

## **Metodologia para realização de testes de uma antena *offset* de 60cm banda Ku com refletor ultraleve - Parte 2: comportamento mecânico**

### ***Methodology for conducting tests of antenna offset 60 cm Ku band with ultralight-reflector - part 2 : mechanical behaviour***

**Daniel Alejandro Lecuona**

Dth.conectores@brasilsat.com.br  
Diretor Industrial

**Luiz Alkimin de Lacerda**

alkimin@lactec.org.br  
Institutos Lactec

#### **Resumo**

Este artigo apresenta a metodologia para avaliação das características de resistência mecânica de antenas *offset* para banda Ku, objetivando o desenvolvimento estrutural de uma nova antena de 60 cm de diâmetro com refletor ultraleve. Incluem-se os procedimentos para obtenção do coeficiente de arrasto (CD), cálculo da força equivalente para o ensaio sob carga estática e análise modal. Obteve-se o CD expondo a antena a 21 posições de azimute e elevação e ventos de 70 km/h e 90 km/h. O conjunto refletor/estrutura traseira não -presentaram deformações no ensaio de carga estática. As frequências que apresentaram maiores amplitudes foram 7,7 Hz, 8,7 Hz, 10 Hz, 13,7 Hz e 29 Hz. Durante os ensaios aerodinâmicos, o protótipo se conservou perfeitamente estável, sem aparente condição de ressonância. Como resultado da aplicação desta metodologia, obteve-se uma antena protótipo que resistiu às cargas de vento destrutivas, mantendo um bom desempenho eletromagnético.

**Palavras-chave:** Ensaio sob carga estática. Ensaio em túnel de vento. Análise modal.

#### **Abstract**

This article presents the methodology to evaluate the strength characteristics of offset antennas for Ku band, aimed at developing a new 60 cm diameter antenna with ultra light reflector. This includes procedures to obtain the drag coefficient (CD), calculation of equivalent strength for the test under static load and modal analysis. The CD was obtained exposing the antenna to 21 different azimuth and elevation positions, and winds velocities of 70 km/h and 90 km/h. The reflector and its rear frame showed no deformation under the static loading test. The frequencies with larger amplitudes were 7.7 Hz, 8.7 Hz, 10 Hz, 13.7 Hz and 29 Hz. During the aerodynamic tests, the prototype has been preserved perfectly stable without apparent resonance condition. As a result of applying this methodology, it was obtained a prototype antenna that resisted the destructive wind loads while maintaining good electromagnetic performance.

**Keywords:** Test under static load. Wind tunnel tests. Modal analysis.

## **1 Introdução**

Este artigo é a complementação da metodologia para realização de testes em antenas *offset* de 60 cm de banda Ku Parte 1, mas com foco nos ensaios mecânicos para comprovar a resistência estrutural da nova antena com refletor ultraleve (UL). Nesse sentido, são descritas as metodologias para obtenção do coeficiente de arrasto da antena, caso não seja conhecido, o cálculo da força equivalente para a realização do ensaio sob carga estática, o procedimento para realização dos ensaios aerodinâmicos em túnel de vento (TV), a determinação das frequências naturais, frequências aerodinâmicas e avaliação de ressonância. Como a ANATEL não regulamenta os valores carga de vento para antenas de DTH, a metodologia proposta auxilia na maneira de:

- avaliar de forma empírica, alternativas de enrijecimento estrutural até chegar na combinação mais enxuta, que garanta o desempenho mecânico e, portanto, o bom funcionamento eletromagnético da antena;
- proceder a homologação de antenas e a realização de estudos semelhantes para outros modelos de antenas fabricados pela companhia.

A norma IEC 61114-2 (1996) define as velocidades de vento operacional, de sobrevivência e de vento destrutivo como sendo:

- vento operacional: é a velocidade do vento abaixo da qual, as características elétricas da antena sob teste não devem degradar acima dos valores especificados;
- velocidade de vento de sobrevivência: é a maior velocidade do vento abaixo da qual, as características elétricas da antena sob teste podem degradar acima dos valores especificados, mas podem ser recuperadas ajustando a direção da antena após a remoção da carga de vento;
- velocidade de vento destrutivo: é uma velocidade de vento muito alta abaixo da qual, as características elétricas da antena sob teste podem ser permanentemente degradadas. Mas, por razões de segurança, nenhuma parte da antena deve desintegrar mecanicamente para valores inferiores à velocidade de vento especificada.

No Brasil, cada operadora determina os diferentes protocolos para realização dos ensaios em TV, especificando diferentes níveis de velocidades (Tabela 1).

**Tabela 1:** Especificação de cargas de vento das maiores operadoras de DTH do Brasil

	VELOCIDADE OPERACIONAL (km/h) (1)	VELOCIDADE SOBREVIVÊNCIA (km/h)	VELOCIDADE DESTRUTIVA (km/h)	PROTOCOLO DE TESTE EM TÚNEL DE VENTO
CLARO	90	140	-	Az(-45°/0°/+45°) Ei(30°) FRENTE + COSTAS 5min.
SKY	70	100	140	5 min
VIVO TV	90	120	150	5 min. FRENTE + 5min. COSTAS
OiTV	70	100	140	N.D.
GVT	70	100	140	5 min. FRENTE + 5min. COSTAS

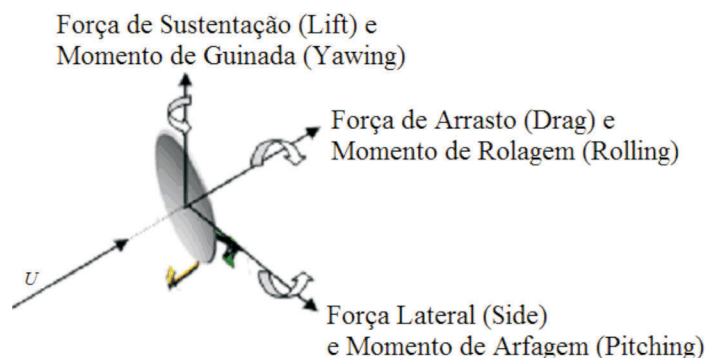
**Fonte:** Requerimentos para testes de antenas DTH de 60 cm (Claro/ Sky/ Vivo/ OiTV/ GVT).

