



SÍNTESE DE ANTENAS OTIMIZADAS PARA TV DIGITAL

Paulo Victor Barreto Tomé

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

SÍNTESE DE ANTENAS OTIMIZADAS PARA TV DIGITAL

PAULO VICTOR BARRETO TOMÉ

ORIENTADOR: UGO SILVA DIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM – 761/21

BRASÍLIA/DF: 30 DE DEZEMBRO - 2020.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SÍNTESE DE ANTENAS OTIMIZADAS PARA TV DIGITAL

PAULO VICTOR BARRETO TOMÉ

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DE TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

APROVADA POR:

Prof. Dr. Leonardo Rodrigues Araújo Xavier de Menezes

Prof. Dr. Paulo Henrique Sales Wanderley

Prof. Dr. Ugo Silva Dias

BRASÍLIA/DF, 30 DE DEZEMBRO DE 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

B273s Barreto Tomé, Paulo Victor
SIÍNTESE DE ANTENAS OTIMIZADAS PARA TV DIGITAL / Paulo
Victor Barreto Tomé; orientador UGO SILVA DIAS. --
Brasília, 2020.
130 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Engenharia Elétrica)
- Universidade de Brasília, 2020.

1. Otimização angular. 2. Maximização de ganho. 3. Síntese
de antenas. 4. Encurvamento do elemento. 5. GRADMAX, 4nec2,
LOGYAGI. I. SILVA DIAS, UGO, orient. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TOMÉ, P.V.B. (2020). Síntese de antenas otimizadas para TV digital. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-721-21, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 132p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Paulo Victor Barreto Tomé

TÍTULO: Síntese de antenas otimizadas para TV digital.

GRAU: Mestre

ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Paulo Victor Barreto Tomé
QMS 8, casa 18A, Sobradinho. Brasília – DF – Brasil – 73080-640.

Dedico este trabalho a Deus, pois esteve sempre presente dando sabedoria e saúde. À minha família, esposa, filhos e amigos que, em todos os momentos, estiveram presentes, incentivaram e guiaram, de forma direta e/ou indireta, os meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Andrea e meus filhos Pedro e Sara, pela compreensão, carinho e amor durante os vários meses em que estava presente, mas não totalmente, dividindo o tempo com a família, trabalho e estudos.

Aos meus pais: Eva e Itamar, à minha vó: Fausta e aos meus irmãos: Angela e Filipe, pelo amor incondicional, carinho e força em todos os momentos.

Ao meu professor e orientador inicial Marco Antonio Brasil Terada, pela parceria, paciência e confiança na minha caminhada na Universidade de Brasília, em que cursei desde disciplinas como aluno especial e que me acompanhou até a conclusão desta dissertação.

Ao professor Franklin pela ajuda com os obstáculos encontrados que vieram agregar ao trabalho. Agradeço pela ajuda e esclarecimentos que foram essenciais ao desenvolvimento de minha pesquisa, apresentada nesta dissertação.

A todos que, de certa forma, indireta ou diretamente, me ajudaram no processo de elaboração e conhecimento adquirido neste trabalho.

A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido. Não na vitória propriamente dita

Mahatma Gandhi

RESUMO

SÍNTESE DE ANTENAS OTIMIZADAS PARA TELEVISÃO DIGITAL

Autor: Paulo Victor Barreto Tomé

Orientador: Ugo Silva Dias

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, mês de dezembro (2020)

Antenas de fio foram amplamente utilizadas no passado em sistemas de comunicação de TV e, mais recentemente, experimentaram um recrudescimento em sua popularidade e interesse em P&D com a digitalização de sinais de televisão. Dipolos, Yagis e Log-Periodics são exemplos comuns de antenas de fio e possuem comprimentos e geometrias ideais de acordo com os canais de TV desejados. Neste trabalho, um novo formato para uma antena Log-Periódica é obtido numericamente através da otimização angular com o auxílio de códigos de computador. A nova geometria produz uma resposta melhor em uma largura de banda de frequência desejada, quando comparada às geometrias clássicas retas ou em forma de V.

Palavras-chave— Antenas; Otimização Angular; Televisão digital; Maximização de ganho; Log-periódicos; Largura de banda de frequência estendida

ABSTRACT

OPTIMIZED DIGITAL TELEVISION ANTENNA SYNTHESIS

Author: Paulo Victor Barreto Tomé

Supervisor: Ugo Silva Dias

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, month of december (2020)

Wire antennas have been widely used in the past in TV communication systems, and more recently have experienced a recrudescence in their popularity and R&D interest with the digitalization of television signals. Dipoles, Yagis and Log-Periodics are common examples of wire antennas and possess ideal lengths and geometries accordingly to the desired TV channels. In this work, a new shape for a Log-Periodic antenna is numerically obtained through angular optimization with the aid of computer codes. The new geometry yields a better response in a desired frequency bandwidth, when compared to the classical straight or V-shaped geometries.

Keywords— Antennas; Angular Optimization; Digital Television; Gain Maximization; Log-periodics; Extended Frequency Bandwidth

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	APRESENTAÇÃO.....	1
1.2	TEMA, OBJETIVO E IMPORTÂNCIA.....	1
1.3	METODOLOGIA E DELIMITAÇÕES.....	2
2.0	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1	BREVE HISTÓRICO.....	3
2.2	PARÂMETROS BÁSICOS.....	5
2.3	DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE NA ANTENA FILAMENTAR.....	5
2.4	O MÉTODO DOS MOMENTOS.....	6
2.4.1	Caso geral – equação de Pocklington.....	6
2.4.2	Função base e peso.....	8
2.4.3	O método <i>Point Matching</i>	11
2.4.4	Método Garlekin – Senoidal.....	15
2.5	ESTRUTURAS OTIMIZADAS.....	17
3.0	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: 1 ELEMENTO.....	18
3.1	ANTENA FILAMENTAR.....	18
3.1.1	Ressonância.....	22
3.2	MONOPOLO.....	24
3.3	DIPOLO DE $1,5\lambda$	26
3.4	MONOPOLOS ISOLADOS E OTIMIZADOS POR ÂNGULO COM DIFERENTES COMPRIMENTOS.....	37
3.5	MONOPOLO DE $2,8\lambda$ OTIMIZADO.....	39
3.6	MONOPOLO: 1 ELEMENTO SUBDIVIDIDO EM 2 FIOS.....	43
3.7	MONOPOLO DE ARCO.....	47
3.8	ANTENA EM ‘V’.....	52
4.0	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: YAGI.....	57

4.1	ANTENA YAGI	57
4.2	YAGI DE 3 ELEMENTOS RETA [6]	61
4.3	YAGI DE 3 ELEMENTOS CURVILÍNEA [12]	64
4.4	YAGI DE 3 ELEMENTOS DE $1,5\lambda$	68
4.5	YAGI DE $2,8\lambda$	74
5.0	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: LOG PERIÓDICA	79
5.1	ANTENA LOG PERIÓDICA	79
5.2	LOG PERIÓDICA DE 18 ELEMENTOS REFERÊNCIA	86
5.3	LOG PERIÓDICA DE 3 ELEMENTOS DE $1,5\lambda$ [17].....	95
5.4	LOG PERIÓDICA DE SEIS ELEMENTOS COM FATOR DE ENCURTAMENTO	101
5.5	LOG PERIÓDICA DE NOVE ELEMENTOS COM FATOR DE ENCURTAMENTO	103
5.6	DISCUSSÃO E RESULTADOS	106
6.0	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	108
6.1	CONCLUSÕES GERAIS	108
6.2	TRABALHOS FUTUROS	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: n.º segmentos <i>versus</i> Zin e Ganho, em 4nec2	21
Tabela 2: n.º de segmentos <i>versus</i> Zin e Ganho em GRADMAX	22
Tabela 3: n.º de segmentos <i>versus</i> Zin e ganho em 4nec2 para dipolo de $0,4611\lambda$	22
Tabela 4: n.º de segmentos <i>versus</i> Zin e ganho em GRADMAX para dipolo de $0,4611\lambda$..	23
Tabela 5: relação entre dipolo e monopolo em 4nec2	26
Tabela 6: relação entre dipolo e monopolo em GRADMAX.....	26
Tabela 7: resumo das simulações dipolo/monopolo com 13 e 6 fios respectivamente	36
Tabela 8: monopolos otimizados isoladamente.....	38
Tabela 9: análise de vários arcos e otimizações na direção X.....	50
Tabela 10: relação dipolo e monopolo de uma yagi reta em 4nec2	59
Tabela 11: resumo dos resultados <i>array</i> de 3 elementos.....	74
Tabela 12: parâmetros de Log periódica	80
Tabela 13: log periódica de 6 elementos	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: televisão analógica, à esquerda, e televisão digital, à direita [15] e [16].....	4
Figura 2: aproximação da corrente com função base [4].....	10
Figura 3: zin: (a) resistência <i>versus</i> N.º segmentos (b) reatância <i>versus</i> N.º segmentos [4].	12
Figura 4: modelo de fonte GAP e Franja Magnética [2]	13
Figura 5: (a) <i>piecewise senoidal</i> (2 segmentos) (b) <i>piecewise senoidal</i> (5 segmentos) [4].	15
Figura 6: (a) Resistência <i>versus</i> n.º segmentos (b) Resistência <i>versus</i> n.º segmentos [4].	16
Figura 7: (a) distribuição de corrente ao longo do fio (b) diagrama de radiação [4].....	19
Figura 8: dipolo de $0,5\lambda$ em 4nec2	20
Figura 9: dipolo de $0,5\lambda$ em GRADMAX, N=36	21
Figura 10: monopolo de $0,25\lambda$, N=18, R=0,005 λ , em GRADMAX.....	24
Figura 11: monopolo de $0,25\lambda$, R=0,005 λ , em 4nec2	25
Figura 12: dipolo de $1,5\lambda$ em GRADMAX.....	27
Figura 13: dipolo de $1,5\lambda$, N=31, em 4nec2	28
Figura 14: monopolo de $1,5\lambda$, N=15, em 4nec2	29
Figura 15: monopolo de $1,5\lambda$, 1 fio, em GRADMAX	30
Figura 16: monopolo de $1,5\lambda$ otimizado, passo a passo, em GRADMAX	30
Figura 17: monopolo de $1,5\lambda$ com 5 otimizações, em GRADMAX.....	31
Figura 18: monopolo com 6 fios após 5 otimizações, vista da estrutura.....	31
Figura 19: monopolo $0,75\lambda$ com 6 fios (cada fio com N=3), em 4nec2	32
Figura 20: monopolo $0,75\lambda$ com 6 fios (cada fio com N=3) otimizados, em 4nec2	33
Figura 21: monopolo $0,75\lambda$ com 6 fios otimizados, em 3D, em 4nec2.....	34
Figura 22: dipolo de $1,5\lambda$ com 13 fios otimizado (cada fio com N=3), em 4nec2.....	35
Figura 23: dipolo de $1,5\lambda$ com 13 fios otimizados, em GRADMAX.....	36
Figura 24: estruturas otimizadas, em GRADMAX	39
Figura 25: monopolo de $2,8\lambda$, 36 fios, em 4nec2	40
Figura 26: monopolo de $2,8\lambda$ com 6 fios, em GRADMAX	41
Figura 27: monopolo de $2,8\lambda$, com 6 fios, em 4nec2	42
Figura 28: estrutura com 2 fios.....	43

Figura 29: monopolo de 2 fios, vista da estrutura	44
Figura 30: monopolo de 2 fios, em GRADMAX	44
Figura 31: monopolo 2 fios, vista da estrutura otimizada	45
Figura 32: monopolo com 2 fios otimizado, em GRADMAX	45
Figura 33: monopolo de 2 fios otimizado, em 4nec2	46
Figura 34: circunferência e arco.	47
Figura 35: arco de $0,5\lambda$, vista da estrutura.....	48
Figura 36: arco de $0,5 \lambda$, em GRADMAX	49
Figura 37: arco de $0,5 \lambda$ otimizado, vista da estrutura.....	49
Figura 38: arco de $0,5 \lambda$ otimizado, em GRADMAX	50
Figura 39: arco de $2,5\lambda$ após otimização, vista da estrutura.....	51
Figura 40: arcos de $1,5\lambda$ e $2,5\lambda$ com 6 e 36 fios otimizados, vista da estrutura.....	52
Figura 41: antena V alfa 47° , em GRADMAX	53
Figura 42: antena V alfa 47° otimizada, em GRADMAX.....	53
Figura 43: antena V alfa 47° otimizada, vista da estrutura	54
Figura 44: antena V alfa 47° otimizada, em 4nec2.....	55
Figura 45: antena V alfa 47° otimizada (banda), em 4nec2.....	56
Figura 46: estrutura da antena yagi [4].....	57
Figura 47: yagi de 3 elementos, em GRADMAX	57
Figura 48: yagi de 3 elementos, em 4nec2	58
Figura 49: yagi de 3 monopolos, em GRADMAX.....	59
Figura 50: yagi de 3 monopolos, em 4nec2.....	60
Figura 51: yagi de 3 monopolos retos, em GRADMAX [6]	61
Figura 52: yagi de 3 elementos retos, em 4nec2 [6].....	62
Figura 53: yagi de 3 elementos retos (banda)[6], em 4nec2.....	63
Figura 54: yagi de 3 monopolos curvilínea, em GRADMAX [12].....	64
Figura 55: yagi de 3 monopolos curvilínea, vista da estrutura [12]	65
Figura 56: yagi de 3 elementos curvilíneos, em 4nec2 [12].....	66
Figura 57: yagi de 3 elementos curvilínea (banda), em 4nec2 [12]	67
Figura 58: yagi de 3 monopolos retos de $0,75\lambda$, sem otimização, em GRADMAX	68
Figura 59: yagi de 3 monopolos de $0,75\lambda$ retos otimizados, vista da estrutura.....	69
Figura 60: yagi de 3 monopolos de $0,75 \lambda$ retos otimizados, em GRADMAX.....	69
Figura 61: yagi de 3 monopolos de $0,75\lambda$ otimizados isoladamente, em GRADMAX	70

Figura 62: yagi de 3 monopolos de $0,75\lambda$ otimizados isoladamente após 9 otimizações, em GRADMAX	70
Figura 63: yagi de 3 monopolos de $0,75\lambda$ otimizados isoladamente, após 9 otimizações, vista da estrutura	71
Figura 64: yagi de 3 monopolos de $0,75\lambda$ retos otimizados, representado em 4nec2	72
Figura 65: yagi de 3 monopolos otimizados isoladamente após otimização do conjunto, em 4nec2.....	73
Figura 66: monopolo $2,8\lambda$, em 4nec2.....	76
Figura 67: conjunto de 2 Monopolos de $2,8\lambda$, em 4nec2, com refletor, em 4nec2	77
Figura 68: conjunto de 2 monopolos de $2,8\lambda$, em 4nec2, com refletor e diretor, em 4nec2	78
Figura 69: estrutura de antena log periódica [4].....	79
Figura 70: simulação de log periódica de 9 elementos, em 4nec2	81
Figura 71: dados de saída do programa LOGYAGI, em Fortran [3]	82
Figura 72: log periódica 9 monopolos, em 4nec2	83
Figura 73: log periódica 9 monopolos, em GRADMAX	84
Figura 74: log periódica 9 monopolos otimizada, em 4nec2.....	85
Figura 75: log periódica 18 elementos, em 4nec2	87
Figura 76: log periódica 18 elementos SWR, ganho, Impedância, em 4nec2.....	88
Figura 77: log periódica triplicação do comprimento, em 4nec2	90
Figura 78: log periódica SWR, ganho, impedância (100Mhz a 700Mhz), em 4nec2	91
Figura 79: nova faixa de frequência: SWR, ganho e Z_{in} (66Mhz a 200Mhz), em 4nec2...	92
Figura 80: resultados, em Fortran [3]	93
Figura 81: dados GRADMAX após otimização, vista da estrutura	94
Figura 82: resultados de LOGYAGI	95
Figura 83: <i>log</i> periódica 3 monopolos e 3 fontes $0,75\lambda$ cada, em GRADMAX	96
Figura 84: <i>log</i> periódica 3 monopolos e 3 fontes otimizada, vista da estrutura	96
Figura 85: <i>log</i> periódica 3 monopolos e 3 fontes otimizados, em GRADMAX	97
Figura 86: <i>log</i> periódica 3 monopolos e 3 fontes, subdividido e otimizado, vista da estrutura	97
Figura 87: <i>log</i> periódica 3 monopolos e 3 fontes, subdividido, otimizado, em GRADMAX	98
Figura 88: nova <i>log</i> periódica de 3 elementos, em dipolos, otimizada, em 4nec2	99

