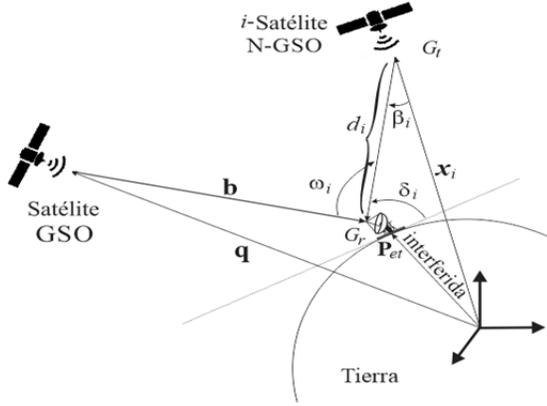


Fig. 1. Antena receptora del Servicio Fijo Terrestre interferida por un satélite N-GSO.

En la Fig. 1, β_i representa el ángulo entre el apuntamiento de la antena transmisora del satélite interferente y la dirección de la estación terrena interferida. El ángulo δ_i representa, el ángulo de llegada de la señal interferente y ω_i es el ángulo entre el apuntamiento de la antena receptora de la estación terrena interferida y la dirección del satélite N-GSO interferente. Una vez descritos los términos de la Fig. 1, es posible expresar en (1) la densidad de flujo de potencia ocasionada por el i -ésimo satélite de la constelación N-GSO en la estación terrena interferida.

$$Epdf_i = 10^{\frac{P_i}{10}} \cdot \frac{G_t(\beta_i) \cdot G_r(\omega_i)}{4\pi \cdot d_i^2 \cdot G_{r,MAX}} \quad (1)$$

En (1) d_i representa la distancia entre el i -ésimo satélite interferente y la estación terrena interferida. Además, P_i es la potencia en la entrada de la antena transmisora del i -ésimo satélite de la constelación N-GSO, en la banda de frecuencia B_{Ref} , $G_t(\beta_i)$ caracteriza la ganancia en la antena transmisora del i -ésimo satélite en la dirección de la estación terrena interferida del sistema GSO. En (1) $G_r(\omega_i)$ describe la ganancia de la antena receptora de la estación terrena en la dirección del i -ésimo satélite interferente, donde $G_{r,MAX}$ su ganancia máxima.

La densidad de flujo de potencia equivalente en el enlace descendente $EPFD_{\downarrow}$ y $Epdf_{\downarrow}$ expresadas en $\text{dB(W/m}^2\text{)}$ y W/m^2 , respectivamente, y generadas por todos los satélites visibles (N_{vis}) de la constelación del sistema N-GSO sobre la estación terrestre interferida, son dadas por la siguiente ecuación:

$$EPFD_{\downarrow} = 10 \cdot \log(Epdf_{\downarrow})$$

$$EPFD_{\downarrow} = 10 \cdot \log \left[\sum_{i=1}^{N_{vis}} 10^{\frac{P_i}{10}} \cdot \frac{G_t(\beta_i) \cdot G_r(\omega_i)}{4\pi \cdot d_i^2 \cdot G_{r,MAX}} \right] \quad (2)$$

En la Fig. 1 ilustra que existe una dependencia de los ángulos β_i y ω_i con los vectores x_i , P_{et} y q . Considerándose, que la posición de la estación terrena interferida es fija y conocida, y al asumir que todos los satélites de la órbita no geostacionaria trabajan con la misma potencia. De este modo la expresión (1) puede ser reescrita como en (3).

$$Epdf_i(x_i, q) = 10^{\frac{P_i}{10}} \cdot \frac{G_t(x_i) \cdot G_r(x_i, q)}{4\pi \cdot d_i^2 \cdot G_{r,MAX}} \quad (3)$$

La densidad $Epdf_{\downarrow}$ es posible expresarla como (4) al utilizar las consideraciones mencionadas anteriormente.

$$Epdf_{\downarrow}(x, q) = \sum_{i=1}^{N_{vis}} Epdf_i(x_i, q) \quad (4)$$

B. Relacionamiento entre $EPFD_{\downarrow}$ y I_p/N_p (razón entre la potencia interferente y la potencia del ruido)

Un parámetro que es necesario analizar para evaluar el nivel de densidad de flujo de potencia equivalente es I_p/N_p que representa la razón entre las potencias interferentes y el ruido en la banda de referencia B_{Ref} .