A IEC 61114-2 (1996) descreve, ainda, a metodologia de ensaios mecânicos para antenas receptoras, inclusive para as antenas *offset* de tamanho médio que operam nas frequências de 11 a 12 GHz, especificando as condições ambientais em que os ensaios devem ser realizados, o número de amostras, tempo de duração e equipamentos utilizados. De forma semelhante à metodologia desenvolvida na parte 1 deste trabalho, a norma orienta a medir o ganho da antena sob teste, antes e depois dos ensaios sob carga estática correspondentes aos diferentes níveis de velocidade de vento, seguindo a norma IEC 61114-1. Este artigo está de acordo com a norma, entretanto, objetiva descrever a metodologia de forma prática focando no desenvolvimento de um protótipo que atenda aos requisitos elétricos, mas que seja o mais enxuto possível em termos estruturais.

## 2 Forças e momentos sobre antenas

A Figura 1 representa as forças e momentos atuando sobre uma antena exposta a uma carga de vento com velocidade  $U$ .

**Figura 1:** Forças e momentos atuando sobre uma antena exposta a carga de vento.



**Fonte:** O autor.

O coeficiente de arrasto é determinado por numerosos experimentos em túneis de vento, túneis de água ou outros dispositivos. Os coeficientes de arrasto e sustentação podem ser calculados pelas seguintes expressões:

$$\text{Coeficiente de arrasto: } C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot U^2 A} \quad (1)$$

$$\text{Coeficiente de sustentação: } C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho \cdot U^2 A} \quad (2)$$

Sendo  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] a massa específica do fluido. Os gases com transferência de calor desprezível podem ser considerados incompressíveis quando a velocidade é menor a 100m/s.

## 2.1 Análise de vibrações de antenas offset

A vibração mecânica de uma antena é definida como sua oscilação em relação a uma posição de referência e pode ser descrita pelos parâmetros de amplitude e frequência. As propriedades mais importantes do sistema mecânico em oscilação são inércia, rigidez, elasticidade e amortecimento, as quais estão relacionadas à capacidade de armazenar energia cinética e energia potencial elástica e às perdas de energia decorrentes das resistências passivas (Diniz, 2011). As forças de arrasto do vento sobre a antena produzem vórtices, gerando vibrações. Para o caso de antenas de DTH, devem se manter operacionais até velocidades de vento de 90 km/h, ou seja, sem perda de imagem para o assinante. Dependendo do nível de sinal recebido na antena, essas vibrações poderão ultrapassar a margem de funcionamento normal do receptor ou *set-top-box*, provocando a perda ou congelamento da imagem, em caso de receptores analógicos ou digitais respectivamente. Por esse motivo, faz-se necessário estruturar o novo refletor UL para que se mantenha operacional com ventos de 90 km/h e se mantenha firme no local, sem perder nenhum elemento, com ventos de velocidade destrutiva a 150 km/h.

## 2.2 Análise modal experimental

A análise modal faz parte do estudo de vibração e consiste em determinar os parâmetros modais da estrutura, as frequências naturais, formas modais e os fatores de amortecimento modal.

Segundo Maia e Silva (1997), a análise modal experimental tem como objetivos:

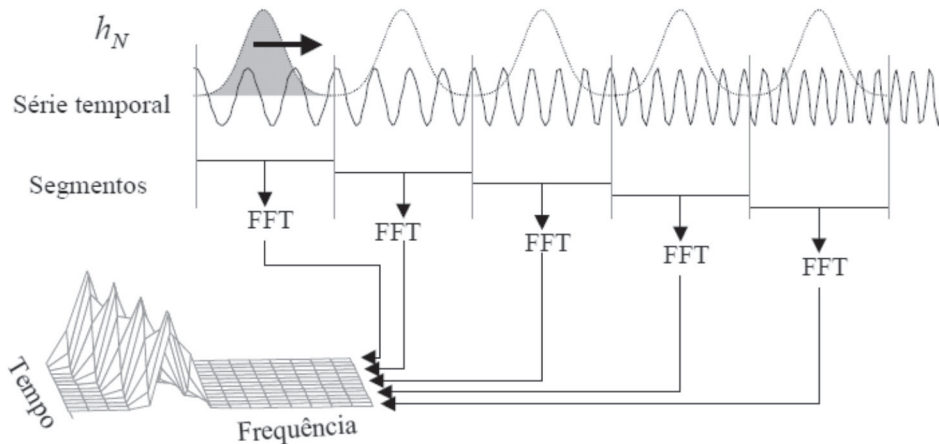
- obter as frequências naturais e modos próprios da estrutura;
- obter informações sobre fatores de amortecimento;
- obter um modelo dinâmico que possibilite ser usado em modificações estruturais quando necessárias;
- aprimorar o modelo dinâmico numérico, por exemplo, em elementos finitos, para que possa representar de maneira confiável a realidade.

A excitação da estrutura pode ser feita através de um impulso, onde é utilizado um martelo de impacto apropriado. A excitação impulsiva é feita em diversos pontos da estrutura e a resposta é medida apenas em um ponto.

Na prática, o deslocamento, a velocidade ou a aceleração da estrutura sob teste é normalmente uma função complexa resultante da interação entre várias frequências naturais da estrutura e das frequências características da força de excitação externa (vento). Para realizar essa análise, utiliza-se a Transformada de Fourier (FT *Fourier Transform*), que permite transformar um sinal no domínio do tempo  $x(t)$  para o domínio da frequência  $x(\omega)$  e vice-versa.

A ressonância ocorre quando a frequência de excitação coincide com uma das frequências naturais. Uma das maneiras de corrigir o problema de ressonância é alterando a frequência natural da antena. Isso é feito alterando a rigidez ou a massa do sistema. É possível visualizar as frequências em função do tempo através do espectrograma (STFT - *Short-Time Fourier Transform*). Ele é calculado pela Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*) de segmentos do sinal definidos pelo produto entre uma janela,  $h_N$ , e o sinal original,  $x(n)$  (Ushizima, 2000). Cada espectro obtido é posicionado consecutivamente formando o eixo do tempo, conforme mostra a Figura 2. Essa ferramenta de análise (*specgram*) está presente no *software* Matlab e realiza o cálculo da FFT do sinal a cada intervalo de amostras pré-determinado.