Figura 89: (a): análise de Ganho. (b): SWR (esquerda) e Zin (direita). Banda: 165Mhz a 425Mhz, em 4nec2	100
Figura 90: SWR e ganho da log periódica de 6 elementos, em 4nec2	102
Figura 91: Zin e estrutura da log periódica de 6 elementos simulada, em 4nec2.....	102
Figura 92: log periódica de 9 elementos com fator de encurtamento, em 4nec2	104
Figura 93: ROE, ganho e Zin de um log periódica de 9 elementos, em 4nec2	105
Figura 94: comparação yagi retilínea, yagi curvilínea e log periódica.....	107
Figura 95: comparação log's: elementos retos e curvados.....	107

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

A	- vetor potencial magnético
β	- numero de onda angular ($2\pi/\lambda$)
c	- velocidade da luz
$E^i(z)$	- campo elétrico incidente no condutor (eixo central)
ϵ_0	- permissividade do vácuo ($1/(c^2 * \mu_0)$)
$E_{fóton}$	- energia do fóton
f	- frequência em Hz
F_n	- Função no ponto n conhecida
h	- constante de Planck
Hz	- unidade de frequência do SI (ciclos por segundo)
I_n	- corrente no ponto 'n'
$I(z')$	- corrente no condutor (superfície)
$I(z)$	- corrente no condutor (eixo central)
j	- representação da parte imaginaria em números complexo ($\sqrt{-1}$)
λ	- comprimento de onda do SI
SI	- Sistema Internacional de Unidades
μ_0	- permeabilidade magnética do vácuo ($4\pi * 10^{-7}$)
Φ	- escalar potencial elétrico
V_m	- tensão no ponto 'm'
Z_{mn}	- impedância do ponto da fonte 'm' ao ponto de observação 'n'

1.0 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O presente estudo foi dividido em seis capítulos. Uma antena é um componente, que de forma simples, pode resolver ou melhorar uma qualidade ruim de sinal em determinado sistema de comunicação. Como exemplo: uma recepção de um aparelho de televisão. O presente estudo busca uma estrutura que tenha desempenho superior às estruturas estudadas e comercializadas. Para isso serão realizadas simulações computacionais em busca de tal estrutura. Serão seis capítulos para tratar do assunto: capítulo 1, apresenta-se a metodologia, os objetivos, as delimitações, entre outros aspectos pertinentes. No capítulo 2, contempla-se revisão bibliográfica pertinente ao assunto abordado (cálculo da distribuição de campo e corrente, método de análise, característica da otimização. Nos capítulos 3, 4 e 5, encontram-se as simulações computacionais desenvolvidas com uso dos *softwares* GRADMAX, 4nec2 e LOGYAGI. E, por fim, no capítulo 6, apresentam-se conclusão e os possíveis trabalhos futuros.

1.2 TEMA, OBJETIVO E IMPORTÂNCIA

O tema principal da presente pesquisa refere-se à melhoria em ganho de uma estrutura radiante (síntese de antena) para a recepção/transmissão de sinais de televisão digital [1]. As simulações desenvolvidas apresentam bons resultados para estruturas filiformes nas frequências da TV digital. Logo, com apenas algumas alterações em elementos inicialmente retilíneos, vislumbrou-se a obtenção de ganhos vantajosos. Como exemplo: em determinadas regiões, que possuem uma recepção de sinal fraca, um ganho superior de 3dB significa um ganho dobrado [2] — o que é vantajoso, pois as estruturas de antenas filiformes são simples de se trabalhar.

A importância da melhoria em estruturas não se faz, apenas, pela diminuição de matéria-prima, mas também pela melhoria na qualidade do sinal transmitido ou recebido. Assim, em certas regiões, tem-se a necessidade de mais ganho para a recepção de sinais, mesmo existindo recursos, ou seja, se busca um sinal melhor.

A motivação sobre o tema diz respeito ao fato de antenas estarem tão próximas nas rotinas do dia a dia [1]. Sempre se ouve ou se percebe a temática da programação da

televisão, com assuntos correlatos aos sinais de celular, controle sem fios etc., acarretando no seguinte questionamento: como é a recepção do sinal dessas tecnologias? De fato, a recepção de sinais eletromagnéticos com mais qualidade poderá ser um fator decisivo para a melhoria ou o surgimento de equipamentos futuros [14].

1.3 METODOLOGIA E DELIMITAÇÕES

Para elaboração do presente estudo, fez-se breve revisão dos principais conceitos teóricos sobre a temática supramencionada. Assim, a natureza da metodologia ocorreu em viés descritivo e explorativo, uma vez que algumas simulações são conhecidas na literatura [3] [4]. Contudo, a exploração de novas estruturas foi o foco do trabalho, com a otimização por ângulo [5] [6].

Destarte, fez-se uso de análises computacionais dos *softwares* GRADMAX, 4nec2 e LOGYAGI [6] [7] [8]. As estruturas otimizadas foram qualificadas tanto de forma quantitativa como qualitativa, bem como a pesquisa em estruturas otimizadas semelhantes, conforme evidenciado na literatura.

Em suma, as linhas que se seguem buscaram analisar uma estrutura de antena filamentar não tradicional/comercial. Assim, fez-se a otimização do monopolo correspondente no *software* GRADMAX [6] [13] em determinada frequência (300Mhz por conveniência devido ao comprimento de onda de 1 metro, aproximadamente) e com as fontes apropriadas. Essa otimização em ângulo promove a inclinação do elemento e, quando o elemento está subdividido em mais segmentos de fio, pode ocorrer o encurvamento do monopolo. Posteriormente, promoveu-se a construção de uma estrutura otimizada no *software* 4nec2, que possui *interface* gráfica mais intuitiva, possibilitando facilidade tanto para a construção quanto para a análise e visualização dos resultados. E, com a estrutura otimizada e construída em 4nec2, analisaram-se os ganhos e os demais parâmetros de uma antena. Assim, com a mesma quantidade de materiais, porém, com elementos encurvados, buscou-se almejar resultados com foco no ganho, analisando as demais características da antena.

2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 BREVE HISTÓRICO

Heinrich Hertz (1886) e Guglielmo Marconi (1901) foram os primeiros estudiosos de antenas que foram capazes de afirmar, experimentalmente, as afirmações teóricas de Maxwell [4]. Desde então, elas são cada vez mais indispensáveis para a sociedade, sendo encontradas por toda parte (casa, trabalho, aviões, satélites etc.), operando como acopladores eletromagnéticos.

Nos últimos 100 anos, as antenas tornaram-se cada vez mais importantes. Heinrich Hertz construiu a primeira antena. Professor do Instituto Técnico em Karlsruhe, Alemanha, Hertz foi o pioneiro e considerado pai do rádio. Em 1888, o físico alemão demonstrou, para a comunidade científica, a existência de radiação eletromagnética construindo um sistema de transmissão e recepção, conforme previsto teoricamente por Maxwell em 1873.

Ajustando a invenção de Hertz, Marconi logrou uma transmissão de longa distância. Assim, por volta do ano de 1902, já se tinham regulares transmissões transatlânticas.

Com o advento do radar durante a Segunda Guerra Mundial, as antenas com comprimentos de ondas de centímetros foram cada vez mais estudadas. Nos últimos anos, antenas estão cada vez mais presentes, mas nem sempre são percebidas, como, por exemplo, em *notebooks* (wireless), celulares, *bluetooths*, campainhas, controles de alarmes etc. [11].

Por antena entende-se um aparelho metálico para radiação ou recepção de ondas de rádio. O *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas* assim define a antena: “[...] *a means for radiating or receiving radio waves*” que traduzido quer dizer “um meio para irradiar ou receber ondas de rádio”.

Em outras palavras, a antena constitui estrutura de transição entre o espaço livre e o guia de onda. O guia de onda ou linha de transmissão pode ser um cabo coaxial que transporta energia eletromagnética da fonte do transmissor para a antena ou da antena para o circuito receptor.

A antena tem por base o princípio de que uma oscilação elétrica (variação de carga elétrica) propicia uma onda eletromagnética. Uma onda eletromagnética, ao atingir uma antena, propicia uma variação de carga — corrente induzida. As antenas, em geral,

convertem elétrons em energia de fótons ou vice-versa. A energia do fóton pode ser expressa, conforme a equação (1), que se segue:

$$E_{fóton} = h * f \quad (2.1)$$

em que:

h = constante de Planck de valor $6,63 * 10^{-34} Js$; e

f = frequência em Hz.

Os sinais de televisão analógica operavam em frequências de 54Mhz à 698Mhz (canal 2 a 51). Com o advento da TV digital, as frequências de operação passaram a ser superior a 470Mhz (canal 14) e logo foram necessárias várias mudanças [1]. Ou seja, ela opera em uma faixa mais alta que a faixa da televisão analógica. Nesse ínterim, deu-se uma mudança direta nas antenas, pois existe uma relação com a frequência de operação do sistema — as antenas na televisão digital devem ser menores para uma melhor qualidade do sinal.

Existem vários tipos de antenas, que são: de fio, de abertura, de *microchip*, *array*, refletores, *lens* etc. Nas cidades são comuns as antenas do tipo de fio (condutores retos) e parabólicas. A antena digital, conforme evidenciado na Figura 1, a seguir, possui ganho de 14dBi, opera na frequência de 470 a 890MHz, é do tipo log periódica, com 14 elementos (28 dos dois lados), impedância de entrada de 75 ohms, entre outras características. Seu custo se dá em torno de R\$ 62,90 (sessenta e dois reais e noventa centavos) [10], [15] e [16].



Figura 1: televisão analógica, à esquerda, e televisão digital, à direita [15] e [16]

Para determinados projetos que incluam a instalação de antenas, é preciso considerar as características destas — padrão de radiação, diretividade, ganho, impedância de entrada, eficiência e polarização são alguns dos parâmetros que devem ser considerados.

O presente estudo tratará da distribuição de corrente em uma antena, uma vez que a otimização tem por base tal característica.

2.2 PARÂMETROS BÁSICOS

Entende-se por padrão de radiação a representação gráfica da distribuição de energia irradiada por determinada antena. É uma representação gráfica da radiação da antena em função de coordenadas espaciais. Evidencia em campo distante como a energia de radiação (campo elétrico ou potência de radiação) se comporta em relação ao ponto de observação ao redor da antena. Pode ser uma representação bidimensional ou tridimensional.

Diretividade e ganho indicam a concentração de energia em uma direção, ou seja, a capacidade da antena de direcionar a potência radiada em determinada direção. O ganho poderá ter o mesmo valor desde que a eficiência seja de 100%. Tanto a diretividade quanto o ganho, em geral, são dados em dB.

Impedância de entrada é a vista entre os terminais da antena. Tem relação direta com a eficiência da transferência de energia que é transmitida ou recebida pela antena. Possui valor complexo com parte real composta pela resistência de radiação da antena e outra por resistência de perdas da antena.

A questão da eficiência tem relação com as perdas da antena — na linha de transmissão ou nos condutores e dielétricos. A perda nos condutores e dielétrico está relacionada à eficiência de radiação.

Por fim, a polarização de uma antena é a maneira de se transmitir sinal eletromagnéticos em uma direção específica. Como exemplo: uma polarização linear vertical, ou linear horizontal, entre outras. A antena receptora deve estar posicionada na mesma direção específica da transmissora.

2.3 DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE NA ANTENA FILAMENTAR

Devido a uma distribuição de corrente ao longo de um fio, existem algumas frequências que são mais atrativas para se trabalhar com determinados comprimentos do elemento. Estas apresentam impedâncias de entrada com parte real e imaginária. Nesse ínterim, determinados comprimentos apresentam impedância de entrada em torno de 50 a 200 Ω e baixo valor de reatância, mostrando-se eficientes para a construção na prática devido

ao casamento de impedância com o circuito ligado à antena. As frequências de meio comprimento de onda e seus múltiplos (inteiros ímpares: 3; 5; 7...) são os casos praticáveis, como se segue:

$$\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \frac{7\lambda}{2} \dots \quad (2.2)$$

Ao mesmo tempo em que existem as antenas mais convenientes de se trabalhar, têm-se as antenas que não são praticáveis. Nessas frequências, a corrente é quase zero no ponto de alimentação. A impedância de entrada torna-se muito alta e reativa — o que pode dificultar o projeto do correspondente circuito de casamento de impedância. São elas múltiplos do meio comprimento de onda (inteiros pares: 2; 4; 6...), como se segue:

$$\lambda, 2\lambda, 3\lambda, 4\lambda \dots \quad (2.3)$$

Um dos parâmetros mais importantes de uma antena é a impedância de entrada, ou, pelo menos, é de grande interesse. Em geral, é composta por um número complexo. Composta de uma resistência (parte real) e uma reatância (parte imaginária).

Uma monopolo possui metade do tamanho do dipolo. Existe a presença do plano terra. O ganho do monopolo é 3dB a mais que o seu respectivo dipolo.

2.4 O MÉTODO DOS MOMENTOS

2.4.1 Caso geral – equação de Pocklington

O Método dos Momentos é um método geral para a resolução de problemas lineares. Pode ser aplicado a problemas eletromagnéticos, como antenas filamentosas.

O método consiste em dividir a estrutura em segmentos. Assim, é possível assumir uma distribuição de corrente constante ao longo de cada segmento. Com o valor da corrente, é possível obter o valor do campo elétrico pelo método clássico (EICE: equação integral do campo elétrico) [4].

Na equação integral de Pocklington de 1987, a corrente no fio fino é, aproximadamente, senoidal, e o raio do fio é bem menor que o comprimento de onda (λ). Assume-se, também, que o elemento se encontra no eixo Z.

A equação integral clássica para uma dada distribuição de corrente é dada como:

$$\int I(z')K(z, z')dz' = E^i(z) \quad (2.4)$$

Da condição de Lorentz [4], tem-se:

$$\frac{\partial A_z}{\partial z} = -j\omega\epsilon_0\Phi \quad (2.5)$$

Sendo: A_z o vetor potencial magnético na componente Z.

Φ o escalar potencial elétrico.

Com base na relação de Lorentz (2.5) e no campo elétrico, por ser expresso pelas variáveis A_z e Φ :

$$E = -j\omega\mu_0A - \nabla\Phi \quad (2.6)$$

Reescrevendo a equação anterior (considerando-se distribuição, apenas, em z),

$$E_z = -j\omega\mu_0A_z - \frac{\partial\Phi}{\partial z} \quad (2.7)$$

Usando a equação de Lorentz (isolando Φ) na equação anterior (tem-se campo elétrico e o vetor potencial magnético apenas como variáveis):

$$E_z = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} + \beta^2 A_z \right) \quad (2.8)$$

Considerando-se uma distribuição de corrente, apenas, na direção z:

$$dE_z = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \left[\frac{\partial^2 \psi(z, z')}{\partial z^2} + \beta^2 \psi(z, z') \right] Jdv' \quad (2.9)$$

Em que: $\psi(z, z')$ constitui a função do espaço livre de Green. Dada por:

$$\psi(z, z') = \frac{e^{-j\beta R}}{4\pi R} \quad (2.10)$$

Em que:

R a distância entre o ponto de observação (x, y, z) e o ponto da fonte (x', y', z') .

Dada por:

$$R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} \quad (2.11)$$

O campo elétrico total é a integral da equação dE_z :

$$E_z = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iiint \left[\frac{\partial^2 \psi(z, z')}{\partial z^2} + \beta^2 \psi(z, z') \right] J dv' \quad (2.12)$$

Apenas a densidade de corrente deve ser necessária, sendo uma densidade apenas na superfície do fio. Nesse ínterim, é possível reduzir a equação do campo elétrico:

$$E_z = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \oint_{L/2}^{L/2} \left[\frac{\partial^2 \psi(z, z')}{\partial z^2} + \beta^2 \psi(z, z') \right] J_s dz' d\varphi \quad (2.13)$$

Sendo o raio menor que o comprimento de onda ($a \ll \lambda$), pode-se reduzir a uma integral de linha.

$$E_z = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \int_{L/2}^{L/2} \left[\frac{\partial^2 \psi(z, z')}{\partial z^2} + \beta^2 \psi(z_0, z') \right] I(z') dz' \quad (2.14)$$

Assumindo-se que o campo incidente ou impresso E_z^i não possui perdas, pode-se considerar $E_z^i = -E_z^s$ e reescrever a equação anterior da seguinte maneira:

$$\frac{1}{j\omega\epsilon_0} \int_{-L/2}^{L/2} I(z') \left[\frac{\partial^2 \psi(z, z')}{\partial z^2} + \beta^2 \psi(z_0, z') \right] dz' = -E_z^i(z) \quad (2.15)$$

Essa é a equação de Pocklington. Por conveniência, ela pode ser reescrita como:

$$\int_{-L/2}^{L/2} I(z') K(z, z') dz' = -E_z^i(z) \quad (2.16)$$

Em que:

$$K(z, z') = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \left[\frac{\partial^2 \psi(z, z')}{\partial z^2} + \beta^2 \psi(z_0, z') \right]$$

2.4.2 Função base e peso

A corrente pode ser aproximada por uma somatória (N) de coeficientes complexos I_n múltiplos de uma função conhecida F_n da seguinte forma:

$$I(z') = \sum_{n=1}^N I_n F_n(z') \quad (2.17)$$

A função $F_n(z')$ é dita como uma função de expansão ou base. Podem ocorrer outros tipos de funções conforme cada caso tratado. A função $F_n(z')$ pode ser do tipo pulso, triangular, senoidal, conforme a escolha desejada. Não há uma forma de escolha inicial. A escolha mais parecida com a distribuição real irá uma convergência de resultados com menos N (segmentos) e logo menos cálculos. Para melhor exemplificar, segue uma das mais simples funções de base:

$$F_n(z') = \begin{cases} 1 & \text{para } z' \text{ pertencente ao segmento} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (2.18)$$

A corrente real será aproximada considerando-se a função base adotada e os coeficientes adequados. Outro fator importante é a quantidade de segmentos que o condutor foi dividido.

