

Metodologia para realização de testes de uma antena *offset* de 60 cm banda Ku com refletor ultraleve – Parte 1: comportamento eletromagnético

Methodology for conducting tests of antenna offset 60 cm Ku band with ultralight-reflector - part 1: electromagnetic behavior

Resumo

Este artigo apresenta a metodologia de avaliação das características eletromagnéticas de antenas *offset* para banda Ku, objetivando o desenvolvimento de uma nova antena de 60 cm de diâmetro, com refletor ultraleve. Incluem-se os procedimentos para a realização do ensaio de vibração forçada e dos diagramas de radiação e rugosidade superficial antes e depois de testes em túnel de vento (TV). Os valores obtidos de ganho e eficiência tiveram boa correlação entre as campanhas de medição, demonstrando que não aconteceram deformações relevantes permanentes nas superfícies dos refletores durante os ensaios em TV, fato corroborado nas medições de rugosidade média superficial. O ensaio de vibração forçada acusou uma perda máxima de 2 dB, ficando dentro da margem de tolerância admitida para o funcionamento do receptor. Como resultado da aplicação desta metodologia, obteve-se uma antena protótipo que resistiu às cargas de vento destrutivas, sem detrimento de suas características mecânicas, mantendo seu desempenho eletromagnético.

Palavras-chave: Diagramas de radiação. Rugosidade superficial. Vibração forçada.

Abstract

This paper presents the methodology for evaluating the electromagnetic characteristics for offset Ku band antennas, aimed at developing a new 60 cm diameter antenna with ultra light reflector. Procedures for performing the forced vibration test, radiation patterns and surface roughness before and after wind tunnel (WT) tests are included. The values of gain and efficiency had good correlation between measurement campaigns, demonstrating that no relevant permanent deformation happened on the reflectors surfaces during the WT tests, a fact corroborated by root mean square ruggedness measurements. The forced vibration test revealed a maximum loss of 2 dB, which was within the margin of tolerance allowed for the receiver's operation. As a result of applying this methodology, it was obtained an antenna prototype that resisted the destructive wind loads without detriment to its mechanical properties, while maintaining its electromagnetic performance.

Keywords: Radiation Pattern. Root Mean Square Ruggedness. Forced Vibration.

Daniel Alejandro Lecuona
Dth.conectores@brasilsat.com.br
Diretor Industrial

Luiz Alkimin de Lacerda
alkimin@lactec.org.br
Institutos Lactec

Introdução

No mundo globalizado, a sobrevivência e o crescimento empresarial dependem de diferenciais competitivos, ainda mais quando, devido à grande concorrência, os produtos comercializados se transformam em *commodities* num curto espaço de tempo. É o caso das antenas parabólicas de satélite de banda Ku *offset*, em especial as utilizadas para recepção de TV por assinatura, conhecidas como antenas DTH (*Direct to Home*). Elas trabalham em frequência muito alta (*SHF - super high frequency*), especificamente a banda Ku (*Kurz-under*) encontra-se entre as frequências de 12 e 18 GHz. Nesse contexto, a inovação e o desenvolvimento de novos produtos desempenham um papel fundamental na competitividade das empresas. Alinhada com esses conceitos, a Brasilsat Harald S/A (BS) desenvolveu o refletor ultraleve UL *offset* de 60 cm

de diâmetro para banda Ku, em um novo material, mais leve e mais econômico. Uma vez que a ANATEL não regulamenta os valores de ganho e carga de vento para antenas de DTH, a metodologia aqui proposta auxilia na maneira de:

- conduzir os ensaios relativos à verificação do desempenho eletromagnético;
- avaliar de forma empírica, alternativas de enrijecimento estrutural até chegar na combinação mais enxuta, que garanta o desempenho eletromagnético e mecânico da antena;
- proceder com a homologação de antenas e realização de estudos semelhantes para outros modelos de antenas fabricados pela companhia.

No Brasil, não existe uma norma similar à IEC 61114-1 (1999), que descreve a metodologia para a obtenção do diagrama de radiação (DR) e medição do ganho, impedância, entre outros parâmetros de vários tipos de antenas, inclusive as parabólicas *offset* nas frequências de 11 a 12 GHz. Por esse motivo, cada operadora determina o ganho para as possíveis faixas de frequência como mostra a Tabela 1, definindo também os protocolos para realização dos ensaios em TV, como será visto na parte 2 deste trabalho.

Tabela 1: Especificação de ganho das maiores operadoras de DTH do Brasil

	Ganho @ 10,7 GHz	Ganho @ 11,7 GHz	Ganho @ 12,5GHz	Ganho @ 12,75 GHz
CLARO	>35,0 dBi	>35,8 dBi		>36,5 dBi
SKY	>34,8 dBi	>35,6 dBi		>36,3 dBi
VIVO TV	> 34,8 dBi	> 35,6 dBi		> 36,3 dBi
OITV	>34,8 dBi	>35,6 dBi		>36,3 dBi
GVT	> 34,3 dBi	> 35,1 dBi		> 35,8 dBi

Fonte: Requerimentos para testes de antenas DTH de 60 cm (Claro/ Sky/ Vivo/ OiTV/ GVT).

Basicamente, os ventos intensos podem reduzir o ganho da antena em virtude de:

- vibrações, que dependendo do nível de sinal poderão ultrapassar a margem de funcionamento normal do receptor ou *set-top-box*, provocando a perda ou congelamento da imagem. Para avaliar esse efeito sobre a nova antena, foi desenvolvido o teste de desempenho eletromagnético sob vibração forçada;
- deformação da curvatura do refletor, provocando a redução do nível de sinal em decorrência do aumento da largura do feixe. Se essa deformação ultrapassar a tensão de plasticidade do refletor, acontecerão deformações permanentes sobre a superfície do mesmo. A metodologia propõe a medição dos diagramas de radiação antes e depois dos ensaios em TV, para confirmar se a antena manteve seu desempenho eletromagnético. Para complementar a metodologia, são quantificados os desvios na superfície refletora, em relação à teórica, através do cálculo do desvio médio quadrático ou RMS (*Root Mean Square*).