**Figura 2:** Obtenção do espectrograma.



Fonte: Ushizima (2000).

### 3 Metodologia de teste

A Tabela 2 mostra os sete protótipos com diferentes configurações estruturais que foram testados. Os componentes padrões (estrutura traseira, capacete e base) correspondem aos modelos utilizados na antena SOA 107–60X, com refletor convencional e o cajado longo atravessando toda a superfície externa do refletor UL. Por possuir a configuração estrutural mais resistente, para iniciar os ensaios, foi escolhida a antena nº 1.

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 mostra a Tabela 2.

**Tabela 2:** Configurações estruturais dos sete protótipos testados.

Nº	Estrutura Traseira	Cajado	Capacete	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
						x			x	x	x	x	x	x	x		
1	Padrão	Cajado longo	Padrão	Padrão	Sim		x		x	x	x	x	x	x	x		
									x	x	x	x	x	x	x		
2	Estreita	Cajadão - Menor 2		Menor	Sim											x	x
3	Padrão	Cajado longo	Padrão	Padrão	Sim											x	x
4	Menor 1	Cajado longo	Padrão	Padrão	Sim											x	x
5	Menor 2	Cajado longo	Padrão	Padrão	Sim											x	x
6	Padrão	Cajado L - Menor 1	Padrão	Padrão	Não											x	x
7	Estreita	Cajado L - Menor 2	menor	Menor	Não											x	x

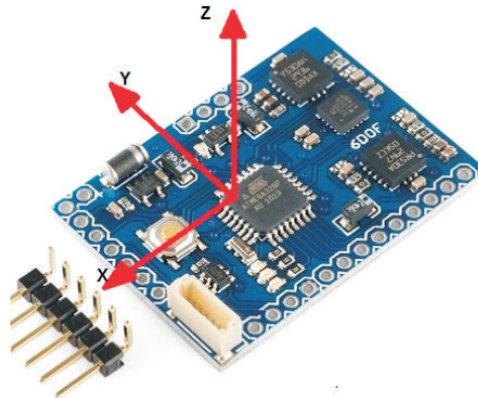
Fonte: O autor

Os protótipos subsequentes apresentam combinações estruturais menores, tanto em tamanho como peso, pois se busca a configuração mais enxuta, que resista às condições de carga de vento. Por motivos de sigilo industrial, não são divulgadas as dimensões dos diversos componentes.

#### 3.1 Análise de vibrações

Para a medição de vibrações, foi utilizada uma placa ArduIMU v2 (<http://www.arduino.cc/>). Esse *hardware* consta de um acelerômetro de três eixos e três sensores de giro, regulador de tensão entre 3,3V e 5V, porto do GPS, processador Atmega328 de 16MHz e vários LEDs de estado. Para sua programação, foi utilizado um *firmware* de código aberto que envia os dados à porta I2C. A Figura 3 apresenta o ArduIMU V2.

Figura 3: ArduIMU v2.



Fonte: [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc) (2013).

O ArduIMU V2 liga-se diretamente a um PC com um cabo FTDI, que é um conversor USB para Serial (nível TTL) que fornece uma interface de dispositivos TTL para USB. Os dados enviados através de uma porta serial são armazenados em um arquivo de texto do tipo TXT no PC. Logo depois, os arquivos são processados com um *script* do *software* Matlab.

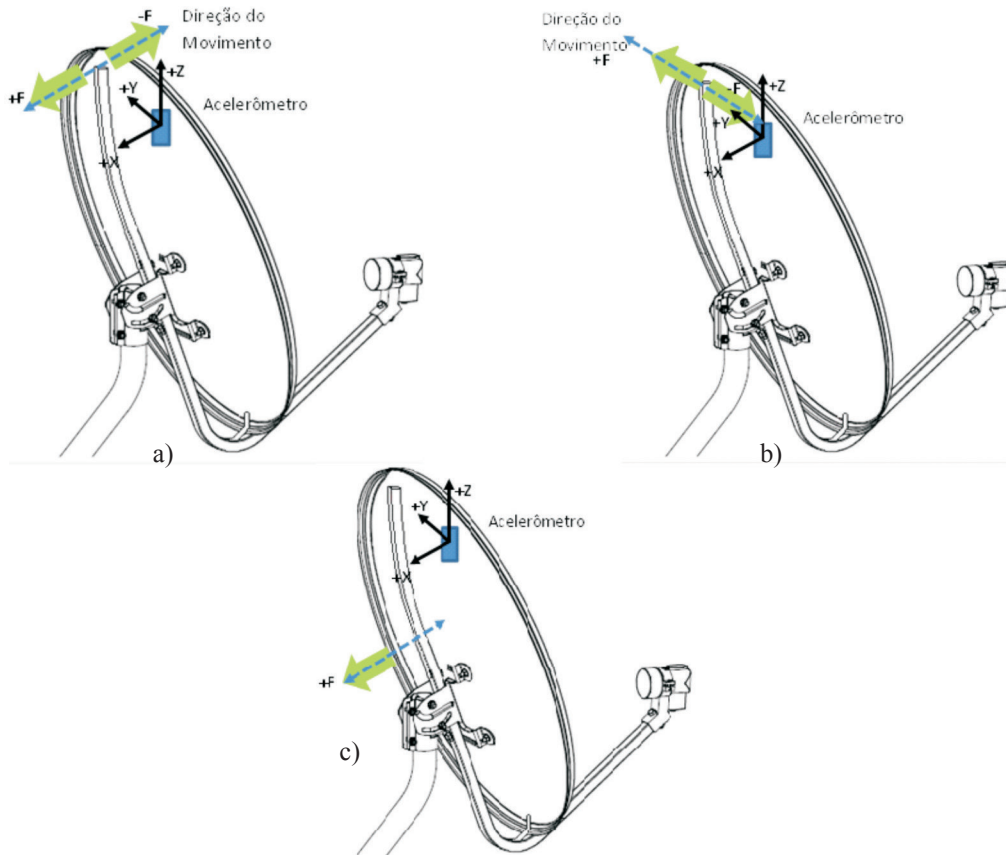
### 3.2 Determinação das frequências naturais

Quando um objeto sofre a ação de uma força impulsiva, as frequências naturais ou ressonantes são excitadas. Se um espectro é medido enquanto o objeto está vibrando devido à ação dessa força, picos espectrais aparecem definindo as frequências naturais do objeto.

