

ANTENAS CON HACES MÚLTIPLES PARA MICROONDAS DE USO SATELITAL

Ing. José Alberto Bava ^{a)}, <bava@ciop.unlp.edu.ar>
Ing. Víctor Sergio Sacchetto ^{b)}, <vss@frlp.utn.edu.ar>
Dr. Alberto Maltz ^{d)}, <alberto@cacho.mate.unlp.edu.ar>
Ing. Guillermo Rodríguez ^{a)}, <guil@ing.unlp.edu.ar>
Ing. Alicia Szymanowski ^{a)}, <sistcom@ing.unlp.edu.ar>
Juan Pablo Ciafardini ^{a)}, <jpciafar@gioia.ing.unlp.edu.ar>

^{a)} Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

^{b)} Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata, Argentina.

^{d)} Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

RESUMEN

En este trabajo se describe el diseño y construcción de modelos de antenas de desarrollo para radiómetros de microondas (MWR, Microwave Water Radiometer) en las bandas de frecuencias K y Ka, a instalarse en el satélite SADC-Aquarius. Esta misión es un emprendimiento conjunto de la NASA (Nacional Aeronautics and Space Administration) y la CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) de Argentina y fue desarrollado en la Universidad Nacional de La Plata, Argentina. La misma está dedicada a estudiar el ciclo global del agua, analizando varios parámetros geofísicos.

Varias antenas han sido analizadas para lograr un diseño, en las frecuencias de 23,8 GHz y 36,5 GHz, que cumpla con los requerimientos estipulados. Un óptimo resultado se obtuvo con una antena reflectora off-set toroidal. Para la obtención de la superficie y su posterior medida se emplearon máquinas herramienta comandadas por control numérico computarizado de tres ejes (MHCNC). Los resultados obtenidos del defecto de forma, en los modelos de antenas de desarrollo construidas, indican un error máximo de 0.0513 mm y una desviación estándar de 0.0139 mm.

El diseño del reflector y los alimentadores principales fueron efectuados en base a los requerimientos de resolución del satélite (ocho haces). Estos radiómetros deben efectuar observaciones simultáneas con otro operando en banda L, en la misma misión, resultando una disposición asimétrica de los alimentadores.

A fin de validar el diseño se construyó un modelo a escala para la frecuencia de 36,5 GHz. La comparación entre las características de la antena simuladas y medidas es satisfactoria.

INTRODUCCION

En estos últimos años, es conocida la importancia de los datos obtenidos con los satélites de sensado remoto para el estudio de los parámetros geofísicos de la Tierra.

El satélite SADC-Aquarius transportará una serie de instrumentos, entre ellos, radiómetros de microondas que permitirán medir la radiación superficial de los océanos, además de

su temperatura y su salinidad, lo que es de gran utilidad para el estudio del cambio climático, y aporta a un completo modelo mundial de clima que elabora Estados Unidos, para observar todo lo que hace al ciclo global del agua.

El radiómetro en banda L, con el que se medirá la salinidad de la superficie del mar (sea surface salinity, SSS), es responsabilidad de la NASA y será construido por el JPL (Jet Propulsion Laboratory). Los dos radiómetros

(microwave water radiometers, MWR) en las bandas K y Ka, que permiten detectar vapor de agua, lluvias, viento de superficie y nubes de agua, operando en las frecuencias de 23,8 GHz y en 36,5 GHz, son responsabilidad de CONAE y el modelo de desarrollo de las antenas, en particular, fue realizado en el Departamento de Electrotecnia de la Universidad Nacional de La Plata.

Los requerimientos a cumplir por las antenas son los siguientes:

- Número de haces 8
- Bandas de frecuencias 23,8 GHz y 36,5 GHz
- Angulo de incidencia 55°
- Resolución 40 Km
- Cobertura total 340 Km
- Altura del satélite 657 Km
- Tolerancia de superficie del reflector $< \lambda / 100$
- Eficiencia de iluminación $> 90\%$

La zona iluminada por el satélite tendrá la disposición mostrada en la Figura 1. Los haces del radiómetro de banda L son los centrales, mientras que los haces de los radiómetros en banda K y Ka efectúan observaciones por delante y por detrás de la trayectoria del satélite. Los radiómetros recolectan señal de los haces de las antenas a fin de efectuar observaciones simultáneas en la zona de cobertura total.