Petkov e Alexandrova (2013) mencionam o impacto do desvio de RMS de uma antena com refletor de banda Ku de 60 cm, quando comparada a um refletor ideal para as frequências de 10,7 GHz, 12,0 GHz e 12,75 GHz.

Tabela 2: Queda do ganho em dB em função do aumento de RMS.

RMS desvio, mm	0	0.047	0.094	0.235	0.47	0.705	0.94	1.175	1.41
Gmax, dBi	36.2	36.199	36.194	36.154	36.011	35.773	35.44	34.99	34.45
Gmax redução, dB	0	0.001	0.006	0.046	0.189	0.427	0.76	1.21	1.75

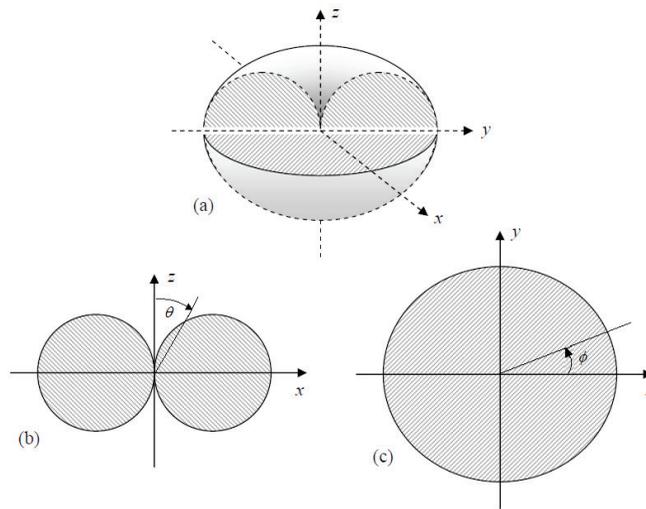
Fonte: Petkov e Alexandrova (2013).

A Tabela 2 demonstra que, a partir de 0,5 mm de RMS, há uma perda acentuada de sinal, chegando a 1,75 dB de diminuição do ganho, com RMS de 1,41 mm. Em antenas com pequena abertura produzidas em série, o RMS é geralmente menor que 0,4 mm, resultando em uma diminuição de 0,2 dB no ganho teórico da antena.

2 Determinação do DR

O DR é a representação gráfica das propriedades de radiação da antena, em função das diferentes direções do espaço (sistema de coordenadas esférico) a uma distância fixa (Anguera e Pérez, 2008). A Figura 1 apresenta o DR de um dipolo curto, sendo (a) a representação tridimensional, com corte no quadrante formado pela interseção dos planos vertical (zy) e horizontal (xy). Em (b) e (c), têm-se os diagramas polares em ambos planos.

Figura 1: DR de um dipolo curto. (a) Representação tridimensional cortada; (b) DR vertical e (c) DR horizontal.

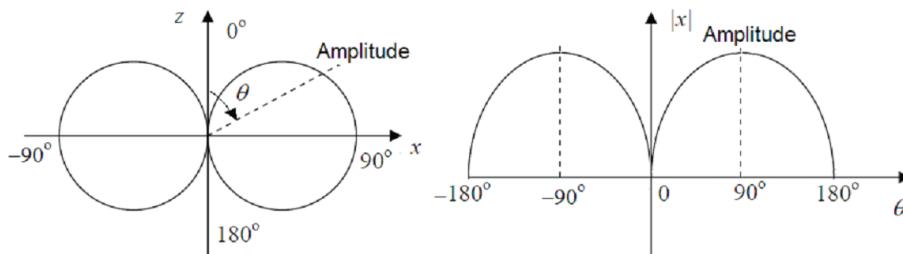


Fonte: Adaptado de Gomes (2011).

Para traçar o diagrama horizontal, deve-se fixar as componentes do raio e o do ângulo θ em $\pi/2$ e variar a componente ϕ de 0 a 2π , de acordo com a convenção para as coordenadas esféricas. Já para o diagrama vertical, deve-se fixar um raio e variar a componente θ de 0 a π com ϕ fixo em $\pi/2$ e também variar θ de 0 a π para ϕ fixo em $-\pi/2$.

Os DR podem ser desenhados também em função das coordenadas polares ou retangulares, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2: DR (a) na forma polar e (b) em coordenadas retangulares.

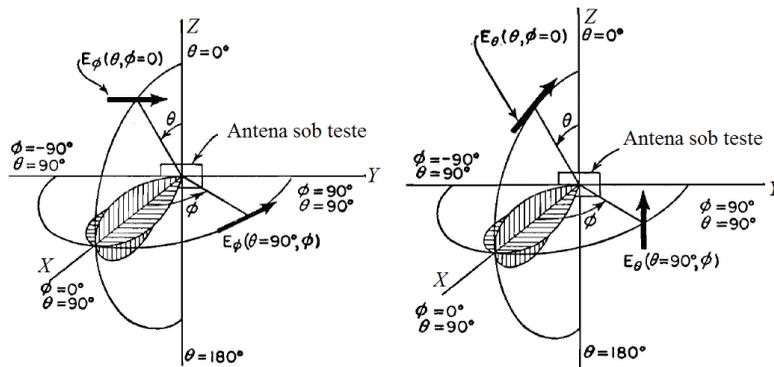


Fonte: Adaptado de Gomes (2011).

No DR no formato polar ($r; \theta$), as linhas radiais tomadas do centro da circunferência até o círculo externo representam o ângulo de análise e o nível a ele associado. O ponto de interseção do raio com o diagrama representa o ganho normalizado em cada direção de radiação, sendo o valor máximo associado ao círculo externo (Conti, 2012).

Normalmente o DR é medido em quatro planos típicos de campos distantes em magnitude e fase. A Fig. 3 exemplifica um enlace terrestre onde o plano de máxima radiação se encontra no eixo X :

Figura 3: Planos típicos de radiação nos planos horizontal e vertical.



Fonte: Hui NUS/ECE. EE4101 (2015).

As componentes de campo E, alternando no plano horizontal e vertical são:

- $E_\phi (\theta = 90^\circ, \phi) = E_\phi$ como função de ϕ no plano XY;
- $E_\phi (\theta, \phi = 0^\circ) = E_\phi$ como função de θ no plano XZ;
- $E_\theta (\theta = 90^\circ, \phi) = E_\theta$ como função de ϕ no plano XY;
- $E_\theta (\theta, \phi = 0^\circ) = E_\theta$ como função de θ no plano XZ.