Dando continuidade ao método, a equação (2.16), juntamente às equações (2.17) e (2.18), pode ser rescrita como:

$$I_n \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sum_{n=1}^N F_n(z') K(z_m, z') dz' \approx -E_z^i(z_m) \quad (2.19)$$

A equação integral é forçada no segmento m , conforme subscripto z_m . Isolando os coeficientes complexos da função base (expansão) de (2.19), tem-se a equação:

$$I_n \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sum_{n=1}^N F_n(z') K(z_m, z') dz' \approx -E_z^i(z_m)$$

$$f(z_m, z'_n) = \int_{\Delta z'_n} K(z_m, z') dz' \quad (2.20)$$

O campo elétrico incidente no segmento “ m ” pode ser expresso como o somatório das correntes (2.17) para uma dada função base conhecida (2.18): E, assim, usando 2.17 em 2.19 e a expressão de 2.20 pode ser expressa a seguinte equação:

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} I(z') K(z_m, z') dz' \approx I_1 f(z_m, z'_1) + \quad (2.21)$$

$$+ I_2 f(z_m, z'_2) + \dots I_n f(z_m, z'_n) + \dots$$

$$+ I_N f(z_m, z'_N) \approx -E_z^i(z_m)$$

Na Figura 2, demonstra-se a aproximação pelo método dos momentos com a função base tipo pulso. Pode-se chegar a resultados mais precisos desde que a escolha da função base seja a mais parecida com a distribuição real para um determinado número de segmentos (N). Sendo a distribuição de corrente senoidal uma escolha de função base desse tipo, chegue-se a resultados mais convergentes do que uma escolha do tipo pulso. Por exemplo: para um dipolo de comprimento de $0,47\lambda$, a escolha da função base senoidal leva de 15 a 20 segmentos (N) para convergir, satisfatoriamente, enquanto a função pulso de 60 a 80 segmentos (N). Caso o comprimento seja de $0,1\lambda$, serão necessários menos segmentos (N), o que não afetará tanto a complexidade dos cálculos.

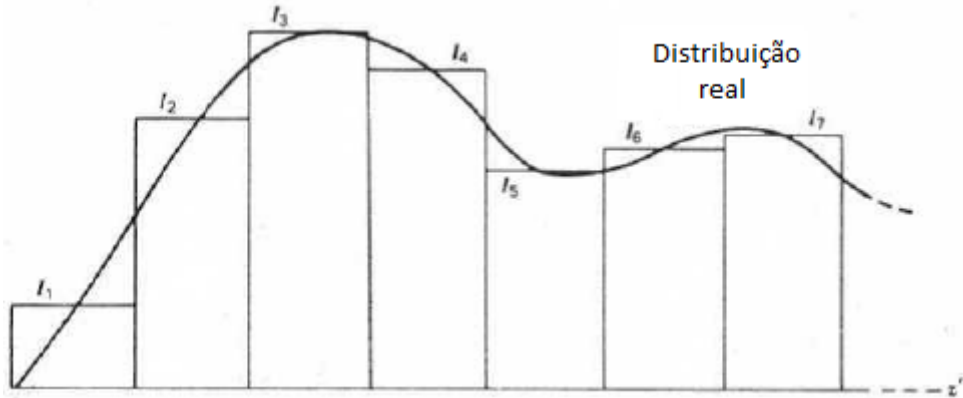


Figura 2: aproximação da corrente com função base [4].

A soma dos campos espalhados, E^s , de todos os N segmentos, é igual ao negativo do campo incidente no ponto Z_m para o caso de transmissão ou de uma fonte localizada a grande distância, que é o caso de recepção. Para uma precisão maior, podem-se usar comprimentos de N menores, ou seja, uma quantidade maior de segmentos (N).

Pode-se resumir a expressão (2.21) em termos de $f(z_m, z'_n)$, I_n e E_z^i (devido à analogia a Lei de Ohm) por Z_{mn} , I_n e V_m , respectivamente, assim, pode-se expressar, por conveniência, a seguinte equação:

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn} I_n = V_m \quad (2.22)$$

Em que:

$$Z_{mn} = f(Z_m, Z'_n)$$

$$V_m = -E_z^i(Z_m)$$

A fonte V_m pode ser analisada como a tensão correspondente devido a um campo elétrico no condutor. Para tanto, têm-se os seguintes modelos:

- a fonte Delta Gap é a mais simples e mais utilizada. Contudo, é a menos precisa para o cálculo da impedância; é mais precisa para pequenos *gaps*; seu uso se dá para uma tensão “V” constante no ponto de alimentação e uma tensão nula nos demais pontos.

A fonte *Frill Generator* foi introduzida para o cálculo do campo distante e próximo de uma antena; o ponto de alimentação é substituído por uma densidade de corrente magnética circunferencial sobre uma abertura circular com raio interno e externo; o cálculo dos raios tem relação com a impedância característica da linha de alimentação, que é utilizada, normalmente, como cabo coaxial. O NEC utiliza uma fonte mista, conhecida como bicônico.

2.4.3 O método *Point Matching*

Para resolver o problema da equação (2.19), faz-se importante N equações. Para tanto, é forçada a condição em N pontos distintos sobre o eixo de Z. Tal processo é chamado de *Point Matching* — um dos casos mais simples do Método dos Momentos. Assim, tem-se um sistema de equações, como pode ser observado na equação (2.23).

$$\begin{aligned}
 I_1 f(z_1, z'_1) + I_2 f(z_1, z'_2) + \dots + I_N f(z_1, z'_N) &= -E_z^i(z_1) \\
 I_1 f(z_2, z'_1) + I_2 f(z_2, z'_2) + \dots + I_N f(z_2, z'_N) &= -E_z^i(z_2) \\
 &\vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\
 &\vdots \\
 I_1 f(z_N, z'_1) + I_2 f(z_N, z'_2) + \dots + I_N f(z_N, z'_N) &= -E_z^i(z_N)
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

Pode ser reescrita na forma de matriz, conforme se segue:

$$\begin{bmatrix} f(z_1, z'_1) & f(z_1, z'_2) & \dots & f(z_1, z'_N) \\ f(z_2, z'_1) & f(z_2, z'_2) & \dots & f(z_2, z'_N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(z_N, z'_1) & f(z_N, z'_2) & \dots & f(z_N, z'_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -E_z^i(z_1) \\ -E_z^i(z_2) \\ \vdots \\ -E_z^i(z_N) \end{bmatrix} \tag{2.24}$$

Ou de forma mais simples (reduzida):

$$[Z_{mn}][I_n] = [V_m] \tag{2.25}$$

A matriz Z_{mn} representa a impedância mútua entre os segmentos do fio. Pode ser obtida adotando-se um tipo de fonte para V_m , em que é possível encontrar as demais incógnitas I_n , tais como:

$$[I_n] = [Z_{mn}]^{-1}[V_m] \quad (2.26)$$

As matrizes $[Z_{mn}]$, $[I_n]$ e $[V_m]$ são chamadas de matriz impedância, matriz corrente e matriz voltagem, respectivamente, devido à analogia com a Lei de Ohm. É apenas uma analogia, pois não correspondem aos valores de ohms, amperes e volts, respectivamente. É apenas uma associação para melhor entendimento.

O Método dos Momentos produz matrizes que representam equações lineares com N incógnitas. Não há uma regra para a escolha de qual função base deve ser escolhida. Mas, na prática, é possível perceber que a escolha da função base, que se assemelha com a função desejada do problema principal, implica a melhor escolha. As funções bases mais comuns são: pulso, triangular, senoidal. Até mesmo trigonométricas podem ser utilizadas.

O *Point Matching* não satisfaz a condição de contorno em todos os pontos da antena filamentar em análise, mas sim, apenas em alguns pontos discretos. Mesmo assim, bons resultados são encontrados. Na Figura 3, evidencia-se a convergência da impedância de entrada para o modelo *Point Matching* com vários N adotados.

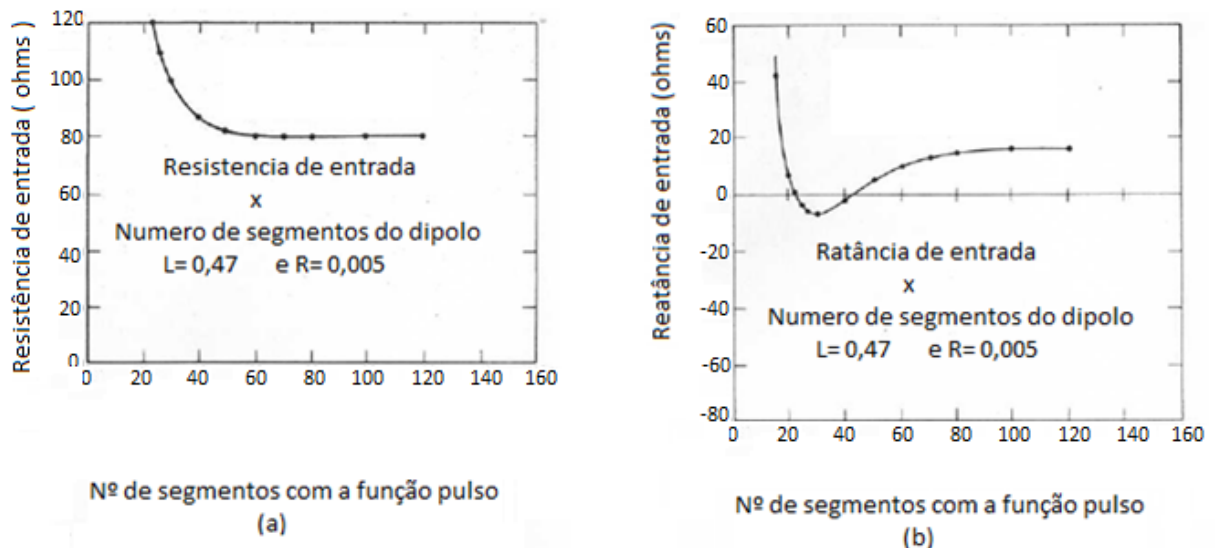


Figura 3: zin: (a) resistência versus N.º segmentos (b) reatância versus N.º segmentos [4].

Delta Gap e *Frill Generator* (tradução: gerador franja) são os modelos de fonte mais utilizados, em relação à condução/alimentação por uma fonte de voltagem simétrica, consoante Figura 4.

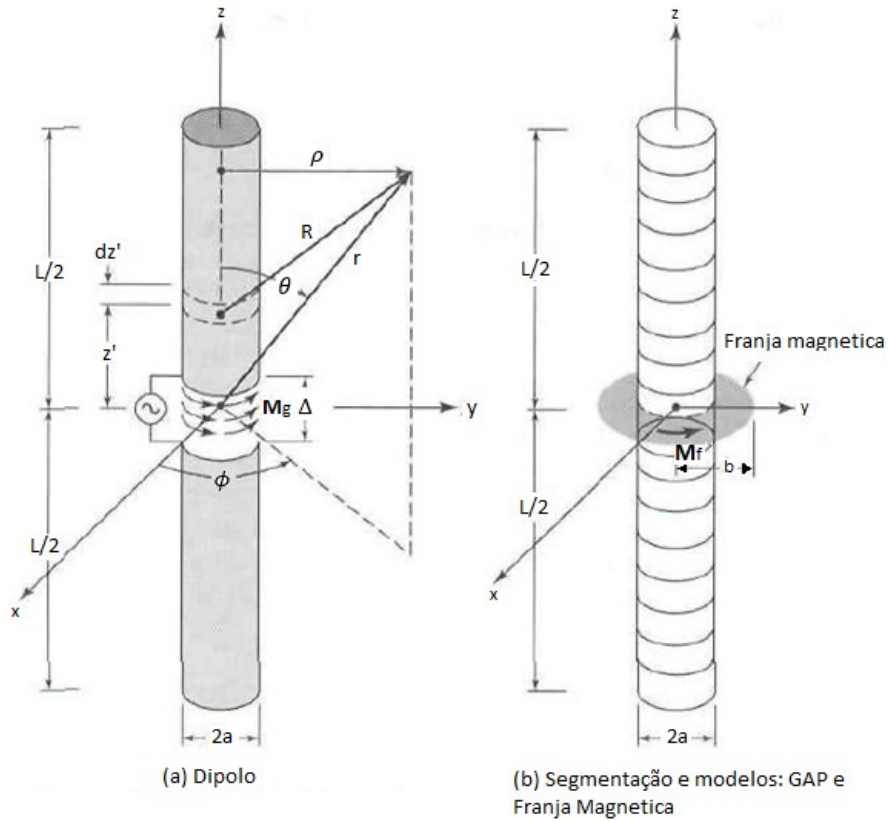


Figura 4: modelo de fonte GAP e Franja Magnética [2]

No caso do Delta Gap, tem-se o modelo mais simples. Contudo, é menos exato entre os dois. Nesse sentido, no ponto de alimentação, se tem tensão de excitação dada por V_i , ao passo que, nos demais pontos, a tensão é zero. Logo, o campo elétrico impresso é representado por um valor de:

$$E_z^i = \frac{V_i}{\Delta} \quad (2.27)$$

Em que:

$\Delta = \text{gap}$ onde a tensão é aplicada.

Já o modelo *Magnetic Frill* (borda magnética) introduz um anel de corrente magnética no ponto de alimentação do fio. O anel é composto por um raio interno dito como “a” e outro raio externo dito como “b”. O campo elétrico impresso é representado por um valor de:

$$E_z^i \left(\rho = 0, \frac{l}{2} \leq z \leq \frac{l}{2} \right) = -\frac{V_i}{2 \ln \left(\frac{b}{a} \right)} \left[\frac{e^{-jkR_1}}{R_1} - \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} \right] \quad (2.28)$$

Em que:

$$R_1 = \sqrt{z^2 + a^2}$$

$$R_2 = \sqrt{z^2 + b^2}$$

Uma expressão útil que associa a impedância característica de uma linha de transmissão com a relação “b/a” do anel de corrente magnética é dada como:

$$Z_c = \sqrt{\frac{\mu_0 \ln \left(\frac{b}{a} \right)}{\varepsilon_0 2\pi}} \quad (2.29)$$

O *Point Matching* (ou método da colocação) adota pontos discretos para satisfazer a condição de contorno. Assim, a fonte utiliza a função Delta de Dirac e a corrente a função Pulso. Outras formas fazem uso de funções no intervalo do segmento, com relação à fonte. Estas são ditas funções de ponderação ou de teste. Se a função de teste corresponde à função base, considera-se esta método de Galerkin. As matrizes Z_{mn} e V_m podem ser vistas com a presença da função de ponderação:

$$Z_{mn} = \int_{-lm/2}^{+lm/2} W_m \cdot E_n^s(l) dl \quad (2.30)$$

$$V_m = - \int_{-lm/2}^{+lm/2} W_m \cdot E^i(l) dl \quad (2.31)$$

Para o caso de mais de um elemento, ou seja, mais de um fio, o Método dos Momentos, também, pode ser utilizado. Do mesmo modo, a matriz resultante será uma matriz composta por todos os segmentos. Consequentemente, tem-se uma ordem de matriz maior, acarretando maior tempo de processamento. O método dos momentos pode ser usado para uma estrutura com 1 ou mais 2 elementos e, também, pode ser utilizado para estruturas planas com as devidas limitações [4].