METODOLOGIA

Se han estudiado distintos conceptos de antenas para lograr el objetivo antes descrito, la solución óptima fue encontrada con una antena offset toroidal de reflector simple con varios alimentadores para obtener haces múltiples.

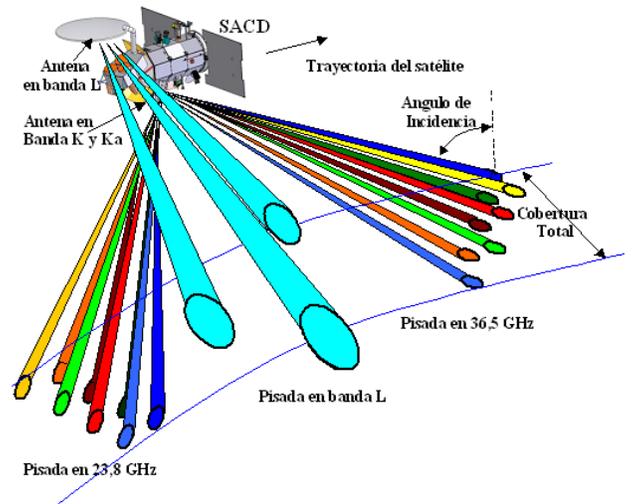


Figura 1 – Pisadas del satélite SACD.

Para lograr los requerimientos exigidos por el instrumento se utilizaron métodos matemáticos de diseños de antenas y simulaciones con herramientas de software. La elección de una antena reflectora offset toroidal con un eje de rotación perpendicular al eje central del sistema fue la mejor solución encontrada a los problemas físicos, mecánicos y electromagnéticos. La disposición resultante de los alimentadores fue alineados sobre dos ejes como se analizará a continuación. Las medidas fueron realizadas a espacio abierto con técnicas de campo lejano.

Se han trabajado varios modelos matemáticos a fin de conseguir una correlación entre las pisadas (ocho haces por cada antena) y la disposición de los alimentadores, cuya ubicación tiene correspondencia también con el análisis de las disposiciones mecánicas posibles para el modelo de reflector utilizado.

La construcción de los reflectores se realizó con máquinas herramienta comandadas por control numérico computarizado de tres ejes (MHCNC) y se efectuaron medidas preliminares sobre la superficie reflectora con máquinas del mismo tipo. Se desarrollaron algoritmos matemáticos para procesar la nube de puntos que surgían de las medidas, a fin de determinar la tolerancia de superficie o desviaciones de forma producida por el maquinado.

GEOMETRÍA DEL REFLECTOR

Según los requerimientos, los diámetros de las antenas deben ser tal que cada haz tenga una pisada promedio en todas las posiciones del orden de 40 Km. La dificultad encontrada en estas circunstancias es que la región de cobertura en la dirección de avance del satélite depende de la posición azimutal de cada haz (Figura 6). Se analizaron distintas estructuras de reflectores optando por una disposición off-set toroidal. Esta estructura genera un arco focal permitiendo la disposición de varios alimentadores sobre el mismo, reduciendo el efecto de coma.

En la actualidad, en sistemas satelitales de sensado remoto, se utilizan reflectores off-set toroidal con múltiples alimentadores dispuestos en forma uniforme sobre un arco focal circular [1]. Debido a los requerimientos no uniformes en la disposición de las pisadas, en este trabajo, se debe utilizar haces múltiples asimétricos. Esto nos llevó a elegir una disposición en los alimentadores como muestra la Figura 7.

La geometría del sistema reflector es mostrada en la Figura 2. Definimos una parábola con vértice en 0 y una longitud focal f . La superficie reflectora se logra haciendo rotar la parábola alrededor del eje de rotación que está a una distancia P del vértice 0. Por razones de diseño, el eje de rotación es perpendicular al eje de central de la superficie reflectora. Por lo tanto, el ángulo α que forma el eje central de la parábola con el eje focal es igual a $\theta_f + 90^\circ$.

La distancia D es la altura de la superficie a utilizar como reflector y el punto C es el centro de la misma.