La $EPFD_{\downarrow}$ expresada en $\text{dB(W/m}^2\text{)}$ se relaciona con la potencia de interferencia en la banda de referencia mediante el área efectiva de la antena de la estación terrestre receptora del sistema de satélite GSO. El área efectiva es determinada a partir del cociente entre $G_{r,MAX}$ y $G_{(1m)^2}$, que representa la ganancia de un metro cuadrado, la cual depende de la longitud de onda λ asociada a la frecuencia central de las señales que intervienen.

La temperatura T del ruido en el receptor de la estación del sistema satelital GSO y la potencia del ruido térmico del receptor en la banda B_{Ref} (ancho de banda) está relacionada por la constante de Boltzman (k) y se expresa en (5),

$$N_{p, B_{Ref}} = k \cdot T \cdot B_{Ref}, \quad (5)$$

al emplear el desenvolvimiento matemático descrito en [9], es posible obtener una expresión que relaciona $EPFD_{\downarrow}$ y I_p/N_p , dado por:

$$\left(I_p / N_p \right)_{B_{Ref}} = \frac{G_{r,MAX} \cdot 10^{(EPFD_{\downarrow}/10)}}{G_{(1m)^2} \cdot k \cdot T \cdot B_{Ref}}, \quad (6)$$

la expresión (7) representa el relacionamiento entre la potencia interferente y el ruido en la banda de referencia en dB.

$$\left(I_p / N_p \right)_{dB} = \tau + EPFD_{\downarrow} \quad (7)$$

$$\tau = 10 \cdot \log \left(\frac{G_{r,MAX}}{G_{(1m)^2} \cdot k \cdot T \cdot B_{Ref}} \right) \quad (8)$$

El relacionamiento descrito anteriormente, las operadoras de sistemas satelitales se sienten más confortables para

determinar los valores de I_p/N_p que se relaciona con la densidad de flujo de potencia equivalente.

C. Determinación de la Función Distribución de Probabilidad Complementaria de EPFD_↓

Las posiciones orbitales x_i , $i = 1, \dots, N_{total}$, donde N_{total} representa el número total de satélites en la órbita N-GSO y la posición orbital q del satélite GSO son caracterizadas como vectores aleatorios. Debido a este modelaje la $Epfd_{\downarrow}$ es también caracterizada como una variable aleatoria.

En la presente investigación son considerados sistemas de satélites N-GSO que presentan las características de la constelación de Walker Delta [10]. En estas constelaciones, si la posición de un satélite (satélite de referencia) es conocida, es posible determinar las posiciones de los restantes satélites que conforman la constelación. Donde x_0 es la posición del satélite de referencia puede ser definida la expresión (9), con $Q_i(x_0)$, $i = 1, \dots, N_{total}$ definida por la estructura de la constelación en [10]

$$x_i = Q_i(x_0), \quad i = 1, \dots, N_{total} \quad (9)$$

Al tener en cuenta la ecuación anterior, es posible expresar (4) como:

$$Epfd_{\downarrow}(x_0, q) = \sum_{i=1}^{N_{total}} Epfd_i[Q_i(x_0), q] \quad (10)$$

En la expresión (10) los vectores aleatorios x_0 y q influyen en la densidad de flujo de potencia equivalente en el enlace de bajada, en la banda de referencia B_{Ref} , ocasionadas por todos los satélites que son visibles en la constelación de satélites N-GSO: por tal razón, la $Epfd_{\downarrow}$ es modelada como una variable aleatoria donde su función distribución de probabilidad complementar es dada por:

$$FDPC_{Epfd_{\downarrow}}(Z) = P(Epfd_{\downarrow} > Z) = \int_Z^{\infty} p_{Epfd_{\downarrow}}(\psi) d\psi, \quad (11)$$

en (11) $p_{Epfd_{\downarrow}}(\psi)$ representa la función densidad de probabilidad de la variable aleatoria $Epfd_{\downarrow}$ y puede ser escrita a partir de la función de probabilidad conjunta de las variables aleatorias $Epfd_{\downarrow}$, x_0 y q . Consecuentemente, la $FDPC_{Epfd_{\downarrow}}(Z)$ es posible escribirla como:

$$FDPC_{Epfd_{\downarrow}}(Z) = \int_{\Omega_q} p_q(V) FDPC_{Epfd_{\downarrow}|q=V}(Z) dV, \quad (12)$$

donde Ω_q es el espacio donde q toman valores y $FDPC_{Epfd_{\downarrow}|q=V}(Z)$ representa la función distribución de probabilidad complementaria condicional de la variable aleatoria $Epfd_{\downarrow}$ que puede ser escrita como (13) al utilizar el desarrollo matemático descrito en [9],

$$FDPC_{Epfd_{\downarrow}|q=V}(Z) = \int_{\Omega_x} \mu[\eta(X, V) - Z] p_{x_0}(X) dX, \quad (13)$$

con $u(*)$ como la función de Heaviside, $\eta(X, V)$ es determinada por las expresiones (3) y (4) y $p_{x_0}(X)$ es la función densidad de probabilidad del satélite referente, cuya expresión es determinada por el método analítico descrito

en [11].

La función distribución de probabilidad complementaria de la variable aleatoria I_p/N_p puede ser determinada mediante la expresión (7) y (13). Luego se tienen como resultado las siguientes expresiones:

$$FDPC_{I_p/N_p|q=V}(\Gamma) = FDPC_{Epfd_{\downarrow}|q=V}(\Gamma - \tau) \quad (14)$$

$$FDPC_{I_p/N_p}(\Gamma) = FDPC_{Epfd_{\downarrow}}(\Gamma - \tau) \quad (15)$$

donde τ es determinada mediante (8).

III. LÍMITES DE EPFD_↓

La recomendación ITU-R S.1323 [12], establece que, en una determinada red de satélites, la interferencia generada por las emisiones de otras redes de satélites que trabajan en la misma banda de frecuencia, deben ser responsables, a lo sumo por el 10 % del tiempo permitido para las tasas de error de bit (TEB) descritas en las condiciones de desempeño de la red considerada. Esto indica que las variaciones de TEB causadas únicamente por la influencia de interferencias externas deben cumplir las condiciones impuestas en la siguiente ecuación:

$$P(t > TEB_i) \leq 0.1 \cdot p_i; \quad i = 1, \dots, l \quad (16)$$

Observe que la relación de las tasas de error de bit (TEB) con la razón energía de bit y nivel de ruido térmico (E_b/N_0) es dada por la siguiente función:

$$t = g(n), \quad (17)$$

donde t es la tasa de error de bit y n es la relación energía de bit/nivel de ruido térmico. Una disminución de la razón E_b/N_0 resulta en un aumento de la TEB, por lo que la función g es decreciente. Como resultado, las restricciones en (16) pueden ser también reescritas de la siguiente forma:

$$P[n < (E_b/N_0)_i] \leq 0.1 \cdot p_i; \quad i = 1, \dots, l \quad (18)$$

$$(E_b/N_0)_i = g^{-1}(TEB_i); \quad i = 1, \dots, l \quad (19)$$

Al considerar solo la presencia de las interferencias generadas por fuentes externas, sea Λ la degradación, es posible expresar la relación E_b/N_0 en cielo abierto ca (clear sky) en dB:

$$\Lambda = (E_b/N_0)_{ca} - n, \quad (20)$$

donde $(E_b/N_0)_{ca}$ representa la razón E_b/N_0 en cielo abierto.

Al considerar la expresión (20) las restricciones de (18) pueden ser expresadas como,

$$P(\Lambda > \xi_i) \leq 0.1 \cdot p_i; \quad i = 1, \dots, l, \quad (21)$$

en la expresión anterior el término ξ_i se determina como:

$$\xi_i = (E_b/N_0)_{ca} - (E_b/N_0)_i; \quad i = 1, \dots, l, \quad (22)$$

En la expresión (21) es posible observar que las restricciones muestran que la Función Distribución de Probabilidad Complementarias de la degradación Λ proveniente de las interferencias externas se expresa por la

siguiente ecuación,

$$FDPC_{\Lambda}(\xi) = P(\Lambda > \xi) = 1 - F_{\Lambda}(\xi) \quad (23)$$

Las restricciones de la expresión (23) pueden ser cumplidas para muchas curvas. Al emplear [13], donde se muestra una serie de pasos que conforman una metodología que, al considerar los valores mínimos ξ_{min} y máximos ξ_{max} de la variable aleatoria Λ es posible determinar, a través de una parametrización adecuada y de la solución de un problema de optimización con algunas restricciones convenientes, una función densidad de probabilidad para la variable aleatoria Λ , tal que la probabilidad de Λ que pertenezca al intervalo abierto (ξ_{min}, ξ_{max}) sea el máximo.