2.4.4 Método Garlekin – Senoidal

Uma outra função em destaque é a *Piecewise Sinusoid* (PWS). Quando se utiliza a mesma função tanto na base (expansão) quanto na ponderação (peso), tem-se um método de Garlekin. Como dito, a escolha da função base ou de ponderação não possui uma regra, ao passo que a escolha de uma função que se assemelha com a função desejada traz resultados mais convergentes com um quantidade menor de segmentos: assim a escolha de uma função base mais próxima da função desconhecida retornará resultados convergentes com uma quantidade menor de subdivisões em comparação a outra função que não seja tão parecida. Sabendo que a corrente possui uma característica senoidal, a escolha da PWS acarreta em bons resultados com, apenas, alguns N segmentos:

$$F_n(z) = \hat{z} \frac{\text{sen}\beta(z - z_{n-1})}{\text{sen}\beta(z_n - z_{n-1})} \quad z_{n-1} \leq z < z_n \quad (2.32)$$

$$F_n(z) = \hat{z} \frac{\text{sen}\beta(z_{n+1} - z)}{\text{sen}\beta(z_{n+1} - z_n)} \quad z_n \leq z < z_{n+1} \quad (2.33)$$

São necessários dois segmentos para formar a estrutura, ou seja, cada segmento possui dois pedaços da senoide, exceto os segmentos da extremidade. A Figura 5, a seguir, ilustra tal característica.

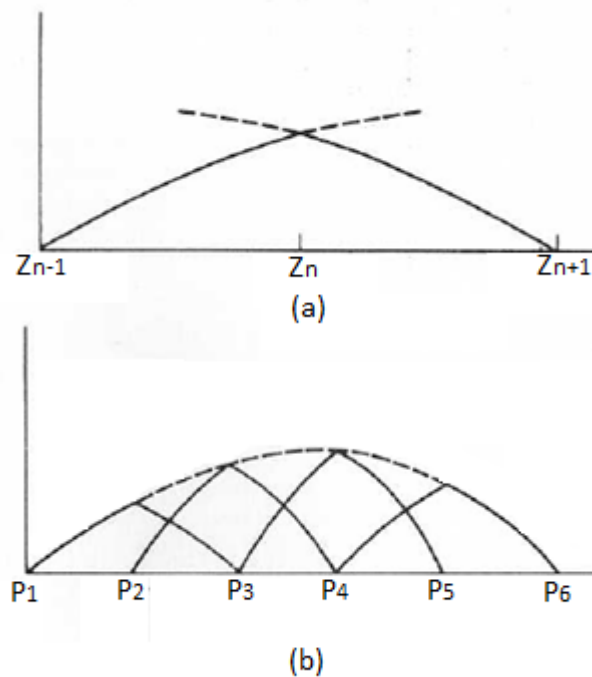


Figura 5: (a) *piecewise sinusoidal* (2 segmentos) (b) *piecewise sinusoidal* (5 segmentos) [4].

Com alguns segmentos, já é possível chegar a bons resultados, conforme expresso na Figura 6. Com $N = 5$ se tem maior precisão em comparação ao método *Point Matching* e a PWS em relação à impedância de entrada (resistência).

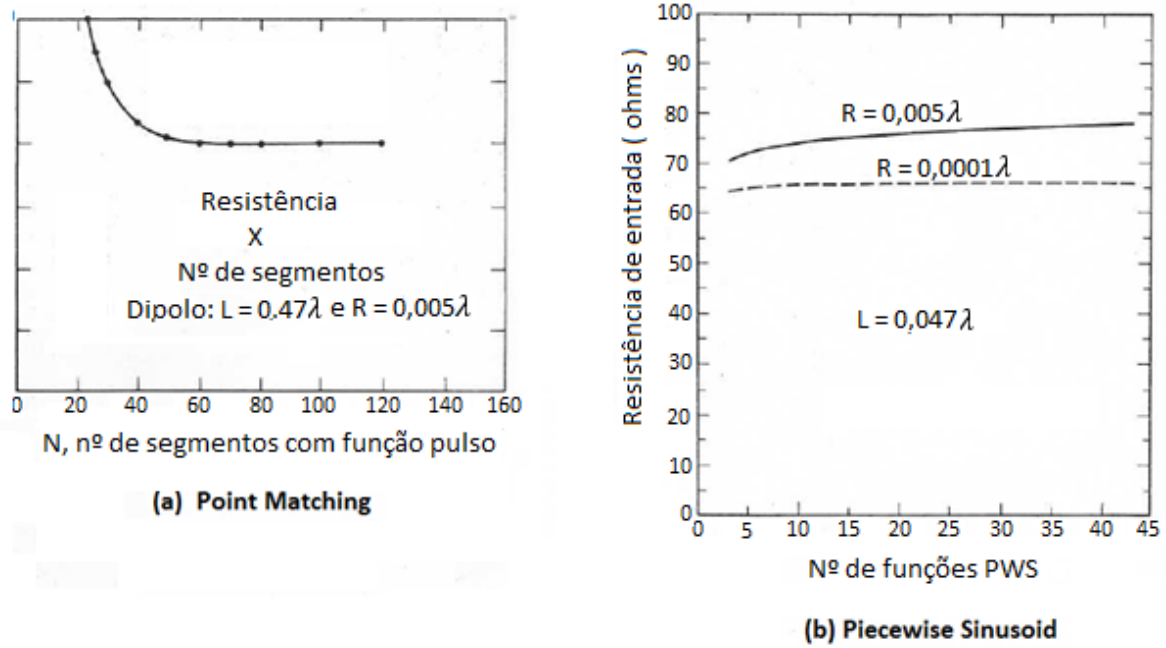


Figura 6: (a) Resistência *versus* n.º segmentos (b) Resistência *versus* n.º segmentos [4].

Por fim, a matriz de elementos generalizados é dada pela forma geral para segmentos na direção z :

$$\begin{aligned}
 Z_{mn} &= \int_{z_{m-1}}^{z_{m+1}} I_m \cdot E_n^S dz \\
 &= - \left[\int_{z_{m-1}}^{z_m} \frac{\sin \beta(z-z_{m-1})}{\sin(\beta \Delta z_m)} + \int_{z_m}^{z_{m+1}} \frac{\sin \beta(z_{m+1}-z)}{\sin(\beta \Delta z_m)} \right] \frac{j30}{\sin(\beta \Delta z_n)} \\
 &\quad \left[\frac{e^{-j\beta R_{n-1}}}{R_{n-1}} - 2 \cos(\beta \Delta z_n) \frac{e^{-j\beta R_n}}{R_n} + \frac{e^{-j\beta R_{n+1}}}{R_{n+1}} \right] dz
 \end{aligned} \tag{2.34}$$

Em que:

$$R_{n-1} = \sqrt{\rho^2 + (z - z_{n-1})^2}$$

$$R_n = \sqrt{\rho^2 + (z - z_n)^2}$$

$$R_{n+1} = \sqrt{\rho^2 + (z - z_{n+1})^2}$$

$$\Delta z_n = z_n - z_{n-1} = z_{n+1} - z_n$$

$$\Delta z_m = z_m - z_{m-1} = z_{m+1} - z_m$$

No caso de antenas log periódicas, tem-se uma conexão paralela aos dipolos da antenas, que é a linha de transmissão relacionada à matriz de impedância de circuito aberto $[Z_{mn}]$. Assim, o uso de uma matriz admitância de curto circuito é mais conveniente $[Y_{mn}]$. Pode ser visto como uma rede de portas que interconectam (portas da linha de transmissão e os elementos da antenas). Pode ser associada uma fonte I_s e uma impedância terminal Y_t à estrutura final. Assim, tem-se determinada matriz de tensão aplicada aos elementos da antena log periodica que devem ser encontrada. A corrente total aplicada consiste no produto da soma das matrizes admitância da antena e da linha de transmissão pela matriz das tensões aplicada aos elementos. Definindo uma matriz de corrente aplicada com 1A em determinado ponto da antena (normalmente o centro) e uma tensão nula nos demais pontos da antena, é possível obter a matriz de tensões aplicada aos elementos [4] e [8].

2.5 ESTRUTURAS OTIMIZADAS

No presente estudo abordou-se a otimização por ângulo dos elementos (fios). Logo, um elemento do *array* foi dividido em fios, que cada fio poderá ser rotacionado em ângulo em busca da otimização de ganho na direção X, conforme evidenciado em [6].

De forma básica, um elemento detentor de dimensões acima de um comprimento de onda (1λ) para a frequência analisada apresenta uma inversão de fase na distribuição de corrente sobre o comprimento do elemento. Assim, a rotação em ângulo busca melhorar o ganho tratando as correntes que não contribuem construtivamente.

Em estruturas com múltiplos pares de $(1/2)\lambda$, a impedância apresenta elevado valor. Assim, fez-se uso de múltiplos ímpares do meio comprimento de onda (3; 5; 7...). Inicialmente, $(3/2)\lambda$ devido à busca de estruturas menores e, posteriormente, outros valores em busca de novas estruturas visando melhores ganhos [21].

3.0 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: 1 ELEMENTO

Na presente seção apresentam-se algumas simulações computacionais com antenas formadas por apenas um fio. O elemento que forma a antena pode ser visto como um conjunto de fios que o subdivide, sendo seu raio com comprimento médio em torno de $0,005\lambda$.

Para tanto, fazendo uso dos *softwares* GRADMAX, 4nec2 e LOGYAGI, alguns pontos relevantes foram destacados para melhor entendimento da estrutura radiante.

3.1 ANTENA FILAMENTAR

O dipolo de meio comprimento de onda é um dos mais utilizados (em antenas filamentosas) devido à sua simplicidade. Possui um elemento fino, com corrente senoidal filamental, com alimentação central, configurando-se como um condutor perfeito. Uma das vantagens do elemento de meio comprimento de onda é sua característica ressonante, conforme evidenciado na Figura 7, a seguir. Em verdade, a ressonância é para comprimento menor — na medida em que o elemento engrossa, o comprimento diminui, a fim de manter a ressonância.

Têm-se as seguintes equações de corrente e campo elétrico, respectivamente, para um fio de meio comprimento de onda:

$$I(z) = I_m \text{sen} \left[\beta \left(\frac{\lambda}{4} - |z| \right) \right] \quad |z| \leq \frac{\lambda}{4} \quad (3.1)$$

$$E_\theta = j\omega\mu \text{sen}\theta \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \int I(z') e^{j\beta z' \cos\theta} dz' \quad (3.2)$$

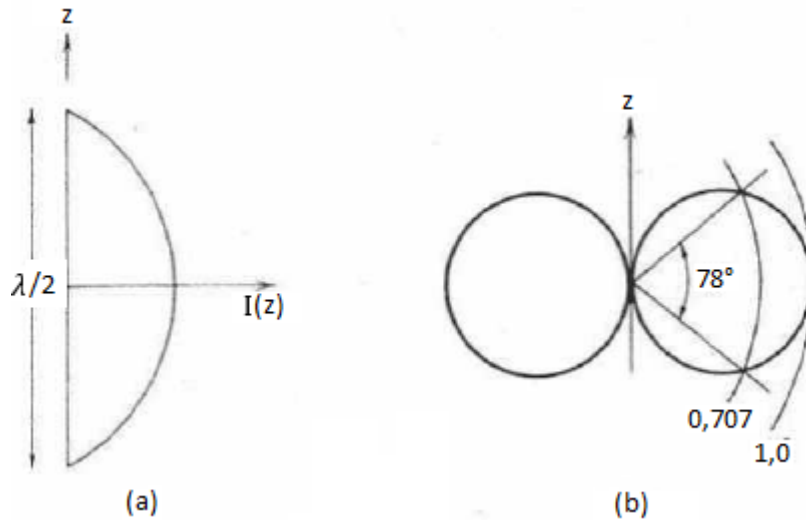


Figura 7: (a) distribuição de corrente ao longo do fio (b) diagrama de radiação [4].

Utilizando a equação (3.1) na equação (3.2), tem-se:

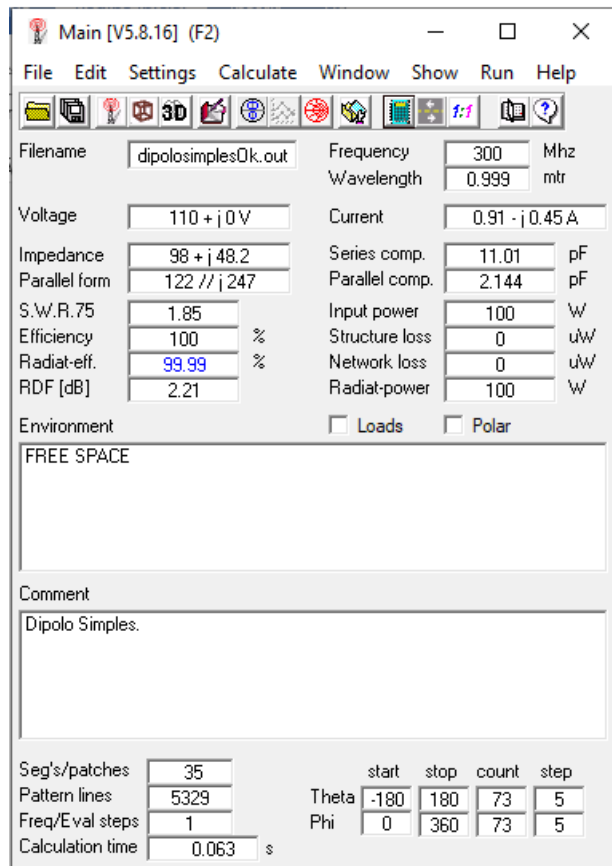
$$E_{\theta} = j\omega\mu \frac{2I_m}{\beta} \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \text{sen}\theta \frac{\cos\left[\left(\frac{\pi}{2}\right)\cos\theta\right]}{\text{sen}^2\theta} \quad (3.3)$$

E a função normalizada (considerando uma estrutura filamentar) sendo:

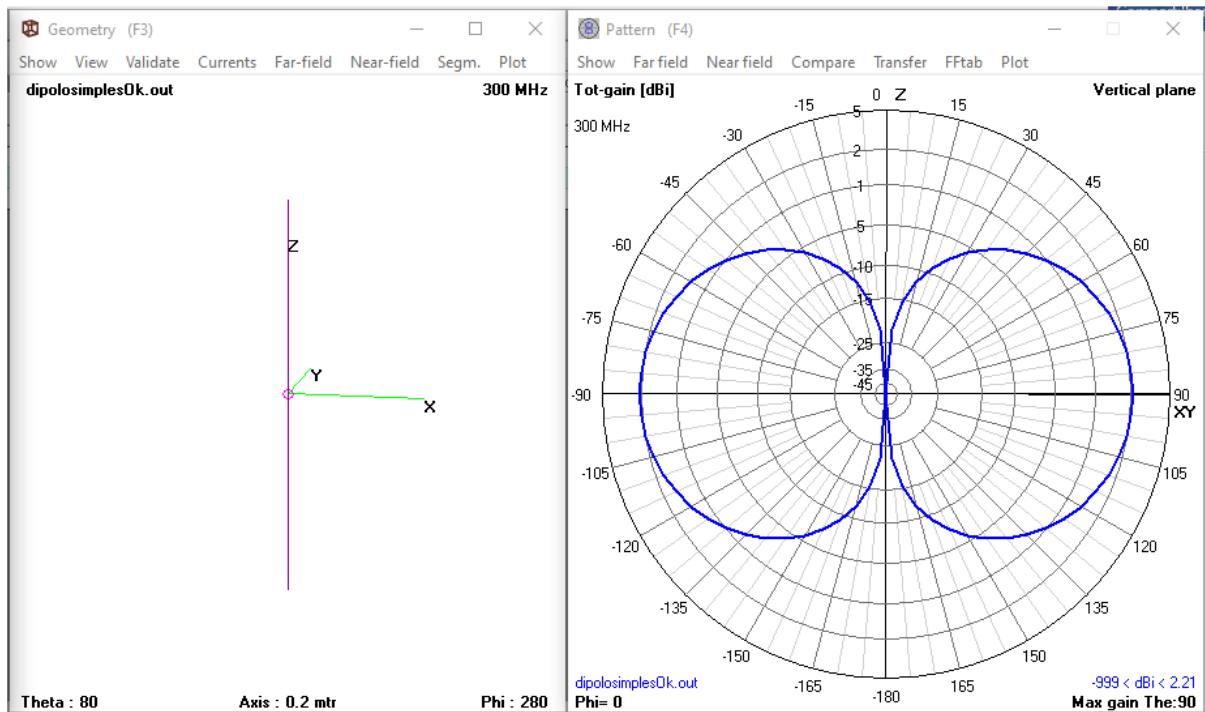
$$f(\theta) = \frac{E_{\theta}}{E_{\theta}(\text{máximo})}$$

$$F(\theta) = g(\theta)f(\theta) = \frac{\cos\left[\left(\frac{\pi}{2}\right)\cos\theta\right]}{\text{sen}\theta} \quad (\text{para antena } \frac{\lambda}{2}) \quad (3.4)$$

No presente estudo, fizeram-se algumas simulações com o intuito de comparar os resultados computacionais com aqueles da literatura. Na Figura 8, foi analisado um dipolo no 4nec2 com $N = 35$ (número de segmentos), $R = 0,005 \lambda$ (raio) e $L = 0,50 \lambda$ (comprimento). Na Tabela 1, pode ser verificado como a impedância de entrada, Z_{in} , e Ganho da antena se alteram devido à variação de N .



