



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
DIRECCIÓN DE POSTGRADO

Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en
Ingeniería Mecánica

**ANÁLISIS DE RENDIMIENTO ELECTROMECAÁNICO DEL
RADIOTELESCOPIO CALTECH SUBMILLIMETER
OBSERVATORY BAJO CONDICIONES EXTERNAS EN EL
LLANO DE CHAJNANTOR, CHILE**

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica

JULIO ESTEBAN NAVARRO NORAMBUENA
CONCEPCIÓN – CHILE, JULIO 2022

Profesor Guía: Cristián Molina Vicuña

Co-guías: José Vial – Cristian Canales – Rodrigo Reeves – Nicolás Lastra

Dpto. de Ingeniería Mecánica Facultad de Ingeniería

Centro para la instrumentación astronómica CePIA, Departamento de
Astronomía

Universidad de Concepción

Agradecimientos

A mi madre Sandra y a mi padre Julio por confiar y arrimar a su árbol a esta alma que, en vela, que deambula en la duda del mundo y del espacio, que despojaron la objetividad de las leyes creando aquello que no hay y haciendo florecer aquello que murió.

A mis sobrinos, Ismael y Luciano, luces perspicaces de un cielo estrellado que sigo con zapatos rotos de tanto andar.

A mis hermanas, Valeria y Paula, que en su lucha diaria de la maternidad y la exigencia de la sociedad me desapego del privilegio y de los musgos del ayer para aprender y desaprender cada día.

A mi abuela Lili, que en su caminar humeante y en el dulzor de su abrazo me multiplica las ansias de ser.

A mi compañera, Flor, que hoy está aquí empujando los muros de babel por mí.

A mis amigos y amigas: Gonzalo, Matías, Diego, Annay, Kareem, Nicolás, Camila, Alberto, Javier, que, en mis peores versiones, pudieron despejar la marea de mi piel y en mis mejores, supieron desprender de sus labios y su cuerpo la dicha de pertenecerles.

A mis amigos y colegas, Cristian y José, que dieron sin esperar, que padecieron la desdicha de mis estropajosos argumentos, que al final del día retocábamos haciéndolo realidad.

A Rodrigo que apostó en la lucha de mi ignorancia y que siempre jugó a ganador por mí.

Al Dim y a CePIA, por existir.

Finalmente, a Cristián, que en la angustia confió en estas letras para lograrlo.

~ Ebenezer ~

RESUMEN

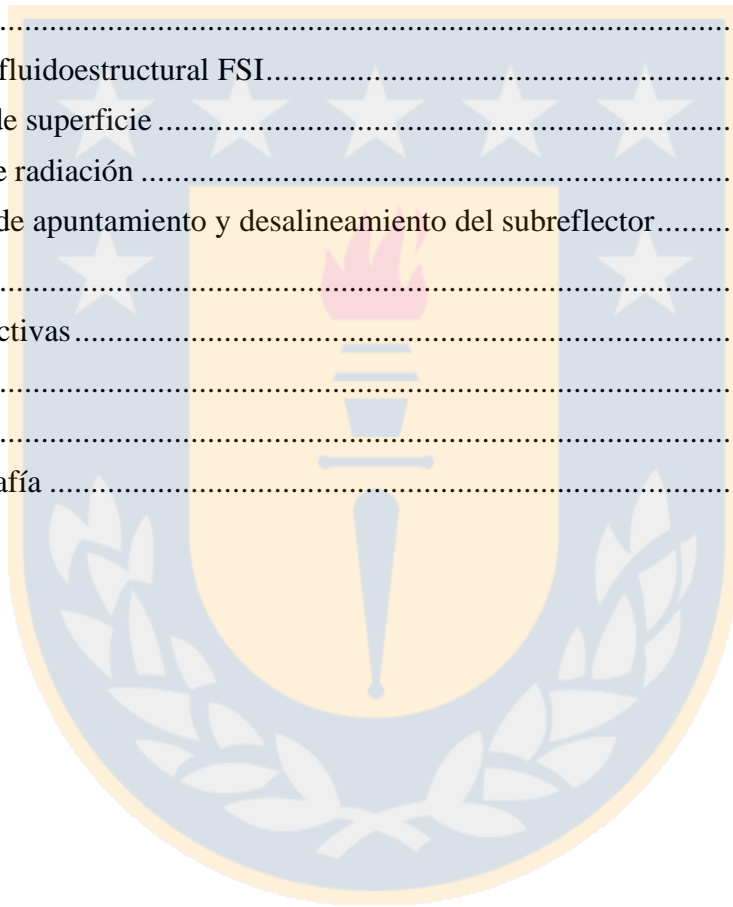
Los cielos de Chile son considerados los mejores para realizar astronomía en el mundo, es por eso que un gran número de observatorios se han construido en la zona norte predominantemente en las regiones de Antofagasta y Coquimbo. Entre estos observatorios se pueden destacar algunos como: ALMA, La Silla, Tololo, Las Campanas o Paranal, los cuales cuentan con telescopios de alta tecnología que ayudan a entregar información relevante e imprescindible para conocer el comportamiento del universo. Con el fin de avanzar aún más en potenciar la astronomía en Chile, es que se emplaza el ambicioso proyecto “Leighton Chajnantor Telescope”, proyecto que pretende traer un radiotelescopio desde Mauna Kea en Hawái al llano de Chajnantor en la región de Antofagasta que está siendo liderado por la Universidad de Concepción, el Instituto Tecnológico de California (Caltech) y la Universidad Normalista de Shangai.

La observación astronómica necesita de una alta precisión de los equipos de observación y los elementos que lo componen, ya que al intentar medir señales tan débiles como las astronómicas, cualquier perturbación podría conllevar a que los datos no sean del todo precisos o de buena calidad. Uno de los elementos más críticos a nivel de precisión dentro del telescopio es el reflector primario, el cual es el encargado de reflejar en una primera instancia las señales que provienen desde el espacio, por tanto, la superficie debe ser cercana al de una parábola ideal. Debido a las condiciones externas tales como viento o gravedad (factores que son considerados en esta investigación), inherentemente los paneles que componen el reflector se verán desplazados de su posición original al igual que el subreflector, el cual es fundamental para reflejar en una segunda oportunidad las señales. El objetivo de la siguiente investigación es determinar la magnitud de estos desplazamientos y conocer qué tan alejado queda la deformada del reflector respecto a lo que se denomina un paraboloides perfecto, además de determinar el desplazamiento que experimenta el subreflector bajo la acción del viento. Por otro lado, se estima el impacto que tienen estos dos efectos anteriormente descritos en el desempeño electromagnético del reflector y cómo afecta en la capacidad de recolección de energía de éste.

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1	11
1.1 Marco general y contextualización	11
1.2 Hipótesis y objetivos.....	15
1.2.1 Hipótesis.....	15
1.2.2 Objetivos	15
1.3 Metodología.....	15
CAPÍTULO 2	16
Área de investigación.....	16
2.1 Radiotelescopios y radioastronomía	16
2.2 Radiotelescopio CSO	17
CAPÍTULO 3	21
Errores de superficie	21
3.1 Problemática.....	21
3.2 Best fit paraboloid.....	22
CAPÍTULO 4	27
Modelo computacional mecánico	27
4.1 Gravedad	27
4.1.1 Modelo geométrico.....	27
4.1.2 Material	28
4.1.3 Condiciones de borde.....	28
4.1.4 Discretización.....	29
4.2 Viento.....	30
4.2.1 Modelo CFD.....	30
4.2.2 Modelamiento en ANSYS Workbench.....	36
CAPÍTULO 5	38
Modelo radiométrico.....	38
5.1 Brillo y potencia espectral.....	38
5.2 Apertura e iluminación.....	41
5.2.1 Apertura.....	41
5.2.2 Iluminación.....	42
5.3 Integral de radiación	45
5.4 Disco de Airy.....	46

5.5	Caso de estudio	51
5.5.1	Errores de superficie	51
5.6	Desalineamiento del subreflector y cambio de apuntamiento	58
CAPÍTULO 6	.....	65
Resultados.....	.....	65
6.1	Gravedad	65
6.1.1	Errores de superficie	65
6.1.2	Patrón de radiación	67
6.2	Viento.....	71
6.2.1	Análisis fluidoestructural FSI.....	71
6.2.2	Errores de superficie	74
6.2.3	Patrón de radiación	75
6.2.4	Cambio de apuntamiento y desalineamiento del subreflector.....	75
CAPÍTULO 7	.....	81
Conclusiones y perspectivas .....	.....	81
7.1	Conclusiones.....	81
7.2	Perspectivas	81
Referencias y bibliografía .....	.....	82

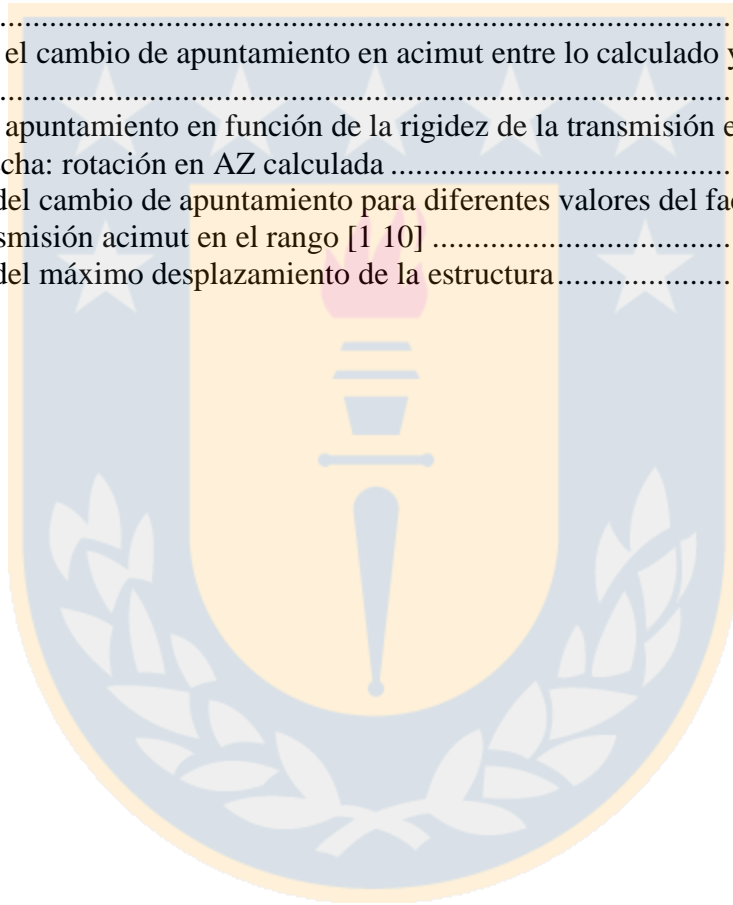


ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ilustración de los errores de superficie.....	12
Figura 2: Conjunto de radiotelescopios Atamaca Large Millimetric Array ALMA	17
Figura 3: Conjunto radiotelescopios ubicados en OVRO	17
Figura 4: Radiotelescopio CSO ubicado en Mauna Kea, Hawaái	18
Figura 5: Reflector primario y back-up structure (BUS) (D.Woody, Schaal, & Vail, 1994)	18
Figura 6: Configuración de antena tipo Cassegrain (Sasao & Fletcher, 2004).....	19
Figura 7: Sistema de corrección de errores de superficie DSOS.....	19
Figura 8: Ángulos característicos para observación.	20
Figura 9: Ilustración de superficie deformada y el <i>BFP</i> (Kong, Qiu, & Wang, 2014).....	22
Figura 10: Rutina de cálculo del paraboloide analítico.....	25
Figura 11: Plano óptico del radiotelescopio CSO.....	26
Figura 12: Modelo geométrico para análisis de gravedad.....	27
Figura 13: Ubicación del subreflector.....	28
Figura 14: Diagrama simplificado del sistema reflector-feedlges	28
Figura 15: Aceleración de gravedad actuando sobre el radiotelescopio	29
Figura 16: Discretización para análisis de gravedad.....	29
Figura 17: Modelo de radiotelescopio CSO para análisis CFD.....	31
Figura 18: Referencia de volumen de control para el análisis de viento de un telescopio (Upnere, 2012)	32
Figura 19: Cotas del volumen de control	32
Figura 20: Evolución de la densidad del aire en el llano de Chajnantor.....	33
Figura 21: Evolución de la viscosidad dinámica del aire en el llano de Chajnantor	34
Figura 22: Discretización del volumen cerca del radiotelescopio (arriba) - Discretización de las paredes (abajo)	35
Figura 23: Condiciones de borde para análisis CFD.....	35
Figura 24: Modelo CAD del radiotelescopio	36
Figura 25: Sistema de referencia del subreflector	36
Figura 26: Condición de presión [Pa]	37
Figura 27: Discretización del modelo FEA.....	37
Figura 28: Ilustración de la incidencia del brillo de una fuente sobre un ángulo sólido infinitesimal (Kraus, 1976).....	39
Figura 29: Patrón de radiación de una antena (Kraus, 1976)	40
Figura 30: Iluminación y apertura (Hecht, 2017)	41
Figura 31: Coordenadas de la apertura y del plano del patrón de radiación (Hecht, 2017).....	42
Figura 32: Propagación de un haz gaussiano (Goldsmith, 1998)	42
Figura 33: Evolución del perfil de amplitud del campo eléctrico a lo largo del eje de propagación (Goldsmith, 1998).....	43
Figura 34: Amplitud de campo eléctrico de un haz gaussiano en el plano	43
Figura 35: Amplitud de campo eléctrico en diferentes posiciones a lo largo del eje de propagación...	44
Figura 36: Potencia del campo eléctrico de un haz gaussiano en el plano.....	44
Figura 37: Ilustración de la propagación de un haz gaussiano en un sistema primario simple.....	45
Figura 38: Iluminación uniforme.....	47
Figura 39: Iluminación uniforme en el plano.	47
Figura 40: Ilustración de un disco de Airy (Hecht, 2017).....	48

Figura 41: Patrón de radiación de Airy	49
Figura 42: Patrón de radiación de Airy en el plano	49
Figura 43: Ubicación del FWHM	50
Figura 44: Ubicación del ángulo del primer nulo	50
Figura 45: Ubicación del nivel del primer lóbulo lateral	51
Figura 46: Diagrama de un reflector con error de superficie	52
Figura 47: Potencia del campo eléctrico normalizado del haz gaussiano llegando al reflector	54
Figura 48: Potencia del campo eléctrico del haz gaussiano normalizado en unidades de decibeles sobre el reflector.....	54
Figura 49: Función de iluminación gaussiana	55
Figura 50: Función de iluminación gaussiana en el plano de apertura	55
Figura 51: Patrón de radiación para una iluminación gaussiana $T = -12 \text{ dB}$	56
Figura 52: Función de iluminación gaussiana con bloqueo en el plano de apertura	56
Figura 53: Patrón de radiación para iluminación gaussiana con bloqueo, sin errores.....	57
Figura 54: Patrón de radiación para tres iluminaciones diferentes	57
Figura 55: Movimiento del subreflector en un sistema cassegrain por una rotación (Guiar & Lansing, 1986.)	59
Figura 56: Sistema reflector primario - subreflector para la condición de viento	60
Figura 57: Rotación de los datos.....	60
Figura 58: Ilustración del desalineamiento del subreflector.....	61
Figura 59: Desalineamiento lateral del subreflector respecto al reflector primario.....	61
Figura 60: Sistema de coordenadas acimutal-elevación y ángulo-horario y declinación (Guiar & Lansing, 1986.)	64
Figura 61: Errores de superficie debido a peso propio	66
Figura 62: Patrón de radiación 2D a 300 GHz considerando errores de superficie.....	67
Figura 63: Patrón de radiación a 300 GHz considerando errores de superficie en diferentes ángulos acimutales	68
Figura 64: Caída de potencia del lóbulo principal a 300 GHz	68
Figura 65: Patrón de radiación 2D a GHz GHz considerando errores de superficie	69
Figura 66: Patrón de radiación a 850 GHz considerando errores de superficie en diferentes ángulos acimutales	70
Figura 67: Caída de potencia del lóbulo principal a 850 GHz	70
Figura 68: Campo de velocidad total en m/s para el caso 30EL-180AZ. Arriba: Plano de perfil del radiotelescopio, centro: plano paralelo al suelo a una altura de 5 metros, abajo izquierda: plano perpendicular al suelo con vista de frente al radiotelescopio, abajo derecha: plano perpendicular al suelo con vista de frente al radiotelescopio justo detrás del reflector primario	72
Figura 69: Campo de desplazamiento total sobre el radiotelescopio para 30EL-180AZ.	72
Figura 70: Campo de velocidad total en m/s para el caso 30EL-225AZ. Arriba: Plano de perfil del radiotelescopio, centro: plano paralelo al suelo a una altura de 5 metros, abajo izquierda: plano perpendicular al suelo con vista de frente al radiotelescopio	73
Figura 71: Campo de desplazamiento total sobre el radiotelescopio para 30EL-225AZ	73
Figura 72: RMS error de superficie para condición de viento	74
Figura 73: Mapa de error de superficie $45^\circ - 315^\circ$	74
Figura 74: Patrón de radiación a 300 GHz (izquierda) y 850 GHz (derecha) considerando errores de superficie debido al viento para el caso 45EL-315AZ en diferentes ángulos acimutales del patrón de radiación en el plano	75

Figura 75: Desalineamiento del subreflector respecto al reflector primario	76
Figura 76: Cambio de apuntamiento respecto al eje <i>X</i> por rotación del sistema primario-subreflector (izquierda) y por desalineamiento del subreflector en la dirección <i>Y</i> (derecha).	76
Figura 77: Cambio de apuntamiento respecto al eje <i>Y</i> por rotación del sistema primario-subreflector (izquierda) y por desalineamiento del subreflector en la dirección <i>X</i> (derecha).	77
Figura 78: Cambio de apuntamiento en el eje <i>X</i> respecto al FWHM a 300 GHz.....	77
Figura 79: Cambio de apuntamiento en el eje <i>Y</i> respecto al FWHM a 300 GHz.....	77
Figura 80: Cambio de apuntamiento en el eje <i>X</i> respecto al FWHM a 850 GHz.....	78
Figura 81: Cambio de apuntamiento en el eje <i>Y</i> respecto al FWHM a 850 GHz.....	78
Figura 82: Medición de cambio de apuntamiento en los enconder del sistema	78
Figura 83: Comparativa de la rotación en acimut en base a lo calculado (izquierda) y lo medido (derecha).....	79
Figura 84: Error entre el cambio de apuntamiento en acimut entre lo calculado y lo medido en ANSYS	79
Figura 85: Cambio de apuntamiento en función de la rigidez de la transmisión en acimut. Izquierda: rotación en XEL. Derecha: rotación en AZ calculada	80
Figura 86: Variación del cambio de apuntamiento para diferentes valores del factor de amplificación de la rigidez de la transmisión acimut en el rango [1 10]	80
Figura 87: Variación del máximo desplazamiento de la estructura.....	80

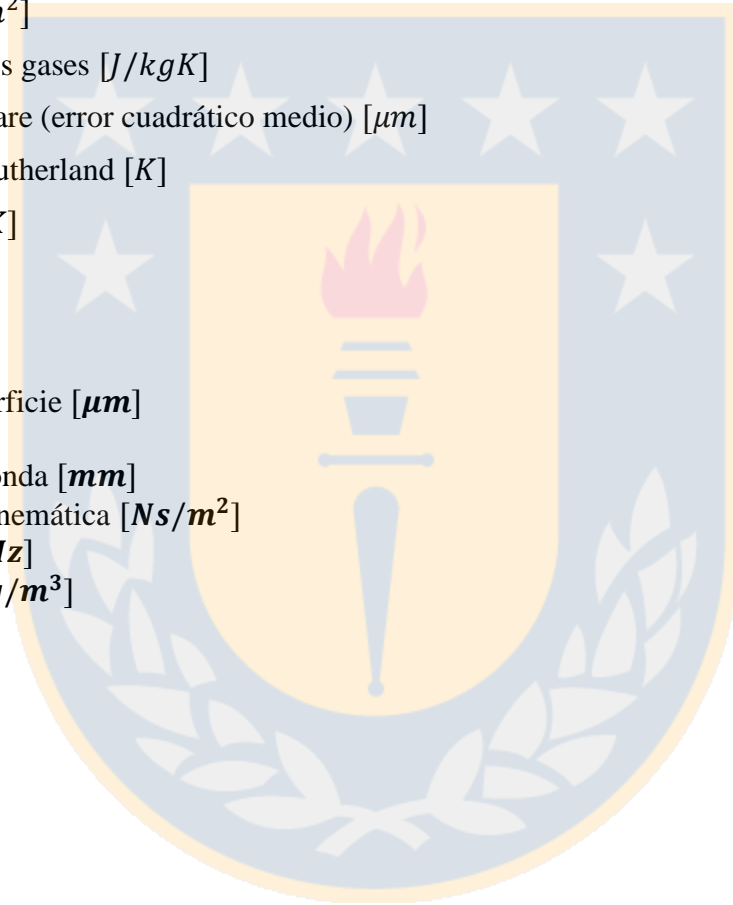


ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas del material utilizado en el entramado de viga (Retamal, 2018).....	28
Tabla 2: Parámetros de muestreo.....	53
Tabla 3: Comparación entre un disco de Airy y el modelo numérico propuesto.	53
Tabla 4: Parámetros de entrada para el modelo radiométrico.	58
Tabla 5: Parámetros para cálculo de apuntamiento por desalineamiento del subreflector	63
Tabla 6: Degradación de los parámetros característicos del patrón de radiación para el caso más desfavorable.....	71
Tabla 7: Cambio de apuntamiento en el eje de elevación cruzado θX por rotación del sistema reflector primario-subreflector [<i>arc. sec</i>].....	84
Tabla 8: Cambio de apuntamiento en el eje de elevación θY por rotación del sistema reflector primario-subreflector [<i>arc. sec</i>].....	85
Tabla 9: Desalineamiento lateral δx del subreflector [mm].....	85
Tabla 10: Desalineamiento lateral δy del subreflector [mm].....	86
Tabla 11: Desalineamiento axial δz del subreflector [mm].....	86
Tabla 12: Cambio de apuntamiento en el eje de elevación cruzado θX por desalineamiento lateral δy del subreflector [<i>arc sec</i>]	87
Tabla 13: Cambio de apuntamiento en el eje de elevación cruzado θY por desalineamiento lateral δx del subreflector [<i>arc sec</i>]	87
Tabla 14: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θX y el FWHM a 300 GHz	88
Tabla 15: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θx por desalineamiento lateral δy y el FWHM a 300 GHz	88
Tabla 16: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θX y el FWHM a 850 GHz	89
Tabla 17: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θx por desalineamiento lateral δy y el FWHM a 850 GHz	89
Tabla 18: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θy y el FWHM a 300 GHz.....	90
Tabla 19: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θy por desalineamiento lateral δx y el FWHM a 300 GHz	90
Tabla 20: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θy y el FWHM a 850 GHz.....	91
Tabla 21: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θy por desalineamiento lateral δx y el FWHM a 850 GHz	91

NOMENCLATURA

A	: Área [m^2]
BFP	: Best fit paraboloid
C	: Longitud al centro [mm]
D	: Diámetro [mm]
g	: Aceleración de gravedad [m/s^2]
N	: Cantidad de puntos
P	: Potencia [W/m^2]
R	: Constante de los gases [J/kgK]
RMS	: Root mean square (error cuadrático medio) [μm]
S	: Constante de Sutherland [K]
T	: Temperatura [K]
Δ	: Variación
Símbolos griegos	
ε	: Error de superficie [μm]
η	: Eficiencia
λ	: Longitud de onda [mm]
μ	: Viscosidad cinemática [Ns/m^2]
ν	: Frecuencia [Hz]
ρ	: Densidad [kg/m^3]



CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Marco general y contextualización

En el contexto del proyecto Leighton Chajnantor Telescope, en donde se pretende trasladar un radiotelescopio desde el Caltech Submillimeter Observatory (CSO) de 10,4 metros de diámetro ubicado actualmente en Mauna Kea, Hawaii al llano de Chajnantor en el desierto de Atacama, es que se enmarca la presente investigación. Las condiciones climáticas a las cuales se verá sometido el radiotelescopio son significativamente más complejas en comparación a las que hoy se tienen en Hawaii, las altas ráfagas de viento o los cambios abruptos de temperatura hacen que el desempeño del radiotelescopio y en especial del reflector primario se vean afectados negativamente. Históricamente las velocidades a las cuales se ha visto sometido el radiotelescopio en Mauna Kea, no superan los 6 m/s y temperaturas mínimas que no bajan de -4°C ni superan los 12°C ([Weather base, Mauna Kea Observatory, Hawaii](#)). Estas condiciones son bastante más favorables a las que se presentan en el llano de Chajnantor en Chile, ya que allí se han registrado históricamente promedios de temperatura mínimas, inferiores a -15°C por tiempos prolongados, además de una velocidad promedio de viento que supera los 20 m/s y donde incluso, existen ráfagas de hasta 30 m/s ([Alma science weather](#)), lo cual es significativo teniendo en cuenta que la velocidad de viento para la cual está diseñado este radiotelescopio es de 30 m/s. Por otra parte, en Mauna Kea el radiotelescopio ha sido protegido del viento mediante un domo que, co-rota junto con él, sin embargo, en Chile estará desprotegido y a la intemperie, por tanto, el riesgo de que el rendimiento del radiotelescopio se vea afectado negativamente se agudiza.

Frente a lo anterior es que se pretende predecir el comportamiento electromecánico de dicho radiotelescopio bajo diferentes condiciones externas en el llano de Chajnantor. La deformación del reflector primario debido a estas condiciones hace que la forma parabólica que posee el reflector se pierda, tomando una forma distorsionada y por tanto haciendo que exista una pérdida en la eficiencia de la observación, así como también lo hace el desplazamiento del subreflector el cual genera un cambio en el apuntamiento de la antena.

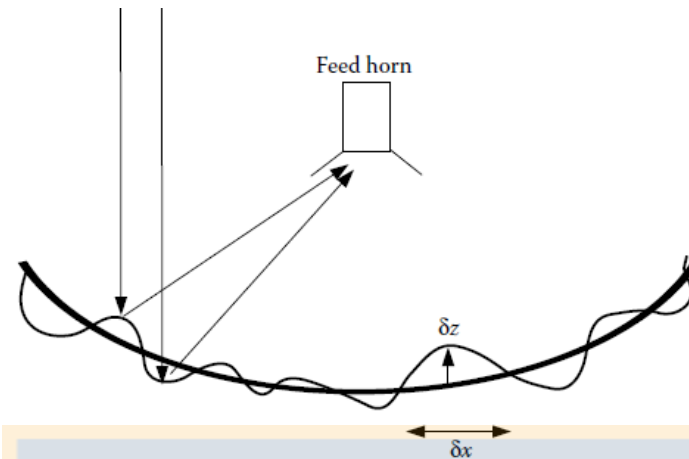


Figura 1: Ilustración de los errores de superficie

El grado de deformación del reflector se le conoce por variados nombres como: error de superficie, distorsión o desviación. Existen dos tipos de errores de superficie: aleatorios y sistemáticos. Este último hace referencia a qué tan alejado se encuentra la superficie deformada de un paraboloide perfecto de revolución *BFP* (forma ideal) por efecto de factores mecánicos como temperatura, viento, gravedad. En la Figura 1 se presenta una imagen ilustrativa de este efecto.

Los errores de superficie causarían que el recorrido que deben cruzar los rayos de luz desde el exterior hacia el foco sea diferente en varias zonas del reflector, es decir, los rayos viajan en desfase, como se muestra en la Figura 1. Estas diferencias hacen que exista una reducción en la eficiencia óptica, ya que las señales que llegan en desfase al foco del telescopio se van a cancelar entre sí en una magnitud proporcional al desfase de éstas.

El parámetro físico que se mide para la observación es una potencia eléctrica la cual es extraída de los equipos de recepción. Esta potencia eléctrica está relacionada con lo que se conoce como una densidad de flujo de energía que a la vez está relacionada con una distribución de brillo desde una fuente celeste, lo que permite finalmente caracterizarla. Cuando se observa con un telescopio, este brillo es modulado por lo que se conoce como patrón de radiación el cual representa la respuesta del telescopio a una fuente de iluminación (energía incidente) y caracteriza la capacidad de la antena de recolectar energía. Así el flujo de energía medido será siempre menor que el flujo real el cual a su vez relaciona el brillo de la fuente.

En la presente investigación se pretende caracterizar el patrón de radiación y con ello el rendimiento electromecánico del radiotelescopio y a la vez, el efecto que tienen los errores de superficie debido a su propio peso.

En astronomía, las antenas reflectoras han sido desarrolladas durante décadas con el fin de aumentar su precisión y calidad en las observaciones. (Y. Duan, 2009) hace fuerte referencia a que el diseño de los reflectores necesita ser investigado tanto desde el punto de vista mecánico como electromagnético con el fin de obtener un alto desempeño con bajos costos. Dentro del diseño desde el punto de vista electromagnético, el reflector debe tener la capacidad de acumular la mayor cantidad de energía proporcionada por una fuente celeste, esto es expresado mediante el patrón de radiación.

(Boonsale, 2001) sostiene que el patrón de radiación se puede expresar como la variación angular de intensidad de radiación a una distancia fija desde la antena, en donde ella puede estar emitiendo o recibiendo radiación. Generalmente los estudios son basados en lo que se conoce como el patrón de

radiación de campo lejano, es decir, a una distancia lo suficientemente lejano al reflector en donde ya no existe variación en la forma del patrón de radiación, contrario al patrón de radiación de campo cercano, el cual se desarrolla cercano al reflector y puede considerarse como un estado transiente de éste, y evoluciona hasta una distribución sin mayores variaciones a un estado estacionario (campo lejano). (Stutzman, 1988) plantea que la formulación teórica del problema puede ser tratado mediante tres métodos tradicionales: integración geométrica óptica de apertura (GO/AI), integración física geométrica de superficie (PO/SI) e integración física óptica de apertura (PO/AI). (Samii, *A comparison of between GO/aperture-field and physical optics methods for offset reflectors*, 1984) compara dos métodos diferentes: óptica geométrica (GO) y física óptica (PO) encontrando en esta última, una ventaja respecto al método GO, ya que permite evaluar las asimetrías del patrón de radiación y el efecto de la difracción en los bordes del reflector.