Define-se a diretividade (dBi) como a “habilidade” que a antena tem em concentrar potência radiada em uma dada região angular (Abud, 2013). Devido à reciprocidade oferecida pelas antenas, a diretividade também pode ser definida como sendo a maior capacidade de recepção do sinal em uma determinada direção. O Sistema de Práticas da Telebrás (1984), no seu anexo III, define a diretividade de uma antena como sendo a razão entre a densidade de potência radiada em uma dada direção e a densidade de potência radiada média total. No caso específico de antenas de DTH, em que o alimentador está integrado ao amplificador (LNBF – *Low Noise Block Downconverter Feedhorn*), não são consideradas as perdas ôhmicas ou de inserção, portanto, o ganho G é igual a diretividade \mathcal{G} , ou seja, $G(dBi) = \mathcal{G}(dBi)$. A equação da diretividade é igual a:

$$\text{com } \mathcal{G} = \frac{720}{\sum_{i=1}^n \pi \psi^2(\phi_n) |\sin \phi_n| \Delta \phi'_n(\text{graus})} \text{ com } \psi^2(\phi) = 10^{\left(\frac{gdB}{10}\right)} \quad (1)$$

Sendo $\Delta \phi'_n(\text{graus})$ o intervalo entre pontos do diagrama de radiação em graus e n o número de pontos tomados no diagrama de radiação.

O sinal eletromagnético G (dB) se mede diretamente do diagrama de radiação obtido em campo (Figura 4) para cada $\Delta \phi$ variando de -180° a $+180^\circ$.

Figura 4: Exemplo de diagrama de radiação plotado.



Fonte: Brailsat (2015).

A eficiência global da antena calcula-se por:

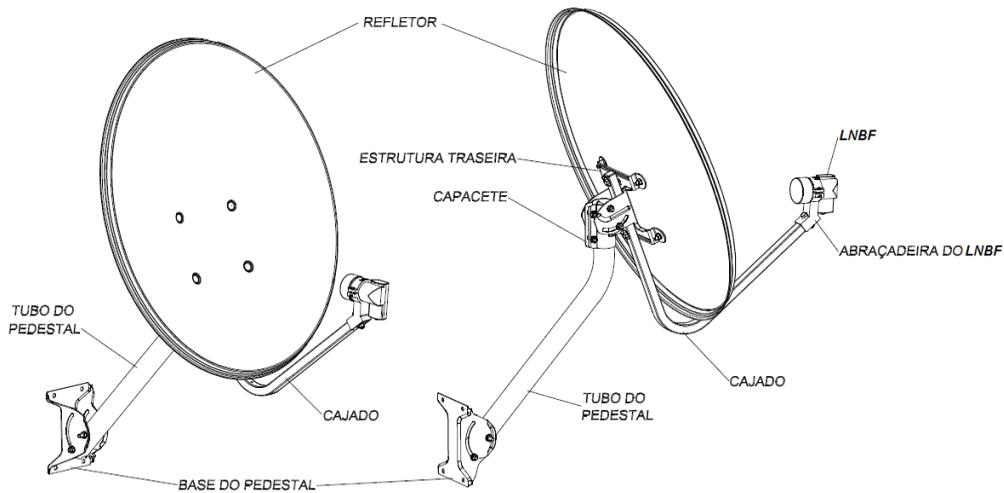
$$\eta = \frac{10^{\left(\frac{G_{dBi}}{10}\right)}}{\left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda}\right)^2} = \frac{10^{\left(\frac{G_{dBi}}{10}\right)}}{(\pi \cdot D \cdot f)^2} \quad (2)$$

sendo D o diâmetro maior da antena (m), f a frequência (MHz) e λ o comprimento da onda da frequência mais alta da faixa de operação da antena (m).

3 Metodologia de teste

Como referência, a Figura 5 apresenta o desenho do padrão da família de antenas offset SOA107-060X, com diâmetros de 60 cm. O refletor e todos os componentes da ferragem da antena são fabricados em chapa de aço com diversas espessuras. A ferragem é composta pela estrutura traseira de suporte do refletor, o capacete, o tubo do pedestal e a base que permite fixar o conjunto a uma laje ou a uma parede. O alimentador, ou *Low Noise Block Downconverter Feedhorn* (LNBF), é fixado pelo cajado, que está fixado na estrutura traseira do refletor.

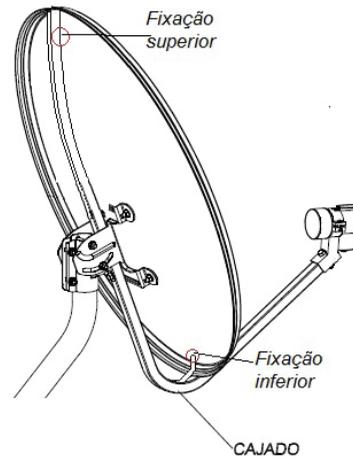
Figura 5: Antena *offset* 60 cm – banda Ku



Fonte: Brasilsat (2015).

O “cajado” da antena convencional termina na estrutura traseira, onde é fixado a ela com parafusos. Para melhorar a estruturação do refletor UL, ampliou-se o comprimento do “cajado” e foram definidos dois novos pontos de fixação, como mostra a Figura 6.

Figura 6: Aumento do comprimento do cajado e novos pontos de fixação.



Fonte: O autor.

Para a realização dos ensaios, foram fabricados sete protótipos, todos eles utilizando o novo refletor UL, mas com variações nos tamanhos dos componentes estruturais. Cada protótipo possui diferentes configurações estruturais: os componentes padrões (estrutura traseira, capacete e base) correspondem aos modelos utilizados na antena SOA 107–60X e o cajado longo (CL) atravessa toda a superfície externa do refletor UL. Por possuir a configuração estrutural mais resistente, foi escolhida a antena nº 1 para iniciar os ensaios. O objetivo inicial foi determinar o coeficiente de arrasto e a combinação angular mais crítica do vento sobre a antena. Nesse sentido, o protótipo foi exposto a velocidades de 70 km/h e 90 km/h, em 21 posições diferentes de azimute e elevação, como indicado na Tabela 3.