(a)



(b)

Figura 8: dipolo de $0,5\lambda$ em $4nec2$

Tabela 1: n.º segmentos *versus* Zin e Ganho, em 4nec2

Dipolo reto de $0,5 \lambda$ em 4nec2					
N	Zin	Ganho	N	Zin	Ganho
5	$88,8 + j48,7$	2,13	55	$99,2 + j46,7$	2,21
15	$95,0 + j49,7$	2,20	65	$99,8 + j46,3$	2,21
25	$97,0 + j49,0$	2,21	75	$100 + j45,9$	2,21
35	$98,0 + j48,2$	2,21	85	$101 + j45,6$	2,21
45	$98,6 + j47,4$	2,21	95	$102 + j45,4$	2,21

Em 4 NEC2, após N igual a 55, já se tem um alerta da proximidade dos limites para a análise de antenas filamentosas pelo programa. O alerta ocorre em relação ao comprimento do segmento — Não se deve usar um comprimento de segmentos menor que a metade do raio do fio. Logo, os valores podem apresentar erros numéricos que, por sua vez, podem divergir da realidade.

Já no *software* GRADMAX, consoante Figura 9, $N = 36$, raio = $0,005\lambda$ e $L = 0,50\lambda$.

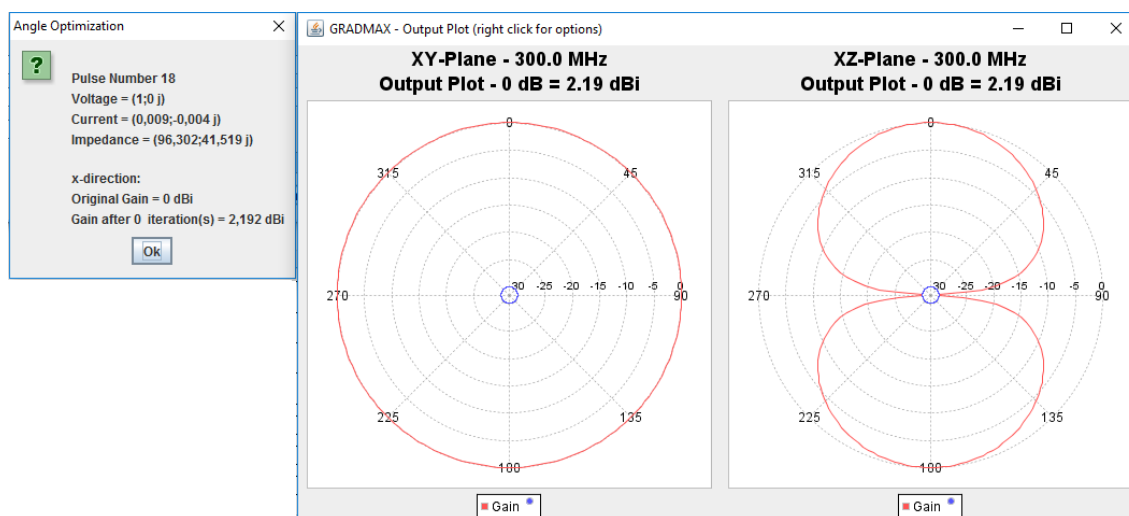


Figura 9: dipolo de $0,5\lambda$ em GRADMAX, $N=36$

Percebeu-se a relação de Zin e o ganho em relação à variação de N em 4nec2 e GRADMAX. Na Tabela 2, a seguir, têm-se os valores para vários N analisados em GRADMAX. Os valores para N maiores que 80 podem levar a resultados numéricos imprecisos, e devem ser evitados.

Tabela 2: n.º de segmentos *versus* Zin e Ganho em GRADMAX

Dipolo reto de $0,5 \lambda$ em GRADMAX					
N	Zin	Ganho	N	Zin	Ganho
6	$82,7 + j34,9$	2,12	56	$98,6 + j42,3$	2,19
16	$91,2 + j38,0$	2,17	66	$99,4 + j42,4$	2,19
26	$94,4 + j40,3$	2,18	76	$100,1 + j42,4$	2,19
36	$96,3 + j41,5$	2,19	86	$100,6 + j42,4$	2,19
46	$97,6 + j42,1$	2,19	96	$101,1 + j42,3$	2,19

Os resultados tanto em 4nec2 quanto em GRADMAX apresentam algumas características importantes. Em relação ao ganho, é possível observar que, em ambos os casos, para valores de N pequenos, se tem uma boa resposta do ganho de uma antena. Nesse ínterim, como o foco do presente estudo foi o ganho e o GRADMAX possui um limite para os segmentos (N), foi possível uma análise com estruturas com mais de um elemento ou com comprimentos maiores que λ , bem como análises com poucos segmentos por fio e boas respostas em ganho.

3.1.1 Ressonância

Em 4nec2, é possível realizar uma rápida otimização para determinado parâmetro. Assim, fez-se uso do dipolo simples de $0,5 \lambda$ com $N = 5$, buscando eliminar a reatância da impedância de entrada e instigando a antena ressonar na frequência trabalhada. O resultado obtido foi de $0,4611 \lambda$ — bem próximo da literatura ($0,475 \lambda$) [4]. As mesmas simulações foram realizadas para vários N tanto para 4nec2 quanto GRADMAX. Nesse ínterim, as Tabela 3 e 4, evidenciam a variação de N, Zin e ganho em 4nec2 e GRADMAX, respectivamente.

Tabela 3: n.º de segmentos *versus* Zin e ganho em 4nec2 para dipolo de $0,4611 \lambda$

Dipolo reto de $0,4611 \lambda$ em 4nec2					
N	Zin	Ganho	N	Zin	Ganho
5	$71,3 - j0,17$	2,07	55	$72,7 - j0,99$	2,14
15	$72,6 + j1,29$	2,13	65	$72,7 - j1,26$	2,14
25	$72,9 + j0,81$	2,13	75	$72,8 - j1,43$	2,14
35	$72,8 + j0,11$	2,14	85	$72,9 - j1,56$	2,14
45	$72,7 - j0,54$	2,14	95	$73,0 + j1,69$	2,14

Tabela 4: n.º de segmentos *versus* Z_{in} e ganho em GRADMAX para dipolo de $0,4611\lambda$

Dipolo reto de $0,4611 \lambda$ em GRADMAX					
N	Z_{in}	Ganho	N	Z_{in}	Ganho
6	$63,4 - j12,23$	2,05	56	$70,7 - j5,9$	2,12
16	$68,1 - j9,20$	2,10	66	$70,8 - j5,9$	2,12
26	$69,4 - j7,3$	2,11	76	$70,9 - j5,8$	2,12
36	$70,4 - j6,5$	2,12	86	$71,0 - j5,8$	2,12
46	$70,4 - j6,1$	2,12	96	$71,1 - j5,8$	2,12

Diante do exposto, é possível observar que os resultados entre os dois programas são aproximados, conforme literatura [4] e [2]. Simulações computacionais podem gerar dados bem próximos da realidade, com suas limitações e aproximações. Cada programa pode gerar dados bem próximos da realizada e divergirem em situações específicas (como limites). A extrapolação de parâmetros pode levar a erros numéricos ou fugir da realidade. Contudo, para o dipolo com meio comprimento de onda, o ganho é pouco influenciado pelo número de segmentos. Já a impedância de entrada é sensível a N e ao tamanho do elemento. No caso da ressonância, um pequeno encurtamento acarreta valor diferente da impedância de entrada — no caso, a uma impedância puramente resistiva, possibilitando melhor casamento de impedância nos demais circuitos que se ligam à antena. No caso de GRADMAX, a ressonância para o dipolo simples é encontrada com $L = 0,466\lambda$ com $N = 96$, que resulta em uma $Z_{in} = 74,32 - j0,02$ e ganho de 2,13 dBi; e, para 4nec2, com $L = 0,4611 \lambda$ com $N = 5$. A ideia inicial sobre variação de N, ganho e impedância de entrada se fez necessária nas simulações evidenciadas a seguir, para a percepção da influência sobre os resultados obtidos.

3.2 MONOPOLO

O monopolo de $0,25\lambda$ é equivalente ao de dipolo de $0,50\lambda$, com algumas observações. O uso de monopolo equivalente ao dipolo será necessário, pois o GRADMAX efetua a otimização por ângulo nesse formato. O motivo do uso de monopolo é a redundância de cálculos comparado ao dipolo. E, assim, menos cálculos podem ser realizados. Havia limite de recursos computacionais na época em que o *software* foi desenvolvido (espaço em memória e elevado tempo de processamento). A impedância de entrada equivale à metade do dipolo simples. Já o ganho é o dobro linearmente, ou seja, 3dB maior que o dipolo simples, estando presente próximo à um plano terra – plano considerado um condutor perfeito. A mesma relação é encontrada nas simulações com GRADMAX e 4nec2, conforme evidenciado nas Figura 10 e 11. Nas Tabelas 5 e 6 demonstra-se os resultados de Z_{in} e do ganho, respectivamente.

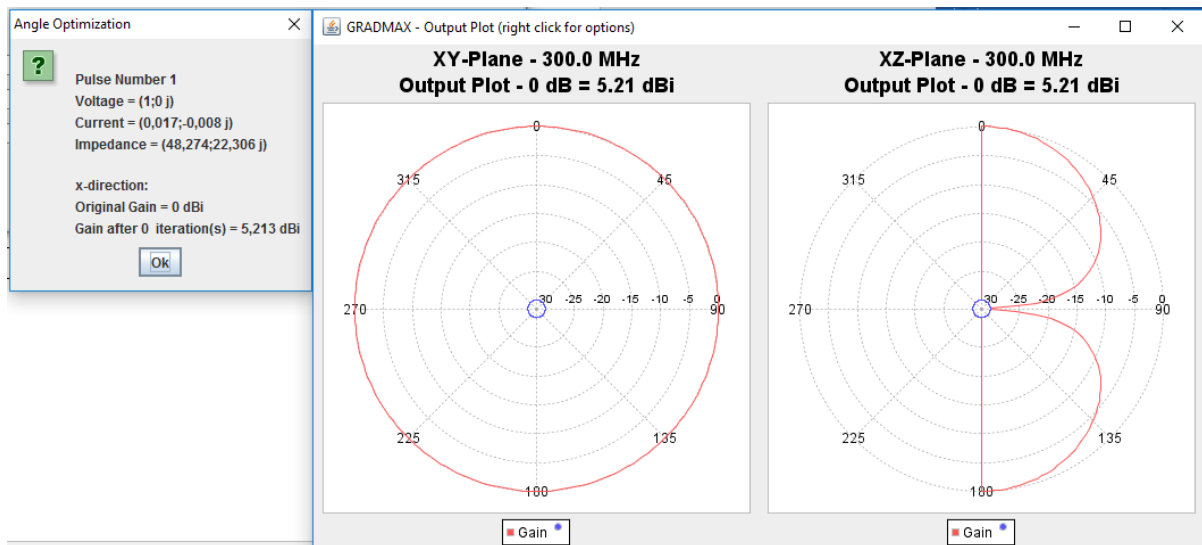
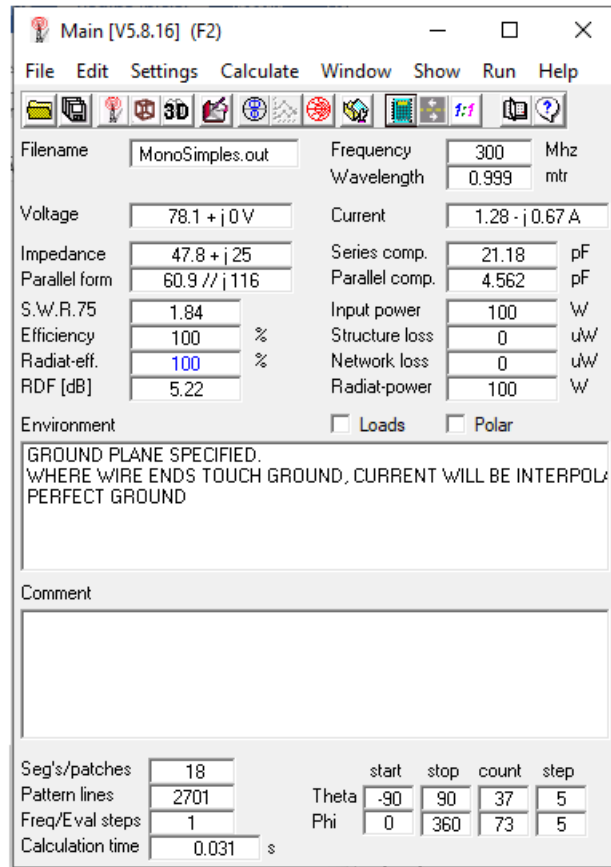
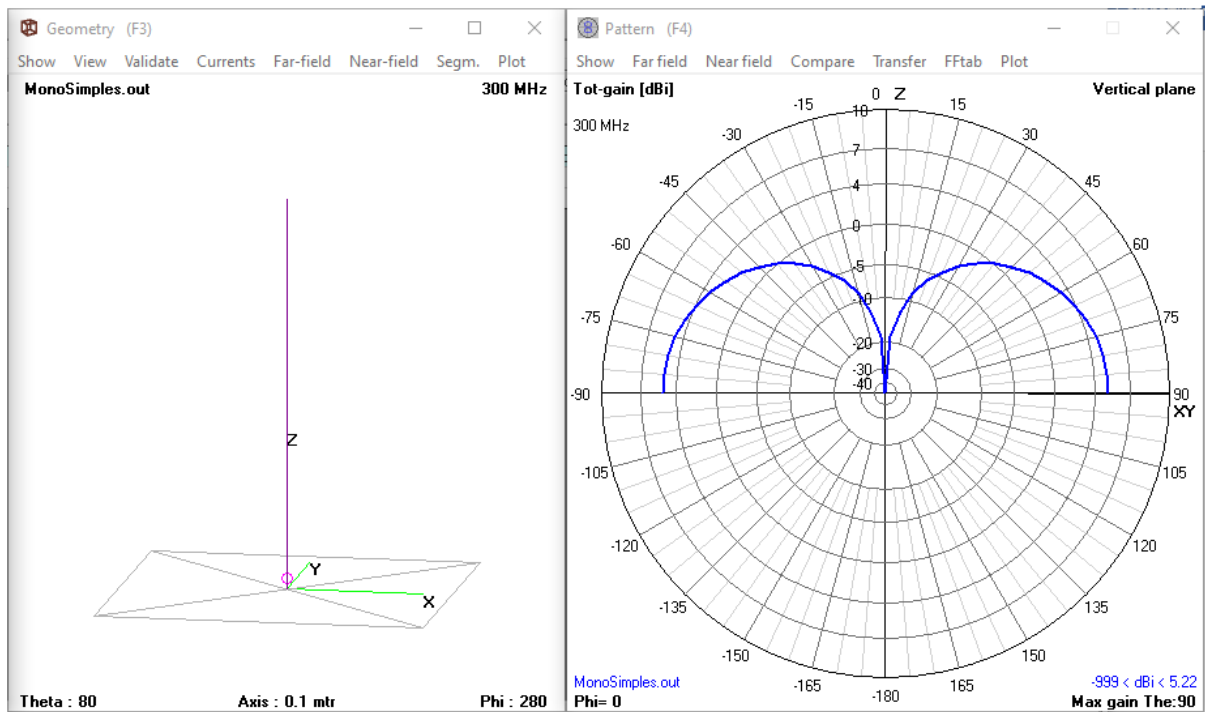


Figura 10: monopolo de $0,25\lambda$, $N=18$, $R=0,005\lambda$, em GRADMAX



(a)



(b)

Figura 11:monopolo de $0,25\lambda$, $R=0,005\lambda$, em $4nec2$

Tabela 5: relação entre dipolo e monopolo em 4nec2

4nec2	Zin	Ganho
Dipolo (N=35)	98,0 + j 48,2	2,21
Monopolo (N = 18)	47,8,0 + j 25	5,22
Relação:	2,00 (parte real)	-3,01dB
Dipolo/Monopolo	2,00 (parte imaginaria)	

Tabela 6: relação entre dipolo e monopolo em GRADMAX

GRADMAX	Zin	Ganho
Dipolo (N=36)	96,30 + j 41,50	2,19
Monopolo (N = 18)	48,27 + j 22,30	5,21
Relação:	1,99 parte real	-3,02dBi
Dipolo/Monopolo	1,86 parte imaginaria	

Em tais simulações, foram demonstradas algumas características importantes, como a relação de equivalência entre dipolo e monopolo tanto para o ganho quanto para a impedância de entrada. Aqui vale destacar que o diagrama de radiação é o mesmo em ambos os casos (com a observação de: no caso do monopolo somente existe diagrama em um dos hemisférios no plano horizontal).