Dentro del diseño desde el punto de vista mecánico, es intuitivo pensar que el elemento reflector no siempre es ideal teniendo siempre errores sobre su superficie, tanto por la operación misma como por la fabricación y el montaje lo cual afecta en la capacidad del reflector de recibir o emitir energía (principio de reciprocidad). Existen dos tipos de errores de superficie: sistemáticas y aleatorias. Las primeras son aquellas debidas a cargas sobre el reflector (carga propia, nieve, viento, temperatura) y las segundas debido a montaje y errores de manufacturación las cuales que son difíciles de controlar. (Ruze, *The Effect of Aperture Errors on the Antenna Radiation Pattern.*, 1952) (Ruze, *Antenna tolerance theory*, 1962) fue el primero en considerar los errores aleatorios que se sucedían sobre un reflector y su efecto sobre el desempeño de éste. En dichos estudios los errores son tratados de forma estadística subdividiendo el reflector en anillos concéntricos en donde a cada uno de los anillos se le asigna una distribución de error probabilística y luego es acoplada con las ecuaciones que rigen el patrón de radiación del campo lejano con el fin de conocer el impacto que los errores tenían sobre el desempeño del reflector.

De allí hacia adelante son variados los estudios que abordan esta problemática, enfocando el objetivo en modelar de manera teórica los errores tanto aleatorias como sistemáticas, para así determinar su efecto en el desempeño del reflector con el fin de corregir estos errores cuando el telescopio se encuentra en operación. (Kong, Qiu, & Wang, 2014) analizan el diseño de un reflector de 110 m mediante un método de optimización, determinando los parámetros que permiten determinar los errores sistemáticos, minimizando la pérdida de energía que se genera por los errores, mostrando la importancia de realizar un análisis electromecánico. (Li, Duan, & Zheng, 2012) propone mediante un método matemático determinar los errores aleatorios (método fractal en tres dimensiones) en donde posteriormente dicha función es acoplada a la ecuación que rige el patrón de radiación de forma teórica, evitando la complejidad y poca exactitud que podría llevar este último cálculo mediante un software de simulación debido a que las discretizaciones desde un modelo estructural a uno electromagnético podrían variar, degradando los resultados finales. Asimismo (Xian, Wang, & Lian, 2009) evalúan el desempeño electromagnético describiendo los errores de superficie mediante polinomios de Zernike los cuales permiten modelarlos mediante las diferentes aberraciones ópticas como por ejemplo coma o astigmatismo, los errores de superficie. La metodología compara los resultados teóricos con resultados mediante software.

De la misma forma es posible realizar el mapeo del patrón de radiación en forma experimental para caracterizar el comportamiento del reflector. (Baars, Lucas, Mangum, & Lopez-Perez, 2007) mediante holografía en dos de los telescopios de ALMA determinan el patrón de campo cercano, es decir próximo al reflector de forma experimental relacionándolo con el patrón de radiación del campo lejano, con ello es posible determinar los errores de superficie sobre el reflector, corregirlos y medir, iterando sobre el último resultado hasta concretar una superficie cercana a la ideal.

Lo que se propone en la presente investigación es determinar los errores de superficie sistemáticos mediante simulación numérica, determinando los desplazamientos que experimenta el reflector a través de un software de simulación que utiliza el método de elementos finitos y posteriormente determinar el BFP permitiendo conocer los errores para diferentes condiciones reales de operación del radiotelescopio en Chajnantor. A través de esto se pretende conocer posteriormente el patrón de radiación de campo lejano y cómo afectan los errores sistemáticos en él.

Como segundo tópico que se aborda es el efecto del movimiento del subreflector respecto a su posición inicial, el cual tiene como resultado un cambio en el apuntamiento de la antena, esto es, que no se está observando lo que debería observarse. El impacto que puede tenerse es variable dependiendo de la configuración óptica del sistema y al mismo tiempo, del elemento que se ve afectado. Por ejemplo, en una configuración primario-simple, donde el receptor se encuentra en el foco del reflector primario, el movimiento del foco primario es mucho más crítico en esta configuración en comparación a una configuración Cassegrain, es decir, con un subreflector y con un foco secundario. Sin embargo, el impacto también depende de los parámetros físicos, tales como el foco primario, el diámetro del reflector, la geometría del subreflector (si existiese), entre otros. (Ruze, *The Effect of Aperture Errors on the Antenna Radiation Pattern.*, 1952) entrega las herramientas teóricas para la determinación del cambio de apuntamiento de la antena cuando, los diferentes elementos reflectores son desplazados de su posición inicial, lo cual en (B.L.Ulich, 1976) han sido verificadas mediante sus mediciones. En (Baars J. W., 2007) se aborda también esta problemática realizando un análisis detallado para el caso de una configuración primario-simple, mostrando al mismo tiempo el impacto sobre el patrón de radiación.

En la presente investigación se abordará esta problemática utilizando las ecuaciones teóricas para determinar el cambio de apuntamiento de la antena a partir del desplazamiento del subreflector, el cual será determinado mediante simulación computacional de un análisis fluido-estructural FSI.

1.2 Hipótesis y objetivos

1.2.1 Hipótesis

A partir de la modelación numérica electromecánica es posible establecer el rendimiento radiométrico del radiotelescopio considerando las condiciones externas a las cuales se verá sometido en su nuevo asentamiento.

1.2.2 Objetivos

1.2.2.1 Objetivo general

El objetivo principal es predecir el comportamiento electromecánico del radiotelescopio cuando esté operando en el llano de Chajnantor.

1.2.2.2 Objetivos específicos

1. Modelar el efecto de carga propia y viento para diferentes condiciones de operación.
2. Programar un algoritmo que permita aproximar a un paraboloide de revolución perfecto (BFP) a la superficie deformada y así conocer el grado de error del reflector.
3. Estudiar el patrón de radiación para el caso ideal.
4. Incorporar los errores de superficie en el patrón de radiación y estudiar el efecto que tienen sobre éste.
5. Estimar el impacto que tiene el viento en el apuntamiento de la antena.

1.3 Metodología

Para lograr estos objetivos se realizará:

- Análisis estático para peso propio mediante el método de elementos finitos de la estructura soportante.
- Análisis del viento mediante CFD mediante el método de volúmenes finitos del radiotelescopio en su totalidad.
- Análisis estructural por efecto del viento.
- Aproximación de lo que se conoce como paraboloide perfecto (BFP) para realizar la comparación respecto del reflector deformado mediante lenguaje MATLAB.
- Realización y validación de modelo numérico para desarrollo de análisis radiométrico.
- Análisis radiométrico para el caso con errores de superficie.
- Análisis de cambio de apuntamiento de la antena debido al viento mediante el método del BFP.

CAPÍTULO 2

Área de investigación

2.1 Radiotelescopios y radioastronomía

Un radiotelescopio es un equipo utilizado para la observación astronómica que permite captar señales del espectro de ondas de radio y observar objetos en el universo difíciles de captar con otro tipo de instrumentación. La rama de la astronomía que analiza y procesa señales en el rango de longitudes de onda de radio (milimétrica y submilimétrica) se denomina radioastronomía.

La luz en estas longitudes de onda proviene de vastas nubes frías en el espacio interestelar, a temperaturas de solo unas pocas decenas de grados por encima del cero absoluto, y de algunas de las galaxias más antiguas y distantes del universo. Los astrónomos pueden usarlo para estudiar las condiciones químicas y físicas en las nubes moleculares, las regiones densas de gas y polvo donde nacen nuevas estrellas. A menudo, estas regiones del universo son oscuras y oscurecidas por la luz visible, pero brillan intensamente en la parte milimétrica y submilimétrica del espectro (Retamal, 2018).

El radiotelescopio se utiliza principalmente para la observación de fuentes celestiales a frecuencias desde 10 MHz hasta 1 THz (10^6 Hz hasta 10^{12} Hz), tales como pulsares o Cuasares.

Este tipo de telescopios fue desarrollado por primera vez como tal en 1937 por Grote Reber que construyó la primera antena parabólica y realizó el primer mapa de emisión de frecuencias de radio de la galaxia. Anteriormente Karl Jansky en 1935 detectó una señal desconocida desde el centro de la galaxia, convirtiéndose en la primera observación radioastronómica. Las fascinantes observaciones que llegarían posterior a esto y al desarrollo en masa de la radioastronomía son variados, tales como (Fecyt, 2014):

- Nacimiento de estrellas y nubes planetarias
- Púlsares
- Supernovas
- Cuásares
- Agujeros negros
- Observación de la línea de emisión del hidrogeno en el universo
- Emisión de fondo cósmico (radiación de las primeras etapas del universo)
- Eyección de cantidad de materia desde un agujero negro (jets)
- Galaxias lejanas

Un radiotelescopio está compuesto por un disco principal en forma de paraboloides en donde las ondas son reflejadas haciéndolas converger en un solo punto denominado foco, donde esta señal posteriormente es reflejada en un segundo reflector denominado subreflector, el cual vuelve a reflejar las ondas a otro instrumento ubicado en el centro del reflector primario en donde se convierten en señales eléctricas que serán posteriormente procesadas y analizadas. En radioastronomía para captar buenas señales se deben utilizar grandes antenas o conjunto de éstas que simulan una antena más grande, este conjunto se denomina *Array*. La técnica de combinar las antenas se denomina Radiointerferometría o Interferometría.

En la Figura 2 se presenta como referencia el conjunto de radiotelescopios (*Interferómetro*) de onda milimétrica y submilimétrica ubicada en el llano de Chajnantor, Chile.



Figura 2: Conjunto de radiotelescopios *Atacama Large Millimetric Array ALMA*

2.2 Radiotelescopio CSO

El Radiotelescopio que pretende arribar al llano de Chajnantor, es uno de los 7 telescopios desarrollados por el profesor Robert Leighton en la década de los 70 puestos en marcha en un inicio en Owens Valley Radio Observatory (OVRO) a 1200 metros de altura en Estados Unidos. Posteriormente se desarrolla uno de mayor precisión para ser puesto en marcha en el Caltech Submillimeter Observatory (CSO) a 4000 metros de altura en Mauna Kea, Hawaii, siendo éste el elegido para ser parte del proyecto LCT.

En la Figura 3 se presenta uno de los radiotelescopios anteriormente descritos en OVRO con etiquetas de los componentes más relevantes para el presente estudio y en la Figura 4 el telescopio CSO ubicado en Mauna Kea.

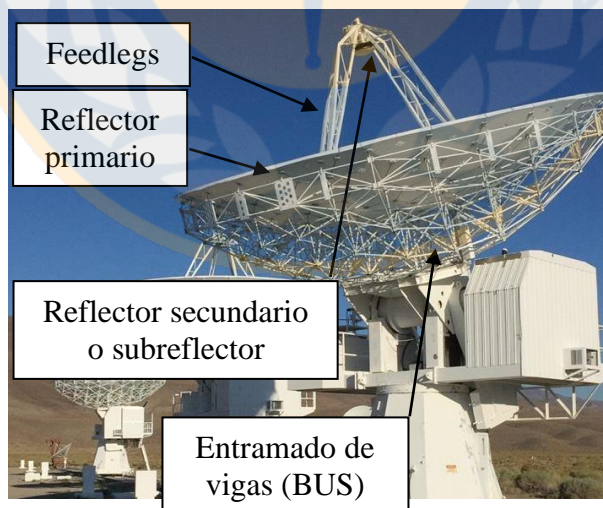


Figura 3: Conjunto radiotelescopios ubicados en OVRO

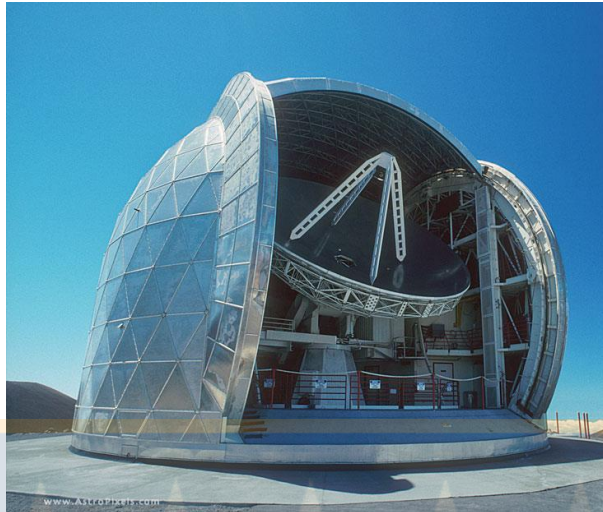


Figura 4: Radiotelescopio CSO ubicado en Mauna Kea, Hawaái

El reflector principal de este radiotelescopio está formado por 84 paneles hexagonales tipo *honeycomb* de aluminio soportados por 3 barras cada uno llamadas *stand-off* y un entramado de vigas de acero denominado *Back up Structure* (BUS) presentado en (D.Woody, Schaal, & Vail, 1994) y tiene un diámetro total de 10,4 m y un diámetro colector de 10,2 m. El reflector principal ha demostrado que con el control activo que posee para corregir las irregularidades sobre la superficie, se ha logrado obtener 11 μm RMS de irregularidad sobre ésta, y capacitado para trabajar eficientemente para longitudes de onda de operación mayores a 350 μm . En la Figura 5 se presenta un diagrama del BUS.

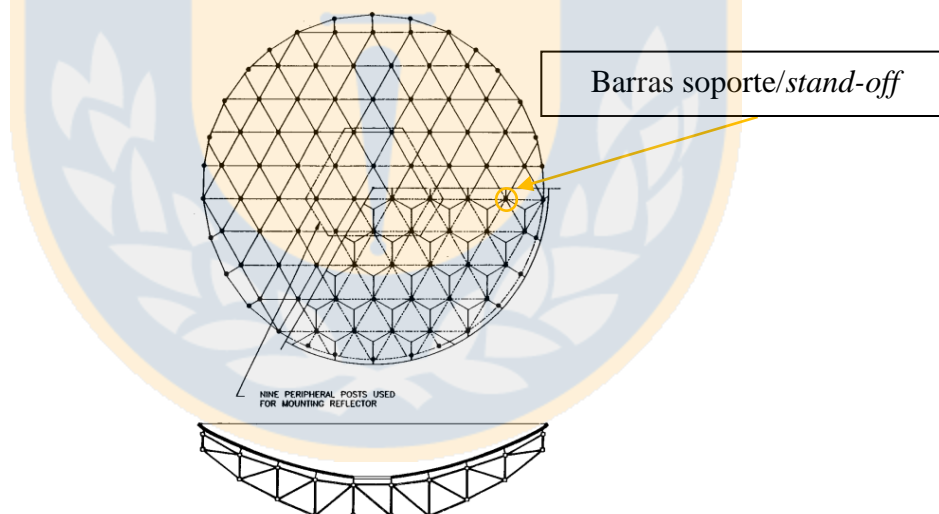


Figura 5: Reflector primario y *back-up structure* (BUS) (D.Woody, Schaal, & Vail, 1994)

La antena es construida en base al diseño *Cassegrain-Nasmyth*, el cual posee un reflector primario parabólico, un secundario hiperbólico y un reflector terciario bajo el reflector primario. En la Figura 6 se presenta la configuración de una antena tipo *Cassegrain*.

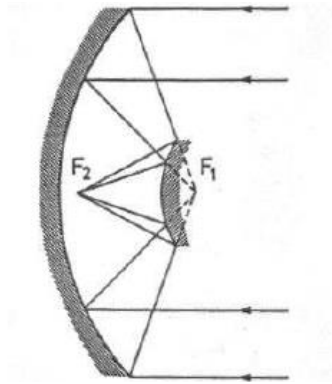


Figura 6: Configuración de antena tipo *Cassegrain* (Sasao & Fletcher, 2004)

El tercer reflector *Cassegrain* se posiciona justo debajo del reflector principal. Las ondas pasan a través de un orificio en el centro del reflector primario para que éstas lleguen al reflector *Cassegrain* y éste refleje las ondas a uno de los costados hacia el foco *Nasmyth* en donde están los instrumentos de adquisición.

Debido a los diferentes efectos físicos que hacen que se generen irregularidades superficiales, se diseña el CSO con un sistema de corrección de estas irregularidades (errores de superficie). Este sistema es termoeléctrico llamado controlador *Peltier* el cual está conectado a un objeto que puede enfriarse o calentarse. En este caso el “objeto” son las barras soporte o *stand-off*, las que al ser calentadas o enfriadas son deformadas permitiendo un desplazamiento de los paneles, tanto para subirlos o bajarlos ajustando el reflector a una forma más cercana a un paraboloide de revolución perfecto. En la Figura 7 se presenta el sistema anteriormente descrito.



Figura 7: Sistema de corrección de errores de superficie DSOS (Dish System Optimization Surface).

Por otra parte, algunos telescopios (incluido LCT) poseen un sistema que permite observar en diferentes direcciones del cielo, combinando dos direcciones angulares conocidas como elevación y acimutal.

En la Figura 8 se presenta ilustrado el ángulo de elevación θ a la derecha y acimut Φ en la izquierda.

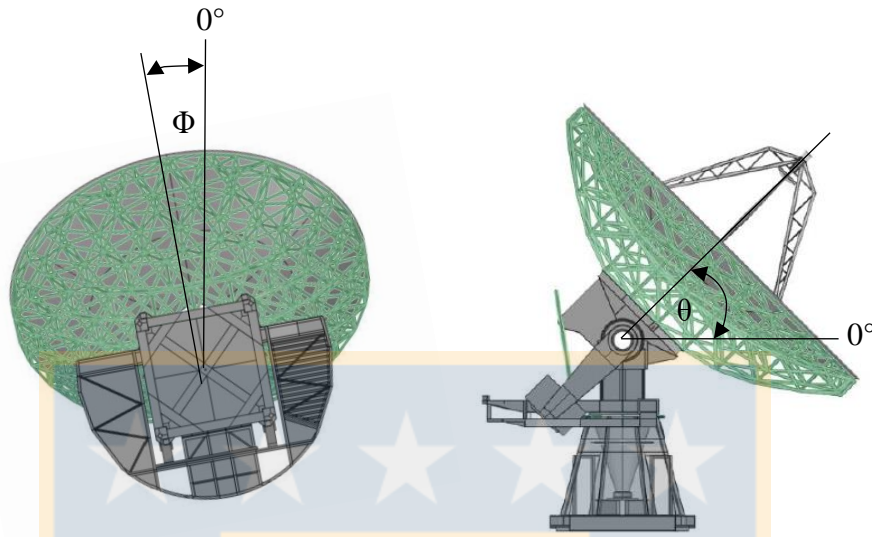


Figura 8: Montura Alt-Acimutal.

Cabe destacar que el ángulo acimutal en astronomía se mide desde el punto cardinal sur barriendo en el sentido de las agujas del reloj, es decir, sur-oeste-norte.

CAPÍTULO 3

Errores de superficie

3.1 Problemática

Los factores externos a los cuales se ve y se verá sometido el radiotelescopio, hacen que la superficie del reflector primario pierda su forma ideal, generando así una disminución de la cantidad de energía incidente que es capaz de recolectar, lo cual se traduce en un aumento del tiempo de observación, que resulta en un aumento de los costos. Es por ello que, predecir el comportamiento electromecánico que se tendrá en las condiciones de operación en el nuevo asentamiento en Chile se hace relevante considerando que el radiotelescopio trabaja en longitudes de onda milimétrica y submilimétrica, en donde el cambio en la forma del reflector se hace aún más crítico para la eficiencia de la observación.

El grado de desviación entre la superficie deformada y la mejor aproximación que puede tener ésta a una superficie ideal (Best Fit Paraboloid) se denomina error de superficie, estos pueden ser sistemáticos o aleatorios. Los primeros son generados por factores mecánicos como gravedad, temperatura o viento, mientras que los segundos son generados por factores aleatorios como montaje o fabricación y que no son controlables. Existen variados estudios asociados al análisis de los errores de superficie, sin embargo, la forma más práctica de determinarlos es en forma empírica mediante holografía, como se ha realizado en (Baars, Lucas, Mangum, & Lopez-Perez, 2007) o en (Serabyn, 1991), pero esta técnica requiere tener a disposición el radiotelescopio en operación, lo cual hasta el momento en este caso de estudio no sucede.

(Li, Duan, & Zheng, 2012) proponen una metodología para modelar los errores aleatorios considerando los valores discretos sobre el reflector, y no su valor RMS, pero estos errores siguen siendo una estimación sometida a cierto sesgo ya que, dependen de parámetros libres. Lo que se propone para tratar los errores de superficie, es determinar éstos en base a los desplazamientos de la estructura soportante del reflector primario, mediante el método de elementos finitos y la ayuda de un software especializado, en donde se extrae una cantidad finita de puntos. Lo anterior es posible abordarlo considerando que la forma de la estructura soportante del reflector está diseñada tal que el campo de desplazamiento tenga una forma particular conocida y no aleatoria.

Los errores de superficie se definen formalmente como: “Que tan alejado se encuentra el reflector primario deformado con respecto a un paraboloide de revolución perfecto o BFP (Best Fitting Paraboloid)” (Kong, Qiu, & Wang, 2014). La Figura 9 muestra de forma ilustrativa la superficie teórica, la superficie deformada y el ajuste de ésta mediante el *BFP*.

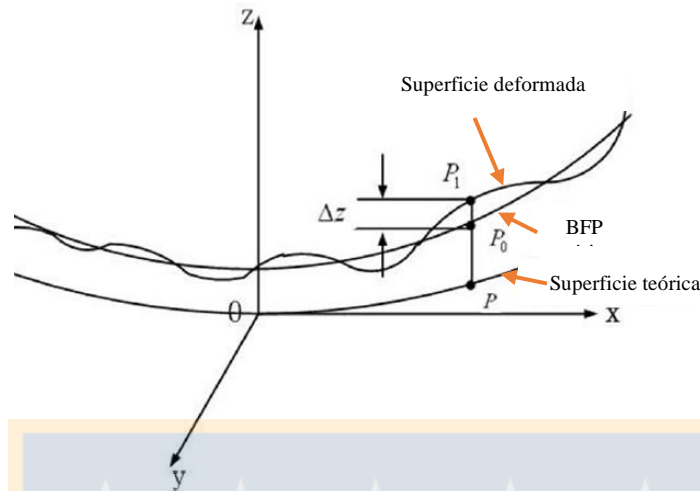


Figura 9: Ilustración de superficie deformada y el BFP (Kong, Qiu, & Wang, 2014)

Aquí ε , es definida como el error de superficie y representada por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \Delta z = z_{BFP} - z_{Deformado} \quad (1)$$

donde z_{BFP} es la posición del punto en el eje de simetría de la superficie ajustada y z_0 , la posición en el eje de simetría del punto físico del panel que fue desplazado. En la presente investigación se pretende cuantificar los campos de ε para diferentes condiciones de operación y observación del radiotelescopio.

3.2 Best fit paraboloid

Para ajustar los puntos generados por el desplazamiento de los paneles se describe el algoritmo presentado en (Miller, 2001) el cual se basa en un problema de optimización. Un paraboloides puede ser escrito de forma cartesiana como:

$$z = a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x + d \cdot y + e \quad (2)$$

donde a, b, c, d y e son constantes, con a y b constantes de forma. Si $a = b$ entonces el paraboloides tiene semiejes iguales, por lo tanto, se denomina paraboloides circular, si $a \neq b$ entonces, sus semiejes son distintos, por lo tanto, se dice que es un paraboloides elíptico. Se plantea una rutina iterativa con el fin de determinar los coeficientes correspondientes al paraboloides teórico a partir de la alineación del eje de simetría del paraboloides medido con uno de los ejes del sistema coordenado global. Esto se realiza mediante la minimización del error cuadrático medio de las distancias entre los puntos medidos y la superficie ajustada.

Sea un conjunto de puntos medidos en el reflector $\{x_i, y_i, z_i\}_0$ con $i = \{1, 2, 3, \dots, m\}$, con m igual al número de puntos medidos sobre la superficie donde éstos son rotados mediante cuatro matrices de rotación R_j de manera independiente las cuales representan la rotación mediante un ángulo θ respecto al eje X positivo, eje X negativo, eje Y positivo y eje Y negativo, respectivamente.

Estas matrices son:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) & 0 \\ 0 & \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \cos(-\theta) & -\text{sen}(-\theta) & 0 \\ 0 & \text{sen}(-\theta) & \cos(-\theta) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\text{sen}(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\theta) & 0 & \cos(-\theta) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$R_4 = \begin{pmatrix} \cos(-\theta) & 0 & -\text{sen}(-\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(-\theta) & 0 & \cos(-\theta) \end{pmatrix} \quad (6)$$

El conjunto de puntos es rotado en los sentidos anteriormente descritos de forma independiente, resultando en cuatro grupos de puntos nuevos $\{x_i, y_i, z_i\}_j$ con $j = \{1,2,3,4\}$. Para construir la cuádrica se determinan los coeficientes de la ecuación resolviendo el sistema dado por:

$$\begin{pmatrix} x_{1,j}^2 & y_{1,j}^2 & x_{1,j} & y_{1,j} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m,j}^2 & y_{m,j}^2 & x_{m,j} & y_{m,j} & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} a_j \\ b_j \\ c_j \\ d_j \\ e_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ z_{m,j} \end{bmatrix} \quad (7)$$

o puede ser expresado como:

$$A_j x_j = b_j \quad (8)$$

La solución del sistema anterior, es posible determinarse a partir de la minimización del residual expresado como:

$$e_j = \| A_j x_j - b_j \| \quad (9)$$

Esto da como resultado que el vector de coeficientes puede ser determinado como:

$$x_j = (A_j^T A_j)^{-1} A_j^T b_j \quad (10)$$

Así, se construye el j -ésimo paraboloides dado por:

$$z_j = a_j \cdot x_{i,j}^2 + b_j \cdot y_{i,j}^2 + c_j \cdot x_{i,j} + d_j \cdot y_{i,j} + e_j \quad (11)$$

Luego se determina la distancia entre la j -ésima superficie teórica determinada con los coeficientes anteriores y los j -ésimos datos rotados como se definió en la ecuación (1) como:

$$\varepsilon_{i,j} = z_j - z_{i,j} \quad (12)$$

Luego se determina el error cuadrático medio (RMS) para los datos rotados por la j -ésima matriz de rotación como:

$$\varepsilon_{rms,j} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta z_{i,j}^2} \quad (13)$$

El proceso se repite para el j -ésimo grupo de datos a partir de las cuatro rotaciones, es decir, se determinarán cuatro valores diferentes del error cuadrático medio. Esto se realiza para conocer en qué dirección angular se genera el valor ε_{rms} mínimo, por tanto, al conocer qué nube de puntos lo posee entonces, la data de puntos inicial para la siguiente iteración será la nube de puntos que genera el mínimo valor ε_{rms} en la iteración anterior. Además, el ángulo de entrada de la siguiente iteración se disminuye mediante un factor f que permite que los puntos cada vez se roten en menor medida y así ajustar en cada iteración de mejor manera la superficie. Mediante este proceso los puntos originales van rotando respecto al eje X y eje Y sucesivamente en una especie de barrido hasta que el eje de simetría de los puntos (que forman el paraboloides) coincida con el eje axial Z del sistema de referencia global, esto se realiza hasta un cierto criterio de detención. Cuando este criterio se satisface entonces, se determinan los coeficientes de la última iteración y se construye la superficie teórica determinando ε_{rms} y las distorsiones $\Delta z_{i,j}$.

Por otra parte, se determinan las rotaciones que experimentan los datos para lograr el reconstruir el BFP, esto se realiza para la condición de viento, la cual genera que el radiotelescopio cambie su apuntamiento debido a las rotaciones que esta condición genera. Gracias a esto, es posible determinar el grado de desalineamiento del subreflector respecto al reflector primario, la cual se discutirá en capítulos posteriores. El algoritmo del BFP puede ser representado mediante el diagrama de bloques presentado en la Figura 10.

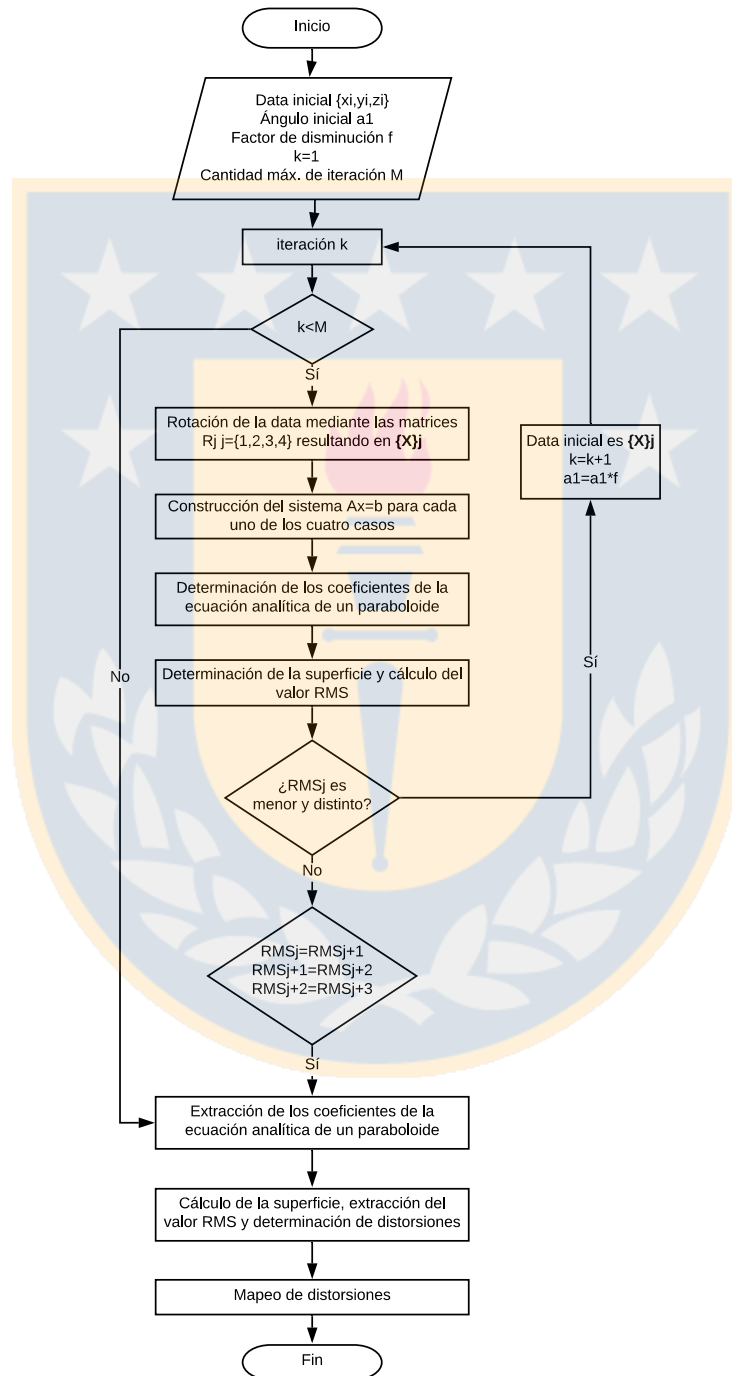


Figura 10: Rutina de cálculo del paraboloido analítico

Debido a que el algoritmo se basa en un problema de optimización de valores iniciales, en específico, lo que se entrega como variable de partida es el ángulo de rotación de partida y el factor de reducción de éste. Para el análisis se fijó el factor de reducción en 0,99 es decir, una reducción del 1% del ángulo por iteración y al mismo tiempo se realizó un análisis de sensibilidad para determinar la estabilidad del algoritmo, donde se varió el ángulo de partida. Como variable de salida se considera el desalineamiento del subreflector y los ángulos de rotación que se calculan en base a este algoritmo.