Se propone que la función distribución de probabilidad complementaria asociada a la función densidad de probabilidad obtenida sea empleada como una máscara $M_{\Lambda}(\xi)$ para analizar el comportamiento estadístico de la degradación Λ derivada de las interferencias externas que afectan el enlace de un receptor de una estación terrestre. Por tanto, el comportamiento estadístico de la variable aleatoria Λ debe satisfacer la siguiente condición,

$$FDPC_{\Lambda}(\xi) \leq M_{\Lambda}(\xi), \quad \forall \xi \in [\xi_{min}, \xi_{max}] \quad (24)$$

La degradación de la variable aleatoria Λ de la razón E_b/N_0 , provocada por la interferencia externa, se relaciona con la razón interferencia-ruido como en [9] y puede ser expresada en dB:

$$\Lambda = 10 \cdot \log \left(1 + 10^{\frac{I_p/N_p}{10}} \right) \quad (25)$$

donde I_p/N_p representa la razón interferencia-ruido expresada en dB. Al emplear el relacionamiento de (25) puede mostrarse que,

$$FDPC_{I_p/N_p}(\Gamma) = FDPC_{\Lambda} \left[10 \cdot \log \left(1 + 10^{\frac{\Gamma}{10}} \right) \right], \quad (26)$$

que indica que la función distribución de probabilidad complementaria de la razón interferencia-ruido puede ser obtenida directamente de la función distribución de probabilidad complementaria de la variable aleatoria Λ . Luego dado el relacionamiento considerado en (24) es posible mostrar que:

$$M_{I_p/N_p}(\Gamma) = M_{\Lambda} \left[10 \cdot \log \left(1 + 10^{\frac{\Gamma}{10}} \right) \right] \quad (27)$$

Al considerar las expresiones (27) y (15) puede ser obtenida una máscara de $EPFD_{\downarrow}$

$$M_{EPFD_{\downarrow}}(Z) = M_{\Lambda} \left[10 \cdot \log \left(1 + 10^{\frac{Z+\tau}{10}} \right) \right] \quad (28)$$

La Tabla I destaca los parámetros utilizados en conjunto con la metodología desarrollada en [13] y el relacionamiento

obtenido en (27) para determinar la máscara $M_{EPFD_{\downarrow}}(Z)$. Además, son considerados $\xi_{min} = 0$, $\xi_{max} = 25$ y $N = 3$. Los límites de $EPFD_{\downarrow}$ correspondientes a los parámetros anteriormente relacionados son mostrados en la Tabla II, válidos para diámetro de antenas 1.8 metros, que corresponden a las muestras de la máscara $M_{EPFD_{\downarrow}}$, o puede ser traducido como los valores que del par (M_l, p_l) , con l definido $(1, 2, \dots, B)$, donde debe ser satisfecha la siguiente relación

$$M_{EPFD_{\downarrow}}(M_l) = p_l, \quad l = 1, 2, \dots, B \quad (29)$$

TABLA I
PARÁMETROS EMPLEADOS EN LA OBTENCIÓN DE $M_{EPFD_{\downarrow}}(Z)$

TEB_i	$(E_b/N_0)_i$ [dB]	ξ_i [dB]	p_i
1×10^{-6}	6.5	10.3	0.0004
1×10^{-8}	7.6	11.4	0.006
1×10^{-9}	8.7	12.5	0.004

TABLA II
LÍMITES DE $EPFD_{\downarrow}$ MEDIANTE LA RECOMENDACIÓN ITU-R S.1323

$EPFD_{\downarrow}$ [dB (W/m ²)]	$T_{\%}EPFD_{\downarrow}$	Banda de frecuencia (GHz)	Diámetro antena (m)
-196	0	4	1,8
-169,8	80		
-165,6	99		
-163,8	99,9		
-162,5	99,99		
-150,1	99,9997		
-149,1	99,99996		
-149	100		

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones de la investigación. Para realizar el análisis del cumplimiento de los límites de la función distribución de probabilidad complementaria de la densidad de flujo de potencia equivalente para los servicios fijos por satélites que satisfacen la máscara de la Fig. 2 en la región de Norte América, fueron empleados dos constelaciones de satélites N-GSO de tipo Walker Delta cuyas características son presentadas en la Tabla III.