Tabela 3: Configurações estruturais dos sete protótipos testados.

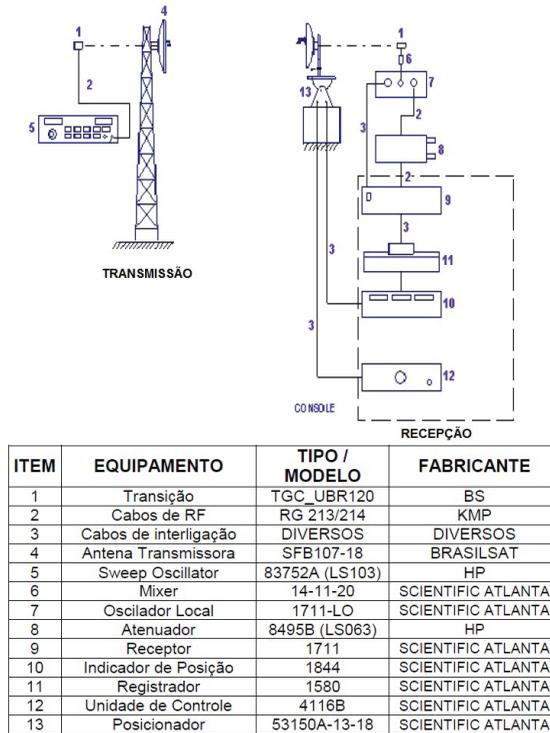
Nº	Estrutura Traseira	Cajado	Base	Diagrama Radiação	70 km/h e 90 km/h: Elevação			70 km/h e 90 km/h: Azimute						120 km/h	150 km/h		
					0	30	60	0	30	60	90	120	150			180	
1	Padrão	Cajado longo (CL)	Padrão	Padrão	Sim	x			x	x	x	x	x	x	x		
							x		x	x	x	x	x	x	x		
								x	x	x	x	x	x	x	x		
2	Estreita	CL - Menor 2	Menor	Menor	Sim											x	x
3	Padrão	CL - Menor 2	Padrão	Padrão	Sim											x	x
4	Menor 1	CL - Menor 2	Padrão	Padrão	Sim											x	x
5	Menor 2	CL - Menor 2	Padrão	Padrão	Sim											x	x
6	Padrão	CL - Menor 1	Padrão	Padrão	Não											x	x
7	Estreita	CL - Menor 2	Menor	Menor	Não											x	x

Fonte: O autor.

3.1 Metodologia para obtenção do DR

Instalado na matriz da BS, a Figura 7 mostra o diagrama do posicionador da marca Scientific Atlanta da série 53000, do tipo Azimute sobre Elevação sobre Azimute, com dois eixos ortogonais que permitem o direcionamento da antena em coordenadas esféricas.

Figura 7: Posicionador Scientific Atlanta da série 53000.



Fonte: Brasilsat (1985).

Dentro do laboratório, localizado abaixo do posicionador, o receptor indica com precisão a potência recebida na frequência de teste, desenhando em papel milimétrico os dados obtidos nos planos de azimute e elevação (Figura 8).

Figura 8: Laboratório localizado embaixo do posicionador da BS.



Fonte: O autor.

A diretividade é calculada utilizando-se um programa que digitaliza o diagrama obtido no campo de provas e faz a integração numérica da densidade de potência abaixo da curva.

Teste de desempenho eletromagnético sob vibração forçada

Analisa-se com um procedimento simples e qualitativo a magnitude da perda de sinal devido à vibração, vinculada ao movimento oscilatório do refletor em função de uma ação dinâmica externa. Como não é possível medir a perda de sinal por vibração dentro do TV, este teste serve como referência do nível de grandeza das amplitudes vibratórias, para uma situação de carga de vento intensa. O procedimento de ensaio consiste, inicialmente, em direcionar a antena para o satélite e medir o sinal com um analisador de sinal de boa qualidade, até conseguir o maior valor. Em seguida, fixa-se o dispositivo de marcação para registro gráfico das amplitudes de vibração na borda superior do refletor, conforme mostra a Figura 9.

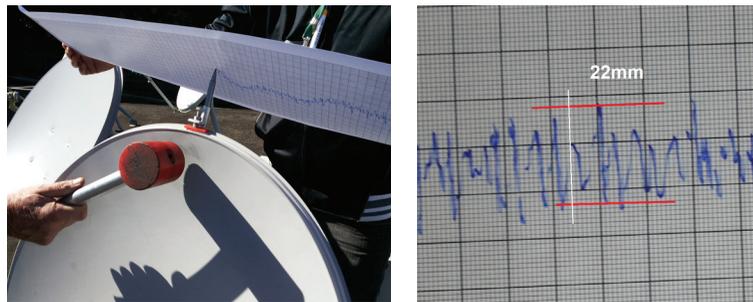
Figura 9: Dispositivo de marcação para registrar amplitudes da vibração.



Fonte: O autor.

Utilizando um martelo de borracha, efetuam-se impactos na borda superior do refletor para gerar movimentos vibratórios forçados a uma frequência de 4 a 5 Hz (40 a 50 batidas a cada 10 segundos) e amplitude de aproximadamente 11 mm, como mostra a Figura 10.

Figura10: Movimentos vibratórios forçados: f entre 4 e 5Hz e amplitude de 11mm.



Fonte: O autor.

Durante o movimento forçado, visualiza-se a imagem recebida do receptor em um monitor próximo à antena e mede-se o sinal, registrando as perdas devidas a vibração. No ensaio foi utilizado um medidor da marca BS DVB-S/S2 modelo MS4001.