Con lo anterior es posible verificar la variación del foco que se genera respecto al foco que tiene teóricamente el reflector, el cual tiene un valor de 4123,26 mm y se muestra en el recuadro en amarillo de la Figura 11 junto con la configuración Cassegrain-Nasmyth comentada en el capítulo precedente.

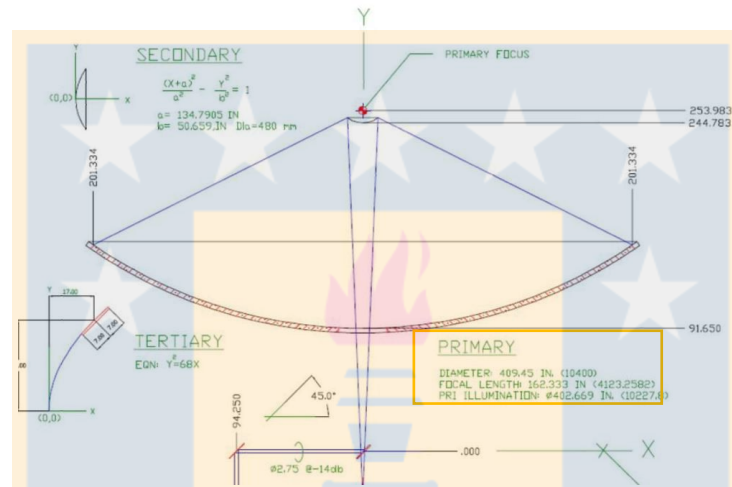


Figura 11: Plano óptico del radiotelescopio CSO

Con el fin de visualizar los errores descritos anteriormente se precisa construir mapas de errores de superficie $\varepsilon(r, \chi)$ que presenten mediante una escala de colores los valores sobre el reflector primario. Para realizar estos mapas, se debe primeramente determinar los desplazamientos de los puntos de apoyo de los paneles del reflector primario esto mediante el método de elementos finitos y con ayuda del software ANSYS. Posterior a ello se deben interpolar todos los puntos generados por esta deformada mediante el paraboloide analítico descrito en el algoritmo anteriormente presentado.

Adicionalmente, es posible determinar la eficiencia por rugosidad del radiotelescopio en función de la longitud de onda de operación, el diámetro del reflector y el valor RMS del error de superficie (Sasao & Fletcher, 2004).

$$\eta_{Ruze} = e^{-\left(\frac{4\pi v \varepsilon_{rms}}{c}\right)^2} \quad (14)$$

donde v corresponde a la frecuencia de operación del telescopio, que para el caso del CSO se encuentra en un rango entre 300 y 850 GHz, y c a la velocidad de la luz.

CAPÍTULO 4

Modelo computacional mecánico

4.1 Gravedad

4.1.1 Modelo geométrico

El modelo FEA está compuesto por todos los elementos menos el reflector primario y los *stand-offs*. El reflector secundario es modelado mediante una viga ubicada en la parte superior de los feedlegs. Los elementos utilizados son elementos de vigas, cáscaras y sólidos de primer orden. Para determinar los errores de superficie sistemáticos, se debe determinar el desplazamiento de una cantidad discreta de puntos conocidos del reflector primario. En el modelamiento se consideran 108 puntos de medición que son los puntos en donde nacen las barras que soportan el reflector que se muestran en la Figura x.

El reflector primario es considerado mediante masas puntuales ubicadas en los puntos bajo las barras de soporte de éste, distribuyendo así la masa de 1373 kg en 108 puntos.



Figura 12: Modelo geométrico para análisis de gravedad

Además, se considera la masa del reflector secundario el cual tiene un valor de 100 kg. Para el modelo, se modela mediante una viga rígida la cual se muestra en la Figura 13.

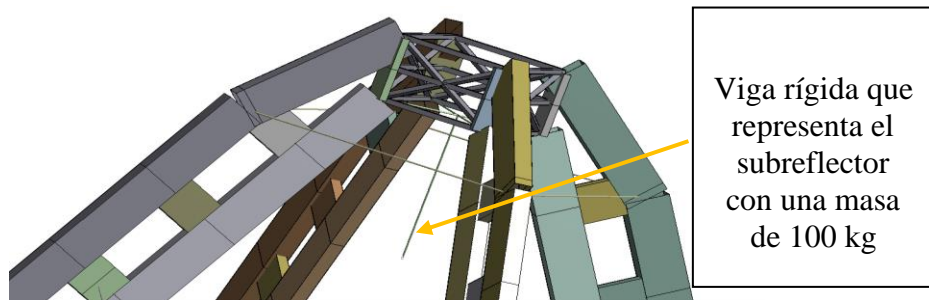


Figura 13: Ubicación del subreflector

4.1.2 Material

El material utilizado para el análisis es acero estructural ASTM A-36 con las características mecánicas que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del material utilizado en el entramado de viga (Retamal, 2018)

Densidad	7850 kg/m ³
Módulo de elasticidad	210 GPa
Módulo de Poisson	0,3

4.1.3 Condiciones de borde

Para comprender la aplicación de la carga propia se define el eje de simetría del radiotelescopio como muestra la Figura 14.

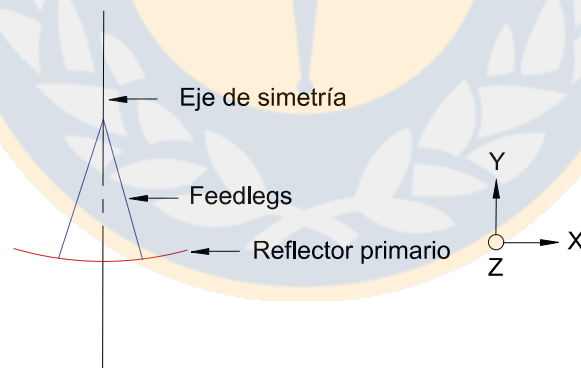


Figura 14: Diagrama simplificado del sistema reflector-feedlegs

La aceleración de gravedad apunta siempre coincidiendo con el eje Y del sistema global como se muestra en la Figura 15.

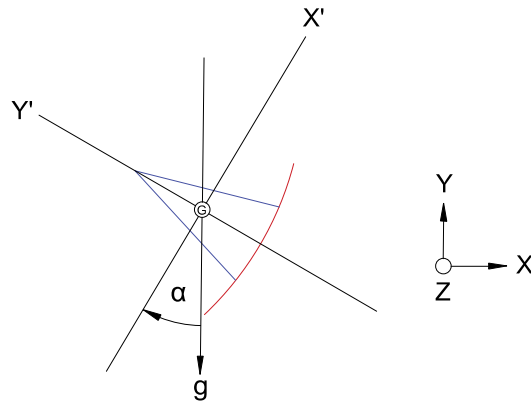


Figura 15: Aceleración de gravedad actuando sobre el radiotelescopio

4.1.4 Discretización

Para la discretización se utilizan elementos de viga de primer orden, debido a que no existen estructuras que posean una curvatura que justifique el uso de elementos de mayor orden. Para los contrapesos se utilizan elementos 3D y para las demás estructuras, se utilizan elementos de cáscara de primer orden.

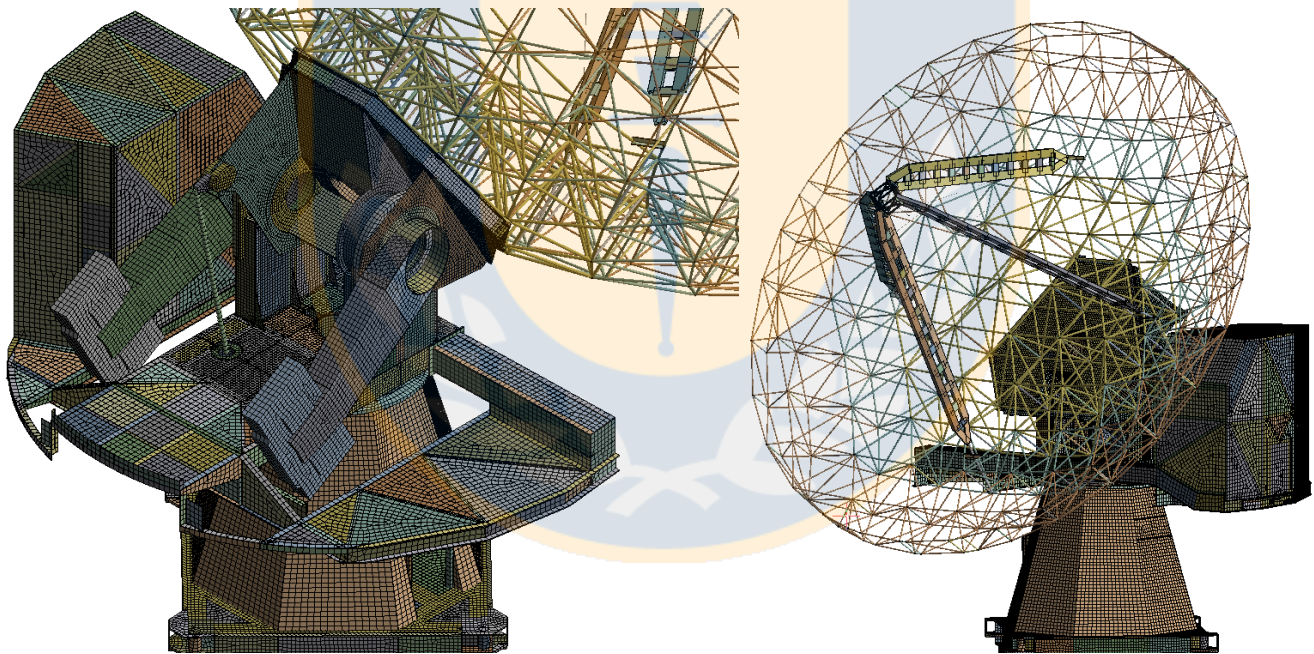


Figura 16: Discretización para análisis de gravedad

4.2 Viento

Uno de los efectos más críticos en el llano de Chajnantor son las altas magnitudes de la velocidad del viento que se dan en este sitio. El efecto del viento no es significativo desde el punto de vista de los errores de superficie ya que su influencia en comparación a la gravedad es mínima (D.Woody, Schaal, & Vail, 1994). Sin embargo, el hecho de que el viento incida sobre la estructura, desplazándolo de su posición inicial, afecta directamente en el apuntamiento que el radiotelescopio tiene. Así, el análisis fluido-estructural *FSI* del efecto del viento se resume en determinar el cambio en el apuntamiento del radiotelescopio tanto por el efecto de que toda la estructura rota y al mismo tiempo de que el subreflector queda desalineado de su posición inicial respecto al eje óptico del reflector primario.

4.2.1 Modelo CFD

El modelo elegido para la simulación es el modelo *Realizable $k - \varepsilon$* , o *$k - \varepsilon^*$* , modelo que es parte del grupo de métodos de turbulencia *RANS* (Reynolds Averaged Navier – Stokes Simulation), el cual tiene una relación calidad/costo bueno respecto a otros modelos de turbulencia tales como *$k - \omega$* , *SST $k - \omega$* , *RNG $k - \varepsilon$* , los cuales son más caros a nivel computacional. Además, el modelo *$k - \varepsilon^*$* es adecuado cuando existen altos desprendimientos (los cuales se esperan debido a la geometría de problema) y recirculación (Guide, 2013). Además, considerando lo realizado en (Upnere, 2012) se analiza el comportamiento fluidodinámico del radiotelescopio RT-32 tomando un modelo de turbulencia *$k - \varepsilon$ standard*. Por otra parte, se consideró un paso de tiempo de 0,001 segundos con un total de 35000 pasos de tiempo con el fin de modelar 35 segundos de simulación pero, utilizando solamente los últimos 20 con el fin de extraer los resultados luego de que la simulación haya logrado un alto grado de convergencia, el cual está bajo análisis en base a los valores residuales tanto de las velocidades en las tres direcciones, la ecuación de conservación y de continuidad y en base a los parámetros de la energía de turbulencia *k* y la tasa de disipación de la energía de turbulencia ε . Además, se controla el *número de Courant* el cual representa la velocidad de cálculo sobre cada elemento del volumen de control, que está definido como:

$$C = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \quad (15)$$

donde *u* es la velocidad del fluido, Δt el paso de tiempo elegido y Δx el tamaño del elemento del volumen de control. Se recomienda para el software ANSYS-FLUENT que este valor tenga como máximo un valor igual 4 con el fin de lograr resultados fidedignos.

4.2.1.1 Modelo geométrico

El BUS no es considerado debido a la complejidad que éste tiene de ser modelado como un sólido (lo que es necesario para el presente análisis) en comparación con las demás estructuras. Esto en vista que el BUS está compuesto por 1247 vigas, de secciones transversales de diferentes dimensiones, y teniendo en cuenta que luego éstos deben ser extraídos del volumen de control de análisis y ser discretizados. Lo anterior lleva a un modelo computacional costoso, con una cantidad de elementos superior a la cantidad de recursos computacionales que se tienen a disposición. Por otra parte, los feedlegs no son considerados debido a que éstos están conectados con el BUS, y como se mencionó, éstos no son considerados, por tanto, los feedlegs tampoco. Además, se asume que la deformación del reflector, está relacionada más directamente con éste, más que con el BUS o los feedlegs. Sin embargo, para el post procesamiento para conocer la deformación de la estructura por el efecto del viento, si se considerarán los feedlegs y el BUS. Para el modelo CFD se considera: Teepee, plataforma de elevación, plataforma acimutal, contrapesos, reflector primario, cabina de instrumentación.

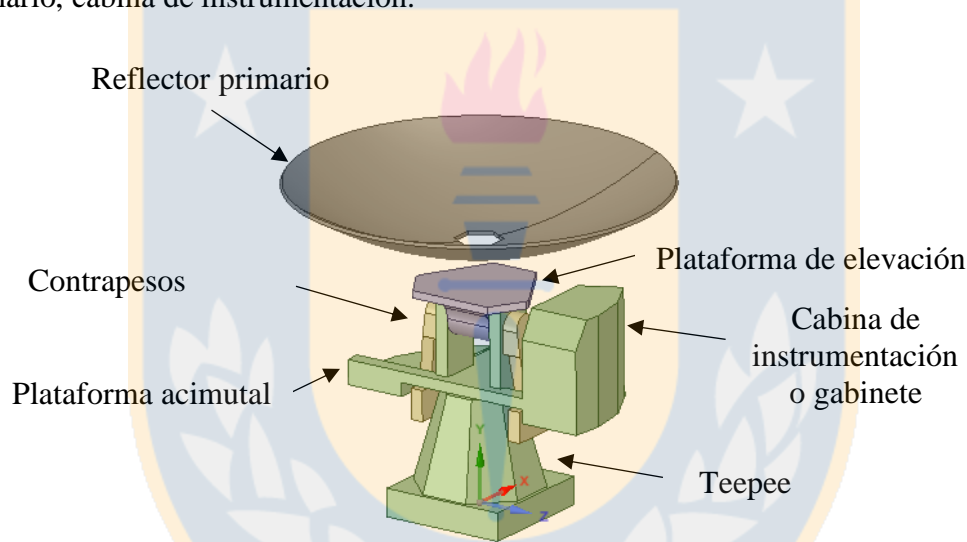


Figura 17: Modelo de radiotelescopio CSO para análisis CFD

Las dimensiones del volumen de control son escogidas tomando cierta referencia a lo que se expone en (Upnere, 2012) donde se analiza un radiotelescopio de 32 metros de diámetro en donde se determinan dichas dimensiones en base a la altura del radiotelescopio como se muestra en la Figura 18.

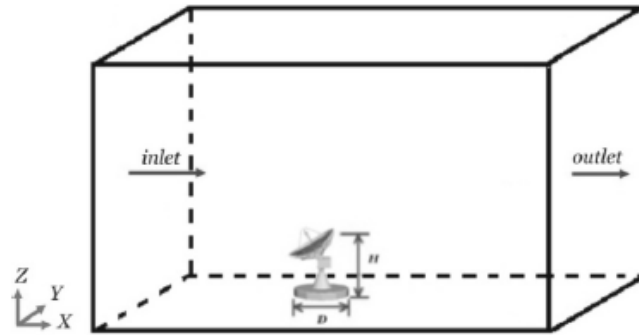


Figura 18: Referencia de volumen de control para el análisis de viento de un telescopio (Upnere, 2012)

En (Upnere, 2012) plantea que el largo del volumen sea igual a 10 veces el diámetro de base del radiotelescopio tanto hacia adelante como hacia atrás de éste, el ancho será igual a 5 veces el diámetro de base y la altura igual a 4 veces la altura del radiotelescopio

Lo planteado es netamente referencial ya que las dimensiones entre el radiotelescopio de análisis y el CSO difieren en demasía, específicamente en la base, por tanto, si se sigue estrictamente lo que se expone el volumen de control no sería el ideal para este análisis. Las dimensiones elegidas son en función del tamaño del reflector primario y considerando un espacio lo suficientemente grande para evitar efectos de borde.

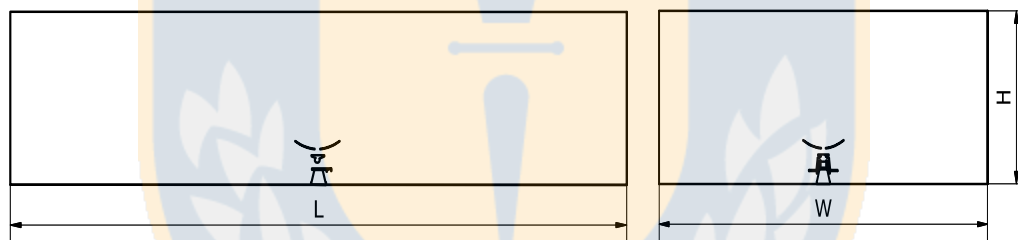


Figura 19: Cotas del volumen de control

El volumen de control utilizado es lo suficientemente grande para representar correctamente el espacio libre en donde se asentará el radiotelescopio. Se considera el radio telescopio en su totalidad con sus componentes. El dominio de análisis tiene un largo L de 300 metros, un ancho W de 150 metros y una altura H de 50 metros.

4.2.1.2 Material

El material a utilizar para la simulación CFD es el aire. Particularmente en el llano de Chajnantor se generan condiciones muy distintas a las que se dan a nivel del mar. Mediante los datos recopilados por APEX es posible determinar las propiedades que tendrá el aire en el llano. Se extrae la información desde el 01/01/2018 al 03/11/2019 en el llano de Chajnantor; datos que son recopilados por el centro meteorológico APEX (APEX Weather Query Form) los cuales pueden ser visualizados y extraídos desde (Alma science weather) (ESO, 2018-2019).

Según los datos recopilados de la plataforma APEX se obtienen los valores de la temperatura y la presión de cada día y, por tanto, es posible determinar la evolución de la densidad del aire y la viscosidad dinámica los cuales son parámetros necesarios para los próximos análisis. Considerando que el aire se comporta como un gas ideal, la densidad es posible determinarse según la ecuación de los gases ideales:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (16)$$

donde P representa la presión absoluta en pascales, R la constante de los gases que es $286,9 \text{ J/kgK}$ y T es la temperatura en unidades de Kelvin. En la Figura 20 se presenta la evolución de ésta en el llano de Chajnantor entre enero de 2018 hasta fines de octubre de 2019 encontrándose un promedio de $0,715 \text{ kg/m}^3$.

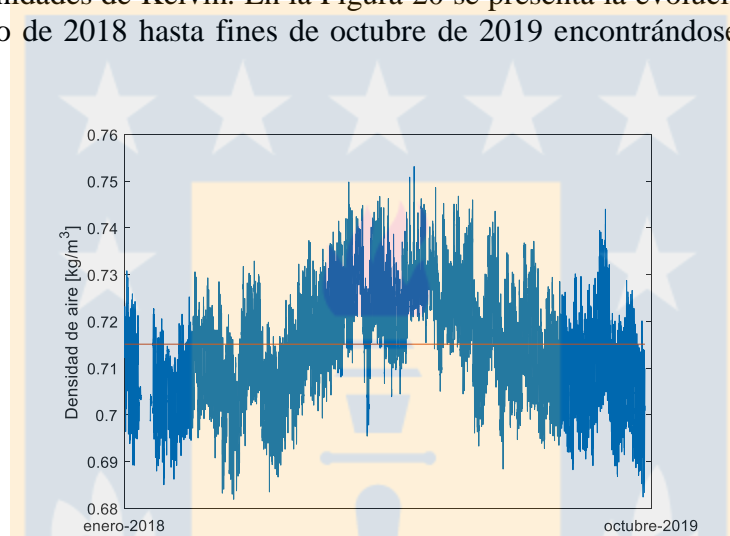


Figura 20: Evolución de la densidad del aire en el llano de Chajnantor

Otro de los parámetros necesarios para caracterizar el aire es la viscosidad cinemática. Mediante lo que se plantea en (Wexler, Teweles, & et. al, 1976) la viscosidad cinemática en el rango de 0 a 86 km de altura es posible determinarse de la forma:

$$\mu = \frac{\beta \cdot T^{\frac{3}{2}}}{T + S} \quad (17)$$

donde β es una constante igual a $1,458 \cdot 10^{-6} \text{ smK}^{1/2}$, S la constante de Sutherland igual a $110,4 \text{ K}$ y T la temperatura en unidades de Kelvin. En la Figura 21 se presenta la evolución de la viscosidad dinámica encontrándose un promedio de $1,70 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$.

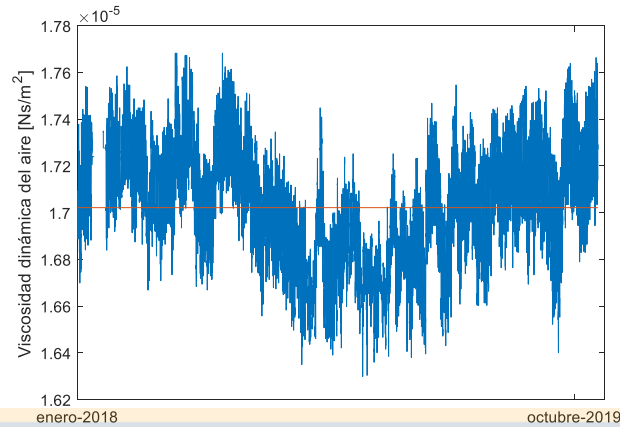


Figura 21: Evolución de la viscosidad dinámica del aire en el llano de Chajnantor

En conclusión, para la simulación se aplican los valores promedios de densidad y viscosidad dinámica.

4.2.1.3 Discretización

La discretización es del tipo no conforme, en donde no siempre los nodos coinciden entre elementos adyacentes. Este tipo de discretización genera ventajas en cuanto a la cantidad de elementos dentro del volumen de control generando así, que se pueda refinar libremente en las zonas de interés sin escatimar en el tamaño en estas zonas.

La cantidad de elementos utilizados es variable, ya que, para diferentes ángulos acimutales el comportamiento del fluido cambia drásticamente debido a los cambios en la posición de todo el telescopio. Existen zonas de recirculación que hacen que el tamaño de la capa límite sea muy por debajo del límite mínimo $y^+ = 11.06$ que debe tenerse para el modelo de turbulencia utilizado, es por ello que la discretización se realiza por iteraciones, esto es, un monitoreo continuo del tamaño de la capa límite y^+ y si éste es mayor a 11.06 y a la vez menor a 300 en la mayor cantidad de zonas en todo el telescopio. Se tiene consciencia de que esto no se logrará en cada lugar del dominio, pero sí, se busca que sea aceptable respecto a los límites establecidos.

Si existen una gran cantidad de zonas que no cumplen esta condición la simulación es detenida observando las zonas de mayor criticidad y discretizando nuevamente el dominio en función de la necesidad de cada zona respecto al tamaño de la capa límite. La discretización alrededor del radiotelescopio y sobre las caras de éste se muestra en la Figura 22.

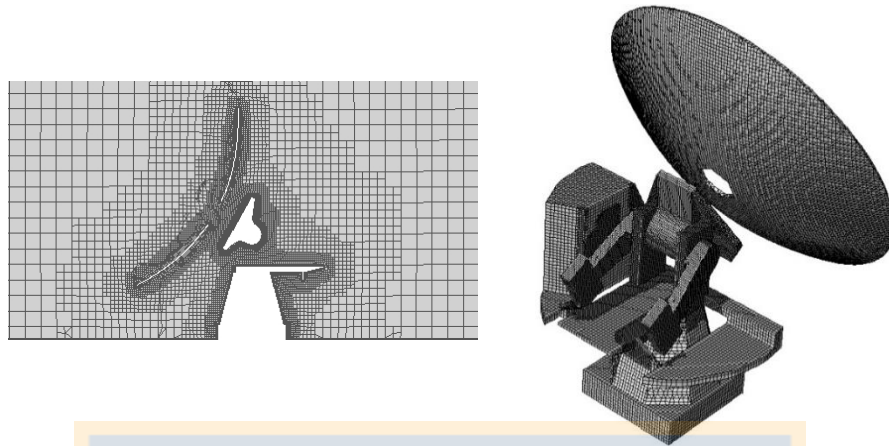


Figura 22: Discretización del volumen cerca del radiotelescopio (izquierda)
- Discretización de las paredes (derecha)

4.2.1.4 Condiciones de borde

Las condiciones de contorno del problema se muestran en la Figura 23 por las letras A, B, C, D y E.

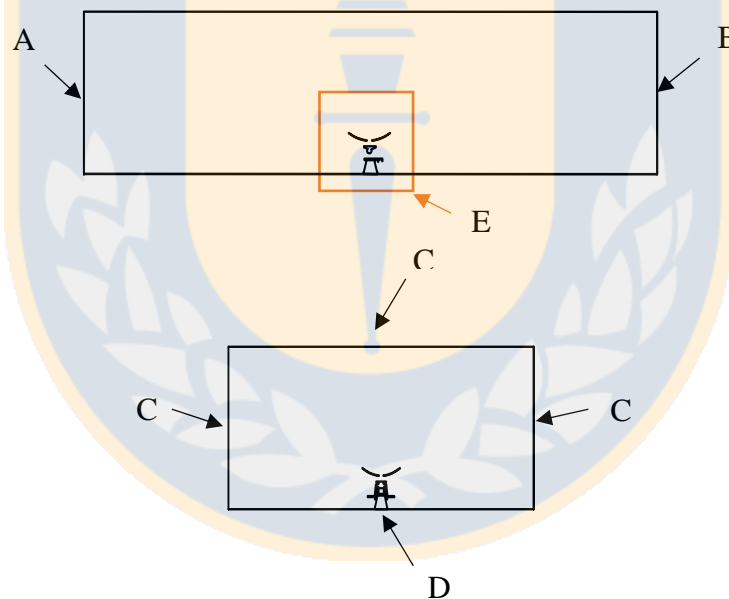


Figura 23: Condiciones de borde para análisis CFD

- A: Condición de entrada de flujo mediante una condición de velocidad de perfil constante de módulo 10 m/s.
- B: Condición de salida del flujo.
- C: Condición de simetría, referido a que todos los efectos de borde más lejos de estos lugares de mantienen constante (simulación del ambiente).
- D: Condición de pared para el piso.
- E: Condición de pared de todo el telescopio.

4.2.2 Modelamiento en ANSYS Workbench

Posterior al análisis fluido dinámico se pretende determinar cómo afectan las presiones generadas por el fluido sobre la estructura, específicamente en el movimiento del subreflector. Para ello se desarrolla un modelo estructural donde se toma el modelo presentado en la sección 4.1.1 con la diferencia, que se adiciona el reflector primario con el fin de transmitir la carga generada por el viento. El modelo geométrico utilizado es el mostrado en la Figura 24.