TABLA III
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS SISTEMAS DE SATÉLITES N-GSO
CONSIDERADOS

Sistema	B	D
Altura [km]	1414	1375
Inclinación del plano orbital [grado]	55	84,7
Número de planos orbitales	4	12
Número de Satélites por planos	5	24
ΔM entre planos adyacentes [grados]	0	1,25
Espacio entre planos [grados]	90	15,36

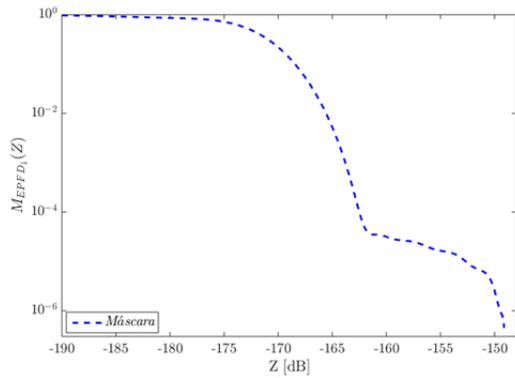


Fig. 2. Máscara a ser satisfecha por la función distribución de probabilidad complementaria de la densidad de flujo de potencia equivalente.

En los dos escenarios analizados, se consideraron una frecuencia de 4 GHz, los diagramas de radiación propuestos en [1] y la recomendación dada en [14], para las antenas de la estación terrena interferida y de los satélites N-GSO de la constelación, respectivamente. Para los sistemas descritos en la Tabla III fueron definidas estaciones terrenas interferidas ubicadas en las siguientes latitudes: 30, 38, 46 y 55 grados. Los resultados obtenidos para las diferentes latitudes de la estación terrena interferida son comparados con la máscara de la Fig. 2. Estas comparaciones son presentadas en las siguientes figuras

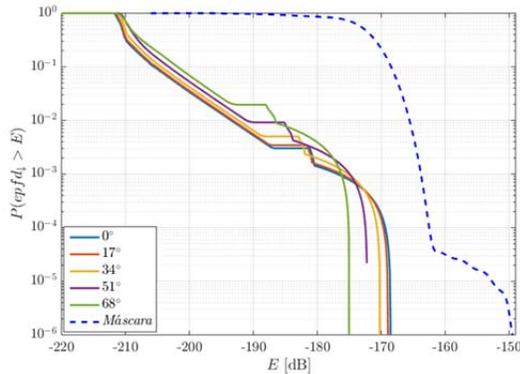


Fig. 3. Comparación entre la máscara y un Sistema B que opera en la latitud 30° y radio de 1.8 m.

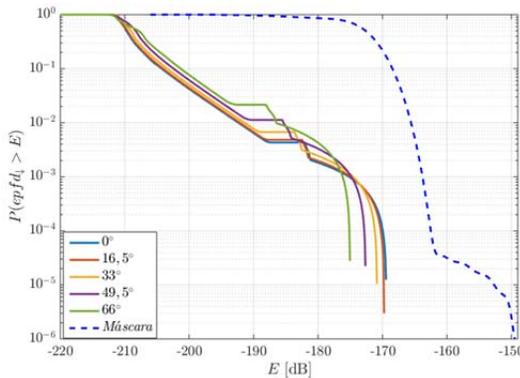


Fig. 4. Comparación entre la máscara y un Sistema B que opera en la latitud 38° y radio de 1.8 m.

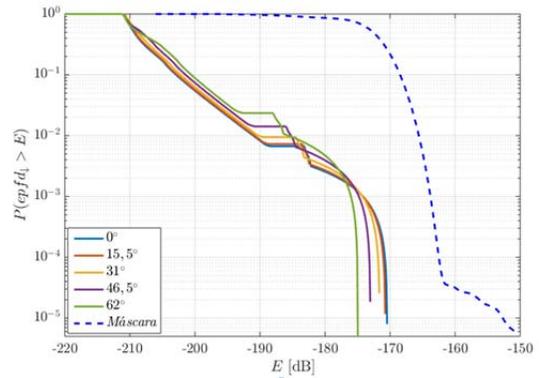


Fig. 5. Comparación entre la máscara y un Sistema B que opera en la latitud 46° y radio de 1.8 m.