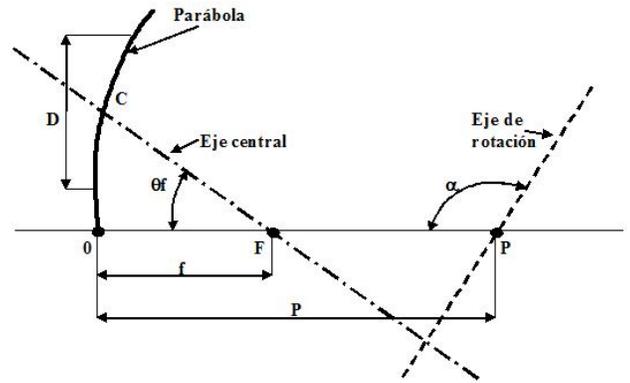


Figura 2 – Vista lateral de geometría del reflector.

La rotación de la parábola sobre el eje, produce también una rotación del foco, produciendo un arco focal que en este diseño estará ubicado en un plano que contiene al eje central del reflector. (Figura 3)

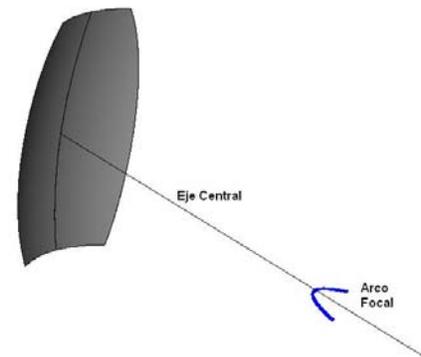


Figura 3 – Vista lateral de la geometría del reflector y disposición del arco focal.

DISEÑO DEL CONJUNTO DE ALIMENTADORES

Como alimentador principal se seleccionó una bocina cónica corrugada (Figura 4) por sus excelentes características frente a otros alimentadores para similares usos. El efecto de las corrugaciones en las paredes permite modificar la distribución de los campos, en especial en el plano E, obteniendo: líneas de

campo rectas y paralelas, variación de amplitud rotacionalmente simétrica, alta eficiencia y bajos niveles de polarización cruzada. Por todas estas razones, estas bocinas son ampliamente utilizadas como alimentadores en radiómetros.

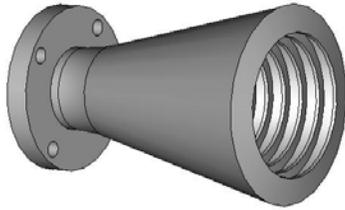


Figura 4 – Bocina cónica corrugada.

Frente al compromiso de lograr una alta eficiencia de iluminación, se obtuvieron aceptables resultados empleando bocinas corrugadas con 15 dB de iluminación en los bordes.

La validación de nuestro modelo se efectuó comparando las mediciones de los modelos de desarrollo con las simulaciones correspondientes efectuadas con programas de cómputo (Figura 5).

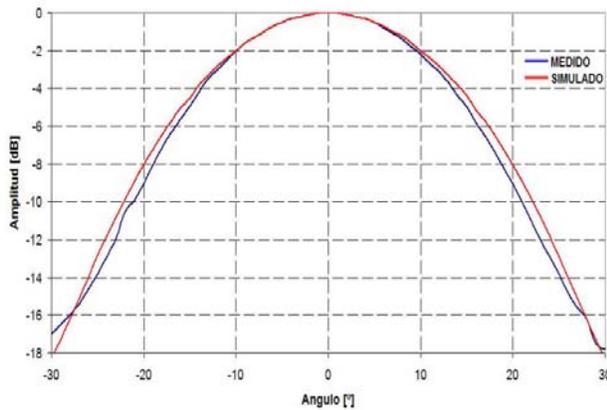


Figura 5 – Diagrama de irradiación de bocina cónica corrugada polarización lineal vertical.

Para determinar la posición de cada alimentador, se partió estudiando los requerimientos de las pisadas, ubicando el satélite en el ecuador.

Las condiciones presentadas para la iluminación de los ocho haces, sobre una cobertura total de 340 Km, pueden ser traducidas matemáticamente en ecuaciones no lineales. Debido a la inexistencia de soluciones exactas, se enfocó el sistema como un problema de optimización. Es importante agregar que no existe un planteo único, ya que de acuerdo a las necesidades prácticas puede ejecutarse la optimización de algunas condiciones y el cumplimiento estricto de otras; o también puede asignarse diferente peso a cada condición.