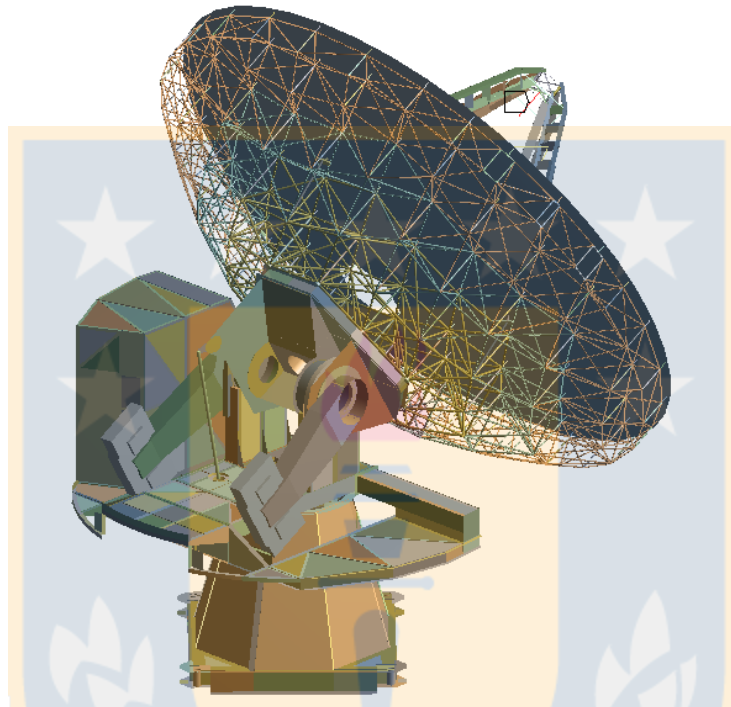


Figura 24: Modelo CAD del radiotelescopio

El desplazamiento del subreflector y del BUS es determinado respecto a un sistema de referencia ubicado a aproximadamente a 5 metros del suelo y en la intersección el eje de acimut y elevación del telescopio el cual se muestra en la Figura 25. El eje Z (azul) coincide con el eje óptico, el eje Y (verde) coincide con el eje de elevación del sistema y el eje X (rojo) es un eje ortogonal a éste denominado eje de elevación cruzado o *cross-elevation* y perpendicular al vector de superficie de la plataforma.

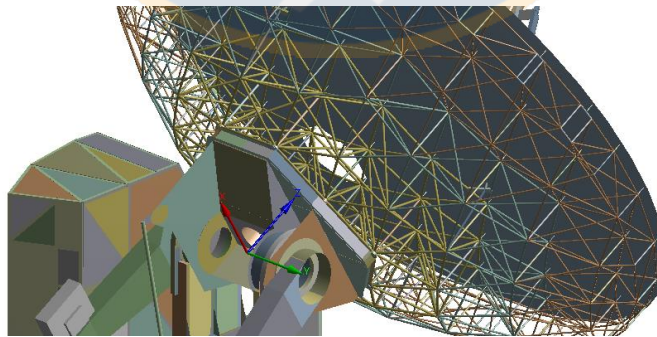


Figura 25: Sistema de referencia del subreflector

4.2.2.1 Material

El material es el mismo utilizado en la sección 4.2.1.2

4.2.2.2 Condiciones de borde

Se consideran dos condiciones de borde, carga y fijación. La de carga está dada por la presión sobre las estructuras importadas desde los resultados dados en la simulación fluido-dinámica y la de fijación es en la zona inferior del Teepee, la cual va fijada al piso.

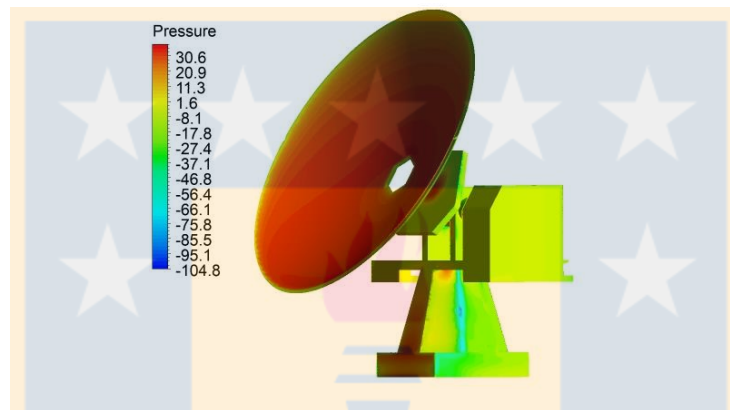


Figura 26: Condición de presión [Pa]

4.2.2.3 Discretización

La discretización del modelo es análoga a la presentada en la sección 4.1.3 solo que adicionalmente se considera el reflector primario, que se muestra en la Figura 27.

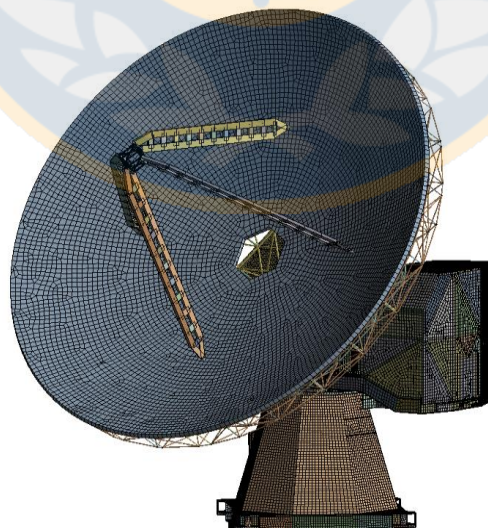


Figura 27: Discretización del modelo FEA

CAPÍTULO 5

Modelo radiométrico

5.1 Brillo y potencia espectral

Para caracterizar una fuente celeste es necesario conocer ciertos parámetros característicos de éste, como es el brillo. Este brillo está asociado con la radiación de dicha fuente y por tanto de su temperatura, donde esta relación puede expresarse en base a la ecuación de Planck por ancho de banda de frecuencia como (Kraus, 1976):

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (18)$$

donde h es la constante de Planck igual a $6,63 \cdot 10^{-34}$ [joule · s], ν la frecuencia en Hz, c la velocidad de la luz igual a $3 \cdot 10^8$ [m/s], T la temperatura de brillo en K y k la constante de Boltzmann igual a $1,38 \cdot 10^{-23}$ [joule/K]. En ciertos casos la ecuación es posible simplificarse mediante la simplificación dada por la relación de Rayleigh-Jeans de la forma:

$$B_\lambda(T) = \frac{2kT}{\lambda^2} \quad (19)$$

con:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (20)$$

Con esto se puede estimar el brillo o la temperatura característica que tiene una fuente en observación. Si se considera que las mediciones se realizan con instrumentación con una capacidad finita de recolección entonces lo que se mide no es directamente el brillo de la fuente.

Tomando un área dA plana constante y un brillo B constante en todas las direcciones y que se recolecta sobre un ángulo sólido $d\Omega$ como se muestra en la Figura 28 y considerando a la vez que este brillo solo es posible medirlo sobre una banda de frecuencia $\Delta\nu$ entonces lo que se mide es lo que se conoce como potencia espectral (normalizada por el ancho de banda) dada por (Kraus, 1976):

$$w = A \iint B \cos\theta d\Omega \quad (21)$$

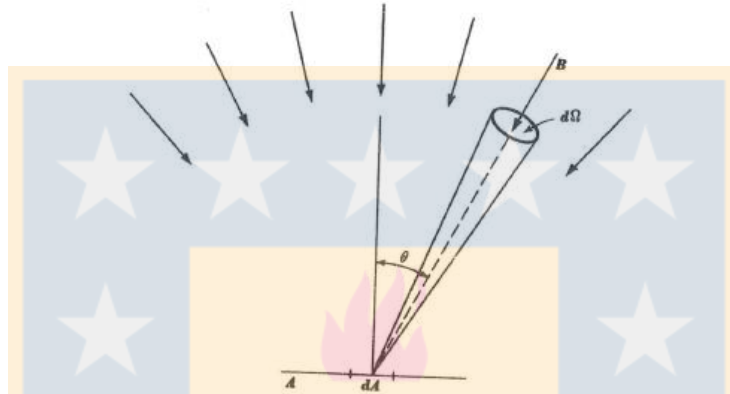


Figura 28: Ilustración de la incidencia del brillo de una fuente sobre un ángulo sólido infinitesimal (Kraus, 1976)

Suponiendo que el brillo es uniforme sobre todo el cielo, es decir, constante sobre el ángulo sólido y a la vez constante en el ancho de banda de análisis, entonces la potencia total medida sobre el área de recolección está dada por:

$$W = \pi AB \Delta\nu \quad (22)$$

Debido a que el brillo podría variar dependiendo de la posición angular sobre el cielo tanto en el ángulo de elevación θ como acimutal ϕ , el brillo en general se expresa en función de estos ángulos como $B(\theta, \phi)$. De esta forma la potencia espectral queda expresada como:

$$w = A \iint B(\theta, \phi) \cos\theta d\Omega \quad (23)$$

El área colectora de la antena en la realidad es menor al área geométrica, por tanto, se integra el término conocido como área efectiva A_e . Esta área efectiva está dada por:

$$A_e = \eta_A A \quad (24)$$

donde η_A es lo que se conoce como eficiencia de apertura compuesta por una serie de subeficiencias donde se destacan tres que se mencionarán a continuación.

$$\eta_A = \eta_{SP} \eta_{Ruze} \eta_{taper} \quad (25)$$

η_{SP} es la eficiencia de *spill over* la cual representa la cantidad de energía que queda fuera de la apertura, η_{Ruze} , la eficiencia por errores de superficie dada por la ecuación (14) y η_{taper} , la eficiencia de *taper* que representa la cantidad de energía que incide dentro de la apertura.

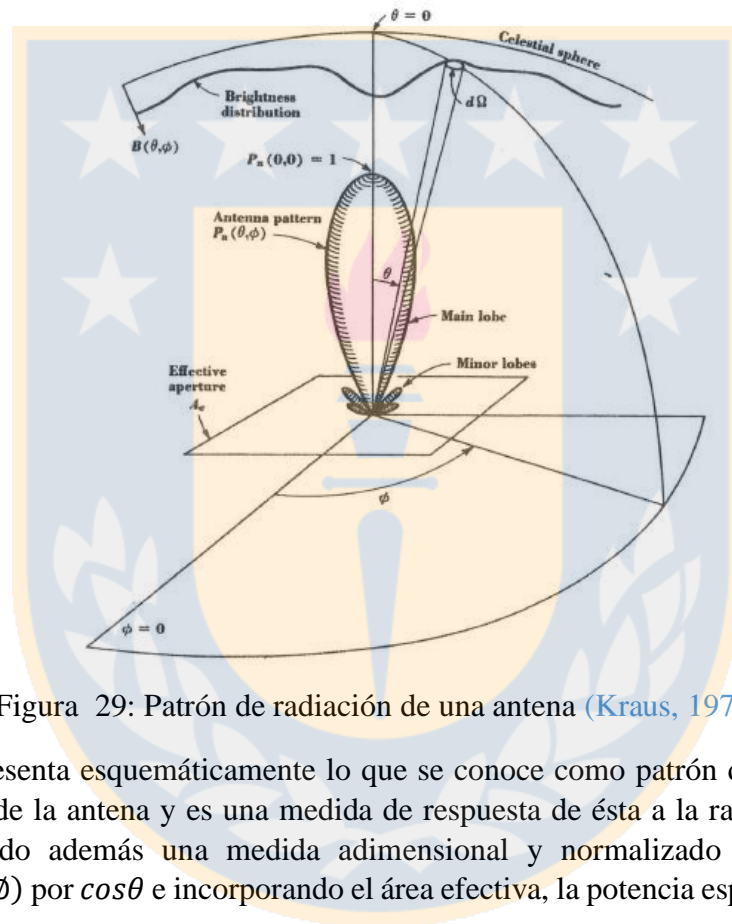


Figura 29: Patrón de radiación de una antena (Kraus, 1976)

En la Figura 29 se presenta esquemáticamente lo que se conoce como patrón de radiación $P_n(\theta, \phi)$, el cual es característico de la antena y es una medida de respuesta de ésta a la radiación incidente en los ángulos θ y ϕ , siendo además una medida adimensional y normalizado por su valor máximo. Reemplazando $P_n(\theta, \phi)$ por $\cos\theta$ e incorporando el área efectiva, la potencia espectral queda ahora dada por:

$$w = \frac{1}{2} A_e \iint B(\theta, \phi) P_n(\theta, \phi) d\Omega \quad (26)$$

Así, la potencia espectral medida queda directamente relacionado con el patrón de radiación de la antena, siendo el brillo de la fuente modulado por éste. Aquí es donde recae la importancia de caracterizar de manera correcta el patrón de radiación de cada antena. En la Figura 29 además se presentan dos conceptos importantes a tener en consideración, el lóbulo principal (*main lobe*) y los lóbulos laterales (*minor lobe*). El primero es donde se recolecta la mayor cantidad de energía de la fuente mientras que en los lóbulos laterales la capacidad de recolección de la antena disminuye, esto permite concluir que se hace necesario tener un patrón de radiación con lóbulos laterales de baja intensidad y una alta capacidad recolectora (ganancia) en el lóbulo principal.

5.2 Apertura e iluminación

El patrón de radiación como se mencionó anteriormente, es la respuesta que tiene la antena a una radiación incidente. Generalmente para caracterizar el patrón de radiación se utiliza lo que se conoce como el principio de reciprocidad el cual postula que: “Una antena puede ser analizada de forma análoga si se considera como emisora o como receptora”. Para términos numéricos, siendo una antena emisora los costos computacionales disminuyen debido a que la integral que rige el patrón de radiación (integral de radiación) se extiende sobre un dominio finito denominado apertura en comparación a considerar la antena como receptora, ya que se debe considerar un dominio de análisis que considere todo el espacio a su alrededor. Para determinar de forma numérica el patrón de radiación se debe caracterizar lo que se conocen como apertura e iluminación.

5.2.1 Apertura

La apertura es el área proyectada en donde todos los rayos incidentes sobre el área de recolección se encuentran en fase, esto es posible visualizarlo mediante la Figura 30, donde la flecha blanca representa una radiación incidente que llamamos iluminación, lo cual será tratado en la sección posterior, atravesando por una ranura simétrica que llamamos apertura. Cabe mencionar que la apertura puede tener la forma geométrica que se estime conveniente.

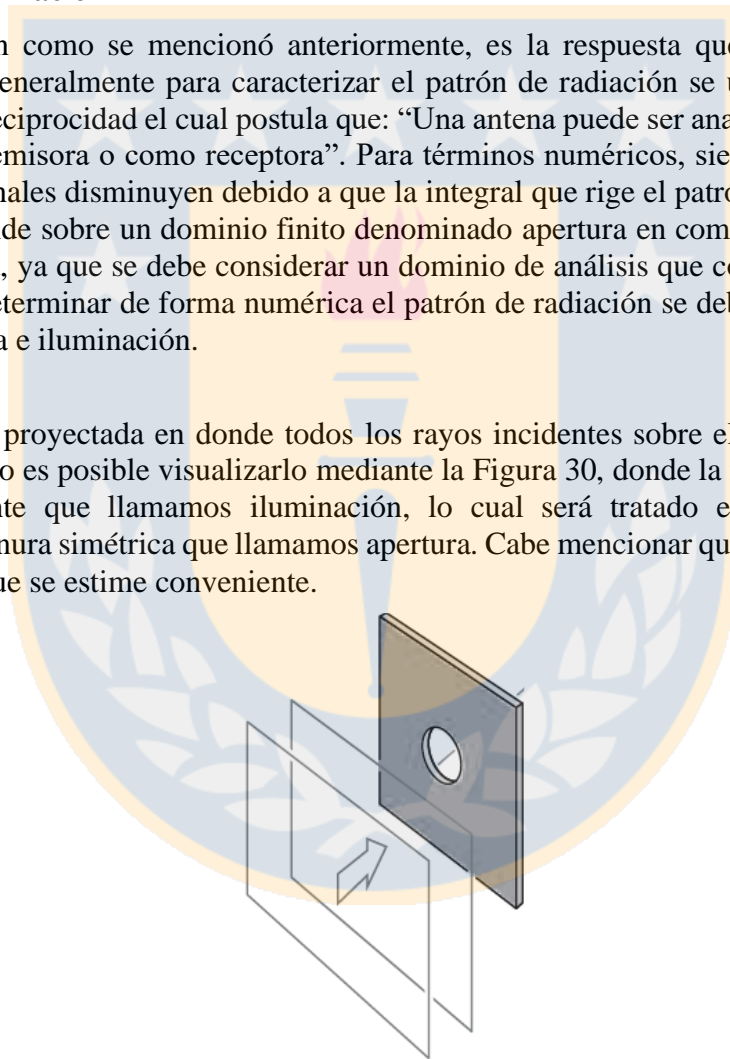


Figura 30: Iluminación y apertura (Hecht, 2017)

La apertura está definida en coordenadas polares, esto es, función de un radio normalizado ρ o r (dependiendo del autor) y un ángulo θ como muestra la Figura 31.

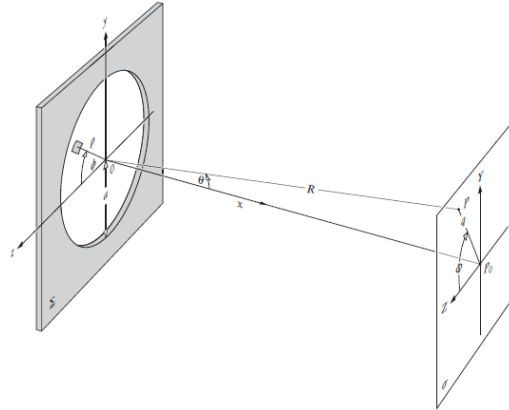


Figura 31: Coordenadas de la apertura y del plano del patrón de radiación (Hecht, 2017)

En el caso ideal la apertura efectiva (también llamada área efectiva como se comentó en párrafos precedentes) es igual a la apertura física, sin embargo, como ya se comentó ésta se ve reducida debido a diferentes factores. En el caso de un reflector primario, la apertura física está dada por el área proyectada $\pi D^2/4$, y está delimitada por el radio $D/2$ del reflector.

El plano en donde se proyecta la radiación incidente luego de pasar por la apertura, es el plano en donde el patrón de radiación tiene lugar llamado plano de radiación.

5.2.2 Iluminación

Un elemento físico como un espejo o lente se dice que es iluminado, si sobre él incide una potencia electromagnética que posee un haz de radiación cualquiera. El perfil que posee la potencia del campo electromagnético depende de la naturaleza misma del haz donde en la mayoría de los casos tiene un perfil Gaussiano, con el cual el haz toma el nombre de haz gaussiano o *Gaussian beam* sin embargo, el caso ideal es que este perfil sea del tipo escalón unitario cuyo perfil es imposible lograrlo en la práctica. En la Figura 32 se presenta esquemáticamente la propagación de un haz gaussiano simétrico respecto al eje axial, desde su origen en el haz de cintura o *beam waist*, a lo largo de su eje de propagación. Notar que en su origen el haz posee un radio de curvatura $R = \infty$, es decir, su forma de onda es plana.

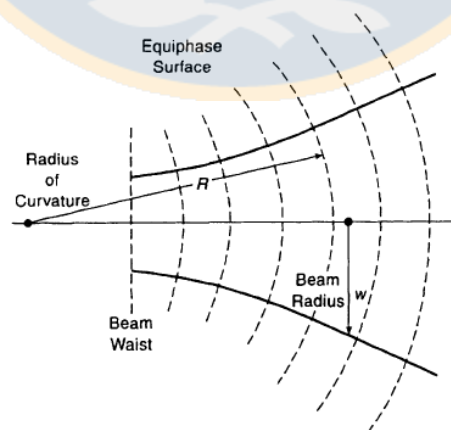


Figura 32: Propagación de un haz gaussiano (Goldsmith, 1998)

El haz gaussiano tiene su máxima densidad de campo eléctrico en el haz de cintura, y ésta decae a medida que se propaga. Esto no quiere decir que la potencia sea máxima en el haz de cintura, sino que la energía total del haz que se irradia, está confinada en un espacio mucho más pequeño en el haz de cintura. Si se consideran diferentes planos en el eje de propagación, la intensidad de campo eléctrico evoluciona como se muestra en la Figura 33, como se comentó anteriormente.

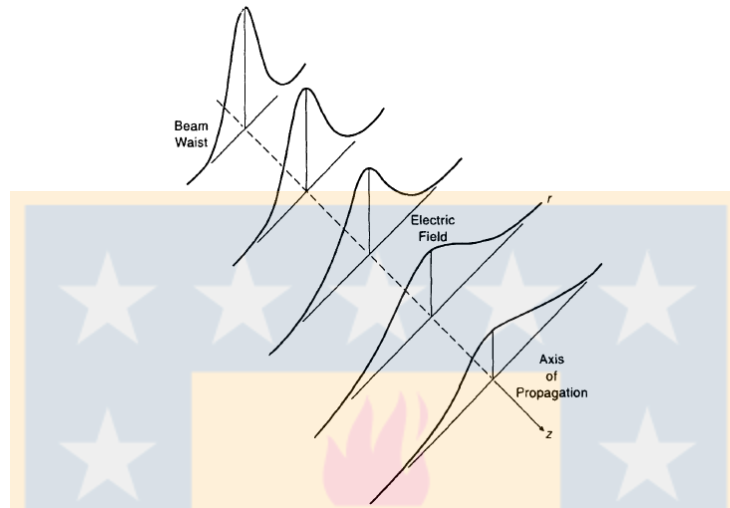


Figura 33: Evolución del perfil de amplitud del campo eléctrico a lo largo del eje de propagación (*Goldsmith, 1998*)

En la Figura 34 se presenta la amplitud de campo eléctrico en el plano y en la Figura 35 distintos perfiles para distancias dadas a lo largo del eje de propagación a modo de ejemplo, donde el tamaño del haz de cintura es de 1 mm y a una frecuencia de 300 GHz. El eje de propagación es el eje horizontal y el eje radial corresponde al eje vertical.

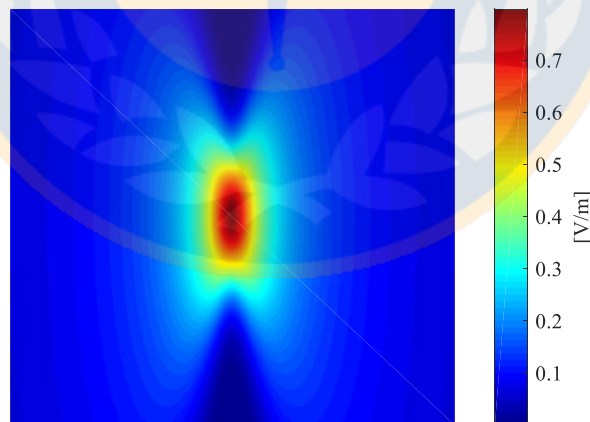


Figura 34: Amplitud de campo eléctrico de un haz gaussiano en el plano

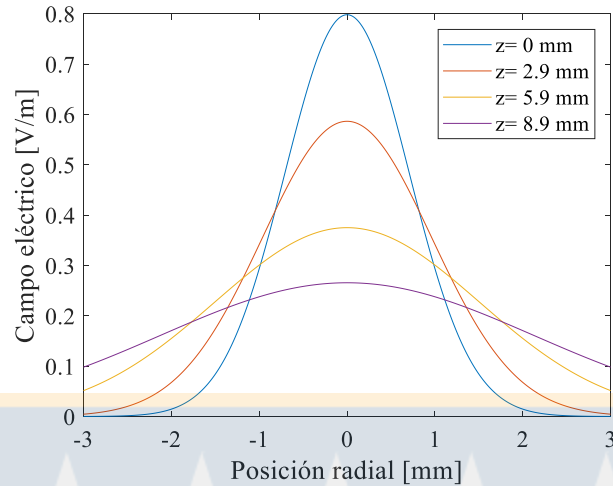


Figura 35: Amplitud de campo eléctrico en diferentes posiciones a lo largo del eje de propagación

Al mismo tiempo la potencia del campo eléctrico dada por el cuadrado de éste se muestra en la Figura 36.

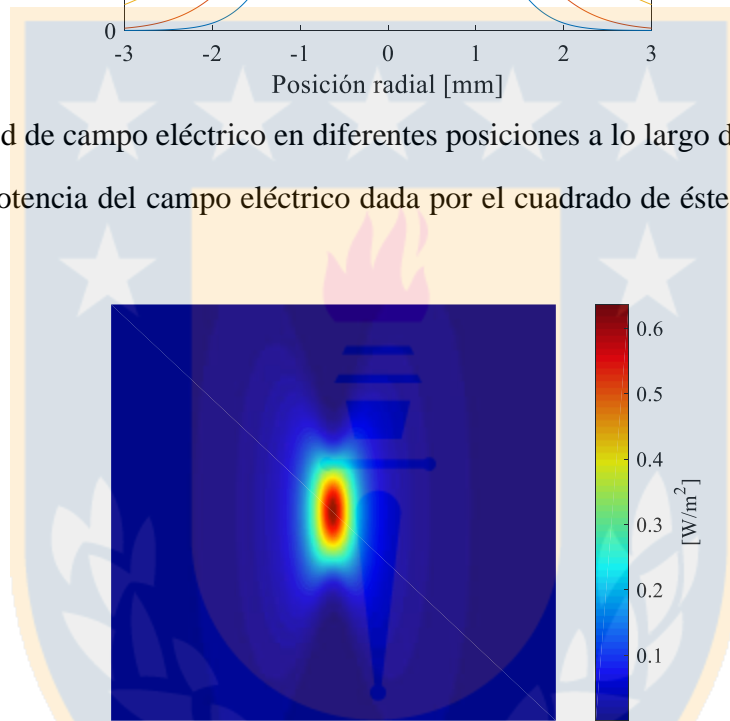


Figura 36: Potencia del campo eléctrico de un haz gaussiano en el plano

En un sistema básico de detección como una configuración primario simple o *single-dish* (utilizados en radioastronomía) se tiene una parábola reflectora y un receptor ubicado en el foco primario de dicha parábola. Si se emite un haz, particularmente un haz gaussiano desde este receptor (que al mismo tiempo funciona como emisor, gracias al principio de reciprocidad), la potencia de campo eléctrico que posee el haz y que incide sobre el paraboloide o reflector primario, se le denomina iluminación. Recordar que la evolución del perfil de amplitud de campo eléctrico se representa como se muestra en la Figura 35, el cual es aplicable en este caso ilustrativo, donde a medida que el haz se aleja del receptor/emisor, su perfil de amplitud varía, pero no pierde su forma gaussiana.

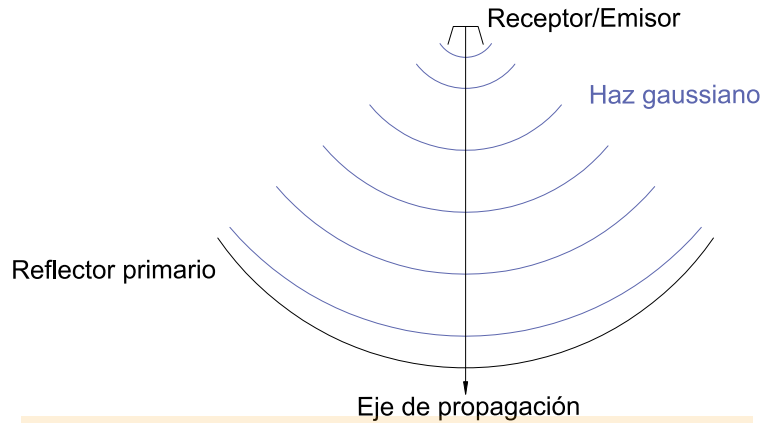


Figura 37: Ilustración de la propagación de un haz gaussiano en un sistema primario simple

En sistemas radioastronómicos distintos a un sistema *single-dish* se utiliza una configuración óptica dados por elementos que divergen y/o convergen el haz de energía que se recolecta, esto a través del uso de elementos como espejos o lentes que los llevan a los elementos receptores que captan la energía incidente, con el fin de caracterizar la fuente de observación que en el caso de la radioastronomía lo que se intenta determinar es la temperatura de brillo de dicha fuente, que, en ciertos casos, incluso corresponde a la temperatura física de ésta.

5.3 Integral de radiación

Para cuantificar y estimar la forma del patrón de radiación se utiliza lo conocido como integral de radiación en el campo lejano o aproximación de Fraunhofer, la cual es una simplificación de la teoría de difracción de Kirchhoff. El campo lejano es el lugar donde el patrón de radiación tiene un comportamiento estacionario sin variación en su fase ni su intensidad, y tiene lugar a una distancia de la apertura dada por (Marr, Snell, & Kurtz):

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (27)$$

donde D es el diámetro de la apertura y λ la longitud de onda de observación. La integral de radiación es equivalente al campo eléctrico sobre la apertura, como respuesta a una iluminación incidente sobre ésta, distribuida en el plano de apertura con coordenada radial r y coordenada angular χ como (Baars J. W., 2007):

$$E(\theta, \varnothing) = \iint F(r, \chi) e^{-i\left\{k\frac{D}{2}r\sin(\theta)\cos(\varnothing-\chi)+\Delta\Phi(r, \chi)\right\}} r dr d\chi \quad (28)$$

donde $\Delta\Phi(r, \chi)$ es el error de fase generado por cualquier alteración del estado ideal en la apertura, $F(r, \chi)$ la función de iluminación, k el número de onda dada por $2\pi/\lambda$ y D el diámetro de la apertura. Notar que la integral de radiación utiliza las coordenadas de la apertura (coordenadas espaciales) a coordenadas angulares. Para calcular la integral de radiación se utiliza el método de la difracción, la que permite determinar el campo eléctrico en la apertura mediante la aplicación de la Transformada de

Fourier en dos dimensiones sobre la función de iluminación, sin embargo, debe tenerse en consideración las exigencias mínimas de la transformada, como es el tamaño de la discretización del dominio la cual debe ser una potencia de 2 y que se cumpla el teorema de Nyquist. Obtenido el campo eléctrico sobre la apertura, el patrón de radiación es la potencia de dicho campo, que de forma lineal es definido como:

$$P(\theta, \phi) = |E(\theta, \phi)|^2 \quad (29)$$

normalizando resulta:

$$P_n(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\max(P(\theta, \phi))} \quad (30)$$

Generalmente el patrón de radiación se presenta en unidades de decibeles. Así el patrón de radiación en decibeles queda expresado como:

$$P_{db}(\theta, \phi) = 10 \log(|E(\theta, \phi)|^2) \quad (31)$$

normalizando:

$$P_{n,db}(\theta, \phi) = 10 \log(P_n(\theta, \phi)) \quad (32)$$

5.4 Disco de Airy

Para caracterizar el caso ideal que permite obtener un estado de referencia, se utiliza lo que se conoce como aproximación de Airy o disco de Airy considerando que: el reflector es iluminado de forma uniforme y además la apertura es circularmente simétrica. Una iluminación uniforme representa un escalón de energía, donde fuera de la apertura su valor es 0 y dentro de ella su valor es constante, igual a 1. Como la apertura es simétrica la iluminación queda solo representada por la componente radial de ésta de la forma:

$$F(r) = 1; -1 \leq r \leq 1 \quad (33)$$

$$F(r) = 0; \text{ De cualquier otra forma}$$

donde r es el radio normalizado por el diámetro del reflector, como se muestra en la Figura 38.