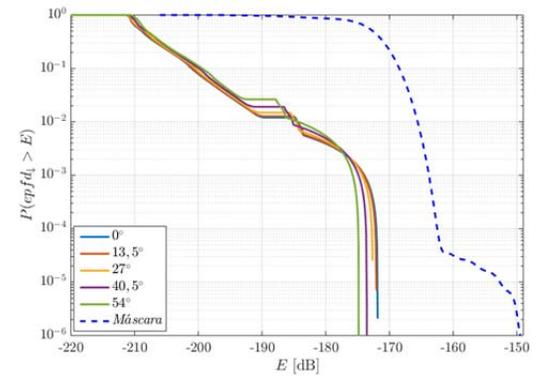


Fig. 6. Comparación entre la máscara y un Sistema B que opera en la latitud 55° y radio de 1.8 m.

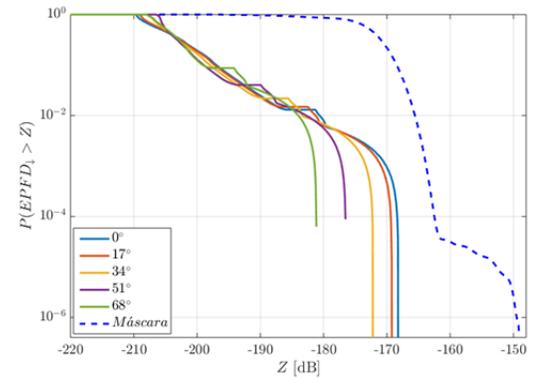


Fig. 7. Comparación entre la máscara y un Sistema D que opera en la latitud 30° y radio de 1.8 m.

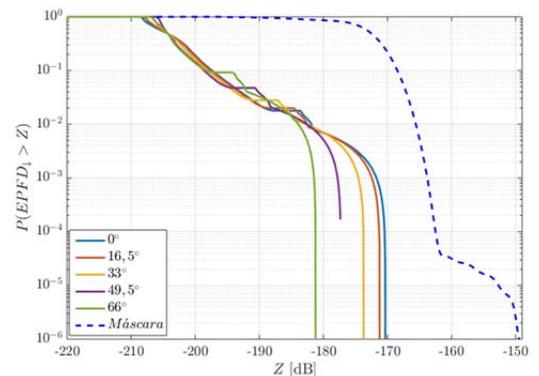


Fig. 8. Comparación entre la máscara y un Sistema D que opera en la latitud 38° y radio de 1.8 m.

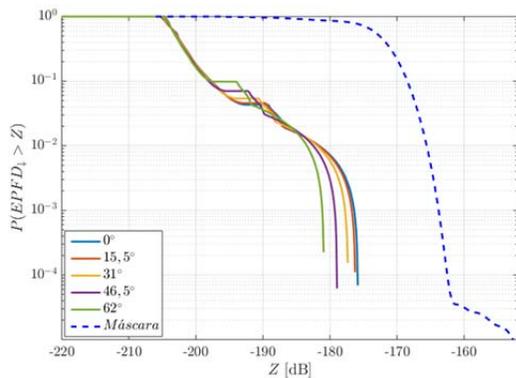


Fig. 9. Comparación entre la máscara y un Sistema D que opera en la latitud 46° y radio de 1.8 m.

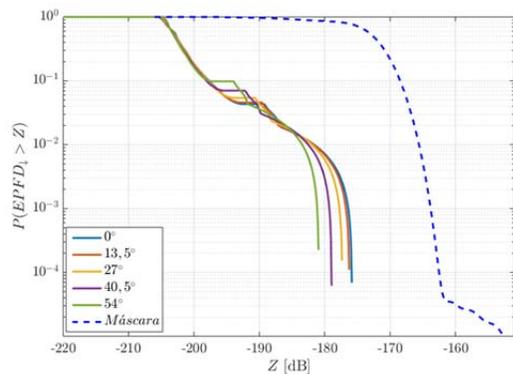


Fig. 10. Comparación entre la máscara y un Sistema D que opera en la latitud 55° y radio de 1.8 m.