3.3 DIPOLO DE $1,5\lambda$

Será analisado um dipolo com $1,5\lambda$ que detém $R = 0,005\lambda$ e frequência 300Mhz. Em 4nec2, possui ganho de 3,65dBi com $Z_{in} = 128 + j51,4$ para $N = 31$. Já em GRADMAX, o ganho foi de 3,64dBi com $Z_{in} = 133,81 + j39,30$ para $N = 100$.

Os monopolos em 4nec2 têm ganho de 6,66dBi e $Z_{in} = 62,6 + j29,1$ para $N = 15$ em modo “*perfect gnd*”. E, em GRADMAX, o ganho é de 6,68dBi e $Z_{in} = 67,11 + j21,46$ com $N = 50$. É possível observar que, do dipolo para o monopolo equivalente, houve correspondência de +3dB no ganho e metade da impedância, conforme se espera para elementos a seguir de 1λ . Os resultados podem ser observados nas Figura 12 à Figura 15.

Em GRADMAX foi novamente construído um monopolo de $0,75\lambda$, porém, com seis fios retilíneos conectados. Logo, é possível realizar a otimização por ângulo de cada fio por meio daquele *software*. O valor do ganho é de 6,67 dBi e $Z_{in} = 70,69 + j 19,28$ para N

= 25 em cada fio, exceto no último, que ficou com 24, totalizando 149 pulsos (o máximo permitido pelo *software*). Tais valores são próximos aos valores obtidos com apenas um fio. A diferença se dá devido à mudança de N. Realizando uma otimização por ângulo, tem-se um ganho de 5,29 dBi na direção X (menor que o ganho inicial de 6,67 dBi máximo que não estava na direção X). Após a segunda otimização, o ganho é de 8,5 dBi na direção X (melhor que o inicial). Na terceira, tem-se como ganho 9,87 dBi; na quarta otimização, ganho de 10,10 dBi; e, na quinta otimização (convergiu), um ganho de 10,15 dBi [6]. Os resultados podem ser observados nas Figura 16 à Figura 18.

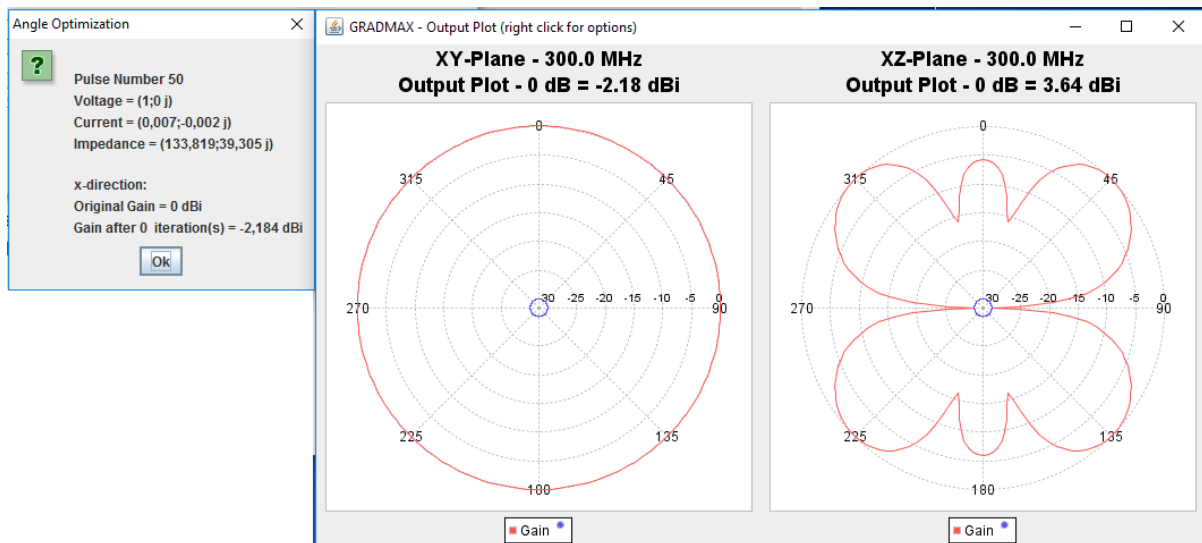
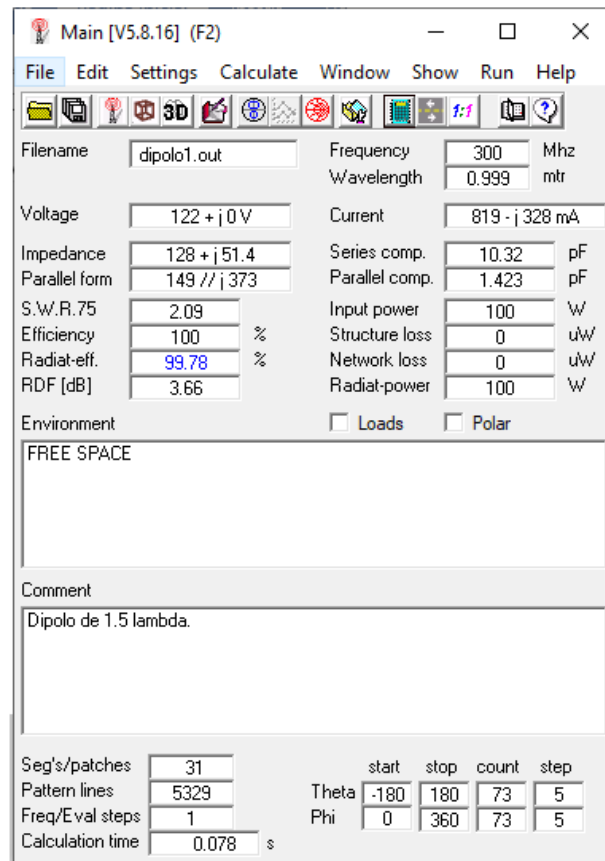
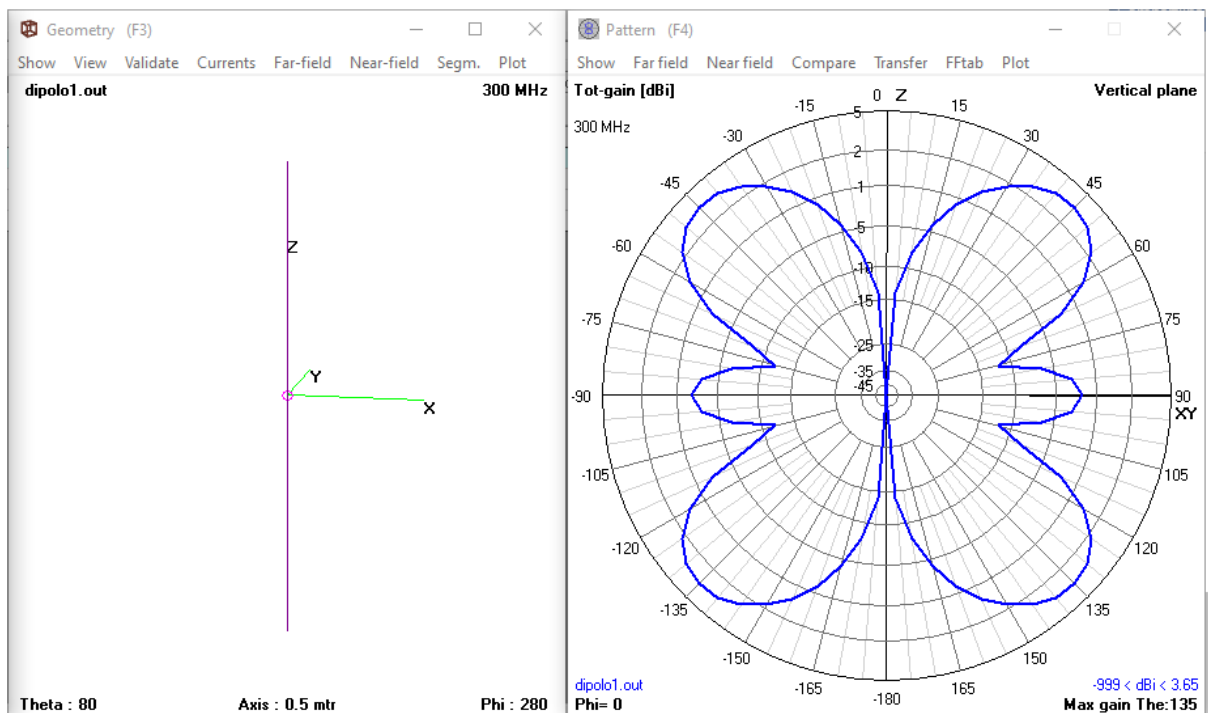


Figura 12: dipolo de $1,5\lambda$ em GRADMAX

A mesma estrutura de monopolo foi construída em 4nec2 para comparação dos resultados entre os dois *softwares*. O monopolo de $0,75\lambda$ (equivalente ao dipolo de $1,5\lambda$) com seis fios apresenta ganho de 6,66 dBi ($N = 3$ para cada fio), conforme Figura 19, Figura 20 e 21. É possível perceber a estrutura otimizada em 4nec2, conforme dados gerados após as otimizações.

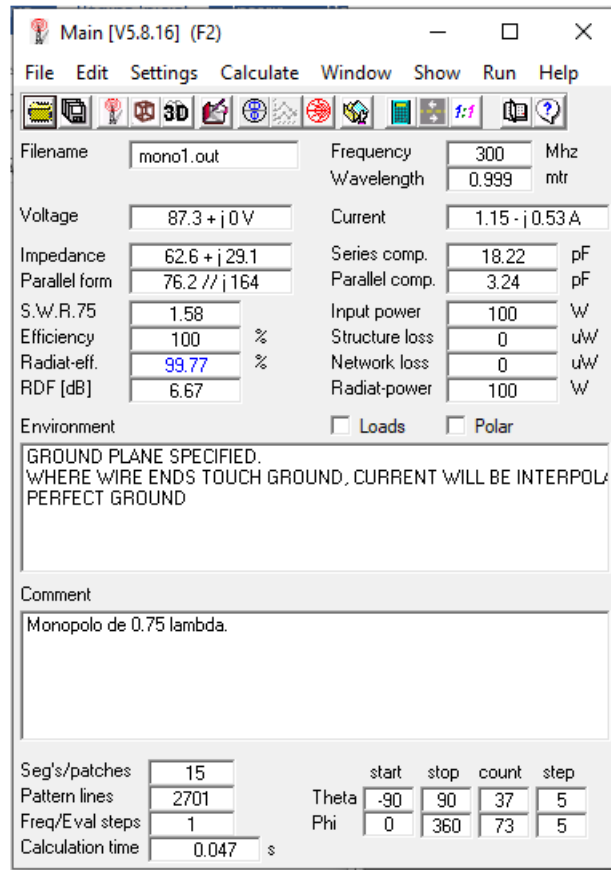


(a)

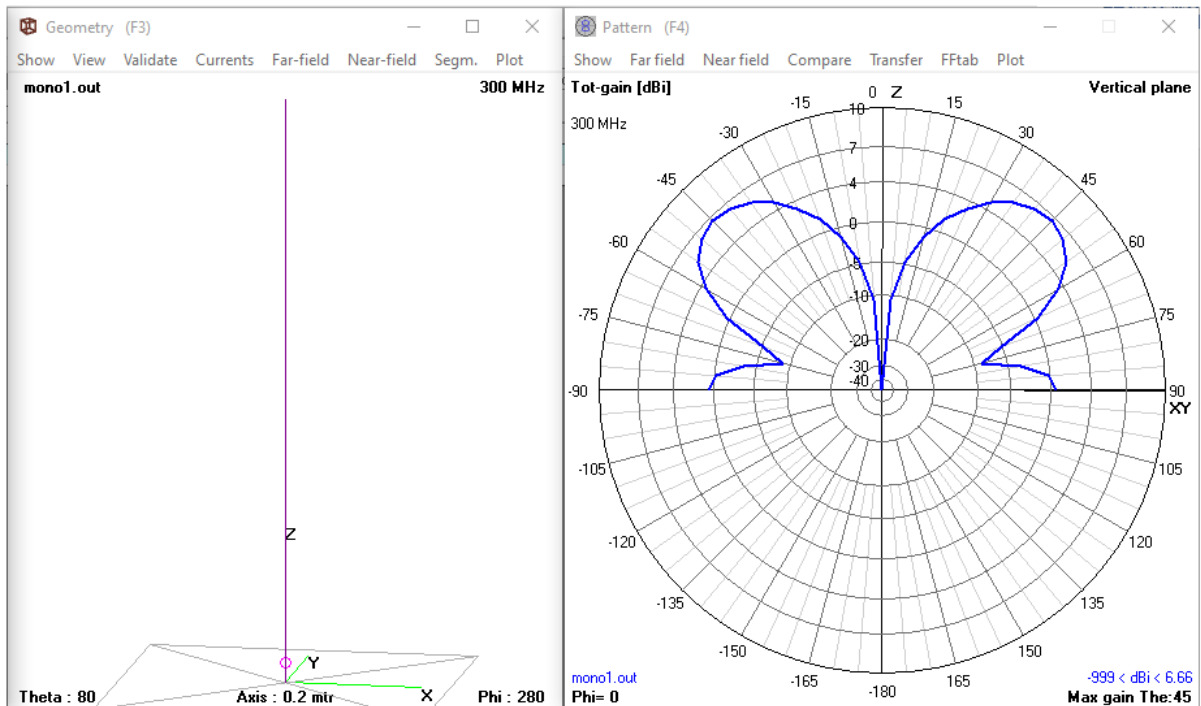


(b)

Figura 13: dipolo de $1,5\lambda$, $N=31$, em 4nec2



(a)



(b)