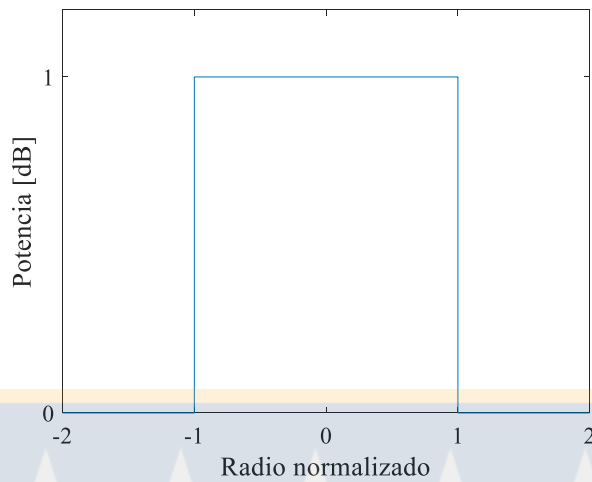


Figura 38: Iluminación uniforme

Y en el plano de apertura se expresa como lo que se muestra en la Figura 39.

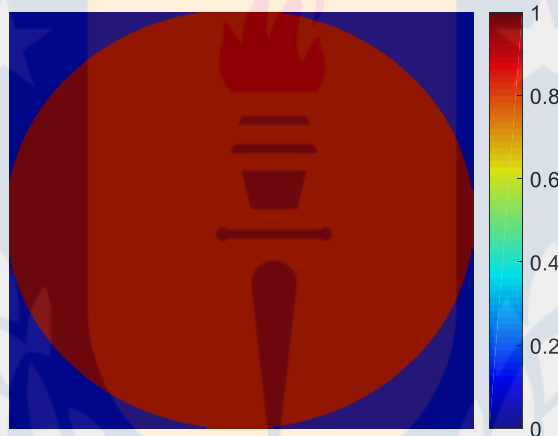


Figura 39: Iluminación uniforme en el plano.

En la Figura 40 se denota la iluminación (1), iluminando la apertura (2) generando en la pantalla negra (3), el patrón de radiación de Airy, el cual es el caso ideal. Si se toma una sección del plano resultante, el patrón de radiación se ve como se muestra en (4).

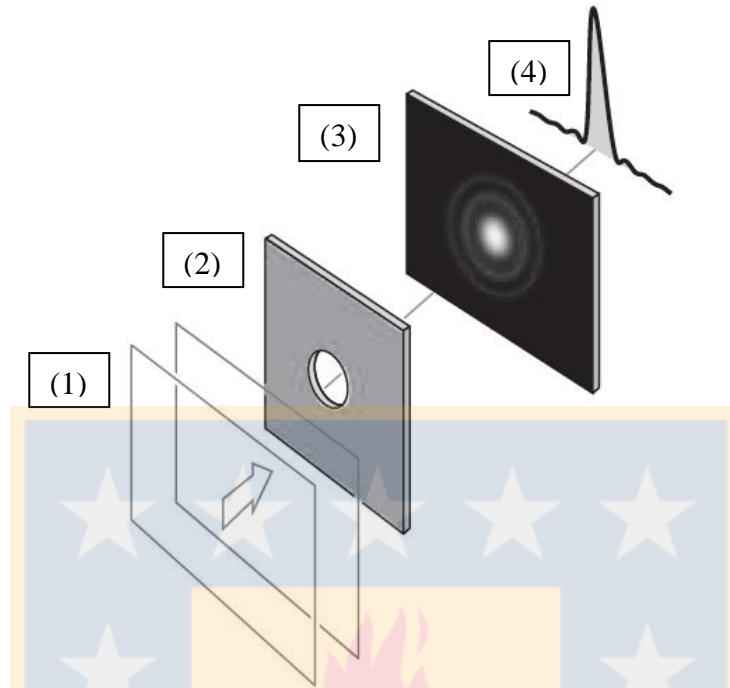


Figura 40: Ilustración de un disco de Airy (Hecht, 2017)

Para los supuestos anteriormente descritos, el campo eléctrico sobre la apertura que posteriormente define el patrón de radiación, es posible determinarlo mediante la integral sobre la apertura, la cual es una aproximación de la ecuación 28 y conocida como la Transformada de Hankel, dada por:

$$E(q) = 2\pi \int F(r) J_0\left(\frac{2\pi a q}{\lambda}\right) r dr \quad (34)$$

donde J_0 es la función de Bessel de primer tipo de orden 0, $F(r)$ la función de iluminación, a el radio de la apertura, q la posición radial sobre la apertura en unidades angulares y λ la longitud de onda de operación. La integral anterior resulta en:

$$E(q) = a \left(\frac{J_1\left(\frac{2\pi a q}{\lambda}\right)}{q} \right) \quad (35)$$

donde J_1 es la función de Bessel de primer tipo de orden 1. La función de Bessel de primer tipo de orden α es definida de la forma:

$$J_\alpha(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(k+\alpha+1)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+\alpha} \quad (36)$$

donde para este caso en particular:

$$x = \frac{2\pi a q}{\lambda} \quad (37)$$

$E(q)$ expresa la intensidad de campo eléctrico E sobre la apertura. Para 850 GHz el patrón de radiación ideal, con los parámetros geométricos del CSO se presenta en la Figura 41.

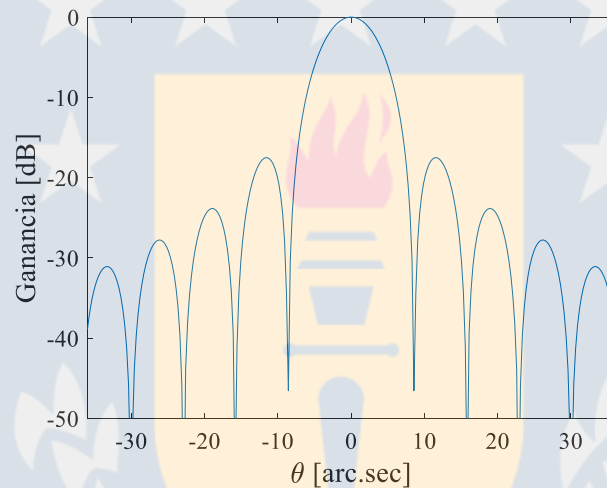


Figura 41: Patrón de radiación de Airy

En el plano se ilustra como en la Figura 42.

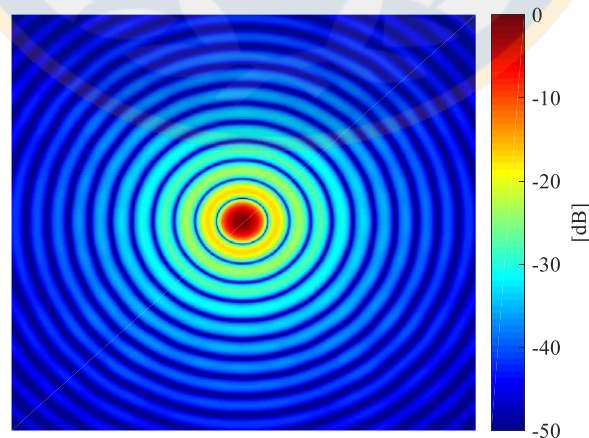


Figura 42: Patrón de radiación de Airy en el plano

Los parámetros de importancia dentro del análisis serán indicados a continuación. El primero de ellos es lo conocido como *Full Width Half at Maximum* (FWHM) el cual representa la posición angular del patrón de radiación donde la potencia cae a la mitad de su intensidad máxima o bien en el caso de la escala en decibeles, a -3 dB .

En el caso de la radioastronomía este parámetro representa la resolución angular, esto es, el tamaño del pixel que se ubica en el cielo para medir una fuente de interés.

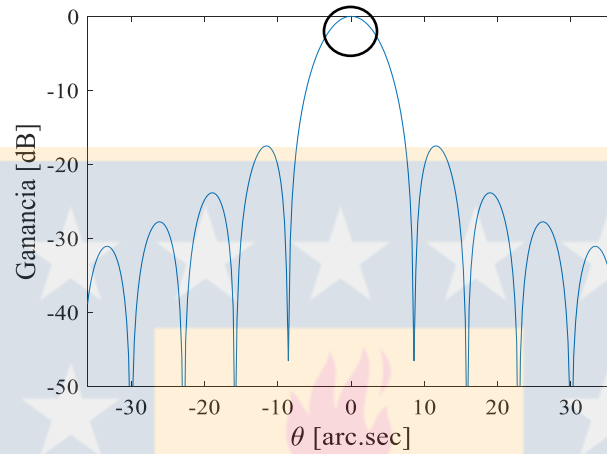


Figura 43: Ubicación del FWHM

Para el caso del disco de Airy el FWHM se puede determinar por:

$$FWHM_{\text{airy}} = \frac{1,02\lambda}{D} \quad (38)$$

Por otro lado, otro parámetro es el *First Null* o Ángulo del primer nulo, el cual es la posición angular en el patrón de radiación donde ocurre la primera caída del *beam* principal. Esto se ilustra en la Figura 44.

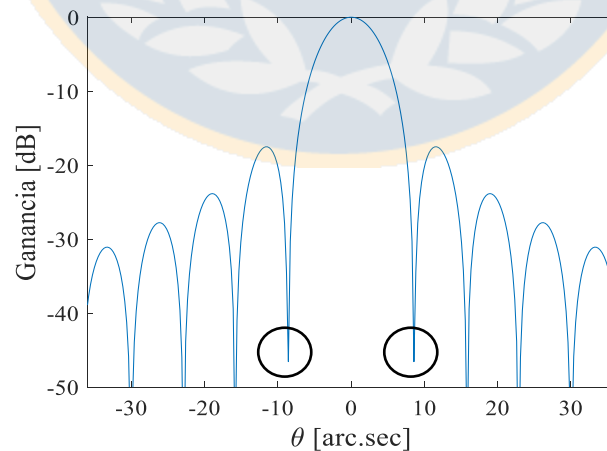


Figura 44: Ubicación del ángulo del primer nulo

Para el caso del disco de Airy el ángulo del primer nulo está dado por:

$$FN_{airy} = \frac{2,44\lambda}{D} \quad (39)$$

Por último, se analiza el *First Side Lobe* o Nivel del primer lóbulo lateral, el cual es la intensidad en decibeles que tiene el primer lóbulo del patrón de radiación que se muestra en la Figura 45.

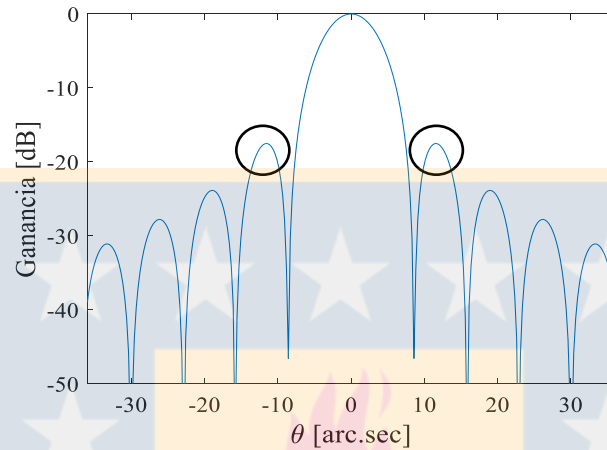


Figura 45: Ubicación del nivel del primer lóbulo lateral

Para el caso del disco de Airy éste tiene siempre un valor igual a $-17,52 \text{ dB}$.

5.5 Caso de estudio

5.5.1 Errores de superficie

Los errores de superficie generan que los rayos incidentes sobre el reflector deban recorrer un camino óptico diferente al que deben recorrer en una superficie ideal. Esto genera una diferencia en el camino óptico dado por (Samii, *An Efficient Computational Method for Characterizing the effects of random surface errors on the average power pattern of reflectors*, 1983) :

$$\Delta\Phi(r, \chi) = \frac{4\pi}{\lambda} \varepsilon(r, \chi) \cos(\xi) \quad (40)$$

donde $\varepsilon(r, \chi)$ es el campo de error de superficie sobre la apertura en la coordenada radial r y la coordenada angular χ , y finalmente ξ es la mitad del ángulo entre el eje axial del paraboloide y el punto de medición del error el cual está relacionado como:

$$\tan \xi = \frac{\rho}{2F} \quad (41)$$

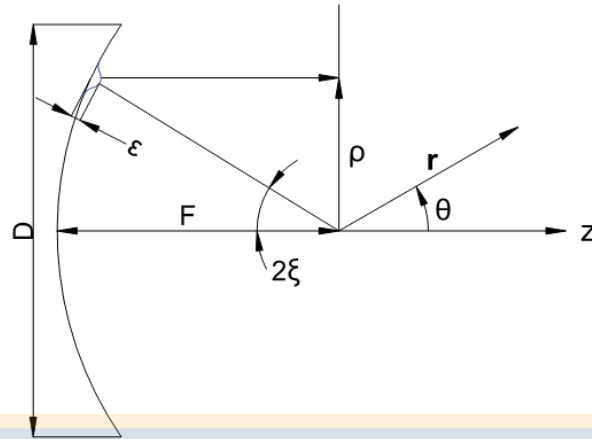


Figura 46: Diagrama de un reflector con error de superficie

En base a la integral de radiación puede deducirse que la función de iluminación está modulada por el término $e^{-i\Delta\Phi(r,\chi)}$ (el cual representa el error de fase inducido) que para el caso de los errores de superficie $\Delta\Phi(r, \chi)$ está dado por la ecuación 42.

Para relacionar los valores angulares, con los valores que entrega la transformada de Fourier la cual generará el patrón de radiación, se deben aplicar las relaciones establecidas para el muestreo de una señal, en este caso: una señal en el dominio de longitud (apertura) llevado a un dominio angular. La discretización en unidades de longitud depende del diámetro de la apertura y la cantidad de pixeles sobre ésta (n).

$$\Delta x = \frac{D}{n} \quad (42)$$

La cantidad de muestras por longitud de onda, θ_s :

$$\theta_s = \frac{1}{(\Delta x / \lambda)} \quad (43)$$

El largo total de la muestra:

$$X = M \cdot \Delta x \quad (44)$$

donde M es la cantidad total de puntos en una dimensión de la muestra. La resolución angular de la muestra del patrón de radiación estará dada por:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{X} \quad (45)$$

y el ángulo máximo de muestreo como:

$$\theta_{m\acute{a}x} = \frac{M \cdot \Delta x}{2} \quad (46)$$

En la Tabla 2 se presentan los resultados para estos valores.

Tabla 2: Parámetros de muestreo.

	300 GHz	850 GHz
Δx [mm]	34,2	34,2
θ_s [°]	0,029	0,010
X [mm]	140000	150000
$\Delta\theta$ [°]	3,57e-6	2,35e-6
$\theta_{m\acute{a}x}$ [°]	0,014	0,0051

Para analizar el patrón de radiación y el efecto que tienen los errores de superficie sobre él, se realiza una simulación numérica mediante el software MATLAB. El modelo computacional es comparado con resultados teóricos, para el caso del disco de Airy para una longitud de onda de 850 GHz. Los resultados de la simulación para validar el modelo desarrollado se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Comparación entre un disco de Airy y el modelo numérico propuesto.

	Teórico	MATLAB	Error [%]
Full width half at maximum FWHM [°]	0,002016	0,002020	0,19
First null beam width FNBW [°]	0,004824	0,004907	1,27
Side level lobe SLL [dB]	-17,52	-17,57	0,28

Los errores encontrados son tolerables ya que permiten al menos, conocer el comportamiento de primer orden de la degradación del patrón de radiación debido a los errores, como el FWHM o el nivel del primer lóbulo lateral.

Para el presente estudio se considera una iluminación Gaussiana axisimétrica respecto al eje axial, que es claramente la intensidad de potencia que tiene un haz gaussiano cuando llega al reflector primario (como se mostró en la Figura 37) dada por (Baars J. W., 2007), como:

$$F(r) = e^{-(\alpha r^2)} ; -1 \leq r \leq 1 \quad (47)$$

Notar que r define la apertura física que recolecta una parte del haz gaussiano. Además α es expresado como:

$$\alpha = \left(\frac{T}{20}\right) \ln 10 \quad (48)$$

donde T es el *edge taper* que representa, la relación entre la potencia en una cierta posición radial r_e , denotada por $P(r_e)$ respecto al máximo de la función P en el centro del haz. Matemáticamente se expresa como:

$$T_e = \frac{P(r_e)}{P(0)} \quad (49)$$

En la Figura 47, la curva azul representa la intensidad de potencia P del haz gaussiano que llega al reflector y las líneas verticales punteadas representan el límite de la apertura física del reflector delimitadas por la ecuación 47 que para el caso normalizado $r_e = D/2$. La relación de intensidad entre la potencia en los límites respecto a la máxima (expresado matemáticamente por la ecuación 49) es el *edge taper* utilizado para el análisis, el cual corresponde a -12 dB .

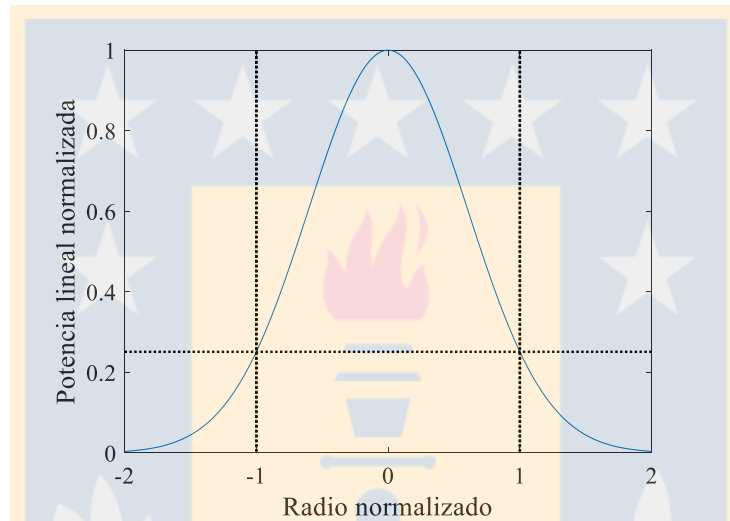


Figura 47: Potencia del campo eléctrico normalizado del haz gaussiano llegando al reflector

Si se considera las unidades de decibeles para caracterizar la potencia normalizada, se tiene lo que se muestra en la Figura 48.

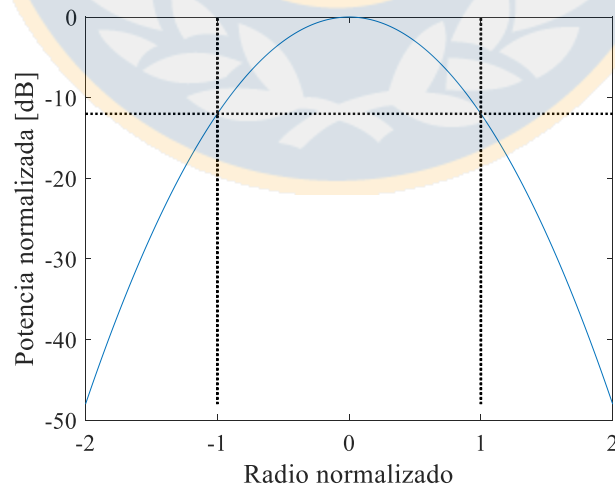


Figura 48: Potencia del campo eléctrico del haz gaussiano normalizado en unidades de decibeles sobre el reflector

Si se considera finalmente el perfil gaussiano que queda dentro de la apertura física, es la que se muestra en la Figura 49.

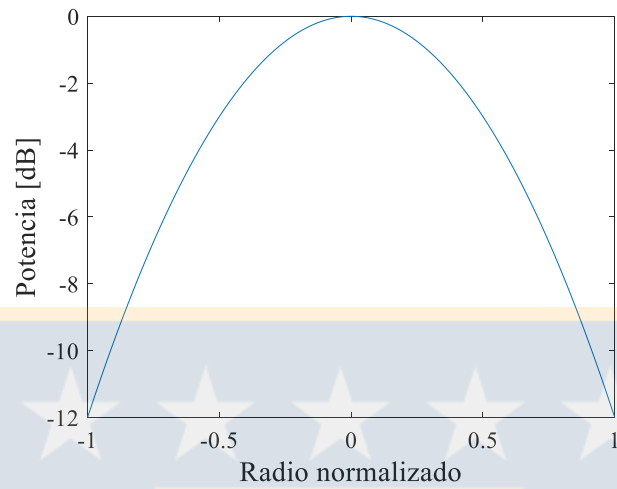


Figura 49: Función de iluminación gaussiana

Y en el plano se muestra como la Figura 50.

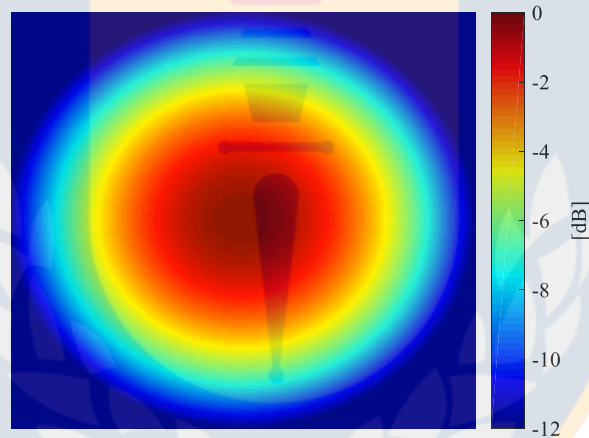


Figura 50: Función de iluminación gaussiana en el plano de apertura

Esta función de iluminación tiene como respuesta, para una frecuencia de 850 GHz , un patrón de radiación en el plano como se muestra en la Figura 51.

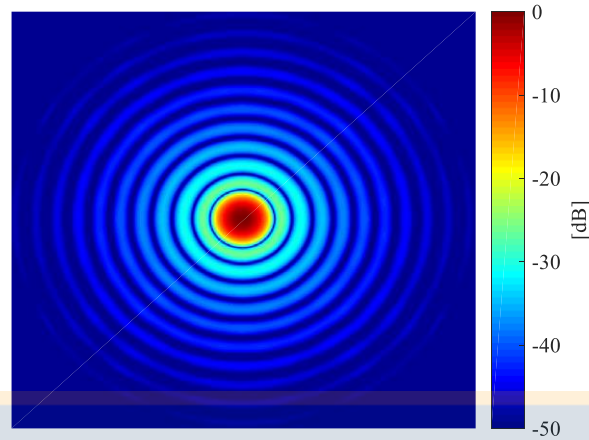


Figura 51: Patrón de radiación para una iluminación gaussiana $T = -12 \text{ dB}$

En el caso del radiotelescopio analizado (como también en muchos otros), la iluminación es afectada por el bloqueo debido a la proyección de las patas que sostienen el subreflector y al orificio central, el cual tiene forma de hexágono, que es más grande que el subreflector. Estos dos efectos son ilustrados en la iluminación de la Figura 52.

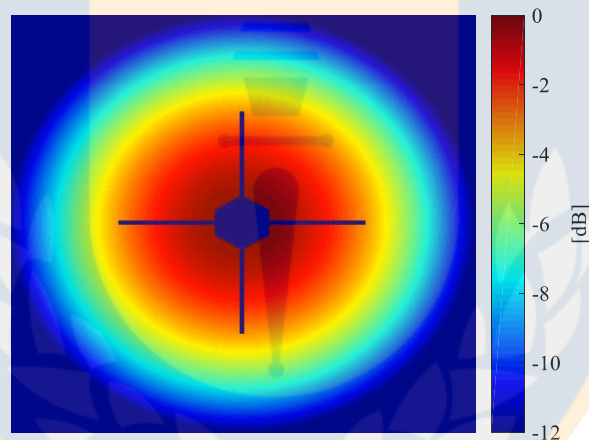


Figura 52: Función de iluminación gaussiana con bloqueo en el plano de apertura

Esta iluminación genera un patrón de radiación de la forma en como se muestra en la Figura 53. Considerar que esta iluminación será la utilizada para el análisis y que los errores de superficie no han sido aún incorporados.

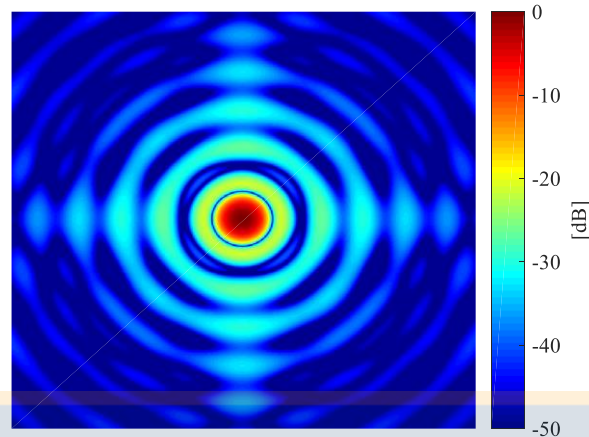


Figura 53: Patrón de radiación para iluminación gaussiana con bloqueo, sin errores

Notar el abrupto cambio en el patrón de radiación cuando el bloqueo es considerado, esto se debe a los efectos de difracción generados.

Si consideramos las tres iluminaciones discutidas en párrafos precedentes, el patrón de radiación a lo largo de un plano para iluminación uniforme, Gaussiana y Gaussiana con bloqueo (C/B) se muestra en la Figura 54. Cabe destacar que el patrón de radiación se ha normalizado por el valor máximo del patrón para una iluminación uniforme.

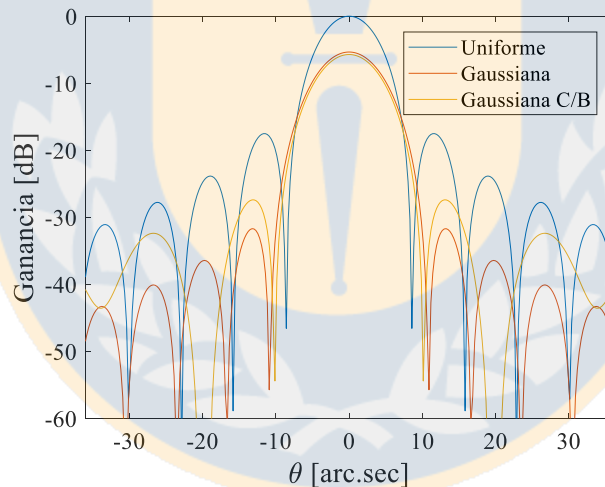


Figura 54: Patrón de radiación para tres iluminaciones diferentes

Notar el ensanchamiento del lóbulo principal donde el $FWHM$ para el caso Gaussiano con y sin bloqueo, son casi idénticos con un valor de $8,31 [arc. sec]$ y para el caso de iluminación uniforme este valor es $7,27 [arc. sec]$.

Además, se registra un aumento relativo de los lóbulos laterales entre una iluminación Gaussiana con bloqueo respecto al mismo tipo de iluminación, pero sin bloqueo, de $4,3 [dB]$. Por último, la caída de ganancia máxima respecto a una iluminación uniforme (lo cual se traduce en una menor capacidad de recolección de energía del lóbulo principal) para un caso con iluminación Gaussiana y para iluminación Gaussiana con bloqueo es $-5,35 [dB]$ y $-5,71 [dB]$ respectivamente.

Las longitudes de onda de interés en esta investigación son 300 y 850 GHz ; la primera es elegida para comparar resultados futuros con otras investigaciones asociadas al CSO (Serabyn, 1991), y la segunda es elegida debido a que, a esta frecuencia, la relación ε/λ se hace más significativa. Los parámetros de entrada para el análisis se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros de entrada para el modelo radiométrico.

Diámetro colector D [mm]	10227,8
Distancia focal f [mm]	4123,2
Frecuencia ν [GHz]	300/850
Función de iluminación	Gaussiana
Edge taper T [dB]	-12

La simulación se realiza con un dominio mayor al presentado en la Figura 52, ya que éste posee un dominio de 299x299 píxeles, mientras que la matriz de análisis total de 8192x8192 píxeles, ya que se agrega lo conocido como *zero padding*, con el fin de evitar efectos de borde en la apertura al aplicar la Transformada de Fourier.

5.6 Desalineamiento del subreflector y cambio de apuntamiento

En esta investigación es primordial conocer el efecto que el viento tiene sobre la estructura. El viento genera que el radiotelescopio rote desde una posición de observación de interés, lo que conlleva a que éste observe y apunte hacia otro lugar, esto es llamado cambio de apuntamiento.

Este cambio puede deberse a dos fenómenos, primero, que el sistema completo del telescopio rote sobre algún eje, sacándolo de su posición de observación y segundo puede darse debido al desalineamiento del subreflector respecto al eje óptico del reflector primario, esto por efecto de un movimiento relativo entre el subreflector y el reflector primario, lo que hace que éste quede *off focus*. Una representación de este desalineamiento puede visualizarse en la Figura 55.