3.3 Metodologia para determinação do RMS

Ruze (1966) relacionou matematicamente o ganho de uma antena parabólica com os erros aleatórios sobre a superfície do refletor. A equação afirma que o ganho da antena é inversamente proporcional à exponencial do quadrado dos erros de superfície ε , podendo ser expressa como:

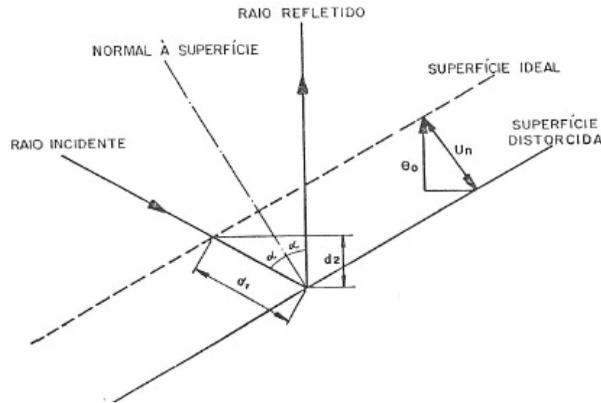
$$G(\varepsilon) = G_0 e^{-\left(\frac{4\pi\varepsilon}{\lambda}\right)^2} \quad (3)$$

em que ε (mm) representa o desvio médio quadrático dos erros RMS do refletor e G_0 o ganho da antena para o refletor ideal sem erros. A expressão é frequentemente expressa em decibéis:

$$G(\varepsilon) = G_0 - 685,81 \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^2 \text{ [dB]} \quad (4)$$

A Figura 11 mostra o esquema de um ponto da superfície do refletor parabólico, em que a linha tracejada representa a superfície ideal e a linha contínua representa a superfície real ou distorcida. Idealmente, o raio incidente seria refletido na superfície tracejada para o ponto focal, mas, devido ao erro, reflete-se na superfície distorcida com um ângulo α para outro ponto focal gerando, portanto, perda de sinal no alimentador.

Figura 11: Detalhe de um ponto do refletor onde incide um raio com ângulo α .



Fonte: Norma ANSI EIA-411-A (1986).

A componente axial do desvio normal pode ser expressa por:

$$e_0 = Un \cos \alpha \tag{5}$$

Sendo e_0 o desvio do raio incidente no ponto de medição (mm) e Un a distância entre a superfície teórica e a real –erro (mm).

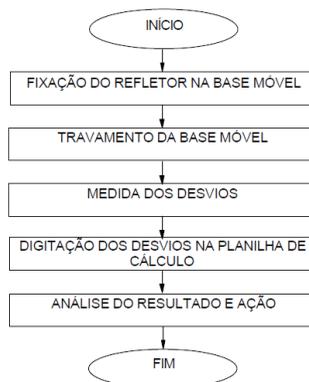
Para calcular o RMS, o refletor é dividido em várias áreas ou polígonos menores A_i [mm²]. O valor de ε é dado por:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_{oi}^2 \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}} \tag{7}$$

Sendo e_{oi} o desvio do raio incidente no ponto i e A_i a área do polígono onde i está localizado.

O procedimento para medição do RMS segue o fluxo descrito na Figura 12.

Figura 12: Procedimento para medição do RMS do refletor.



Fonte: Brasilsat (2014).

A Figura 13 mostra o refletor fixo na base móvel. As nervuras acompanham a superfície do refletor e sobre elas se localizam os pontos de medição.

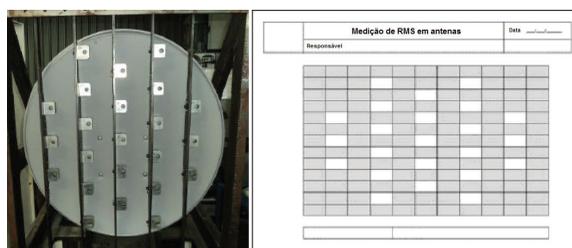
Figura 13: Vista lateral do gabarito de medição do RMS.



Fonte: Brasilsat (2014).

Com o posicionamento do refletor na base móvel e com a planilha de registro de valores em mãos, faz-se a medição em cada ponto das nervuras (Figura 14), utilizando-se um defletômetro como mostra a Figura 15.

Figura 14: Gabarito para medição e planilha para registro dos pontos de desvio *i*.



Fonte: Brasilsat (2014).

Figura 15: Medição realizada com defletômetro.



Fonte: Brasilsat (2014).

Os desvios obtidos são digitados na planilha para cálculo do RMS, conforme modelo indicado na Tabela 4, que automaticamente fornece o valor de RMS (mm).

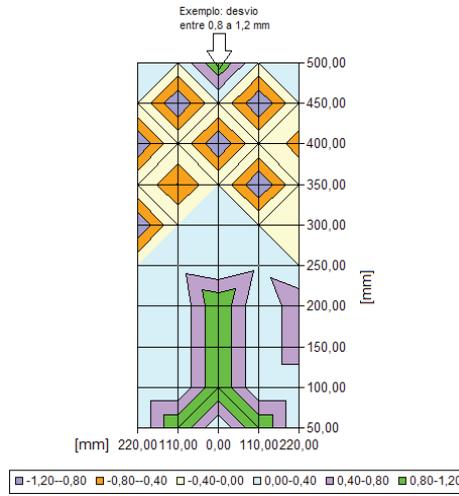
Tabela 4: Valores medidos em cada ponto de referência – Antena 10. Fonte: BS

Cálculo de Desvio de Superfície (RMS) - v1.12					
Antena SOA107-060					
Data:	6-out-14				
N. Série:					
RMS (mm):	0,26				
Var. Vertice:	-1,08				
Resp. pela Medida:		ROP			
Resp. pelo Cálculo:					
Peça 10					
Desvio Medido com Relação ao Gabarito (mm)					
	220,00	110,00	0,00	110,00	220,00
600,00					
550,00		3,44		3,31	
500,00			3,98		
450,00		2,43		3,36	
400,00	2,53		1,72		2,47
350,00		1,32		1,60	
300,00	1,25		0,54		0,78
250,00		1,83		1,88	
200,00	1,20		0,00		2,82
150,00		1,37		1,07	
100,00			0,10		
50,00		1,38		1,53	

Fonte: O autor.