V. CONCLUSIONES

En esta investigación se ha presentado y discutido el desenvolvimiento matemático para la determinación de la máscara $EFPD_i$ al partir de criterios para la protección del Sistema Fijo por Satélites ya establecidos. Fue descrita una metodología para determinar una máscara $EFPD_i$, esta máscara fue avalada a través de comparaciones con las funciones distribución de probabilidad complementaria de las densidades de flujo de potencia equivalente generadas por los enlaces descendentes de un sistema de satélites non-GSO en la estación terrestre receptora interferida GEO al emplear una antena receptora de 1.8 metros. En la comparación fueron analizados dos sistemas de satélites non-GSO con estructura de la constelación de Walker Delta [10]. Dada la investigación realizada se concluye que la máscara de protección obtenida es adecuada para proteger estaciones terrenas interferidas en la región de Norte América de la interferencia generada por los sistemas de satélites N-GSO analizados en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] *Radio Regulations*. Recomendación ITU (International Telecommunication Union), 2012.
- [2] ITU, "Continued development of interference criteria and methodologies for fixed-satellite service coordination between feeder links of non-geostationary satellite networks in the mobile-satellite service and geostationary-satellite networks in the fixed-satellite service in the bands 19.3-19.7 GHz and 29.1-29.5 GHz", en *Conf. ITU World Radiocommunication Conference final acts*, 1997, pp. 474-476.

- [3] *Radio Regulations, International Telecommunication Union, Computer simulation of short-term interference between the feeder-links of two Non-GSO MSS networking sharing the 5 and 7 ghz bands*. Recomendación ITU-R, Document 4A/11-E, Sep. 1996.
- [4] *Radio Regulations, Interference between two N-GSO FSS networks*. Recomendación ITU-R, Document a4/101-E, Sep. 1996.
- [5] *Radio Regulations, Simulation of in-line interference between the feeder links of four separate Non-GSO MSS constellation sat 5/7 ghz (leo-c, leo-d, leo-e and leo-f)*. Recomendación ITU-R, Document 4A/109-E, Sep. 1996.
- [6] *Radio Regulations, Simulation results on the epfd calculation for N-GSO FSS system operating in the 12 ghz frequency range*. Recomendación ITU-R, Document 4A/32-E, Feb. 1998.
- [7] *Radio Regulations, Working document towards a preliminary draft new recommendation on frequency sharing between the N-GS fixed satellite service N-GSO and the fixed service (FS) in the band 40.5-42.5 ghz*. ITU, Document 4A/32-E, Feb. 1998.
- [8] UIT, "Studies relating to consideration of allocations in bands around 1.4 GHz for feeder links of the non-geostationary-satellite systems in the mobile-satellite service with service links operating below 1 GHz" en *Conf. ITU World Radiocommunication Conference final acts*, 2000, pp. 435-437.
- [9] R. Pino and J. Fortes. "Proteção de redes do Serviço Fixo por Satélite que utilizam satélites geoestacionário contra a interferência gerada pelos lances de descida de sistemas não geoestacionários operando na faixa 3,7-4,2 GHz", tesis de maestría, PUC-Rio, Brasil, Apr. 2018.
- [10] JG. Walker. "Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage", Royal Aircraft Establishment. Technical report, Tech. Rep. 70211 (UDC 629.195: 521.6), 1970.
- [11] J. Forte, R. Sampaio-Neto and J.E Amadores-Maldonado, "Analytical method for assessing interference in interference environments involving NGSO satellite networks", *International journal of satellite communications* 17.6. pp 399-419. (1999).
- [12] *Radio Regulations, Maximum permissible levels of interference in a satellite network (GSO/FSS; non-GSO/FSS; non-GSO/MSS feeder links) for a hypothetical reference digital path in the fixed-satellite service caused by other codirectional FSS networks below 30 GHz*, Recommendation ITU-R S. 1323, 1997.
- [13] J. Fortes and A. Batista, "Satellite link performance under rain and external interferences: Constraints to be imposed on the statistical behavior of the external interferences". *International Journal of Satellite Communications and networking*, 2010.
- [14] *Radio Regulations, Satellite antenna radiation pattern for use as a design objective in the fixed-satellite service employing geostationary satellite*, Recommendation ITU-R S.672-4, 1997.