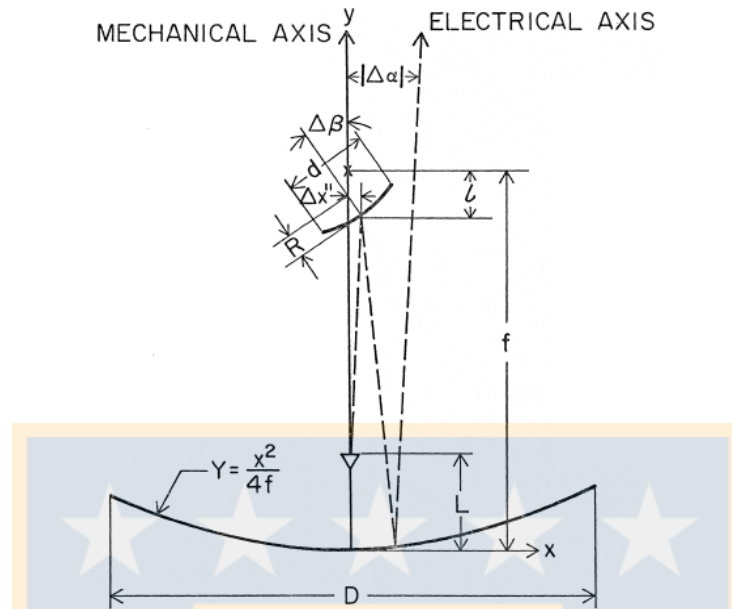


Figura 55: Movimiento del subreflector en un sistema cassegrain por una rotación (Guitar & Lansing, 1986.)

Como se ha mencionado anteriormente, en la presente investigación se ha realizado un análisis fluido-estructural para conocer el comportamiento entre el viento y las estructuras del radiotelescopio. Gracias a esto, es posible conocer las fuerzas que actúan sobre éste y calcular el cambio en el apuntamiento del sistema cuando rota todo el sistema y cuando existe un desalineamiento del subreflector respecto al reflector primario debido a un movimiento relativo entre ambos.

Para separar ambos efectos la metodología del BFP es utilizado, el cual es presentado en la sección 3.2. En general el algoritmo permite determinar el ángulo de rotación que debe experimentar una nube de puntos de la superficie de un paraboloides deformado para que éste, quede orientado en la misma dirección que lo estaría si no estuviera deformado. Esta es la misma metodología para determinar los errores de superficie, sin embargo, lo que se extrae de este método (considerando la condición de viento) como variable de salida no son éstos, sino las rotaciones que experimentan los datos de la superficie deformada, los cuales son las rotaciones que experimenta la estructura por el efecto del viento. En la Figura 56 puede visualizarse el problema de base.

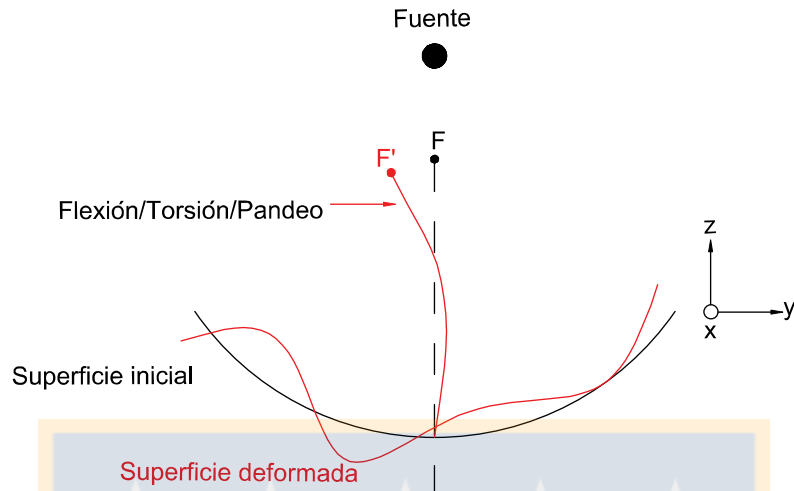


Figura 56: Sistema reflector primario - subreflector para la condición de viento

Se tiene una fuente la cual está siendo observada en la posición que se encuentra la línea negra con F la posición inicial del subreflector, luego de que el viento impacta sobre la estructura, ésta es deformada pasando a la línea roja donde el subreflector queda en F'. Notar que tanto la superficie del paraboloide y los feedlegs están deformados. Como se comentó previamente, la deformación del sistema reflector primario y subreflector puede ser dividida en dos componentes: la rotación del sistema completo y el movimiento relativo entre el subreflector y el primario. El algoritmo rota la superficie deformada con el fin de alinearla con el eje Z del sistema de referencia mediante una rotación θ_x (θ_x solo es mostrado de manera ilustrativa ya que existe también un θ_y) como muestra la Figura 57, así con esta rotación el efecto de la rotación de todo el sistema es eliminada.

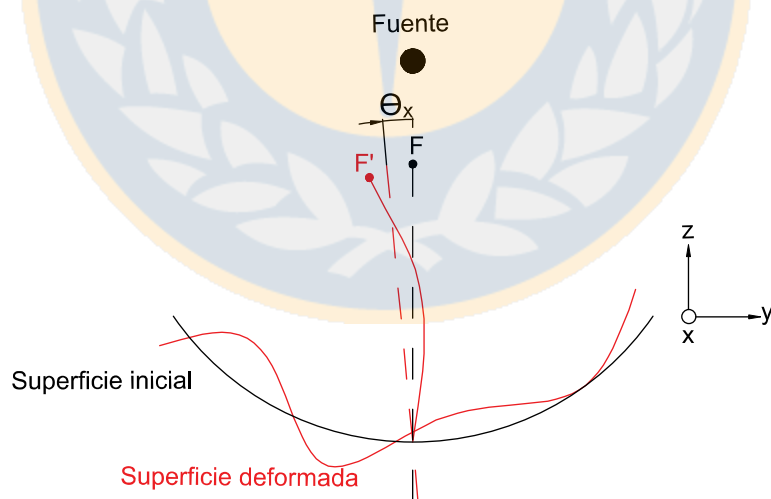


Figura 57: Rotación de los datos

Una vez que los datos de la deformada son rotados, el movimiento relativo entre el subreflector y el reflector primario puede ser calculado. En la Figura 58 y 59 se muestra el sistema rotado y los desplazamientos relativos en los diferentes planos.

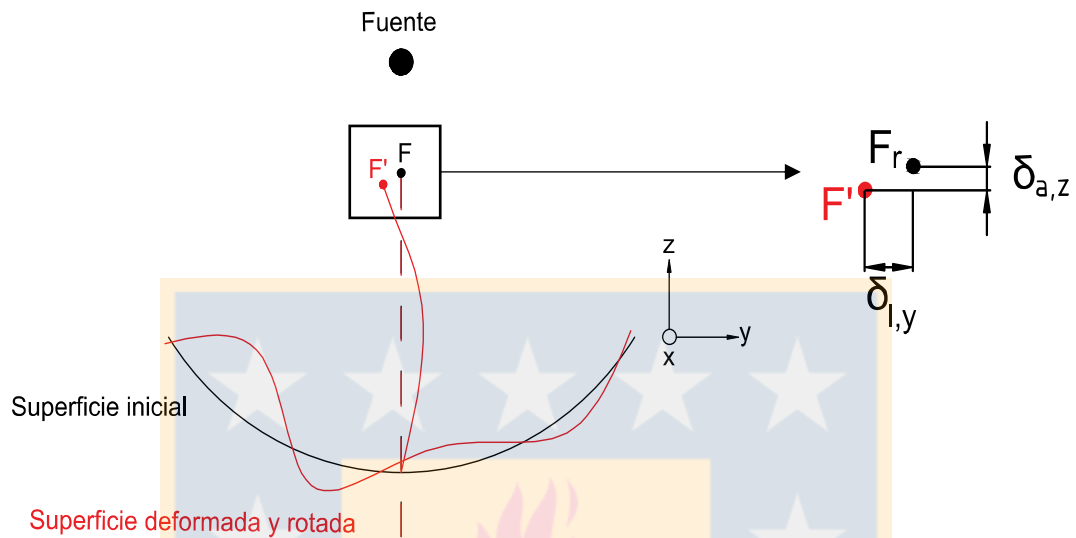


Figura 58: Ilustración del desalineamiento del subreflector

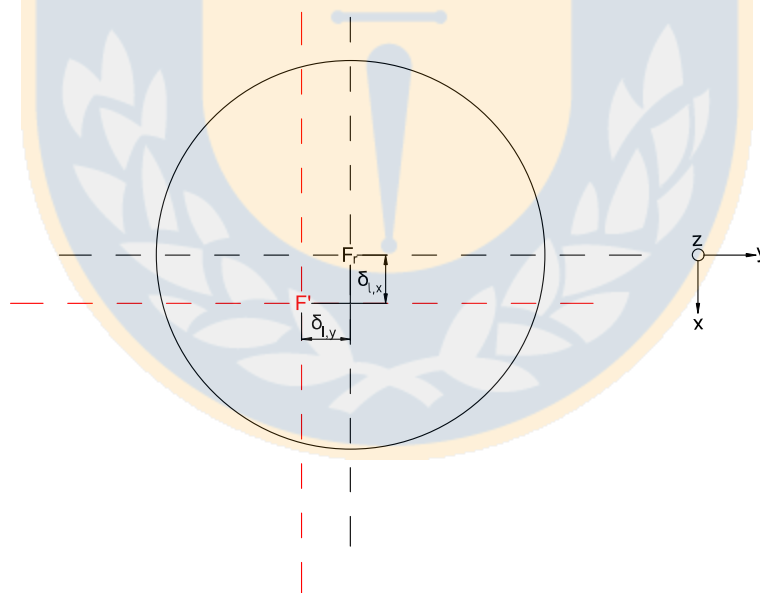


Figura 59: Desalineamiento lateral del subreflector respecto al reflector primario.

Finalmente el movimiento relativo queda cuantificado mediante los desplazamientos δ_x y δ_y . Notar que si los feedlegs no se deformaran respecto al reflector primario, F' debería eventualmente coincidir nuevamente con F . Este residual que resulta por este movimiento relativo genera un cambio de apuntamiento adicional en el sistema Cassegrain al ya generado por la rotación del sistema que es calculado como (B.L.Ulich, 1976)

$$\theta_{\delta x} = \delta_y \left(\frac{BDf}{f} - \frac{BDF}{f_e} \right) \quad (50)$$

$$\theta_{\delta y} = \delta_x \left(\frac{BDf}{f} - \frac{BDF}{f_e} \right) \quad (51)$$

donde f es la distancia focal primaria y f_e la distancia focal del sistema cassegrain dada por:

$$f_e = mf \quad (52)$$

con m el factor de magnificación del sistema cassegrain, calculado en base a la excentricidad del hiperboloide que forma el subreflector dado por:

$$m = \frac{e + 1}{e - 1} \quad (53)$$

con e igual a:

$$e = \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} \quad (54)$$

con a , el semieje mayor del hiperboloide y b , el semieje menor del hiperboloide. La ecuación del hiperboloide que da forma al subreflector es:

$$\frac{(x + a)^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (55)$$

Luego, BDF es el *beam deviation factor* del sistema primario y BDF es el *beam deviation factor* del sistema cassegrain que están dados por (Baars J. W., 2007):

$$BDF = \left(\frac{1}{2\tau + 1}\right) \left\{ 48f_r^2 \left[1 - 32f_r^2(-1 + \tau) + \tau + 32f_r^2(-1 + 16f_r^2(1 - \tau)) \left(-\ln f_r^2 + \ln \left(\frac{1}{16} + f_r^2 \right) \right) \right] \right\} \quad (56)$$

$$BDF = \left(\frac{1}{2\tau + 1}\right) \left\{ 48F_r^2 \left[1 - 32F_r^2(-1 + \tau) + \tau + 32F_r^2(-1 + 16F_r^2(1 - \tau)) \left(-\ln F_r^2 + \ln \left(\frac{1}{16} + F_r^2 \right) \right) \right] \right\} \quad (57)$$

con f_r y F_r la razón focal del sistema primario y cassegrain respectivamente, igual a f/D y mf/D .

τ al mismo tiempo queda definido como:

$$\tau = 10 \left(\frac{T}{20} \right) \quad (58)$$

Para el análisis se considera un *edge taper* T igual a 0 lo cual representa una iluminación uniforme. En la Tabla 5 se presentan los datos necesarios para determinar el cambio de apuntamiento debido al desalineamiento del subreflector.

Tabla 5: Parámetros para cálculo de apuntamiento por desalineamiento del subreflector

Parámetro	Valor
T [dB]	0
τ	1
a ["]	134,79
b ["]	50,66
e	1,07
m	30,28
f [mm]	4223,2
f_e [mm]	124.874
f_r	0,40
F_r	12,21
BDF	0,80
BDF	1

Los resultados obtenidos en base al método del BFP entregan como salida las rotaciones del sistema θ_y (respecto al eje de elevación EL) y θ_x (respecto al eje de elevación cruzado XEL). La relación que existe entre este último y la rotación en el eje acimutal AZ está dada por (Guiar & Lansing, 1986.):

$$\Delta XEL = \Delta AZ \cos \alpha \quad (59)$$

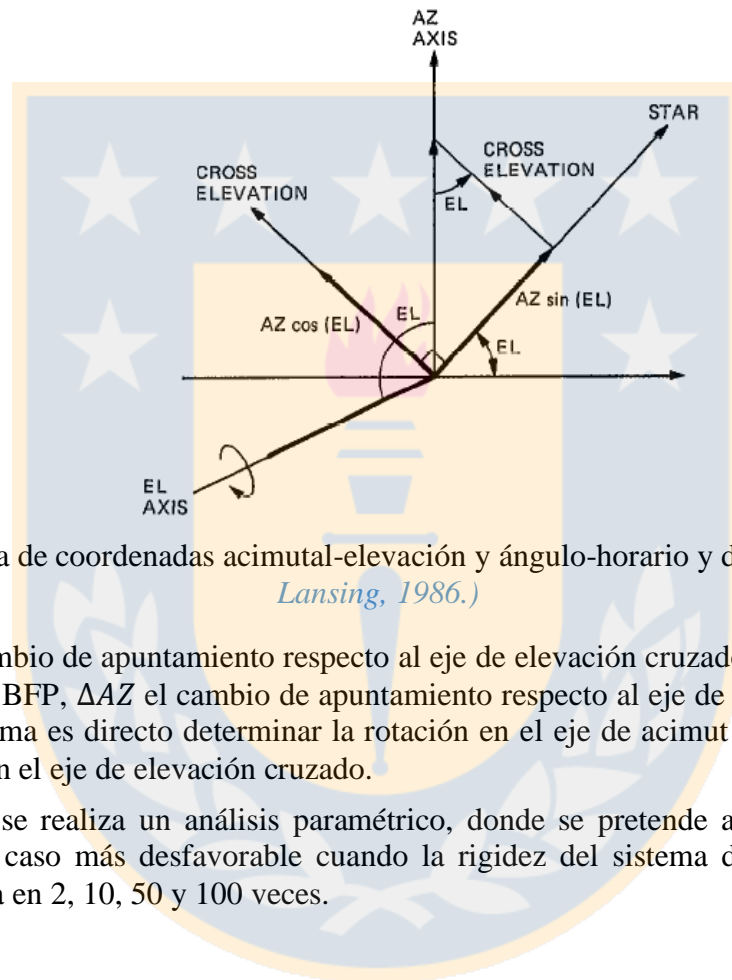


Figura 60: Sistema de coordenadas acimutal-elevación y ángulo-horario y declinación (Guiar & Lansing, 1986.)

Donde ΔXEL es el cambio de apuntamiento respecto al eje de elevación cruzado el cual es determinado en base al método del BFP, ΔAZ el cambio de apuntamiento respecto al eje de acimut y α el ángulo de elevación. De esta forma es directo determinar la rotación en el eje de acimut teniendo como variable conocida la rotación en el eje de elevación cruzado.

De manera adicional se realiza un análisis paramétrico, donde se pretende analizar la variación del apuntamiento para el caso más desfavorable cuando la rigidez del sistema de transmisión en el eje acimutal es aumentada en 2, 10, 50 y 100 veces.

CAPÍTULO 6

Resultados

6.1 Gravedad

6.1.1 Errores de superficie

Se determinan los desplazamientos en las direcciones X, Y, Z en la base de los stand-off los cuales permitirán posteriormente conocer cuál es la ecuación del paraboloide que mejor aproxime la superficie del reflector deformado mediante el algoritmo presentado en capítulos precedentes. Se considera que el punto en el espacio perteneciente al panel y a la base stand-off al mismo tiempo, está representado por su posición inicial sin deformar más el desplazamiento después del efecto correspondiente.

$$(x, y, z) = (x_0, y_0, z_0) + (\Delta x, \Delta y, \Delta z) \quad (60)$$

donde los subíndices “0” corresponden a la posición inicial, y los Δ representan el desplazamiento generado por el efecto que se estudia. En base a los desplazamientos de la base de los stand-offs se construye la superficie deformada y posterior el *BFP* que mejor se ajusta a esta superficie. Además, con el fin de tener una superficie de referencia también se construye el *BFP* que mejor se ajusta a la superficie generada por los puntos SIN deformar. Así, los errores de superficie se determinan mediante la resta de estas dos superficies. En la Figura 61 se presentan los resultados obtenidos para cuatro ángulos de elevación.

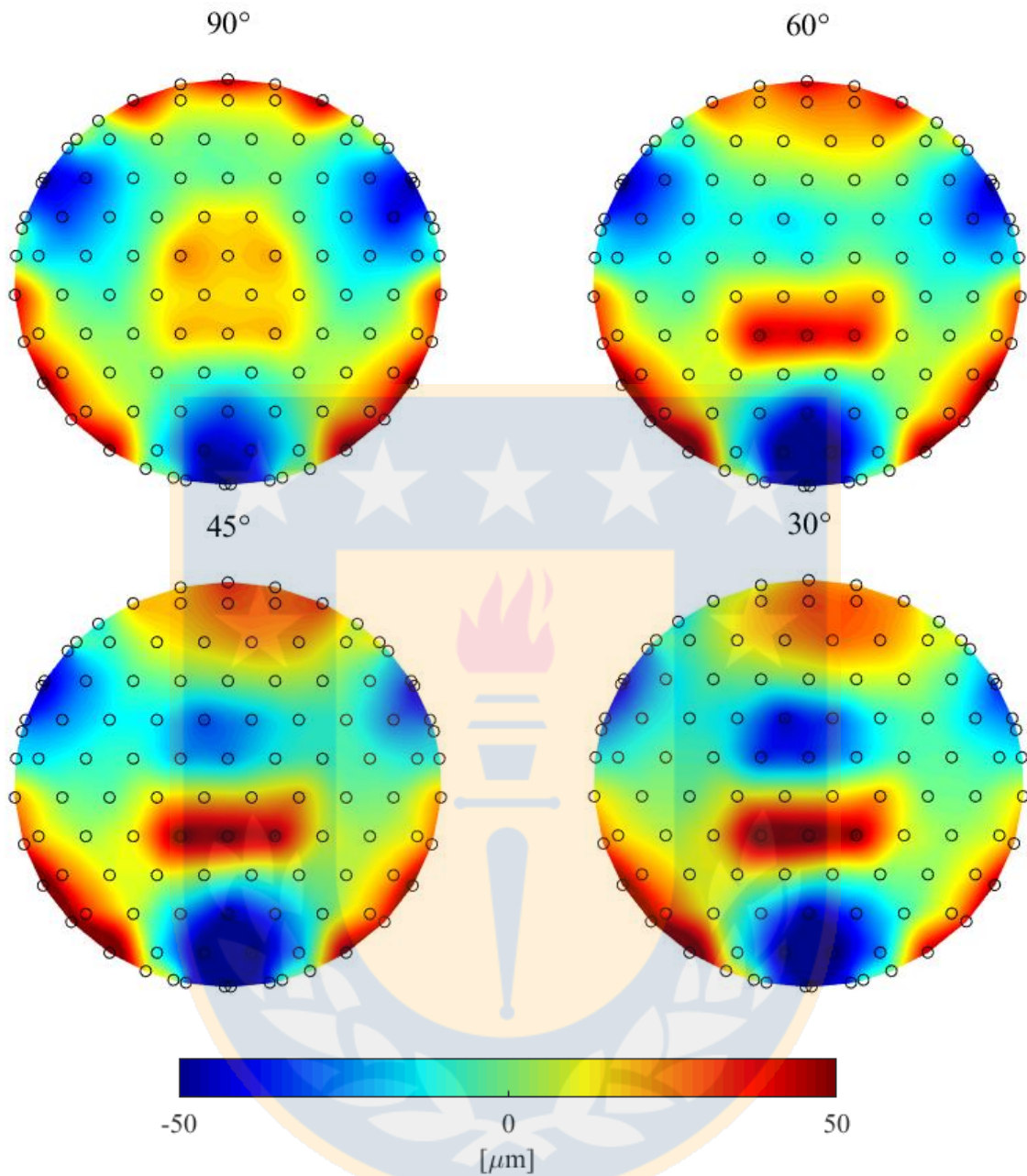


Figura 61: Errores de superficie debido a peso propio

6.1.2 Patrón de radiación

Estos errores de superficie conllevan una degradación del patrón de radiación los cuales se presentan en la Figura 62 para una longitud de onda de 300 GHz o bien 1 mm de longitud de onda. Se considera de una resolución angular de los ejes del patrón de radiación presentado desde

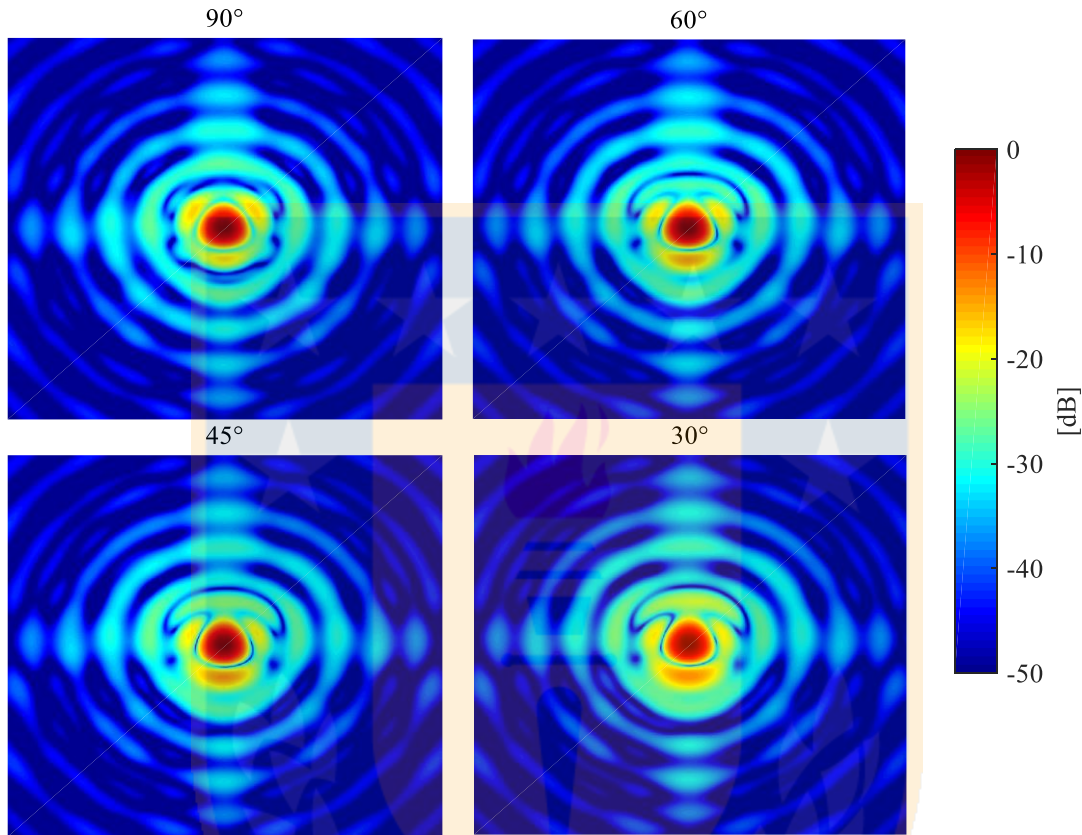


Figura 62: Patrón de radiación 2D a 300 GHz considerando errores de superficie

Notar que el patrón de radiación pierde cierta simetría. Esto es más sencillo de visualizar si se toman diferentes planos acimutales a 0° , 45° y 90° . Notar la diferencia en la intensidad de los lóbulos laterales y el ensanchamiento del lóbulo principal respecto al caso ideal 0° acimutal (en el eje horizontal) denotado por “Sin errores”, el cual es el mostrado en la Figura 63.

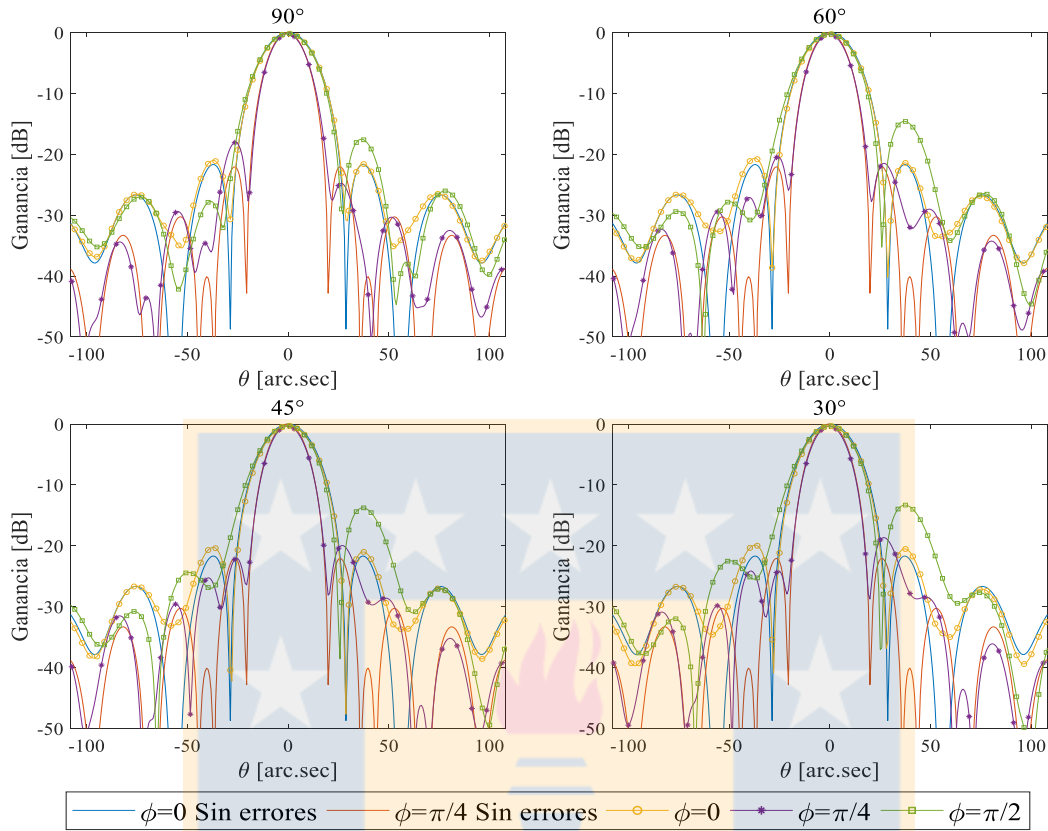


Figura 63: Patrón de radiación a 300 GHz considerando errores de superficie en diferentes ángulos acimutales

Adicionalmente se determina la caída de ganancia del lóbulo principal debido a los errores de superficie para 300 GHz, la cual se muestra en la Figura 64.

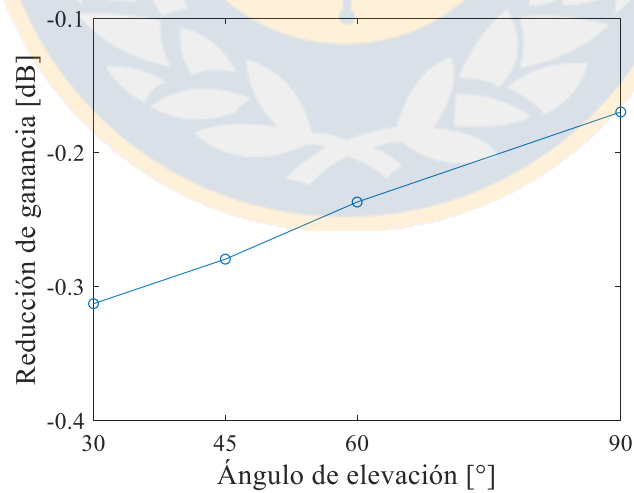


Figura 64: Caída de potencia del lóbulo principal a 300 GHz

Cuando se considera una frecuencia de 850 GHz o bien $350 \mu\text{m}$ de longitud de onda, el patrón de radiación es aún más degradado. Esto es debido al hecho que la relación ε/λ expuesta en la ecuación 40, se hace más significativa. Los resultados del patrón de radiación en el plano se muestran en la Figura 65.