As forças de excitação aplicadas sobre a antena são de flexão, torção e lateral e as medições são realizadas conforme o seguinte procedimento:

- Fixar a placa do acelerômetro na parte superior do refletor.
- Aplicar uma excitação impulsiva:
  - I. Flexão: segurar a parte superior do cajado e imprimir uma força na direção do eixo X que produza um deslocamento da estrutura de aproximadamente 10 mm, conforme mostra a Figura 4(a).
  - II. Lateral: segurar na parte superior do cajado e imprimir uma força na direção do eixo Y do acelerômetro que produza um deslocamento da estrutura de aproximadamente 10 mm, como mostra a Figura 4(b).
  - III. Torção: segurar em uma borda no meio do refletor e imprimir uma força na direção do eixo X do acelerômetro que produza um deslocamento da estrutura de aproximadamente 10 mm, como mostra a Figura 4(c).
- Realizar as leituras e gerar os espectros de frequência por meio do *software* Matlab.

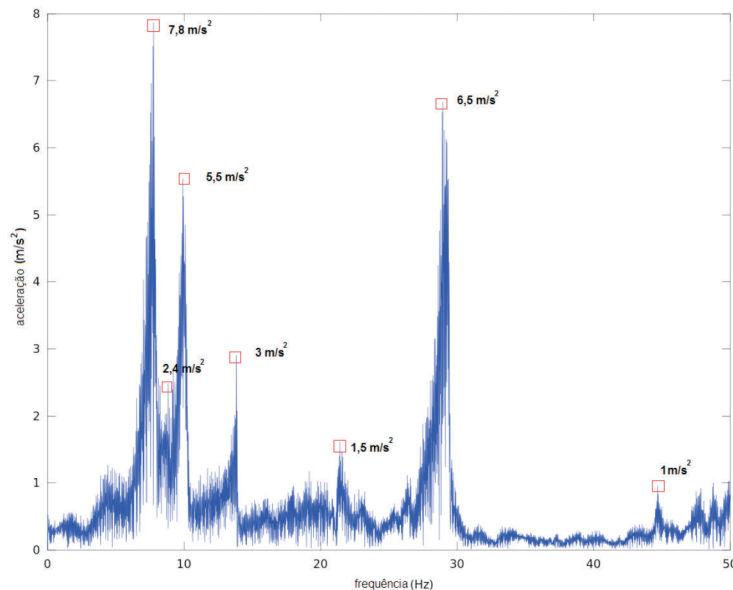
**Figura 4:** Excitação impulsiva de flexão (a), lateral (b) e torção (c).



**Fonte:** O autor.

Para facilitar a análise das frequências modais e aerodinâmicas dos gráficos obtidos, foram consideradas as frequências com acelerações maiores a  $1 \text{ m/s}^2$ , como mostra a Figura 5.

**Figura 5:** Análise das frequências modais.



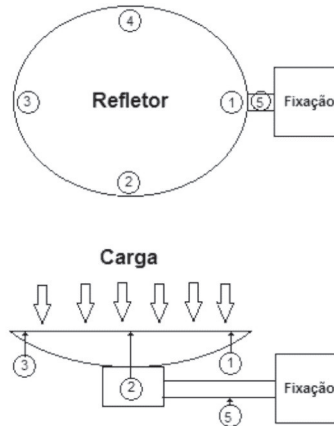
**Fonte:** O autor.

### 3.3 Ensaio sob carga estática

A seguinte metodologia se baseia no procedimento TR-537 da empresa Dynamic (2011) para testes estáticos de carga de vento em antenas 1,2m banda Ka.

- Montar o refletor na posição horizontal.
- Colocar os medidores digitais sob os eixos do refletor, nas posições 1, 2, 3, 4 e 5, conforme mostra a Figura 6.

**Figura 6:** Diagrama de carga estática de vento.



**Fonte:** Baseado em General Dynamics (2011).

- Calcular a força equivalente estática a 150 km/h ( $U = 42\text{m/s}$ ), para o maior coeficiente de arrasto  $C_D$  encontrado. Da Equação 1 se deduz que:

$$F_D = C_D \frac{\rho}{2} AU^2 \quad (3)$$

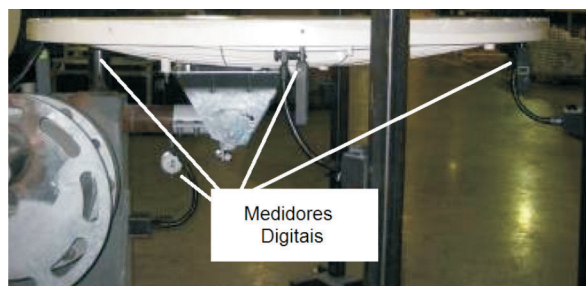
Sendo:

A densidade do ar  $\rho = 1,1968\text{kg/m}^3$

A superfície  $A = 0,3188\text{m}^2$

- Aplicar a carga estática equivalente à face do refletor, durante 2 minutos, com um peso semelhante à força  $F_D$  calculada.

**Figura 7:** Detalhe dos medidores digitais.



**Fonte:** General Dynamics (2011).

- Remover a carga e registrar as leituras dos indicadores digitais (Figura 7). Esses deslocamentos são utilizados para calcular o erro de apontamento angular do feixe e a perda de ganho operacional.

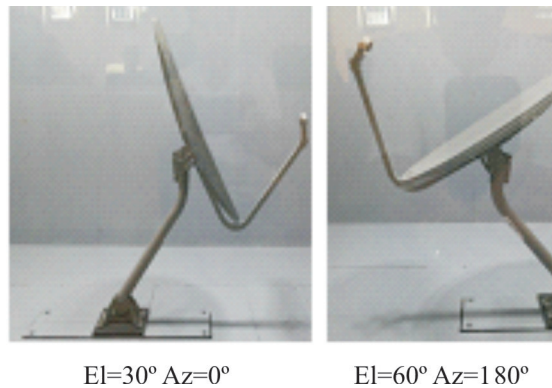
Obs: O ensaio realizado no ITER (2015) foi qualitativo, pois não se dispunha de medidores digitais.