En este caso se ha trabajado con un criterio de mínimos cuadrados basado esencialmente en la relajación de una de las condiciones, permitiendo separación entre las pisadas. Este enfoque tiene varias soluciones satisfactorias dependiendo de ciertas condiciones iniciales del esquema iterativo subyacente. Nosotros adoptamos la que creímos conveniente desde el punto de vista de la disposición de los ocho alimentadores.

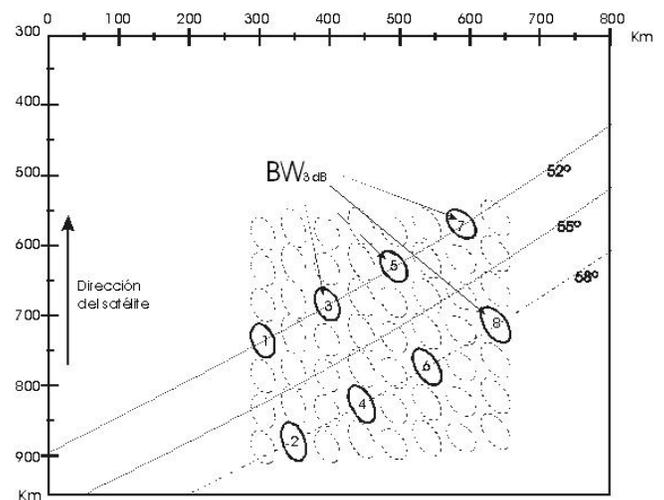


Figura 6 – Pisada de uno de los radiómetros de microondas.

El resultado de los algoritmos matemáticos procesados a través de un programa

de cómputo es mostrado gráficamente a través de la figura 6 y los valores obtenidos son:

- Longitud cubierta por cada haz en la dirección del satélite: entre 34 y 43 Km
- Baches promedio entre haces: 6,4 Km

De los cálculos también se extrajeron los ángulos entre haces de antena, lo que permitió determinar la posición de cada alimentador. Problemas de interferencia mecánicas, impedían instalar los ocho alimentadores en línea. Por lo tanto se resolvió ordenarlos en dos líneas de cuatro alimentadores a ambos lados del arco focal, disposición válida en este tipo de antenas.

La ubicación final de los alimentadores, en una vista frontal, es la mostrada en la figura 7, aunque queda definir que posición se adoptó en la dirección perpendicular a la figura (eje z).

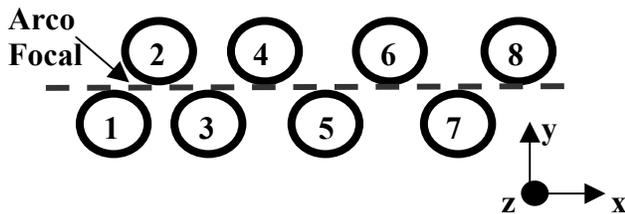


Figura 7 – Vista de frente de alimentadores.

Una alternativa era disponer los alimentadores siguiendo el arco focal, esto hacía que los alimentadores quedaran posicionados todos en diferente línea, lo que dificultaría la disposición de las guías de ondas que conectan los alimentadores con el radiómetro.

La solución elegida, después de hacer el análisis del problema y simulaciones para la validación, fue alinear cuatro alimentadores en la parte superior del arco focal y cuatro en la parte inferior en diferentes planos (Figura 8). Ambas filas de bocinas están dispuestas equidistantes del arco focal y para simplicidad del diseño, el eje central de la parábola coincide con el centro geométrico de las figuras.

Las variaciones de ganancia entre las bocinas extremas y las centrales, debido a la asimetría en su disposición, no superan el dB.

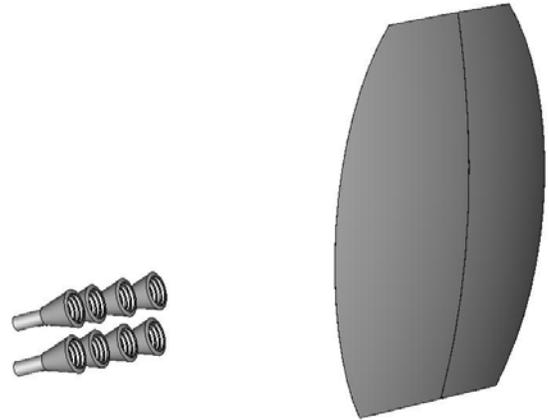


Figura 8 - Vista lateral del conjunto.