Figura 14: monopolo de $1,5\lambda$, $N=15$, em 4nec2

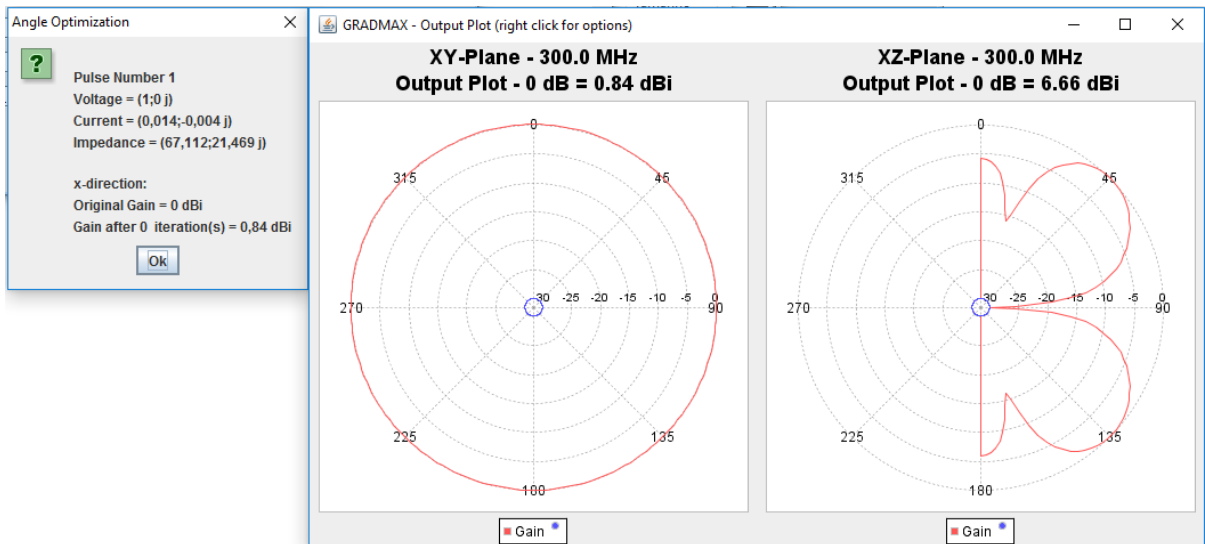


Figura 15: monopolo de $1,5\lambda$, 1 fio, em GRADMAX

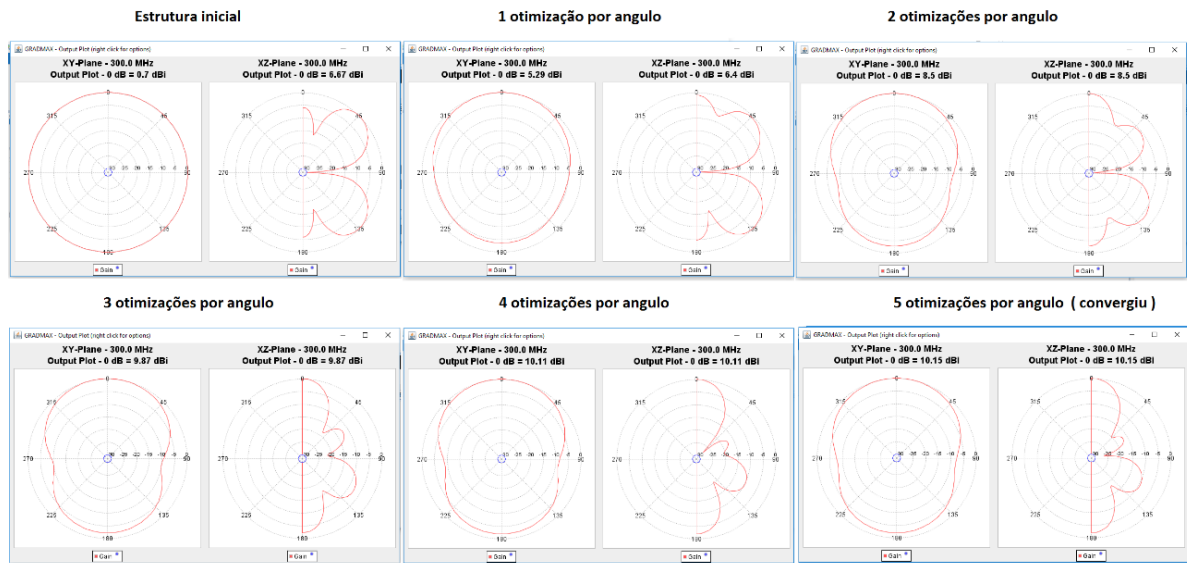


Figura 16: monopolo de $1,5\lambda$ otimizado, passo a passo, em GRADMAX

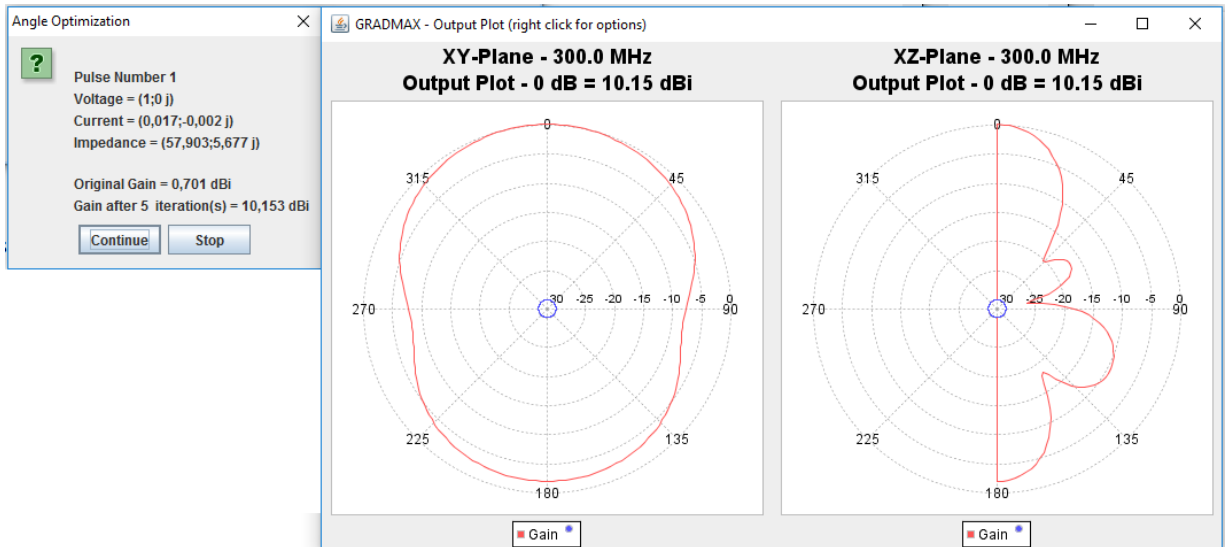
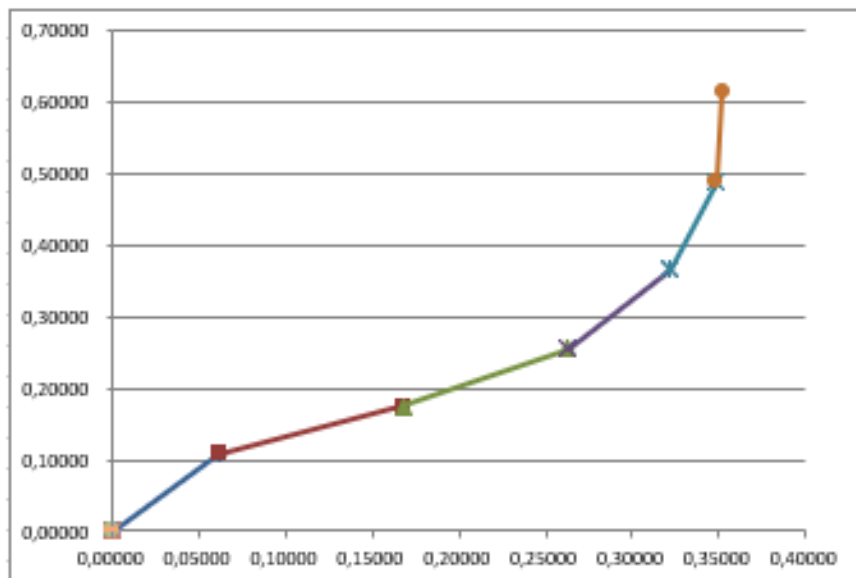


Figura 17: monopolo de $1,5\lambda$ com 5 otimizações, em GRADMAX

1 ELEMENTO:

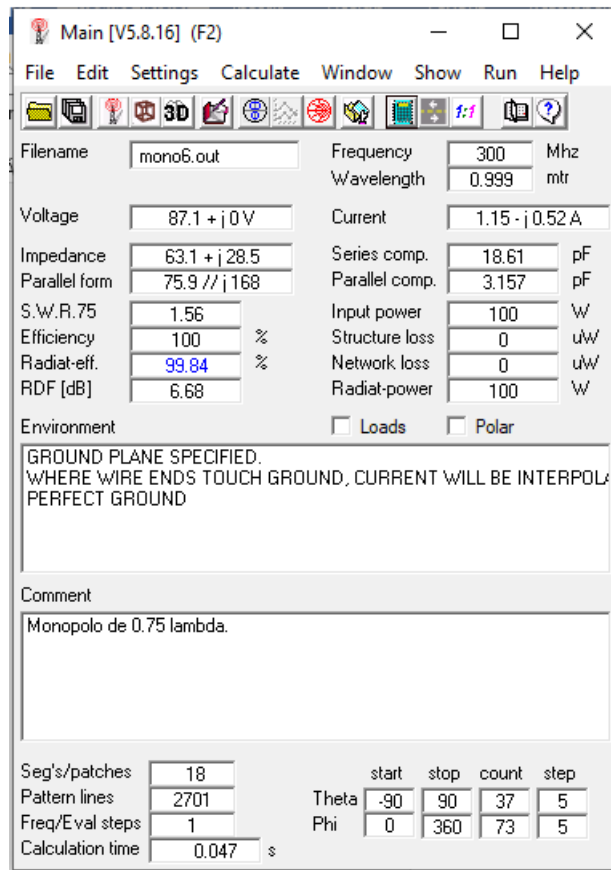
Nome	n' Fios	Free S	Free / Ground	n' Fontes	n' cargas	Frequencia	Fontes (Pulso / Mag / Fase)			
Monopolo6fios	6	Free Space	2	1	0	300	1	1	1	0
							2	0	0	0
							3	0	0	0
							4	0	0	0
							5	0	0	0
							6	0	0	0
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	C1	C2	NS Segmentos	Raio
Fio 1	0,00000	0,00000	0,00000	0,06161	0,00000	0,10876	-1	0	25	0,005
Fio 2	0,06161	0,00000	0,10876	0,16785	0,00000	0,17463	1	0	25	0,005
Fio 3	0,16785	0,00000	0,17463	0,26305	0,00000	0,25564	2	0	25	0,005
Fio 4	0,26305	0,00000	0,25564	0,32186	0,00000	0,36594	3	0	25	0,005
Fio 5	0,32186	0,00000	0,36594	0,34816	0,00000	0,48814	4	0	25	0,005
Fio 6	0,34816	0,00000	0,48814	0,35198	0,00000	0,61308	5	0	24	0,005

(a)

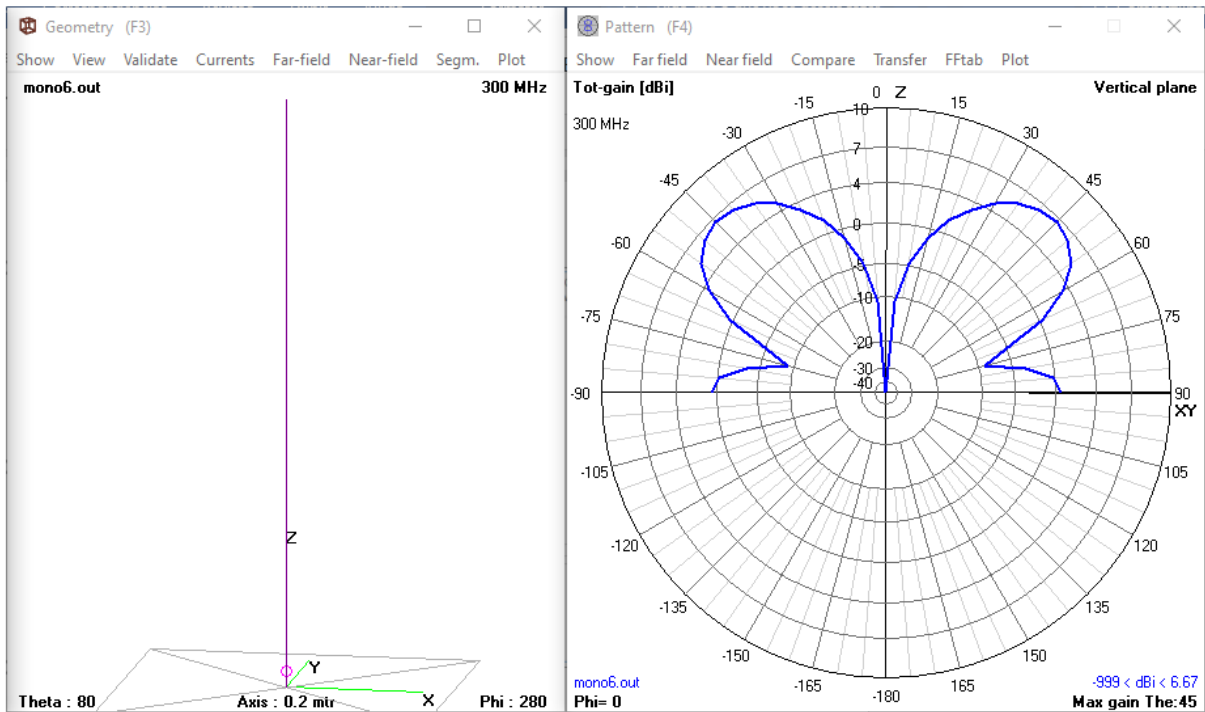


(b)

Figura 18: monopolo com 6 fios após 5 otimizações, vista da estrutura

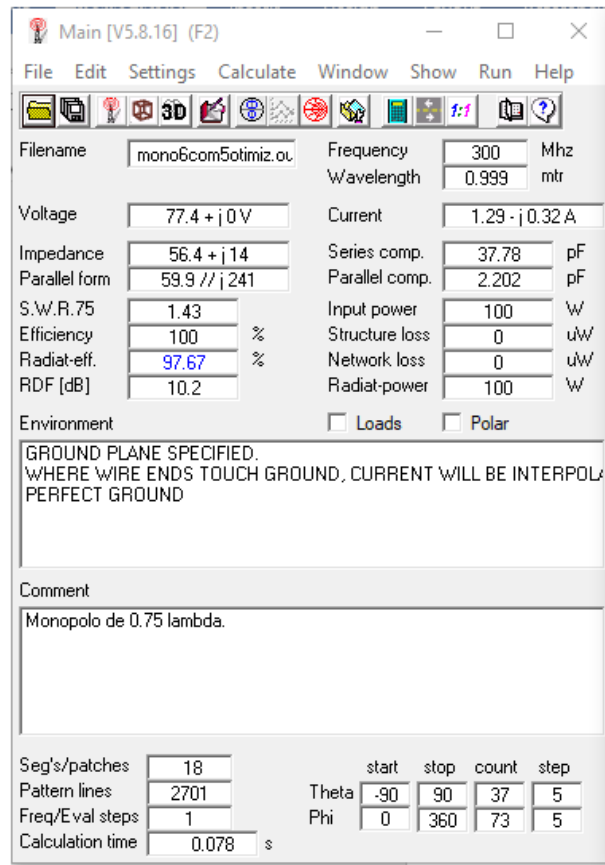


(a)

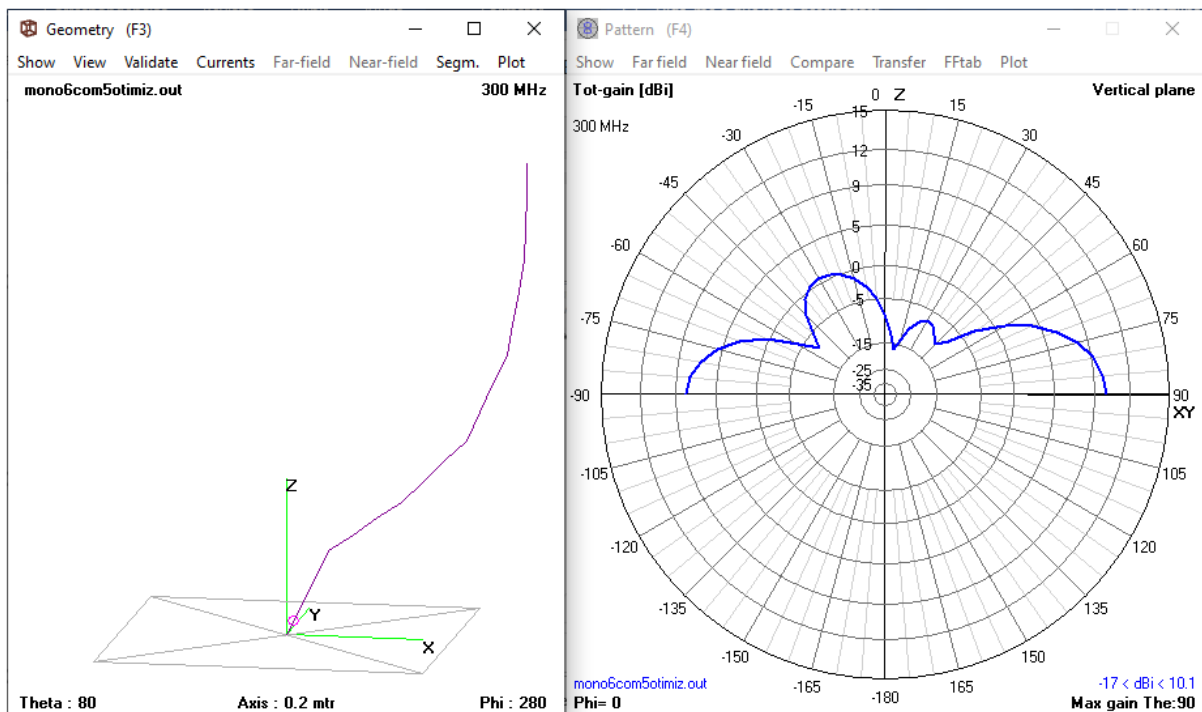


(b)

Figura 19: monopolo $0,75\lambda$ com 6 fios (cada fio com $N=3$), em 4nec2



(a)



(b)

Figura 20: monopolo $0,75\lambda$ com 6 fios (cada fio com $N=3$) otimizados, em 4nec2