Para calcular o RMS de um refletor de 60 cm, considera-se suficiente a análise aproximada de uma faixa retangular com dimensões de 440 mm x 500 mm sobre a superfície do mesmo. A planilha de cálculos está baseada no Relatório Técnico CPqD RMSX - Cálculo/Otimização RMS (Cardoso Pereira, 1987) e na norma EIA RS-411 (1986). O programa utilizado fornece gráficos topográficos que representam visualmente as variações de ε sobre a superfície do refletor, sendo as cores representativas dos valores dos desvios superficiais para as seções consideradas (Figura 16). Para a faixa de frequência da antena de DTH (12 GHz), o valor máximo aceitável de RMS é 0,4 mm. Assim, por exemplo, na coordenada zero mm de largura, 500 mm de altura, existe um desvio entre 0,8 a 1,20 mm; nesse caso, o programa apresenta essa subárea na cor verde.

Figura 16: Distribuição dos desvios no refletor (largura 440 mm / altura 500 mm).



Fonte: O autor.

4 Resultados obtidos

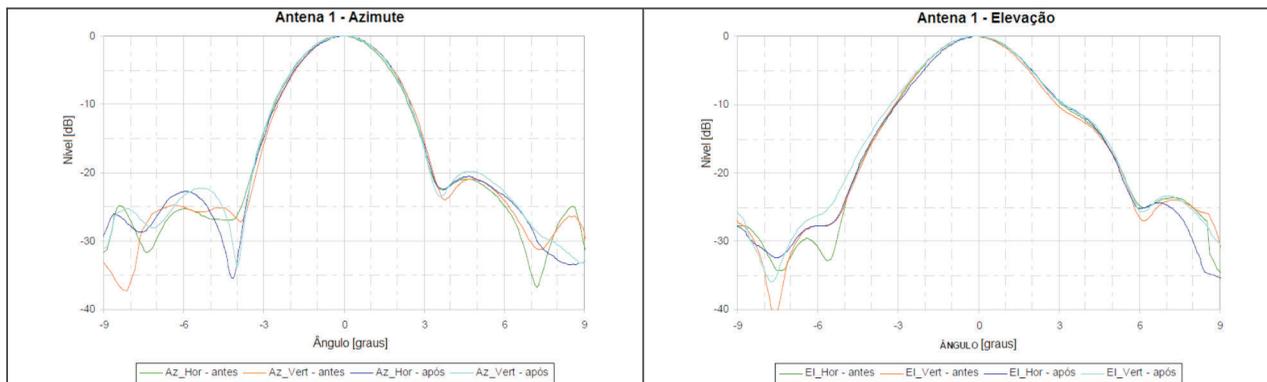
DR – antes e depois dos ensaios em TV

O objetivo principal desta análise é verificar deformações permanentes resultantes dos ensaios em TV. Caso tenham acontecido, as distorções se refletirão nos diagramas de radiação. Por se tratarem de protótipos, poderá haver variações no posicionamento dos alimentadores, resultando em DR fora de padrão e incertezas no ganho e na eficiência. Entretanto, independentemente das incertezas nos resultados eletromagnéticos, procura-se verificar a repetitividade dos diagramas. Mesmo assim, serão apresentados os resultados de ganho e eficiência, pois fazem parte da metodologia apresentada neste artigo. Considerando que as antenas *offset* de banda Ku são diretivas, é possível resumir, de forma aproximada, a análise dos diagramas de radiação entre os ângulos θ na faixa de -9° a $+9^\circ$, já que a energia se concentra preponderantemente nessa região.

Para este ensaio, foram escolhidas as antenas 1, 2 e 5. Conforme a Tabela 3, as duas últimas foram expostas a velocidades de vento destrutivo e ambas possuem estruturas menos rígidas que a padrão, utilizada para a antena 1. Apesar de a antena 1 não ter sido exposta a essa carga aerodinâmica, foi o protótipo que mais tempo passou sob testes. Seguindo a metodologia, foram avaliadas as três antenas no posicionador da BS, antes e após os ensaios em TV.

A Figura 17 apresenta a comparação do DR de azimute e elevação nas polarizações vertical e horizontal da antena 1, antes e após os ensaios no TV. Na região de maior energia (θ de -3° a $+3^\circ$), todos eles se sobrepõem.

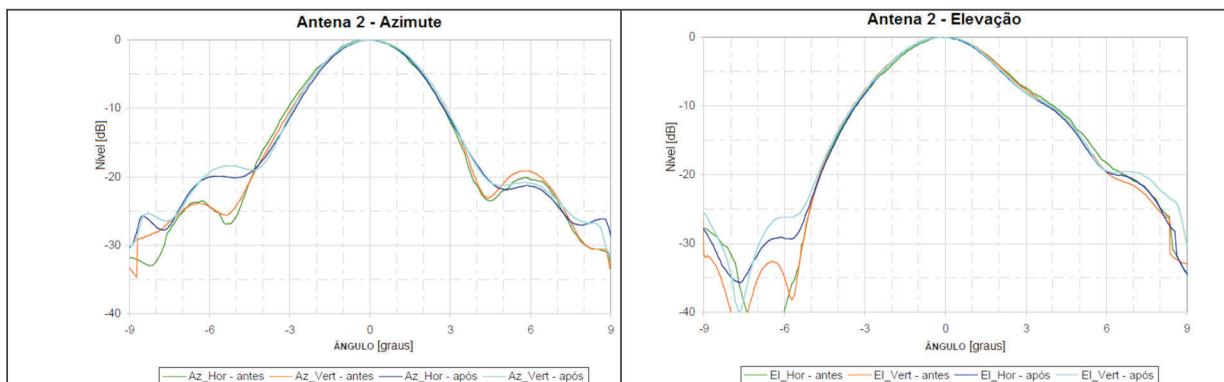
Figura 17: DR de azimute e elevação da antena 1.



Fonte: O autor.

A Figura 18 apresenta a comparação do DR nas polarizações vertical e horizontal, tanto para azimute (Az) como para elevação (El) da antena 2, antes e após os ensaios no TV. Na região de maior energia (θ de -3° a $+3^\circ$), todos os resultados para DR se sobrepõem.