CONSTRUCCION DEL REFLECTOR

El contorno del reflector se determinó haciendo la intersección de los ocho haces generados por las bocinas y la superficie reflectora.

Los parámetros de las antenas adoptados para un diseño de estas características fueron: una relación diámetro a distancia focal igual a la unidad ($f/D = 1$) y un diámetro (D) capaz de generar un haz de 2° que producirá, para un satélite a 650 Km de altura, la iluminación de una región de cobertura en la dirección del satélite de aproximadamente 40 Km.

La superficie reflectora fue maquinada sobre un bloque de aluminio 6061. Para la obtención de la superficie se emplearon máquinas herramientas comandadas por control numérico computarizado de tres ejes (MHCNC). Se diseñó un dispositivo de montaje que permite alinear el material de partida con su base rotada, ubicando el eje de rotación del toroide en posición horizontal (Figura 9). Con esto se logró obtener la superficie deseada aplicando funciones de interpolación circular del CNC. Esto simplificó y redujo el tamaño del programa, optimizando el funcionamiento de la MHCNC. El código CN se obtuvo mediante la prestación de programación

paramétrica, descartándose el empleo de sistemas CAD-CAM. El programa puede adaptarse para obtener otras superficies semejantes con solo cambiar unas pocas variables.

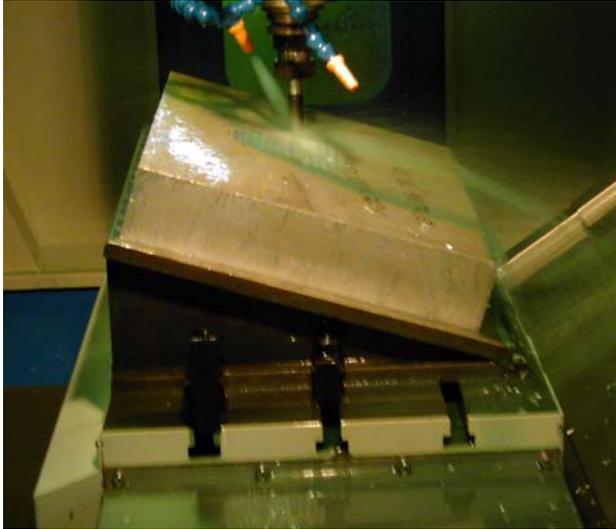


Figura 9 – Montaje del reflector y maquinado sobre la MHCNC.

Los requerimientos para la construcción de la superficie reflectora son de $\lambda/100$, esto equivale a una tolerancia de 0,12 mm para la frecuencia de 23,8 GHz y 0,08 mm para la frecuencia de 36,5 GHz. Para efectuar la medida se utilizó una MHCNC como posicionador de un reloj comparador, generando una nube de puntos. Como no se pudo encontrar una expresión de manejo sencillo de la superficie offset toroidal, se aplicaron algoritmos para obtener la tolerancia de la superficie maquinada. Los valores teóricos de la misma se obtuvieron con un programa de cómputo cuyo algoritmo está basado en el método de Newton-Raphson. La medida de tolerancia se determinó con otro algoritmo, que aplica traslaciones y rotaciones a la nube de puntos medidos hasta que la desviación estándar de las diferencias, respecto de la nube de puntos calculados en forma teórica sea mínima, indicando de esta manera cuánto se aparta la forma maquinada de la teórica (Figura 10).

En los modelos de desarrollo construidos se logró un error máximo de 0,05 mm y una desviación estándar de 0,014 mm.