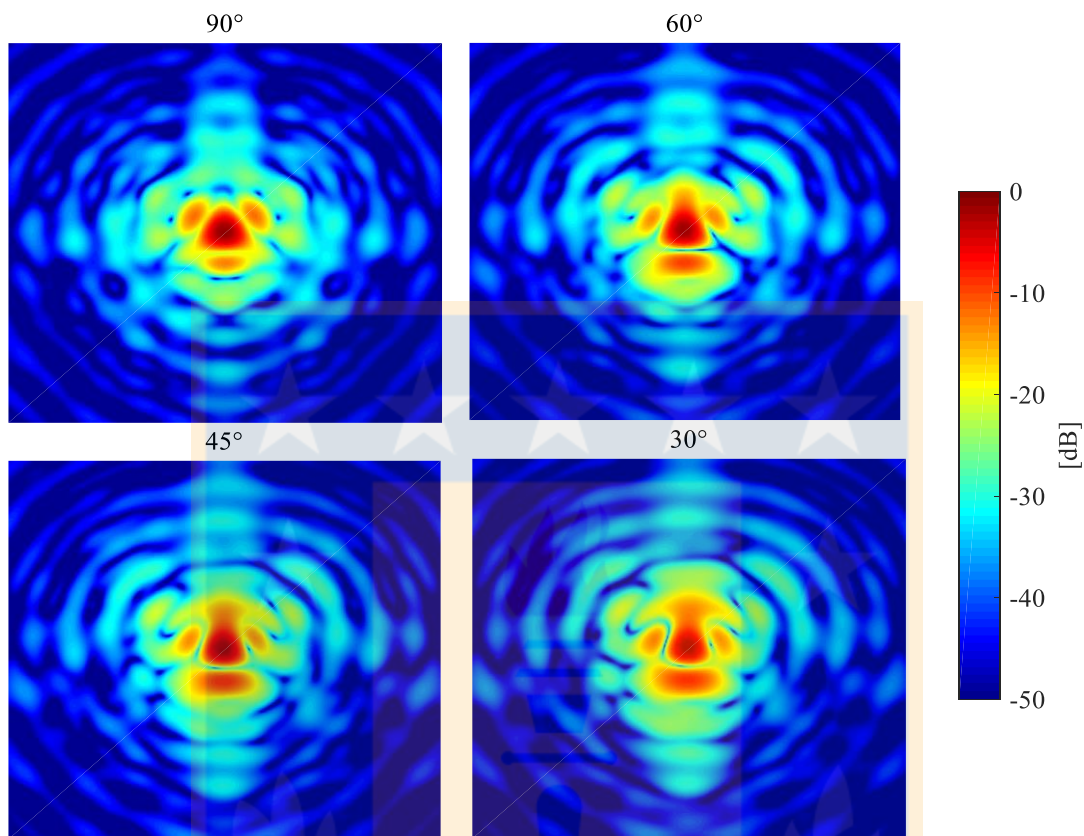


Figura 65: Patrón de radiación 2D a 850 GHz considerando errores de superficie

En la Figura 66 se presenta el patrón de radiación anterior tomando los tres planos anteriormente descritos, y la caída de la ganancia del lóbulo principal en la Figura 67.

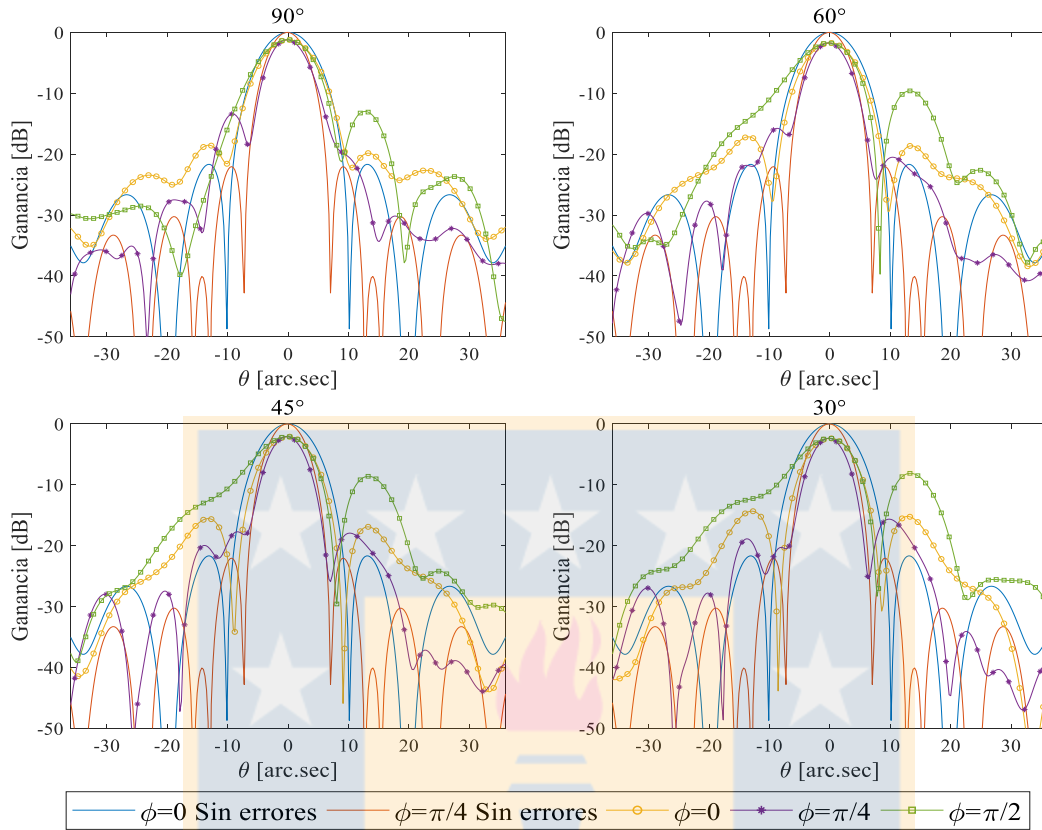


Figura 66: Patrón de radiación a 850 GHz considerando errores de superficie en diferentes ángulos acimutales

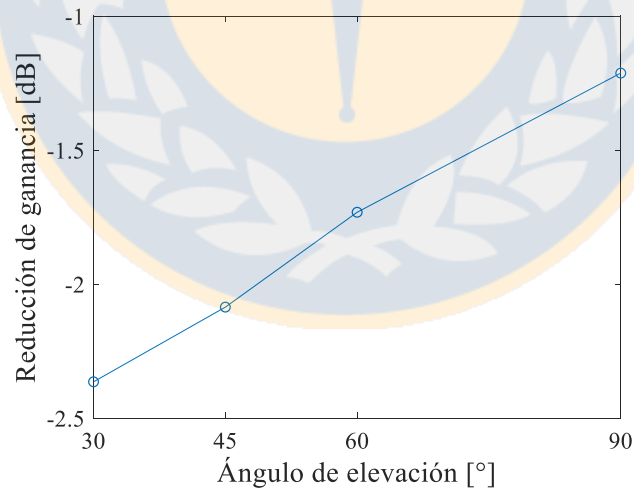


Figura 67: Caída de potencia del lóbulo principal a 850 GHz

Notar que el caso más desfavorable ocurre a 30° en elevación. En base a este caso se compara la degradación del FWHM y SLL la cual se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Degradación de los parámetros característicos del patrón de radiación para el caso más desfavorable

Ángulo del plano	Parámetros	Con errores de superficie	Sin errores de superficie
0	SLL max [dB]	-14,34	-21,68
	FWHM [arc.sec]	7,53	8,31
	Caída de ganancia [dB]	-2,37	0
$\pi/4$	SLL max [dB]	-15,64	-22,05
	FWHM [arc.sec]	5,58	5,97
	Caída de ganancia [dB]	-2,38	0
$\pi/2$	SLL max [dB]	-8,11	-21,68
	FWHM [arc.sec]	8,7	8,31
	Caída de ganancia [dB]	-2,37	0

6.2 Viento

6.2.1 Análisis fluidoestructural FSI

Como se mencionó en párrafos precedentes, se consideraron los últimos 20 [s] de simulación para analizar el efecto del viento sobre la estructura, monitoreando los parámetros de estabilidad correspondientes como el valor del tamaño de la capa límite y^+ y valores residuales. Se determinan las rotaciones del sistema reflector primario-subreflector en las direcciones X e Y mediante el método *BFP* explicado en párrafos precedentes. En base a estos resultados se eligen dos casos críticos: 30EL-225AZ y 30EL-180AZ, con el fin de visualizar los resultados obtenidos del análisis fluido-dinámico y estructural. A continuación, se presenta un conjunto de imágenes para estas dos condiciones en particular.

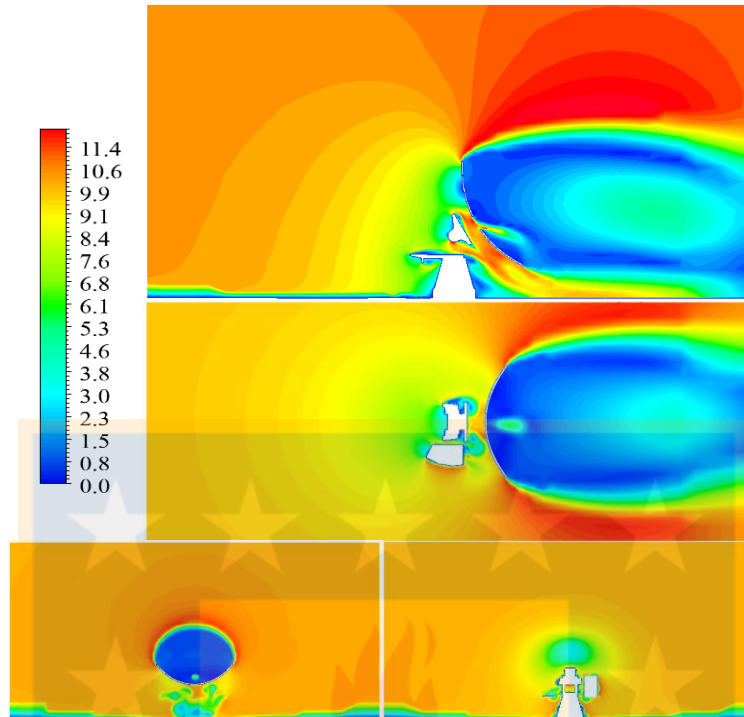


Figura 68: Campo de velocidad total en m/s para el caso 30EL-180AZ. Arriba: Plano de perfil del radiotelescopio, centro: plano paralelo al suelo a una altura de 5 metros, abajo izquierda: plano perpendicular al suelo con vista de frente al radiotelescopio, abajo derecha: plano perpendicular al suelo con vista de frente al radiotelescopio justo detrás del reflector primario

En la Figura 69 se visualiza el campo de desplazamientos totales en mm sobre el radiotelescopio para este caso. Considerar que este proceso en donde, se extraen las presiones desde el módulo fluido-dinámico de ANSYS, se importan al módulo estructural y se determina el desplazamiento del subreflector en las tres direcciones. Este análisis es análogo para los 32 casos analizados.

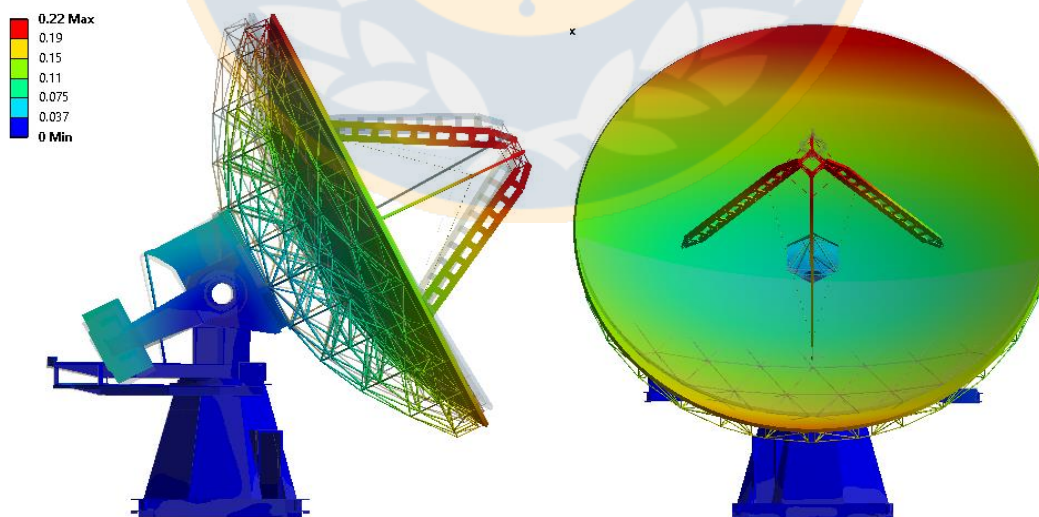


Figura 69: Campo de desplazamiento total sobre el radiotelescopio para 30EL-180AZ.

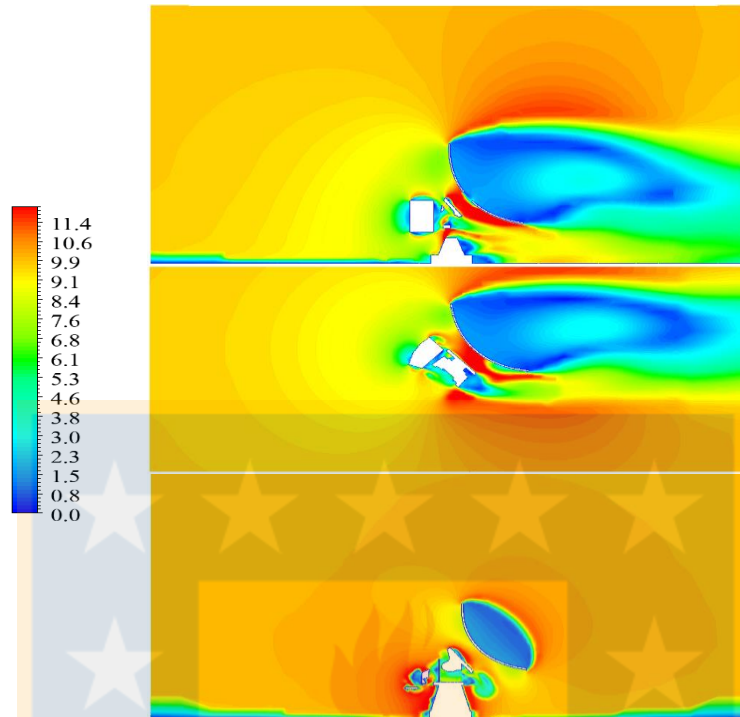


Figura 70: Campo de velocidad total en m/s para el caso 30EL-225AZ. Arriba: Plano de perfil del radiotelescopio, centro: plano paralelo al suelo a una altura de 5 metros, abajo izquierda: plano perpendicular al suelo con vista de frente al radiotelescopio

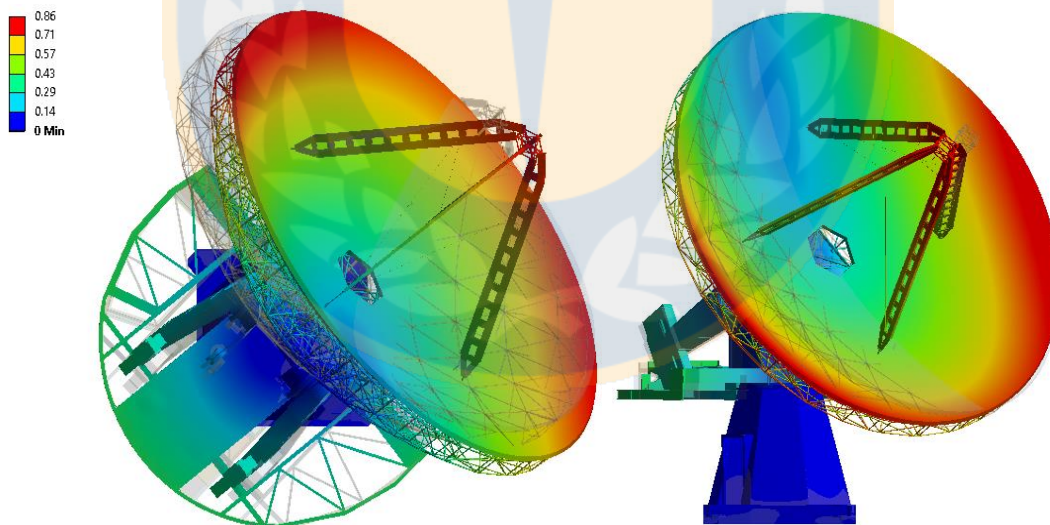


Figura 71: Campo de desplazamiento total sobre el radiotelescopio para 30EL-225AZ

6.2.2 Errores de superficie

Con el fin de encontrar el caso más desfavorable según este criterio, se determina el error cuadrático medio RMS para las diferentes condiciones de observación.

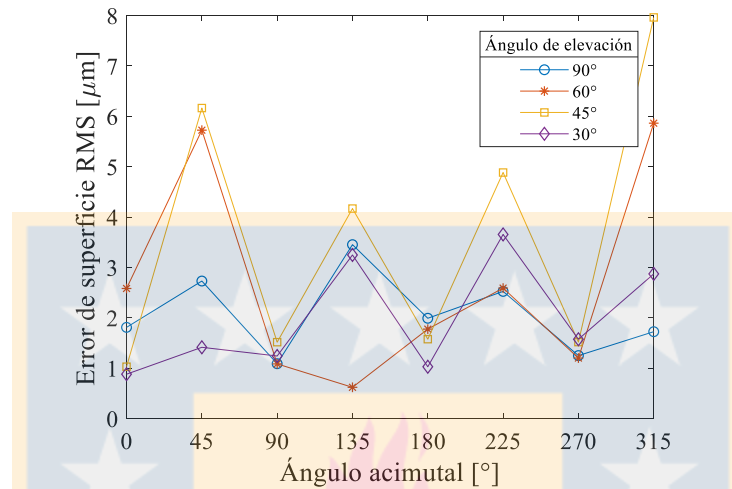


Figura 72: RMS error de superficie para condición de viento

Considerando que según este criterio el caso más desfavorable ocurre en 45° en elevación y 315° en acimut, el mapa de errores de superficie para este caso se presenta en la Figura 73.

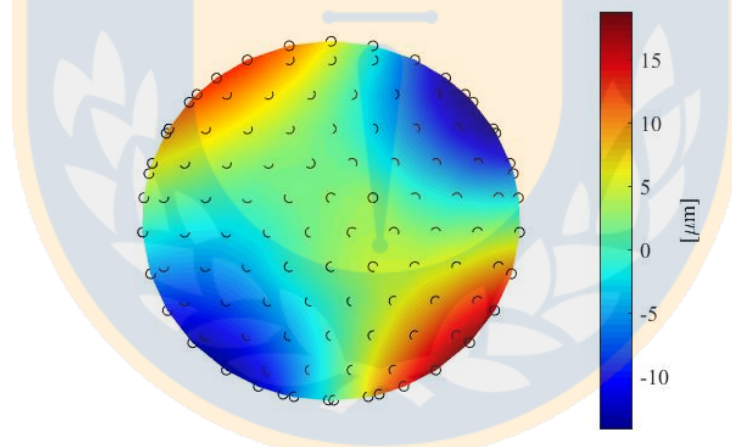


Figura 73: Mapa de error de superficie 45°- 315°.

Los resultados presentan un bajo aporte del viento en los errores sobre la superficie del reflector primario.

6.2.3 Patrón de radiación

De forma análoga como se realizó para el caso de la gravedad, se calcula la variación del patrón de radiación en diferentes planos acimutales como en la Figura 63 o Figura 66. Solo se presenta el caso más desfavorable como se mencionó en la sección anterior, para las dos frecuencias de análisis. Cabe destacar que no se presenta el patrón de radiación en el plano, ya que debido a que no se distingue de manera clara los cambios en el patrón cuando se observa en el plano.

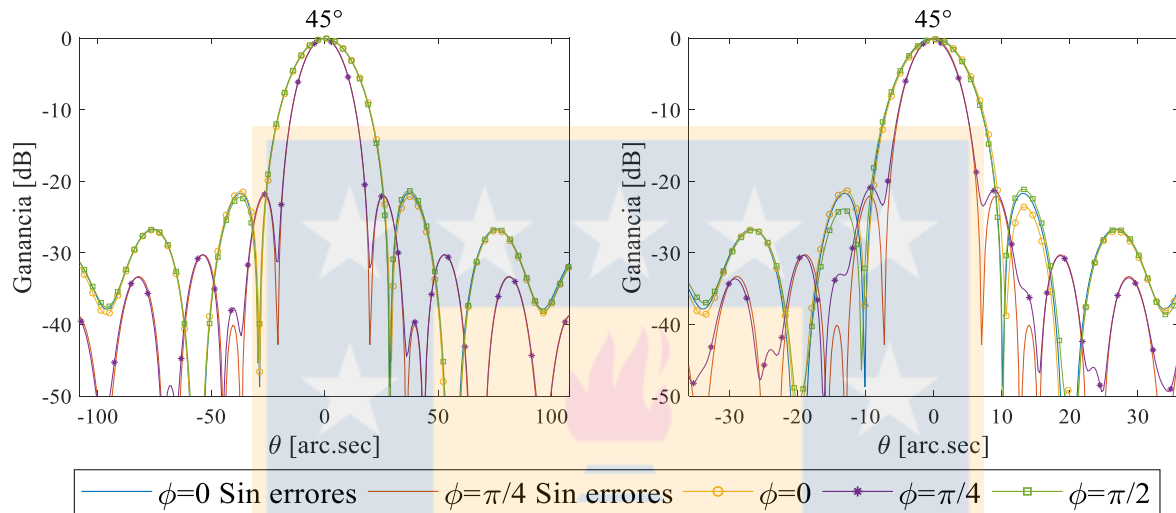


Figura 74: Patrón de radiación a 300 GHz (izquierda) y 850 GHz (derecha) considerando errores de superficie debido al viento para el caso 45EL-315AZ en diferentes ángulos acimutales del patrón de radiación en el plano

6.2.4 Cambio de apuntamiento y desalineamiento del subreflector

El desplazamiento lateral del subreflector ocurre en dos direcciones las cuales se analizan en forma separada, tanto en Y como en X . En el caso axial los desplazamientos que ocurren en esta dirección son de bajo valor en comparación al desplazamiento lateral. Esto último tiene implicancias en la caída de la ganancia máxima que puede tener el patrón de radiación, si existen altos valores de desplazamiento axial, la ganancia máxima tiende a disminuir (Baars J. W., 2007).

Los desplazamientos del subreflector para las diferentes combinaciones de observación, y los ángulos de rotación del sistema completo se presentan en las siguientes figuras, considerando el ángulo de elevación cruzado y la transformación desde éste al ángulo acimutal.

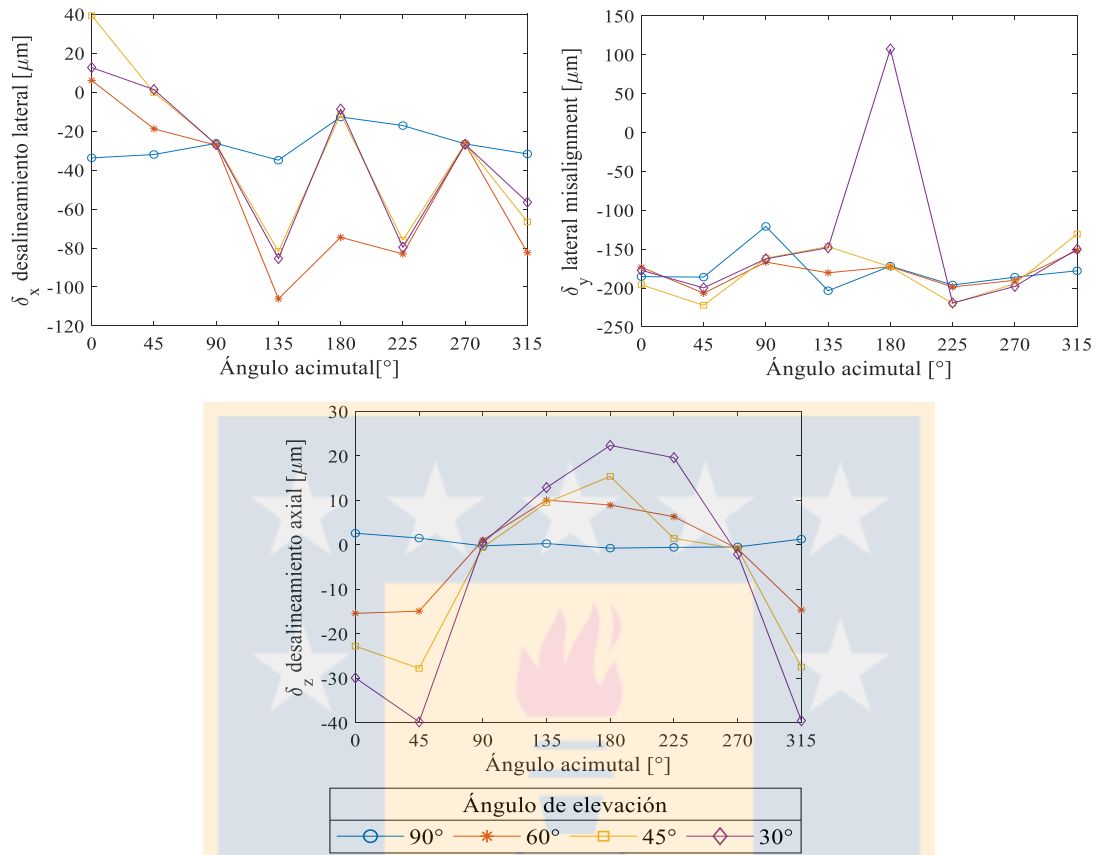


Figura 75: Desalineamiento del subreflector respecto al reflector primario

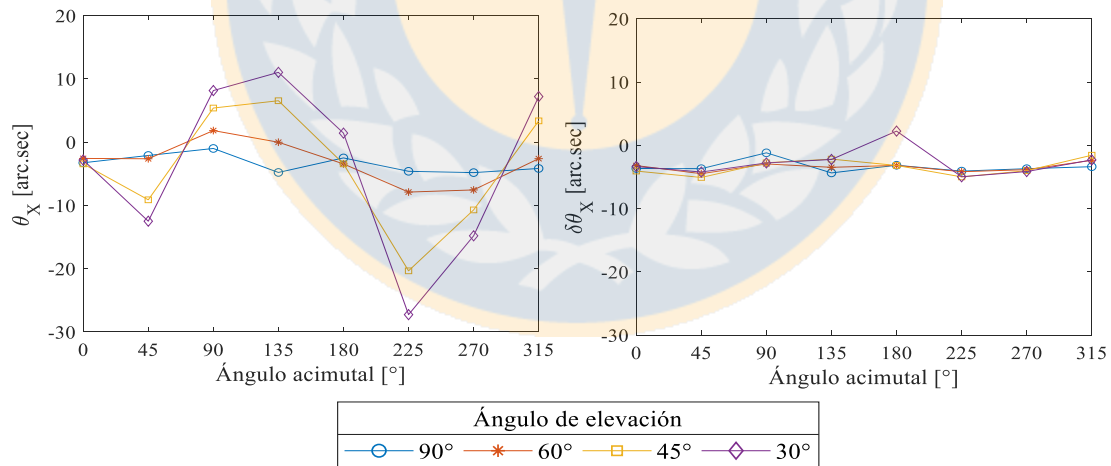


Figura 76: Cambio de apuntamiento respecto al eje X por rotación del sistema primario-subreflector (izquierda) y por desalineamiento del subreflector en la dirección Y (derecha).

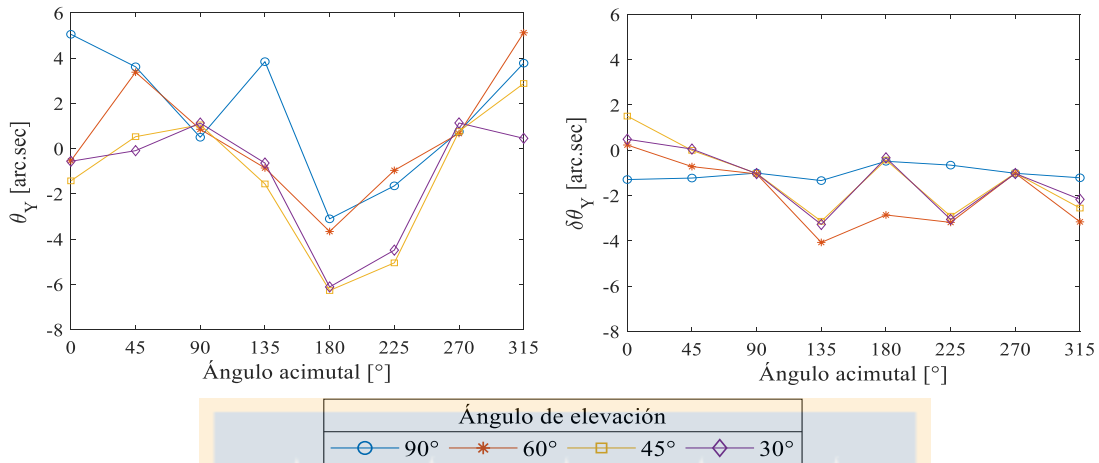


Figura 77: Cambio de apuntamiento respecto al eje Y por rotación del sistema primario-subreflector (izquierda) y por desalineamiento del subreflector en la dirección X (derecha).

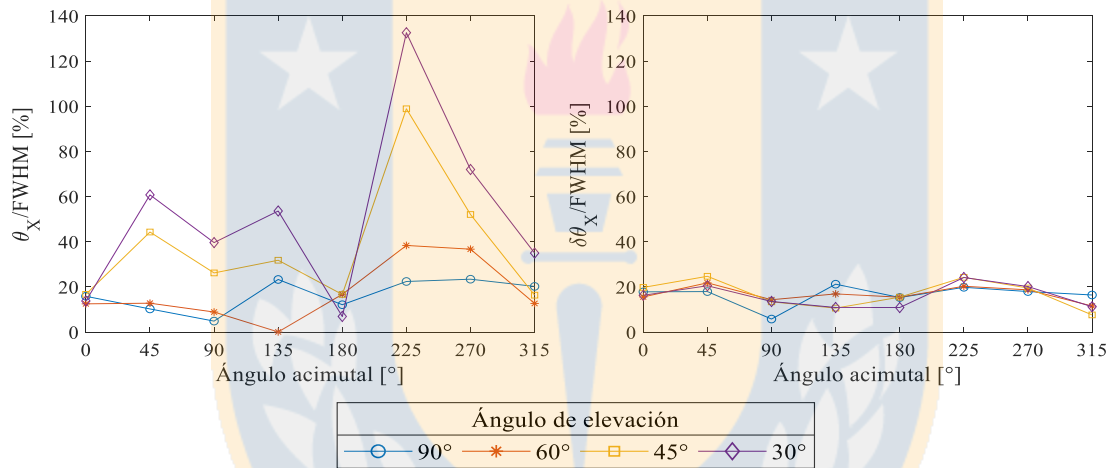


Figura 78: Cambio de apuntamiento en el eje X respecto al FWHM a 300 GHz.