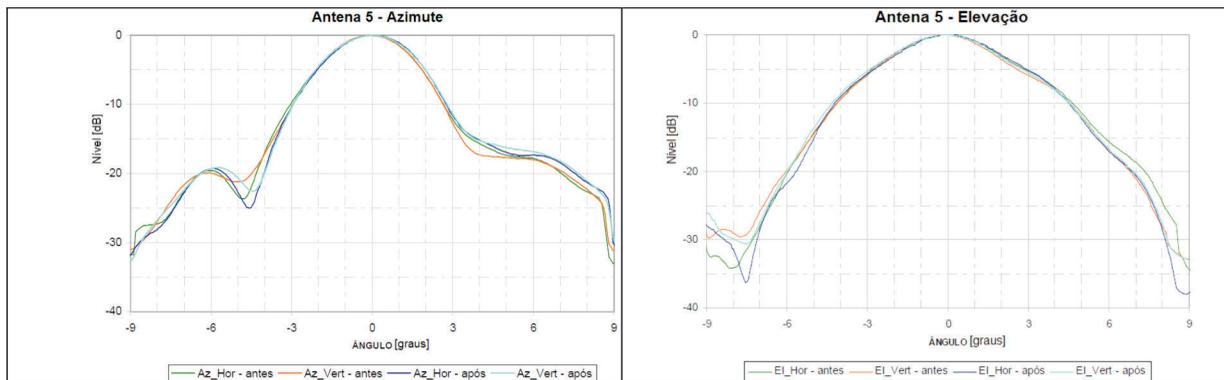
Figura 18: DR de azimute e elevação da antena 2.



Fonte: O autor.

De forma semelhante, na Figura 19, pode-se observar os quatro gráficos correspondentes aos DR de azimute e elevação da antena 5, nas polarizações vertical e horizontal, antes e após os ensaios no TV. Novamente, na região de maior energia (θ de -3° a $+3^\circ$), todos os resultados se sobrepõem.

Figura 19: DR de azimute e elevação da antena 5.



Fonte: O autor.

Observa-se, na comparação dos DR de todas as antenas testadas, que as curvas obtidas antes e depois dos ensaios em TV são muito similares. As Tabelas 5 e 6 apresentam o ganho médio (dBi) calculado pela integração dos valores obtidos nos planos de azimute, elevação, polarização horizontal e vertical e a eficiência (%), respectivamente.

Tabela 5: Ganho das antenas com refletor UL (dBi)

SOA 107-60	REFLETOR UL					
	Antena 1		Antena 2		Antena 5	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Az Horiz	35,8	35,8	34,8	35,0	34,7	34,5
Az Vert	36,0	35,7	34,9	34,8	34,8	34,4
El Horiz	34,2	34,3	33,4	33,6	32,0	32,1
EL Vert	33,9	33,6	33,1	33,1	32,0	31,8
Ganho médio	35,1	34,9	34,1	34,2	33,6	33,4
Diferença média	-0,1		0,1		-0,2	

Fonte: O autor.

Tabela 6: Eficiência das antenas com refletor UL (%)

SOA 107-60	REFLETOR UL					
	Antena 1		Antena 2		Antena 5	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Eficiência média	59,8	58,3	48,2	48,8	42,5	40,9

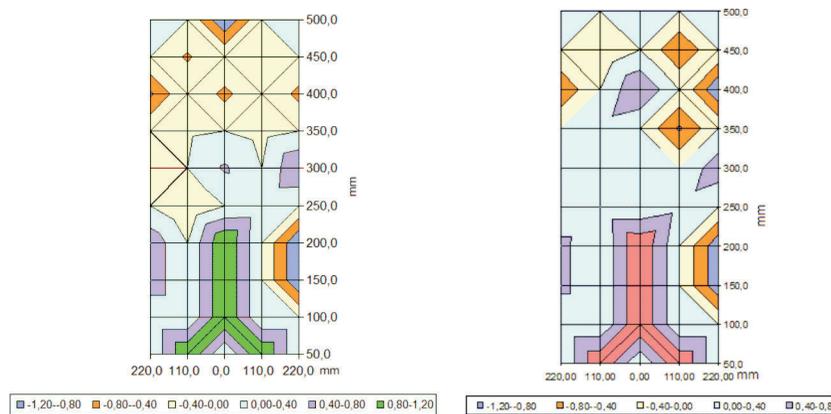
Fonte: O autor.

Considerando-se que a margem de erro do método de medição é de 0,1 dB, os resultados apresentam uma boa correlação entre as medidas antes e após os ensaios realizados no TV. Dessa forma, pode-se afirmar que não aconteceram deformações relevantes permanentes nos refletores UL após passarem por cargas de vento elevadas, principalmente os refletores das antenas 2 e 5, que foram expostos a ventos destrutivos de 150 km/h.

Cálculo do RMS – antes e depois dos ensaios em TV

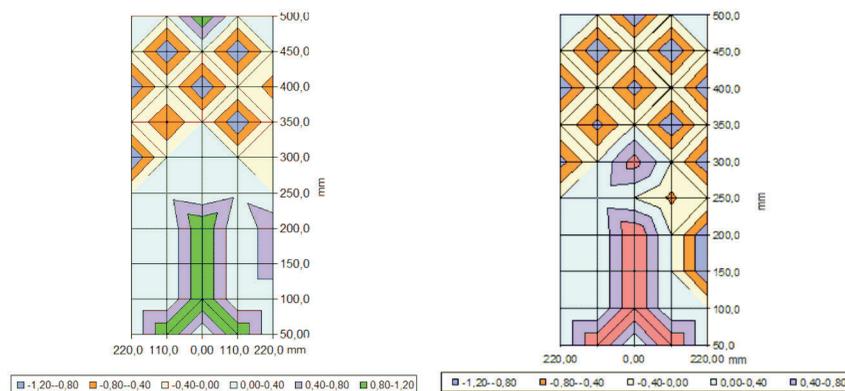
Para medição do RMS, foram escolhidas as antenas 1 e 7. A antena 7 é o protótipo final aprovado para desenvolvimento do produto e a antena 1, por ter sido o protótipo que passou por mais ensaios em TV. A Figura 20 apresenta a comparação dos resultados de RMS encontrados antes e depois dos ensaios em TV para o refletor da antena 1. Da mesma forma, a Figura 21 apresenta a comparação para o refletor da antena 7.

Figura20: Comparação dos gráficos de desvio de superfície RMS da antena 1, antes e após o ensaio em TV.