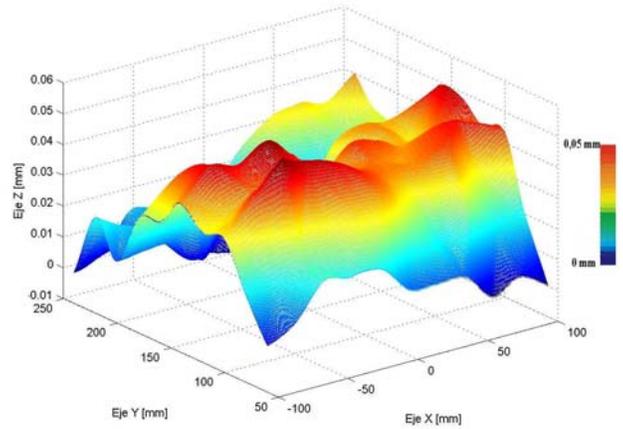


Figura 10 - Desviación de la superficie maquinada de su valor teórico.

RESULTADOS DE LAS MEDIDAS

El comportamiento electromagnético de la antena fue medido y simulado para los ocho alimentadores en la frecuencia de 36,5 GHz. Las variaciones con la frecuencia son suaves y en este trabajo nosotros presentamos los resultados a su frecuencia central. El modelo completo es mostrado en la Figura 11.

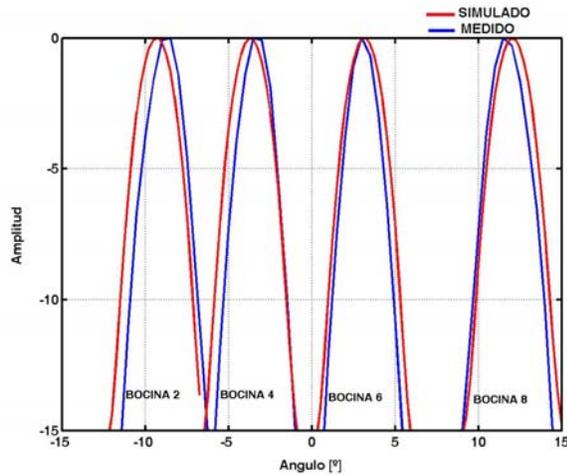


Figura 11 - Foto de modelo de desarrollo completo.

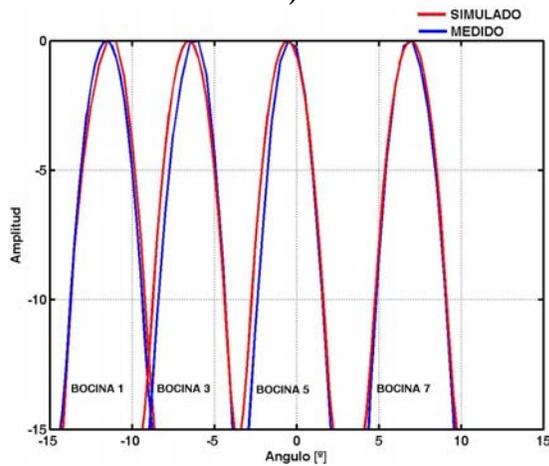
Las medidas del diagrama de irradiación han sido efectuadas en campo lejano y en el espacio libre.

La Figura 12 muestra la comparación entre los valores del diagrama de irradiación simulados y medidos para el lóbulo central.

Se puede observar una gran similitud entre los dos diagramas, verificando no solo el diseño de la antena, sino también la construcción de la superficie, de los alimentadores y la alineación correcta del sistema.



a)



b)

Figura 12 - Diagramas de irradiación., a) haces de las bocinas superiores, b) haces de las bocinas inferiores.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer este trabajo al Dr. Raúl Colomb ya que sin la iniciativa, el apoyo y la confianza que nos brindó durante todo el proyecto hubiera sido imposible su concreción.

REFERENCIAS

[1] Design, manufacture and test of a pushbroom radiometer - Nielsen, P.H. Pontoppidan, K. Heeboell, J. Le Stradic, B. - Antennas and Propagation, 1989. ICAP 89., Sixth International Conference on (Conf. Publ. No.301).

[2] Advanced microwave scanning radiometer (ANSR) requirements and preliminary design study - K. Tachi, K. Arai and Y. Sato - IEEE Transation on Geoscience and Remoto Sensing, Vol 27, N2 - March 1989.

[3] Potential Benefits of a 37 GHz Dual Polarization Radiometer for the Aquarius Salinity Mission - F. Wentz, K. Hilburn, D. Smith and C. Gentemann - Remote Sensing Systems (RSS) Tech. Report 063003 - June 2003.