## 4 Resultados obtidos

### 4.1 Determinação do coeficiente de arrasto

- Inspeccionar as amostras, que deverão ser isentas de defeitos ou imperfeições mecânicas.
- Fixar a antena na plataforma da balança do túnel de vento.
- Ensaiai a antena nas velocidades de 20m/s (72km/h) e 25m/s (90km/h), para ângulos El=0, 30 e 60°, para todas as combinações de ângulos de Az= 0, 30, 60, 90, 120, 150 e 180°.

**Figura 8:** Algumas das combinações de azimute e elevação.



Fonte: O autor.

A Figura 8 mostra algumas combinações de azimute e elevação no protótipo inicial escolhido de número 1.

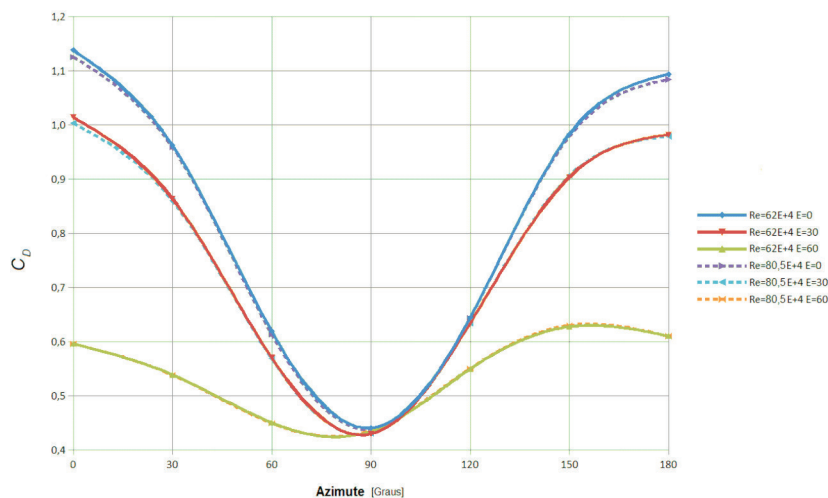
- Determinar o maior valor do  $C_D$ .

Fisicamente, o número de Reynolds ( $R_e$ ) é o quociente entre as forças de inércia e as forças de viscosidade:

$$R_e = \frac{\text{inertia forces}}{\text{viscous forces}} = \frac{UL}{\nu}$$

O gráfico da Figura 9 representa o  $C_D$  em função da variação dos ângulos de azimute, para os três ângulos de elevação e os  $R_e = 62.10^4$  (70 km/h) e  $R_e = 80,5.10^4$  (90 km/h) para a antena 1.

**Figura 9:** Coeficiente de Arrasto  $C_D$ .

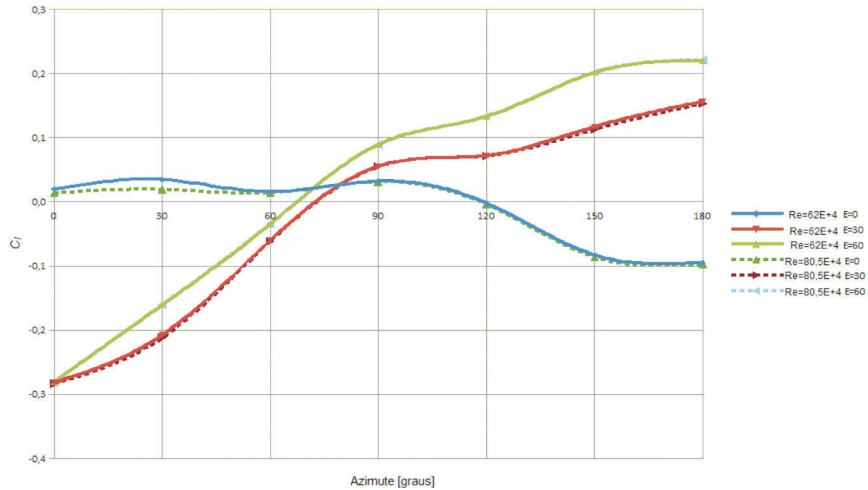


Fonte: O autor.



Observa-se que o  $CD$  parte do seu valor máximo 1,13 na posição em que os eixos do refletor estão normais à direção do vento ( $Az=0^\circ$ ). À medida que aumentam os ângulos de elevação e de azimute, a área influenciada pelo vento vai diminuindo, até atingir seu valor mínimo em  $Az=90^\circ$ , quando o plano formado pelos eixos do refletor fica paralelo à direção do vento. A partir desse ponto, o vento começa a incidir sobre as costas do refletor, aumentando novamente a força de arrasto sobre ele. O maior valor é alcançado na posição  $Az=180^\circ$   $El=0^\circ$ , com um  $CD$  de 1,09. O gráfico também mostra a sobreposição das curvas para as duas velocidades consideradas, confirmando o efeito de incompressibilidade do ar.

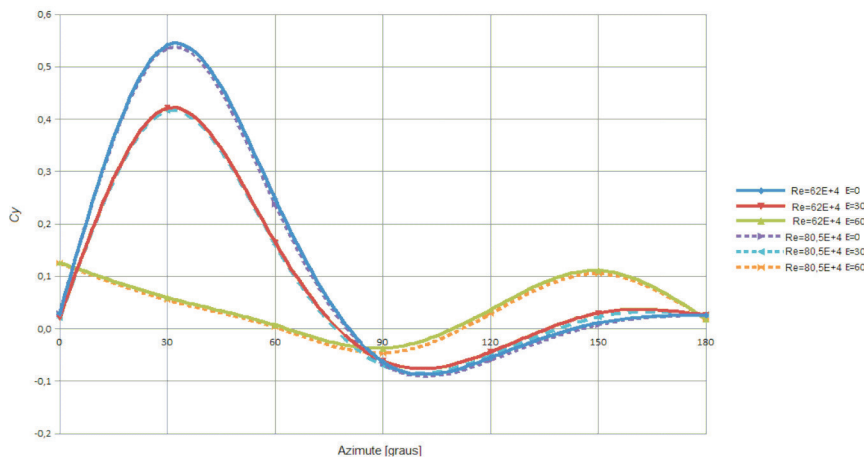
**Figura 10:** Coeficiente de sustentação  $Cl$ .