Fonte: O autor.

Figura 21: Comparação dos gráficos de desvio de superfície RMS da antena 7, antes e após o ensaio em TV.



Fonte: O autor.

Observa-se, nos gráficos topográficos das duas antenas, que aconteceram deformações desprezíveis nos resultados de RMS, antes e após os ensaios em TV. Tal percepção é confirmada na Tabela 7, que apresenta resultados globais do RMS das superfícies dos refletores das antenas 1 e 7, antes e depois dos ensaios em TV.

Tabela 7: RMS para os refletores das antenas 1 e 7, antes e depois dos ensaios em TV.

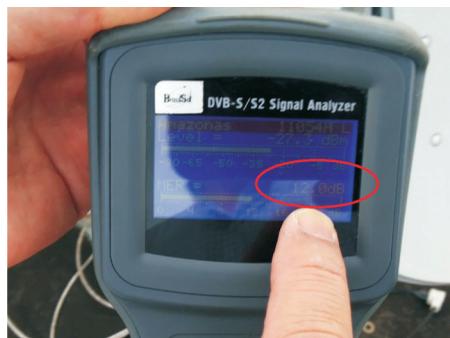
Antena	RMS [mm] Antes TV	RMS [mm] Depois TV
1	0,23	0,26
7	0,34	0,35

Fonte: O autor.

4.3 Ensaio de vibração forçada

Seguindo o procedimento apresentado, a antena de 60 cm *offset* banda Ku com refletor UL foi apontada para o satélite Amazonas, obtendo sinal máximo de 12 dB como mostra a tela do analisador de sinal (Figura 22). Durante o ensaio de vibração forçada, houve uma perda máxima de 2 dB, contudo, a imagem manteve-se sem interferência, pois a perda na intensidade ficou dentro da margem de tolerância admitida para o funcionamento do *set-top-box*. A Figura 23 mostra a imagem perfeitamente nítida no monitor utilizado para o acompanhamento visual do teste.

Figura 22: Analisador de sinal.



Fonte: O autor.

Figura 23: Imagem nítida no monitor.



Fonte: O autor.

Conclusões

A metodologia estabelecida abrange os aspectos mais importantes na avaliação eletromagnética de uma antena *offset* de 60 cm. Nesse sentido, foram comparados os resultados dos diagramas de radiação antes e depois dos ensaios em túnel de vento. Os valores de ganho e eficiência apresentaram uma boa correlação entre as medidas, demonstrando que não aconteceram deformações relevantes permanentes nos refletores UL após passarem por cargas de vento destrutivo de 150 km/h.

O ensaio de vibração forçada foi desenvolvido especialmente para avaliar a magnitude da perda de sinal devido à vibração, vinculada ao movimento oscilatório do refletor em função de uma ação dinâmica externa. O teste acusou uma perda máxima de 2 dB, mas a imagem se manteve normal, ou seja, a perda de intensidade do sinal ficou dentro da margem de tolerância admitida para o funcionamento do *set-top-box*.

As medições da rugosidade superficial sobre os refletores das antenas 1 e 7, antes e depois dos ensaios em túnel de vento mostraram que não ocorreram praticamente variações no RMS, corroborando os resultados obtidos nos diagramas de radiação.

A metodologia adotada nesses ensaios foi adequada, pois permitiu confirmar o desenvolvimento estrutural proposto de uma nova antena com refletor UL, que resistiu às cargas de vento sem deformações, mantendo seu desempenho eletromagnético.

Referências

- ABUD, E. **Antenas e sua essência: teoria sem complicações e aplicações sem mistérios**. Apostila - Naga® Desenvolvimento de Negócios Ltda, 2013.
- ANSI/EIA-411-A. Electrical and Mechanical Characteristics of Earth Stations Antennas for Satelellite Communications. **American National Standard** - Revision of EIA – 411, 1986.
- BRASILSAT HARALD S/A. **Analizador de sinal satélite DVB-S/S2 modelo: MS4001**, 2011.
- CISCO SYSTEMS. **Antenna patterns and their meaning**. 2007. Disponível em: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-antennas-accessories/prod_white_paper0900aecd806a1a3e.pdf. Acesso em 28 jan. 2015.
- HUI, H. T. **Antenna measurements**. NUS/ECE. EE4101. 1. Department of Electrical and Comput. Engineering - National University of Singapore. Disponível em <http://www.ece.nus.edu.sg/stfpage/elehht/Teaching/EE4101/Lecture%20Notes/Antennas%20Measurement.pdf>. Acesso em 27 jan. 2015.
- IEC 61114-1. **Receiving antennas for satellite broadcast transmissions in the 11/12 GHz band - Part 1: Electrical measurements**, 1999.
- KRAUS J. D.; MARHEFKA, R. J. **Antennas for all applications**. 3. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2002.
- PEREIRA, J. C. **RMSX - cálculo / otimização RMS, versão PC**. Relatório técnico CPqD – Telebrás, 1987.
- PETKOV, P.; ALEXANDROVA, E. **New construction ku-band antenna with improved radiation diagram for satellite broadcasting receiving earth station**. Bulgarian Academy of Sciences. Space Research and Technology Institute. Aerospace Research in Bulgaria. 2013, Sofia. Disponível em: <http://www.space.bas.bg/Aerospace%20research/25/14.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2015.
- RUZE, J. Antenna Tolerance Theory A Review. **Proceedings of the IEEE**, v. 54, n. 4, pp. 633-642, 1966.
- SISTEMAS DE PRÁTICAS TELEBRÁS. **Procedimento de aceitação em fábrica de antenas para as faixas de VHF e UHF**. Série Engenharia. Adendo 225-500-510. Emissão 1984.

Sobre os autores

Daniel Alejandro Lecuona

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Nacional, Argentina (1988) e mestrando em Desenvolvimento de Tecnologia, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, Brasil (2013).

Luiz Alkimin de Lacerda

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná (1991), mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1993) e doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1997). Atualmente é pesquisador do LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, professor orientador do Mestrado Profissional em Desenvolvimento de Tecnologia (IEP/LACTEC), professor adjunto do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Paraná e professor permanente do PPGMNE da Universidade Federal do Paraná.