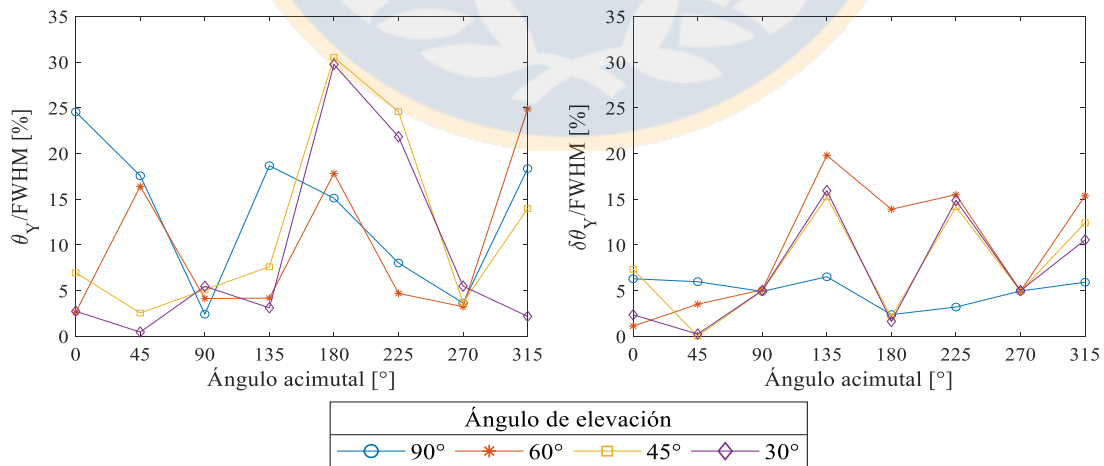


Figura 79: Cambio de apuntamiento en el eje Y respecto al FWHM a 300 GHz.

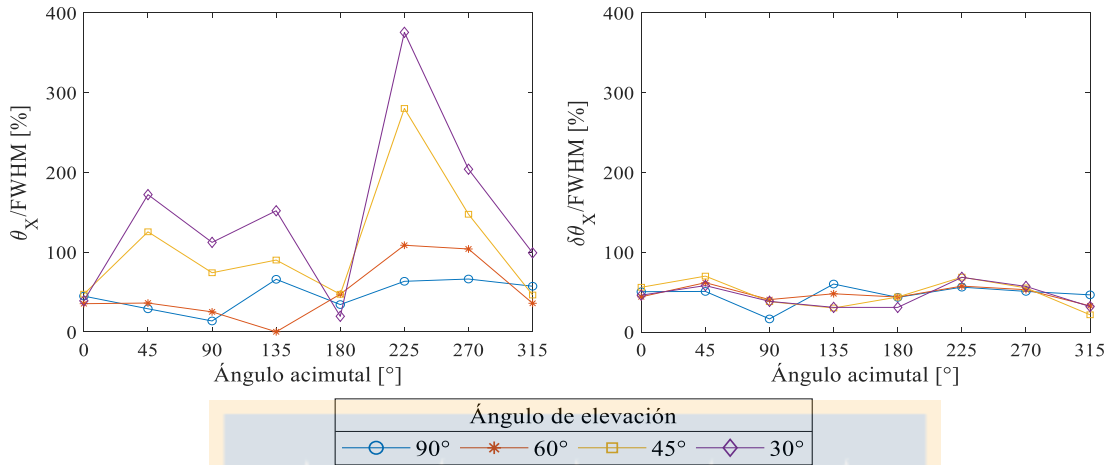


Figura 80: Cambio de apuntamiento en el eje X respecto al FWHM a 850 GHz.

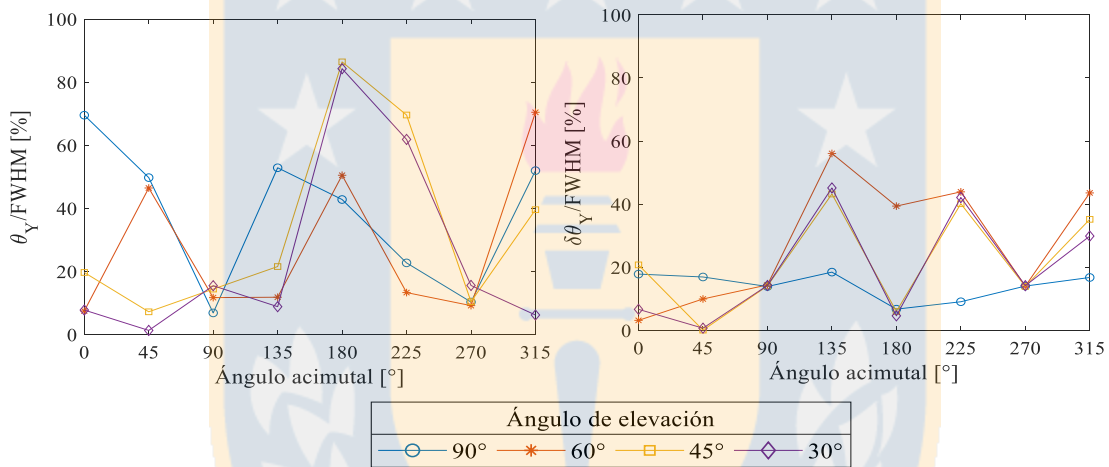


Figura 81: Cambio de apuntamiento en el eje Y respecto al FWHM a 850 GHz.

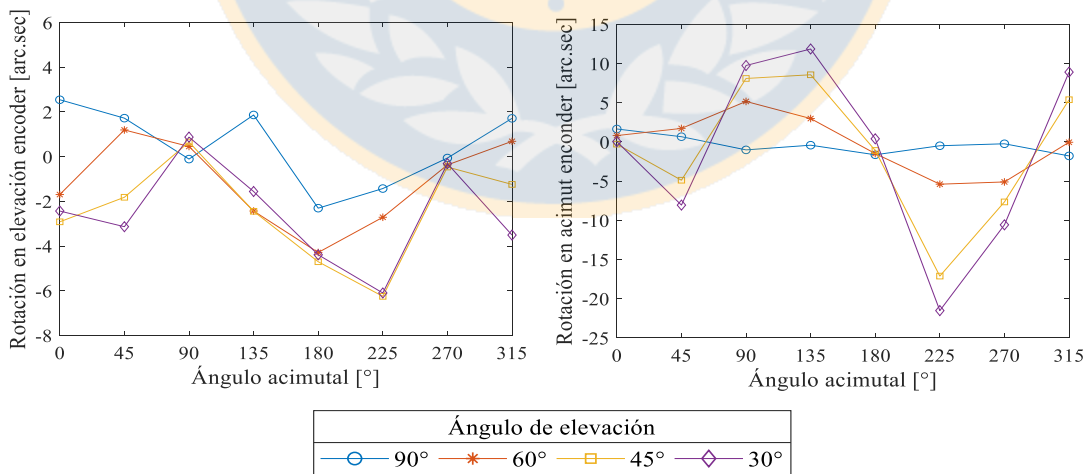


Figura 82: Medición de cambio de apuntamiento en los encoders del sistema.

Considerando la ecuación 59 que relaciona la rotación en el eje de elevación cruzada a partir de la rotación en el eje de acimut, se realiza una comparativa entre la rotación en acimut que sufre el sistema mediante la medición de ésta en el software ANSYS y la rotación en acimut que sufre el sistema calculado en base a la ecuación 59. En la Figura 83 se presenta este comportamiento excluyendo el ángulo de elevación de 90° ya que, para este valor, la rotación en acimut tiende a infinito, además, como el BFP realiza la rotación inversa de los puntos del reflector deformado, para comparar entre lo medido y lo calculado, se multiplica este último por -1 .

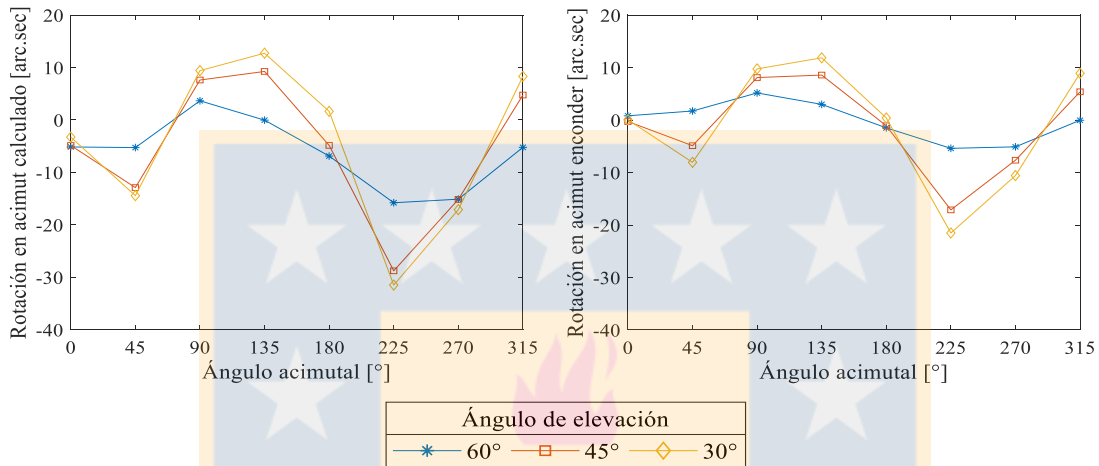


Figura 83: Comparativa de la rotación en acimut en base a lo calculado (izquierda) y lo medido (derecha).

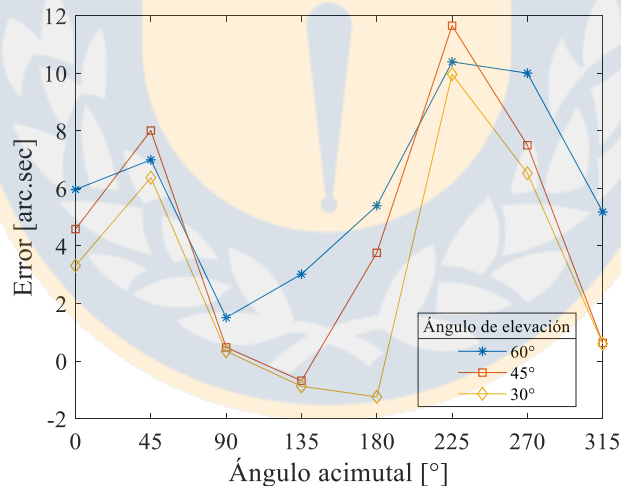


Figura 84: Error entre el cambio de apuntamiento en acimut entre lo calculado y lo medido en ANSYS.

El cambio en el apuntamiento en la dirección X (eje de elevación cruzado) por el aumento de rigidez del sistema de transmisión en acimut, se presenta en la Figura 85 para el caso más desfavorable: 30EL-225AZ.

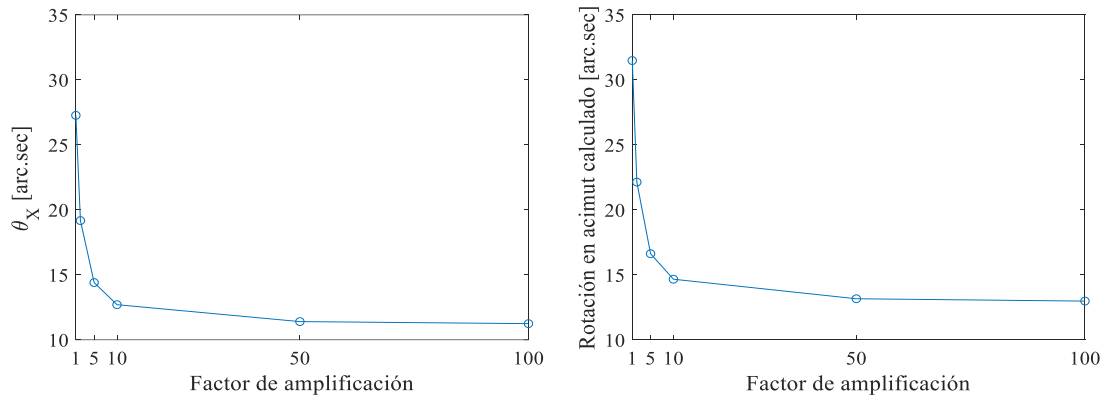


Figura 85: Cambio de apuntamiento en función de la rigidez de la transmisión en acimut. Izquierda: rotación en XEL. Derecha: rotación en AZ calculada.

Si se considera la región donde el factor de amplificación varía entre 1 y 10, el cambio de apuntamiento se presenta en la Figura 86.

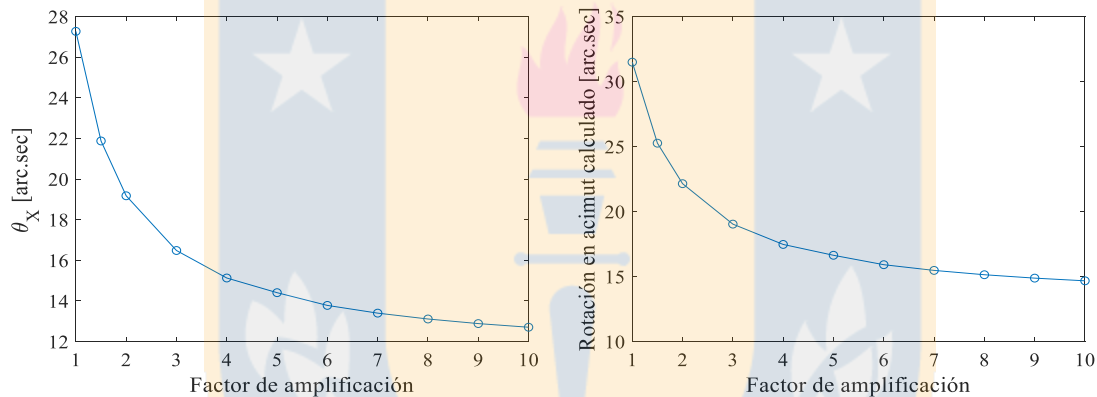


Figura 86: Variación del cambio de apuntamiento para diferentes valores del factor de amplificación de la rigidez de la transmisión acimut en el rango [1 10].

Adicionalmente, la variación del máximo desplazamiento que experimenta la estructura se muestra en la Figura 87.

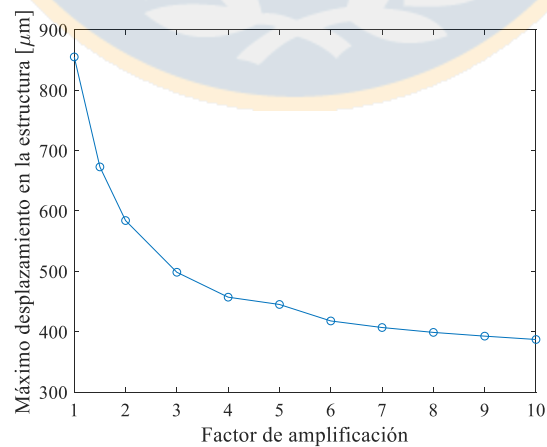


Figura 87: Variación del máximo desplazamiento de la estructura.

CAPÍTULO 7

Conclusiones y perspectivas

7.1 Conclusiones

En la presente investigación se realizó un análisis electromecánico, acoplando tópicos asociados a mecánica computacional como es FEA y CFD, con análisis radiométrico y conceptos asociados al comportamiento de un telescopio. Las principales conclusiones de este estudio son:

- Es posible conocer el impacto que tienen los efectos mecánicos en el comportamiento electromagnético que tiene el radiotelescopio.
- Los resultados presentan una primera aproximación favorable, dando paso a un análisis más detallado en el futuro.
- El impacto que tiene el viento sobre los errores de superficie es mínimo, alcanzando un valor RMS máximo de $8 \mu m$ comparados con los $25 \mu m$ que como mínimo se tienen para los errores debidos al propio peso. Esto conlleva al mismo tiempo a un impacto menor en los parámetros característicos del patrón de radiación de la antena.
- Siguiendo con el punto anterior, la degradación del patrón de radiación se da con más fuerza para una condición de peso propio y en 30° de elevación, donde se tiene un aumento máximo de uno de los lóbulos laterales de un 61% sin embargo, en el caso del FWHM éste no presenta gran variación al igual que la ganancia máxima.
- El análisis de cambio de apuntamiento y desalineamiento del subreflector, presenta resultados prometedores para la caracterización de las posibles ventanas de observación que puede tener el radiotelescopio, esto es que, mediante el estudio realizado es posible determinar en qué posiciones de observación es o no posible una observación con un rendimiento aceptable. Mediante lo expuesto es claro que, con una velocidad de $10 m/s$ y en una posición de observación de: 30EL-225AZ, 30EL-180AZ, 45EL-225AZ, 45EL-180AZ y 60EL-180AZ presentarían dificultades para una óptima observación en especial a frecuencias altas.
- Como es de esperarse, un aumento en la rigidez del sistema (en este caso de la transmisión que genera el movimiento en el ángulo acimutal) genera una abrupta caída en el cambio de apuntamiento haciendo menos crítica la observación. Esto debe ir de la mano con la razón costo/beneficio, ya que, un aumento de 10 veces la rigidez actual garantiza una disminución de aproximadamente un 50% en el cambio de apuntamiento. El costo asociado a un sistema rigidizador debe evaluarse con los materiales disponibles en el país, la fabricación, disponibilidad de herramientas, etc.

7.2 Perspectivas

El trabajo futuro en base a lo expuesto en la presente investigación es:

- La comparación experimental de los resultados del patrón de radiación mediante alguna técnica como es holografía coherente, holografía, u otra.
- Validación de los resultados del cambio de apuntamiento a través del sistema de control del radiotelescopio.
- Simulación térmica del radiotelescopio y análisis de su impacto sobre el rendimiento electromecánico.



Referencias y bibliografía

Alma science weather . (s.f.).

B.L.Ulich. (1976). *Pointing characteristics of the 36-foot telescope NRAO*.

- Baars, J. W. (2007). *The paraboloid reflector antenna in radio astronomy and communication*.
- Baars, J., Lucas, R., Mangum, J., & Lopez-Perez, J. (2007). Near-Field Holography of Large Reflector Antennas.
- Boonsale, S. (2001). Effects of random surface errors on the performance of parabolic reflectors.
- Born, & Wolf. (1980). *Theory of aberrations*.
- Caltech, UdeC, & sciences, C. a. (2016). *Conceptual Design Report of the Leighton Chajnantor Telescope*.
- Casco, N., & Sanz, J. (2008). *Estimación de la rugosidad superficial de la Antena II*. Buenos aires.
- Cornejo, C. (2017). Leighton Chajnantor Telescope. *Periodismo Udec*.
- D.Woody, Schaal, W., & Vail, D. (1994). Design, Construction and Performance of the Leighton 10.4-m Diameter Radio Telescopes. *IEE Xplore*.
- ESO, E. S. (2018-2019). *Weather Station at the Atacama Pathfinder Experiment*.
- Fecyt. (2014). Radioastronomía.
- Gillen, G., & Guha, S. (2006). Description of Spherical Aberration and Coma of a Microlens Using Vector Diffraction Theory. *International Optical Design Conference*.
- Goldsmith, P. (1998). *Gaussian Beam Quasioptical Propagation and Applications*.
- González-Galicia, Resete-Aguilar, Garduño-Mejía, Bruce, & Ortega-Martínez. (2011). *Effects of primary spherical aberration, coma, astigmatism and field curvature on the focusing of ultrashort pulses*.
- Guiar, C., & Lansing, L. (1986.). Antenna Pointing Systematic Errors Model Derivations. *Ground antenna and Facilities Engineering Section*.
- Guide, A. U. (2013). *Introduction to ANSYS Fluent: Turbulence modeling*.
- guide, A. u. (2013). *Mesh Quality*.
- H., S. (2001). *Least squares fitting with rotated paraboloids*. Mathematical communications 6.
- Hecht, E. (2017). *Optics*.
- J.W.M Baars, R. J.-P. (2007). Near-field radio holography of large reflector antennas. *IEE Antennas and Propagation* .
- Kong, L., Qiu, Y., & Wang, G. (2014). Homology design of the 110-meter aperture reflector antenna based on segmented best fit paraboloid.
- Kraus, J. (1976). *Radio Astronomy*.
- Li, N., Duan, B., & Zheng, F. (2012). Effect of the Random Error on the Radiation Characteristic of the reflector antenna based on two-dimensional fractal.
- Li, T., Shi, J., & Tang, Y. (2018). Influence of surface error on electromagnetic performance of reflectors based on Zernike polynomials. *Acta Astronautica*.
- Marr, J., Snell, R., & Kurtz, S. (s.f.). *Fundamentals of radioastronomy*.
- Miller, L. (2001). Pathfinder photogrammetry research for ultra-lightweight and inflatable space structures. *National aeronautics and space administration*.

- Retamal, M. (2018). *Análisis estructural de telescopio submilimétrico LCT bajo condiciones de viento y operación en el llano de Chajnantor, región de Antofagasta*. Concepción.
- Ruze, J. (1952). The Effect of Aperture Errors on the Antenna Radiation Pattern.
- Ruze, J. (1962). Antenna tolerance theory.
- Samii, R. (1983). An Efficient Computational Method for Characterizing the effects of random surface errors on the average power pattern of reflectors.
- Samii, R. (1984). A comparison of between GO/aperture-field and physical optics methods for offset reflectors. *IEE Transactions of Antennas and Propagation*.
- Sasao, T., & Fletcher, A. (2004). *Introduction to VLBI Systems Chapter 2: Radio Telescopes Antennas*.
- Serabyn, E. (1991). Surface figure measurements of radio telescopes with a shearing interferometer .
- Stutzman, W. (1988). Numerical evaluation of radiation integrals for reflector antennas analysis including a new measure of accuracy. *IEE Transactions of Antennas and Propagation*.
- Upnere, S. (2012). Characterization of Wind Loading of the Large Radio Telescope. Weather base, Mauna Kea Observatory, Hawaii. (s.f.).
- Wexler, H., Teweles, S., & et. al. (1976). US standrd atmosphere.
- Williams, T. (2017). The Atacama Desert in northern of Chile. *QUASAR EXPEDITION*.
- Wilson, T., Rohlfs, K., & Huttemeister, S. (s.f.). *Tools of Radioastronomy*. Springer Astronomy and Astrophysics library.
- Xian, B., Wang, C., & Lian, P. (2009). Effect of surface error distribution and aberration on electromagnetic performance of reflector antenna. *International Journal of Antennas and Propagation*.
- Y. Duan, C. Y. (2009). Reflector antenna distortion analysis using MEFCM. *IEEE Transactions of Antennas and Propagation*.

ANEXO

Tabla 7: Cambio de apuntamiento en el eje de elevación cruzado θ_x por rotación del sistema reflector primario-subreflector [*arc. sec*]

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	-3,262	-2,573	-3,439	-2,833

45°	-2,109	-2,632	-9,116	-12,499
90°	-1,000	1,829	5,389	8,152
135°	-4,793	-0,015	6,545	11,030
180°	-2,494	-3,440	-3,429	1,424
225°	-4,610	-7,892	-20,340	-27,267
270°	-4,818	-7,552	-10,712	-14,809
315°	-4,161	-2,610	3,362	7,196

Tabla 8: Cambio de apuntamiento en el eje de elevación θ_Y por rotación del sistema reflector primario-subreflector [*arc. sec*]

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	5,048	-0,542	-1,429	-0,564
45°	3,612	3,373	0,524	-0,095
90°	0,498	0,850	1,047	1,124
135°	3,839	-0,859	-1,565	-0,642
180°	-3,108	-3,666	-6,275	-6,118
225°	-1,649	-0,966	-5,053	-4,491
270°	0,749	0,666	0,756	1,130
315°	3,772	5,116	2,874	0,450

Tabla 9: Desalineamiento lateral δ_x del subreflector [mm]

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	-0,034	0,006	0,039	0,013
45°	-0,032	-0,019	0,000	0,001
90°	-0,026	-0,027	-0,027	-0,027
135°	-0,035	-0,106	-0,082	-0,085

180°	-0,013	-0,075	-0,011	-0,009
225°	-0,017	-0,083	-0,076	-0,080
270°	-0,027	-0,027	-0,026	-0,027
315°	-0,032	-0,082	-0,067	-0,057

Tabla 10: Desalineamiento lateral δ_y del subreflector [mm]

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	-0,096	-0,084	-0,106	-0,087
45°	-0,096	-0,117	-0,133	-0,110
90°	-0,031	-0,077	-0,072	-0,073
135°	-0,114	-0,091	-0,057	-0,058
180°	-0,082	-0,083	-0,083	0,058
225°	-0,106	-0,109	-0,130	-0,130
270°	-0,096	-0,100	-0,105	-0,108
315°	-0,088	-0,062	-0,041	-0,060

Tabla 11: Desalineamiento axial δ_z del subreflector [mm]

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	0,0026	-0,0154	-0,0228	-0,0299
45°	0,0015	-0,0149	-0,0278	-0,0398
90°	-0,0002	0,0011	-0,0005	0,0005
135°	0,0003	0,0101	0,0095	0,0129
180°	-0,0007	0,0090	0,0154	0,0224

225°	-0,0006	0,0063	0,0014	0,0196
270°	-0,0004	-0,0009	-0,0008	-0,0021
315°	0,0013	-0,0146	-0,0275	-0,0395

Tabla 12: Cambio de apuntamiento en el eje de elevación cruzado θ_x por desalineamiento lateral δ_y del subreflector [*arc sec*]

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	-3,670	-3,206	-4,073	-3,356
45°	-3,695	-4,491	-5,087	-4,226
90°	-1,192	-2,952	-2,763	-2,792
135°	-4,368	-3,483	-2,188	-2,244
180°	-3,153	-3,184	-3,187	2,241
225°	-4,084	-4,178	-4,994	-4,974
270°	-3,699	-3,851	-4,017	-4,151
315°	-3,384	-2,378	-1,569	-2,314

Tabla 13: Cambio de apuntamiento en el eje de elevación cruzado θ_y por desalineamiento lateral δ_x del subreflector [*arc sec*]

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	-1,295	0,231	1,507	0,484
45°	-1,229	-0,723	-0,006	0,051
90°	-1,010	-1,046	-1,022	-1,033
135°	-1,341	-4,072	-3,138	-3,278
180°	-0,488	-2,860	-0,434	-0,335
225°	-0,659	-3,188	-2,915	-3,057

270°	-1,020	-1,017	-1,012	-1,029
315°	-1,217	-3,163	-2,555	-2,170

Tabla 14: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θ_x y el FWHM a 300 GHz

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	15,9	12,5	16,7	13,8
45°	10,3	12,8	44,3	60,8
90°	4,9	8,9	26,2	39,6
135°	23,3	0,1	31,8	53,6
180°	12,1	16,7	16,7	6,9
225°	22,4	38,4	98,9	132,6
270°	23,4	36,7	52,1	72,0
315°	20,2	12,7	16,3	35,0

Tabla 15: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θ_x por desalineamiento lateral δ_y y el FWHM a 300 GHz

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	17,8	15,6	19,8	16,3
45°	18,0	21,8	24,7	20,5
90°	5,8	14,4	13,4	13,6
135°	21,2	16,9	10,6	10,9
180°	15,3	15,5	15,5	10,9
225°	19,9	20,3	24,3	24,2
270°	18,0	18,7	19,5	20,2

315°	16,4	11,6	7,6	11,3
-------------	------	------	-----	------

Tabla 16: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θ_x y el FWHM a 850 GHz

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	44,9	35,4	47,4	39,0
45°	29,1	36,3	125,6	172,2
90°	13,8	25,2	74,2	112,3
135°	66,0	0,2	90,1	151,9
180°	34,3	47,4	47,2	19,6
225°	63,5	108,7	280,2	375,6
270°	66,4	104,0	147,5	204,0
315°	57,3	36,0	46,3	99,1

Tabla 17: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θ_x por desalineamiento lateral δ_y y el FWHM a 850 GHz

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	50,6	44,2	56,1	46,2
45°	50,9	61,9	70,1	58,2
90°	16,4	40,7	38,1	38,5
135°	60,2	48,0	30,1	30,9
180°	43,4	43,9	43,9	30,9
225°	56,2	57,6	68,8	68,5
270°	50,9	53,0	55,3	57,2
315°	46,6	32,8	21,6	31,9

Tabla 18: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θ_y y el FWHM a 300 GHz

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	24,5	2,6	6,9	2,7
45°	17,6	16,4	2,5	0,5
90°	2,4	4,1	5,1	5,5
135°	18,7	4,2	7,6	3,1
180°	15,1	17,8	30,5	29,7
225°	8,0	4,7	24,6	21,8
270°	3,6	3,2	3,7	5,5
315°	18,3	24,9	14,0	2,2

Tabla 19: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θ_y por desalineamiento lateral δ_x y el FWHM a 300 GHz

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	6,3	1,1	7,3	2,4
45°	6,0	3,5	0,0	0,2
90°	4,9	5,1	5,0	5,0
135°	6,5	19,8	15,3	15,9
180°	2,4	13,9	2,1	1,6
225°	3,2	15,5	14,2	14,9
270°	5,0	4,9	4,9	5,0
315°	5,9	15,4	12,4	10,5

Tabla 20: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θ_y y el FWHM a 850 GHz

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	69,5	7,5	19,7	7,8
45°	49,7	46,5	7,2	1,3
90°	6,9	11,7	14,4	15,5
135°	52,9	11,8	21,6	8,8
180°	42,8	50,5	86,4	84,3
225°	22,7	13,3	69,6	61,9
270°	10,3	9,2	10,4	15,6
315°	52,0	70,5	39,6	6,2

Tabla 21: Razón porcentual entre el cambio de apuntamiento del sistema en el eje de elevación cruzado θ_y por desalineamiento lateral δ_x y el FWHM a 850 GHz

Ángulo acimutal	Ángulo de elevación			
	90°	60°	45°	30°
0°	17,8	3,2	20,8	6,7
45°	16,9	10,0	0,1	0,7
90°	13,9	14,4	14,1	14,2
135°	18,5	56,1	43,2	45,1
180°	6,7	39,4	6,0	4,6
225°	9,1	43,9	40,2	42,1
270°	14,0	14,0	13,9	14,2
315°	16,8	43,6	35,2	29,9