Fonte: O autor.

O gráfico da Figura 11 mostra o comportamento do coeficiente lateral  $Cy$ . O maior valor de carregamento lateral acontece na combinação de ângulos  $El=0^\circ$  e  $Az=31^\circ$ , com um valor de 0,54.

**Figura 11:** Coeficiente lateral  $Cy$ .

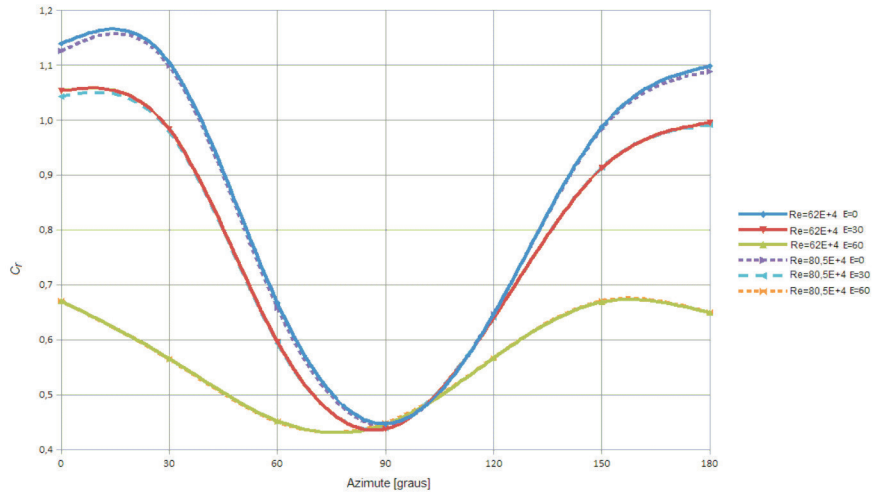


Fonte: O autor.

A Figura 12 mostra a curva do coeficiente de arrasto resultante  $C_r$ , que se calcula pela equação:

$$C_r = \sqrt{(C_x)^2 + (C_y)^2} \quad (4)$$

**Figura 12:** Coeficiente de Arrasto Resultante  $C_r$ .



Fonte: O autor.

O valor máximo de 1,13 foi obtido para os ângulos de  $EI=0^\circ$  e  $Az$  próximo a  $0^\circ$ .

#### 4.2 Realização do ensaio sob carga estática

Com o  $CD=1,13$ , calcula-se a força equivalente estática a 150 km/h aplicando a equação (2):  $FD=380,26$  N ou 38,76 kgf. Para simular essa carga, foram distribuídas 26 garrafas de água de 1,5 kg sobre a superfície do refletor, somando 39 kg, como mostra a Figura 13.

**Figura 13:** Teste sob carga estática.



Fonte: O autor.

Após dois minutos de aplicação da carga, foram inspecionados o conjunto refletor e a estrutura traseira, os quais não apresentaram deformações. A análise foi visual, pois não se dispunha de medidores digitais na ocasião. Esse teste indica que o conjunto possivelmente suportará a velocidade de vento destrutiva nos ensaios em TV.

#### 4.3 Determinação das frequências naturais

Foram realizados ensaios subsequentes, diminuindo gradualmente o tamanho do cajado e de alguns componentes da estrutura traseira. Com esse procedimento empírico, pode-se determinar a melhor configuração, correlacionando resistência com os materiais envolvidos, dando como resultado a configuração do protótipo final ou antena 7.

Esta antena encontra-se com registro de patente solicitado no Brasil, sob o número BR:202014013528-1 (antena parabólica com refletor autoestruturado), e por questões de sigilo industrial, as medidas e características da estruturação não serão divulgadas neste trabalho. A seguir, são apresentados os resultados dos testes manuais de excitação impulsiva de flexão, torção e lateral para determinar as frequências naturais e, na sequência, os ensaios em TV nas posições  $EI=0^\circ$ ,  $Az=30^\circ$  e  $EI=30^\circ$ ,  $Az=30^\circ$ .

**Tabela 3:** Determinação das frequências naturais da antena 7

Antena 7		AMPLITUDES $m/s^2$								
Frequências Hz	7,7	8,7	10,0	11,3	13,7	18,0	21,3	29,0	50,0	
<b>FLEXÃO</b>										
X	1,3		1,7							
Z	11,8	5	6		1,8	1	1,2	5		
<b>LATERAL</b>										
X	1,2		1,9	1						
Y	15	6,5	6							
Z	15,5	5		2,5	2		2			1
<b>TORÇÃO</b>										
X			1,6							
Y	5,2		2		1					
Z	7,8	2,4	5,5		3		1,5	6,5		1

Fonte: O autor.

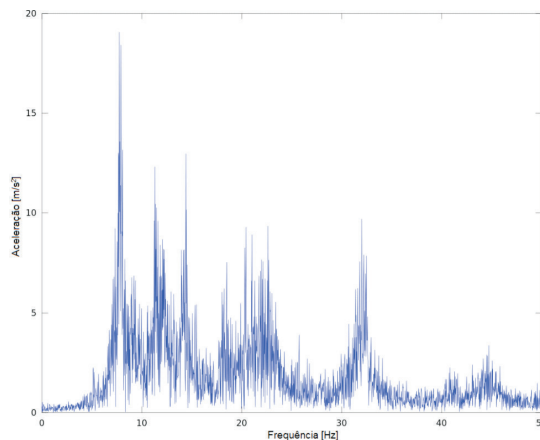
A Tabela 3 resume os valores das frequências obtidos nos ensaios de excitação impulsiva sobre a antena 7, sendo as amplitudes em  $[m/s^2]$  e a frequência em  $[Hz]$ . Para facilitar a visualização, as acelerações com valores acima de  $10 m/s^2$  e até  $14,99 m/s^2$  foram pintadas na cor verde e valores superiores, na cor laranja. Análise dos resultados:

- As frequências naturais que apresentam amplitudes mais relevantes estão localizadas em: 7,7 Hz, 8,7 Hz, 10,0 Hz, 13,7 Hz e 29,0 Hz.
- Por definição, a frequência natural é proporcional à raiz quadrada da rigidez  $K [N/m]$  da antena e inversamente proporcional à raiz quadrada da massa. Como a antena 7 tem uma estruturação mais leve, portanto, menos massa, algumas frequências mais baixas que apareciam em outros protótipos estruturalmente mais pesados não aparecem mais.
- As maiores amplitudes encontram-se nos eixos Y e Z.

#### 4.4 Realização de testes aerodinâmicos na antena 7

A seguir são apresentados os espectros de frequências para a antena 7, na posição  $EI=0^\circ$  e  $Az=30^\circ$ , com velocidades variando de 15 m/s a 42 m/s, aplicadas em cada caso durante 5 minutos. Como exemplo, a Figura 14 apresenta o resultado para  $EI=0^\circ$ ,  $Az=30^\circ$  a 42m/s.

**Figura 14:** Ensaio aerodinâmico em TV – Antena 7,  $EI=0^\circ$ ,  $Az=30^\circ$  a 42m/s.



Fonte: O autor.

A Tabela 4 resume os espectros de frequências aerodinâmicas para os ensaios realizados na posição  $EI=0^\circ / Az=30^\circ$ , nas velocidades de 15m/s a 42m/s, aplicadas durante 5 minutos na antena 7.

**Tabela 4:** Espectro de frequências para a antena 7, na posição  $EI=0^\circ$ ,  $Az=30^\circ$

Antena 7		EI=0°, Az=30° AMPLITUDES m/s <sup>2</sup>											
Frequências Hz	7,7	8,7	10,0	11,3	13,7	15,0	16,7	18,0	21,3	26,0	29,0	32,0	46,0
V=15m/s													
X													
Y	1,7	1,25	1,1		1,1								
Z	2,5	2,45	3,1			1,75	1,6	1,25			1,5		
V=20m/s													
X													
Y	6	3	1,2	1,2	3		1						
Z	7,8	4,5	2	4	2				4		3		1
V=25m/s													
X				1,6					1				
Y	6,2	3,5	2	2	3		2	2,1	1	1,2			
Z	9,5	5,8	3,5	7,5	3				5	2	3		1
V=30m/s													
X				2					1,4				
Y	9	7			4		2,8	2	1,8	2			
Z	12,5	8	3	8	3	4,5			8,2	2,5	5		2
V=35m/s													
X	1,4		1,4	2,5	1,5			1,2	2,25	1,2			
Y	17	7	2	2,5	7,5			4	1	2,5			
Z	20	10	2	10	7,7				7	2	7		
V=40m/s													
X	1,5		1,4	2,5	1,2			2,8	2,3				
Y	11,8	8	4	4	4,5		4	4,5	2	2,3			
Z	19,5	7	6	11,5	6			7,5	7,5			7,5	2
V=42m/s													
X	1,4			3,2	3,2	1,2	1,2	3	3				
Y	10	8	5	5,7	2,5	4	5,5	6		3			
Z	18,5	7	5	12	12,3		5	7	7			8	2,5

Fonte: O autor.

Análise dos resultados:

- As amplitudes vibratórias das frequências naturais a partir de 35m/s não alcançaram valores críticos;
- Com velocidades do vento maiores, surgem novas frequências em 15 Hz, 16,7 Hz, 26,0 Hz, 32 Hz e 46 Hz. Com destaque para as amplitudes alcançadas em 7,7 Hz, 11,3 Hz e 13,7 Hz, a partir de 35 m/s.

A Tabela 5 resume o espectro de frequências aerodinâmicas para os ensaios realizados na posição  $EI=30^\circ/Az=30^\circ$  para a antena 7.

**Tabela 5:** Espectro de frequências para a antena 7 na posição  $EI=30^\circ$ ,  $Az=30^\circ$

Antena 7		EI=30°, Az=30° AMPLITUDES m/s <sup>2</sup>											
Frequências Hz	7,7	8,7	10,0	11,3	13,7	15,0	16,7	18,0	21,3	24,0	30,0	32,0	44,0
V=15m/s													
X													
Y		1,7	1,7		3,1								
Z	3,5	3		2,7	2	7,5						2	
V=20m/s													
X													
Y	3,2	2,5			3,2		1,2						
Z	5	3	1	2,2	1			3,8				4,2	
V=25m/s													
X	1,4	1,45		1,5					1,4				
Y	5,5	3	1	1,2	5,2			2					
Z	8	5	1	6,2					6,8		4,5		1,2
V=30m/s													
X	2,5	1,6		1,8	1,2			1	3	2			
Y	8	6			11		3	3	2				
Z	12,5	7	2	4	8			4	9,7		6		
V=35m/s													
X	3	2	1	1,5	3,2			1	2,8	2,5			1
Y	11	6		4	7		3	3	2,5				
Z	15	7	2	5	12,5			4,5	21			10	
V=40m/s													
X	5	2		2,5	2			1,5	2,5	3			
Y	16	8		4	7,5		5	6					
Z	24,5	7	2,5	7	6,5		4	7	8			12	
V=42m/s													
X	7	2	1	3	3	3		2	4	4			1
Y	19	8	2	4	8	0		6					
Z	31	5	2	8	9	2		7	10	5		12	

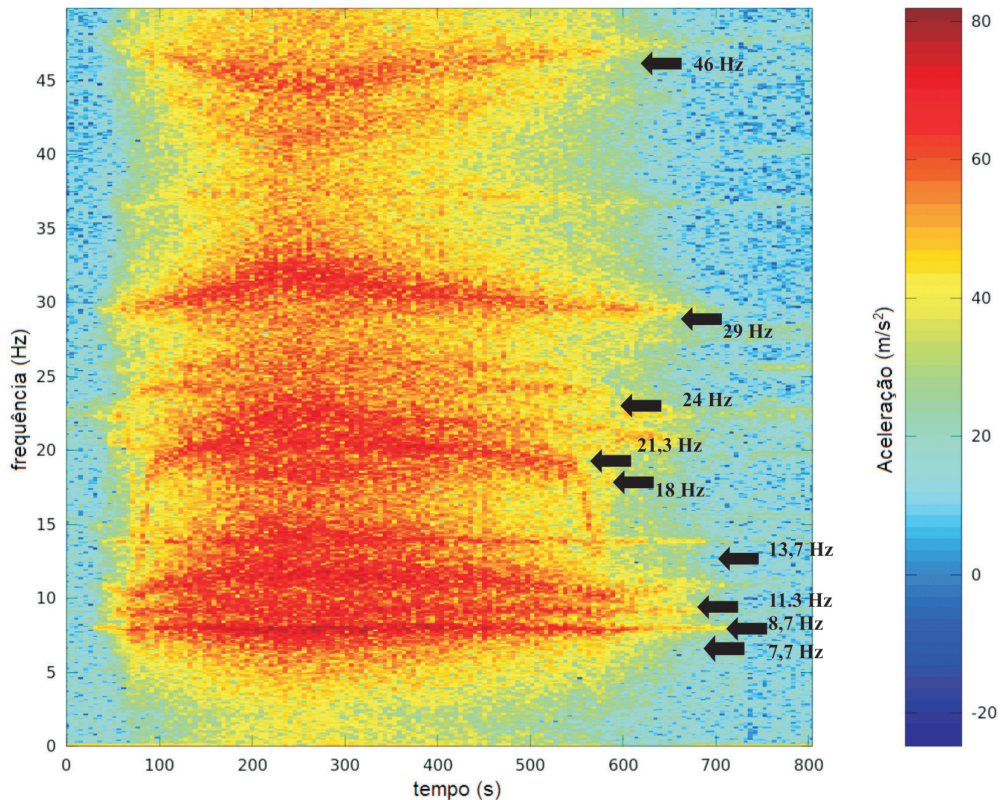
Fonte: O autor.

Os ensaios no túnel de vento da antena 7 nas posições  $EI=0^\circ / Az=30^\circ$  e  $EI=30^\circ / Az=30^\circ$  demonstraram que o modelo se manteve estável sem aparente condição de ressonância.

#### Determinação do espectrograma

Observa-se, no espectrograma, todo o espectro de frequências obtidas durante os ensaios, como mostra a Figura 15, referente à antena 7. O espectrograma mostra as amplitudes mais relevantes referentes às frequências naturais encontradas em 7,7 Hz; 8,7 Hz, 11,3 Hz, 13,7 Hz, 18,0 Hz, 21,3 Hz e 24 Hz e as amplitudes maiores referentes às frequências aerodinâmicas 29 Hz e 46 Hz.

Figura 15: Espectrograma – Antena 7.



Fonte: O autor.

## Conclusões

A metodologia estabelecida abrange os aspectos mais importantes na avaliação mecânica e eletromagnética de uma antena *offset* de 60 cm.

Para confirmar a resistência mecânica estrutural do novo refletor UL, foram realizados ensaios aerodinâmicos, inicialmente sobre a antena 1, que por sua configuração era o protótipo mais robusto. A antena foi exposta a velocidades de 20 e 25 m/s, em 21 posições diferentes de azimute e elevação.

Com os valores obtidos dos coeficientes de arrasto frontais e laterais para cada posição e velocidade, foram confeccionados os gráficos que demonstraram que, por um lado, para velocidades de vento subsônicas o ar permanece incompressível e, por outro, permitiram determinar a posição mais crítica do vento sobre a antena, sendo no caso da antena ensaiada localizada em  $Az=0^\circ / EI=0^\circ$ , ou seja, com o refletor posicionado frontalmente ao fluxo do vento.

Com o *CD*, foi calculada a força equivalente do vento destrutivo (150 km/h) e realizada a simulação, pelo ensaio sob carga estática. E após dois minutos de aplicação da carga, o conjunto refletor e a estrutura não apresentaram deformações.

Os testes em túnel de vento demonstraram que a estruturação proposta foi eficiente, pois não houve deformações mesmo nos protótipos expostos a cargas de vento destrutivas.

Na análise modal, as frequências naturais foram obtidas através da aplicação de forças de excitação manuais de flexão, torção e lateral. Os ensaios no túnel de vento com velocidades de 15m/s até 41m/s na antena 7, nas posições  $EI=0^\circ/Az=0^\circ$  e  $EI=0^\circ/Az=30^\circ$ , forneceram as frequências aerodinâmicas, demonstrando que o modelo se manteve estável sem aparente condição de ressonância.

Em seguida, foram realizados novos ensaios, diminuindo gradualmente o tamanho do cajado e de alguns componentes da estrutura traseira. Com esse procedimento empírico, pôde-se determinar a melhor configuração em termos de resistência versus materiais envolvidos, dando como resultado a configuração do protótipo final ou antena 7 (protótipo aprovado com solicitação de patente mundial).

Os ensaios realizados para determinar os modos de vibração natural e aerodinâmicos, expondo esse protótipo a diversos ângulos e velocidades de vento, demonstraram que as amplitudes vibratórias para a velocidade operacional de 90 km/h (25m/s) foram baixas, ou seja, a antena se mantém operacional nessa velocidade. Apesar do aumento das amplitudes vibratórias a partir de 40 m/s, velocidades consideradas destrutivas, o protótipo se conservou perfeitamente estável, sem aparente condição de ressonância.

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

DINIZ, A. O. **Monitor de vibração contínua com o uso de acelerômetro**. Trabalho de conclusão de Curso. Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos 2011.

GENERAL DYNAMICS SATCOM TECHNOLOGIES. **Static and dynamic wind load test report 1.2M Ka-band 3122 series antenna**. Prodelin Corporation, 2011.

IEC 61114-1. **Receiving antennas for satellite broadcast transmissions in the 11/12 GHz band - Part 1: electrical measurements**. 1999

IEC 61114-2. **Methods of measurement on receiving antennas for satellite broadcast transmissions in the 11/12 GHz band - Part 2: mechanical and environmental tests on individual and collective receiving antennas**. 1996.

ITER. **Instituto tecnológico y de energías renables S .A.**. Disponível em: <http://www.iter.es/>. Acesso em: 30 fev. 2015.

MAIA, N. M. M.; SILVA, J. M. M. **Theoretical and experimental modal analysis**. New York: Research Studies Press, 1997.

USHIZIMA, M. R. **Desenvolvimento de ferramentas para análise de sinais biológicos nos domínios tempo, frequência e tempo-frequência**: aplicação ao estudo da regulação da pressão arterial. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. 2000.

## 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.