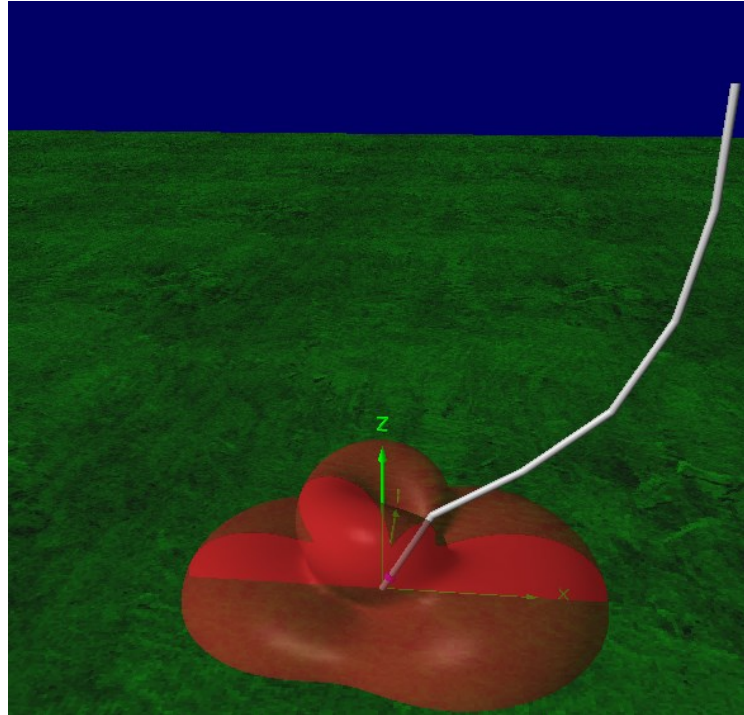
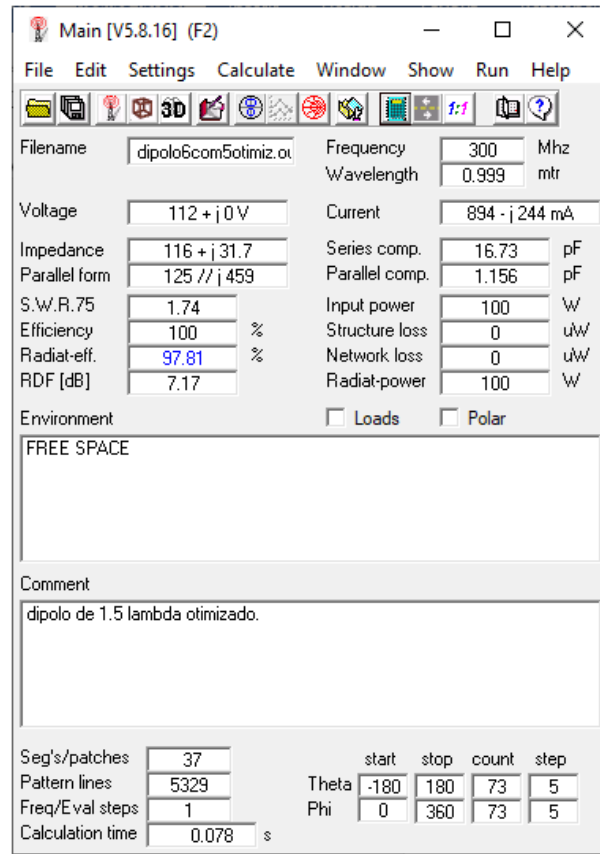


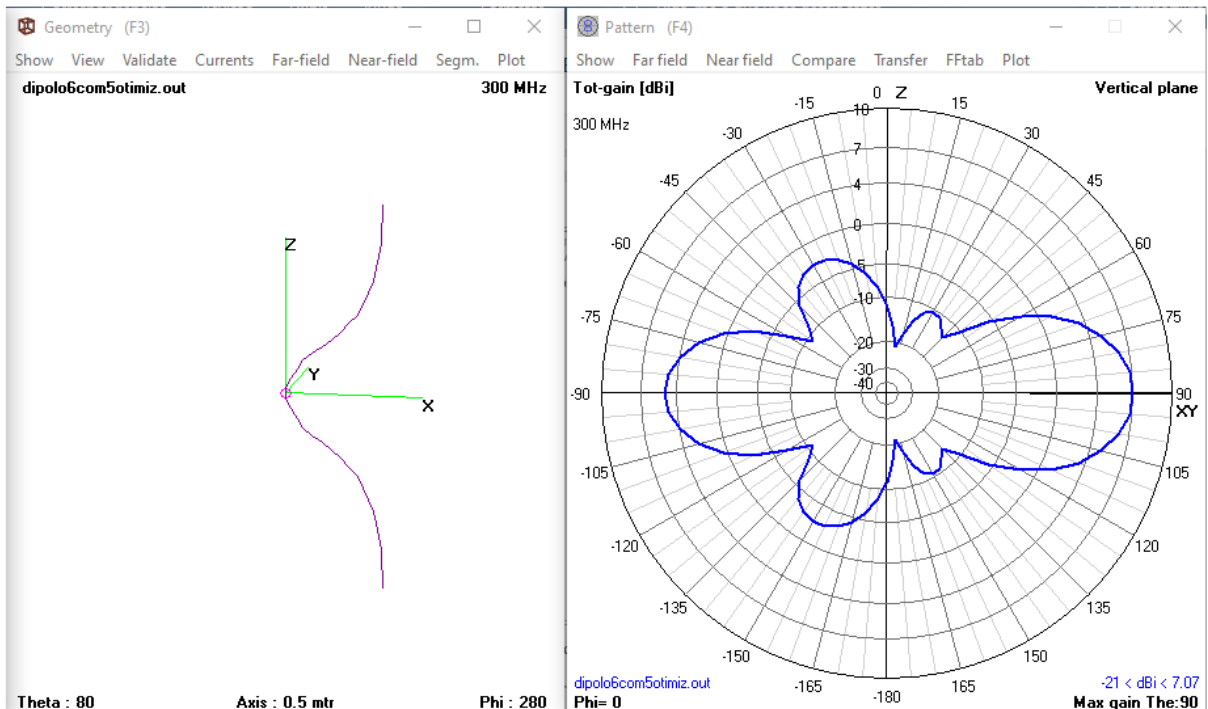
Figura 21: monopolo $0,75\lambda$ com 6 fios otimizados, em 3D, em 4nec2

A construção em GRADMAX necessita de 13 fios (seis fios otimizados para cada lado e mais um para aplicação da fonte de voltagem) devido às suas limitações de pulso (total de 149 pulsos — cada fio foi analisado com 12 segmentos e o fio para a fonte com seis segmentos, totalizando 149 pulsos). Nesse ínterim, foi possível observar que o diagrama e o ganho são bem parecidos com os obtidos em 4nec2 — o que demonstra que mesmo com segmentações um pouco diferentes, diagrama e ganho são minimamente afetados. Já a impedância de entrada detém relação de maior dependência. E, devido à facilidade de construção e ao maior número de segmentos por fio no programa 4nec2, fez-se uso deste para melhor visualização do diagrama. Por outro lado, para a promoção das otimizações, fez-se uso do GRADMAX, conforme Figura 22 e 23.

O processo supramencionado tem seu resumo na Tabela 7, sendo possível uma visão geral de como se deu a otimização. Vale destacar que, em GRADMAX, a impedância de entrada logrou valores próximos dos esperados, mesmo para uma pouca quantidade de segmentos.



(a)



(b)

Figura 22: dipolo de $1,5\lambda$ com 13 fios otimizado (cada fio com $N=3$), em 4nec2

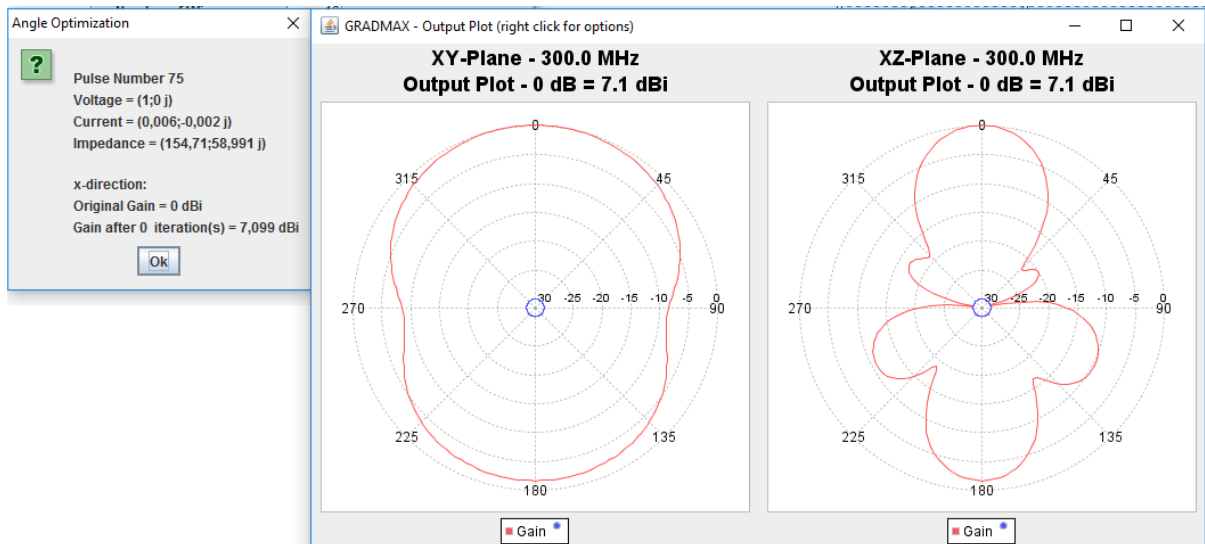


Figura 23: dipolo de $1,5\lambda$ com 13 fios otimizados, em GRADMAX

Tabela 7: resumo das simulações dipolo/monopolo com 13 e 6 fios respectivamente

$L = 1,5\lambda$	4nec2	GRADMAX
Dipolo	$G = 3,65$ dBi	$G = 3,64$ dBi
	$Z_{in} = 128 + j 51,4$	$Z_{in} = 133,81 + j 39,30$
Monopolo	$G = 6,66$ dBi	$G = 6,68$ dBi
	$Z_{in} = 62,6 + j 29,1$	$Z_{in} = 67,11 + j 21,46$
Diferenças do Dipolo para Monopolo	$G \approx + 3$ dBi	$G \approx + 3$ dBi
	$Z_{in} \approx - 3$ dBi (metade)	$Z_{in} \approx - 3$ dBi (metade)
Otimização em GRADMAX (5 interações até a convergência)		
Monopolo otimizado	$G = 10,1$ dBi	$G = 10,153$ dBi
	$Z_{in} = 56,4 + j 14$	$Z_{in} = 57,90 + j 5,67$
Dipolo otimizado	$G = 7,07$ dBi	$G = 7,01$ dBi
	$Z_{in} = 116 + j 31,7$	$Z_{in} = 154,7 + j 58,99$
Diferenças do Dipolo para Monopolo (otimizados)	$G \approx + 3$ dBi	$G \approx + 3$ dBi
	$Z_{in} \approx - 3$ dBi	$Z_{in} > - 3$ dBi (devido à N)

O primeiro estágio da pesquisa verificou o caso de um dipolo com tamanho acima de 1λ . Tal característica permite a inversão de fase no processo de otimização por ângulo. E, ainda, a relação de Z_{in} e ganho se mantiveram, conforme esperado. Posteriormente, foi construído o equivalente em modo monopolo, porém, com seis fios no único elemento. Assim, deu-se a otimização por ângulo, acarretando o encurvamento do elemento.

Em cinco otimizações ocorreu a convergência do programa, que passou de um ganho pobre de 3,65dB para 10,15dB (em dipolo 7,07dB). Em sequência, foi construído o respectivo dipolo otimizado tanto em 4nec2 quanto em GRADMAX. O *software* 4nec2 possui interface mais amigável que GRADMAX para a construção de *array's*. Logo, o 4nec2 foi o programa escolhido para construção, sendo o GRADMAX o *software* necessário para otimizar por ângulo.

3.4 MONOPOLOS ISOLADOS E OTIMIZADOS POR ÂNGULO COM DIFERENTES COMPRIMENTOS

A presente pesquisa procedeu a otimização de monopolos em ângulo com o uso do programa GRADMAX. Para melhor visualização de cada elemento (monopolo) promoveu-se a construção de uma estrutura com 36 fios interligados. Logo, a inclinação de cada fio trouxe melhor precisão para a estrutura final.

Em cada monopolo analisado, foi possível perceber o ganho e a impedância de entrada antes da otimização. Posteriormente, observou-se tanto o ganho quanto a impedância de entrada. Também foi confeccionado em Microsoft Excel um gráfico para a visualização da estrutura obtida após a otimização de GRADMAX.

Em suma, alguns resultados se mostraram promissores, como um monopolo de 2.8λ que, após a otimização, chegou a 15,93dB (seu correspondente dipolo teria em torno de 12,93dB) — valor bem alto para apenas um elemento. Outro resultado obtido refere-se à intersecção do elemento com ele mesmo — exemplo para o monopolo de $1,3\lambda$. Houve, também, uma resposta após apenas uma otimização (chegando à convergência) — exemplo para o monopolo de $1,4\lambda$.

Observou-se que a intersecção no próprio elemento, bem como a não otimização (convergência em apenas uma etapa) se deram não apenas uma vez, deduzindo o fato de ocorrência de alguma periodicidade na otimização de elementos com o aumento do comprimento. Tal intersecção é devido ao *software* realizar a otimização (inclinação do segmento de fio) mesmo que os segmentos de fio ocupem o mesmo espaço físico. Contudo, o efeito dessa intersecção é algo impreciso, pois o algoritmo de simulação pode tender a erros. A Tabela 8 e a Figura 24,, resumem as otimizações empreendidas, sendo possível observar o ganho e a impedância de entrada antes e após a otimização.

Tabela 8: monopolos otimizados isoladamente

Otimização de monopolos			
Monopolo normalizado (λ)	Estrutura inicial reta plano XY/ XZ	Estrutura otimizada plano XY / XZ	Observação
0,5	7,05 / 7,05	7,29	
0,6	7,90 / 7,90	9,00	
0,7	4,77 / 5,94	10,09	
0,8	-5,56 / 6,76	10,08	
0,9	-36,72 / 6,72	9,80	
1,0	-15,88 / 7,11	10,67	
1,1	-5,37 / 7,60	11,50	
1,2	3,12 / 7,34	12,10	
1,3	4,77 / 7,90	11,79	Houve intersecção.
1,4	5,11 / 7,56	5,15	Pouca otimização.
1,5	5,73 / 8,0	12,54	
1,6	6,88 / 8,0	13,01	
1,7	2,65 / 8,52	13,74	
1,8	-9,56 / 8,70	13,99	
1,9	-22,58 / 8,23	13,99	
2,0	-13,73 / 8,35	13,78	
2,2	4,11 / 9,47	14,72	
2,4	5,08 / 8,77	5,15	Pouca otimização
2,6	5,82 / 8,77	15,24	
2,8	-16,47 / 9,65	15,93	Ganho elevado
3,0	-9,33 / 9,43	15,35	

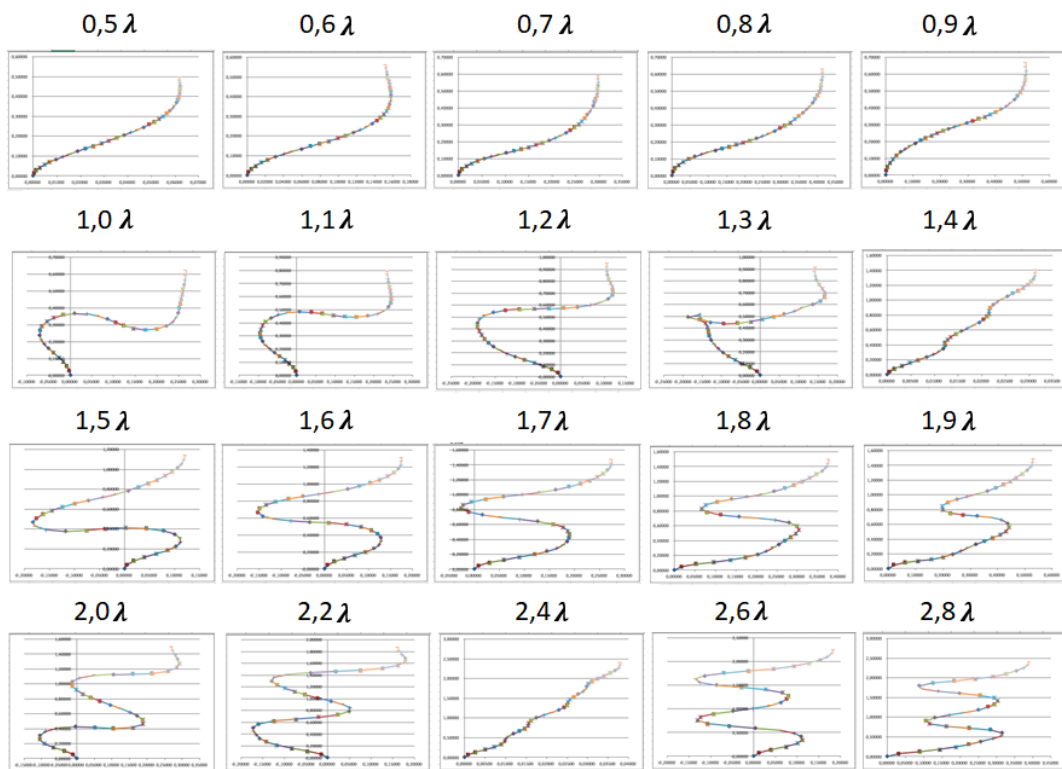
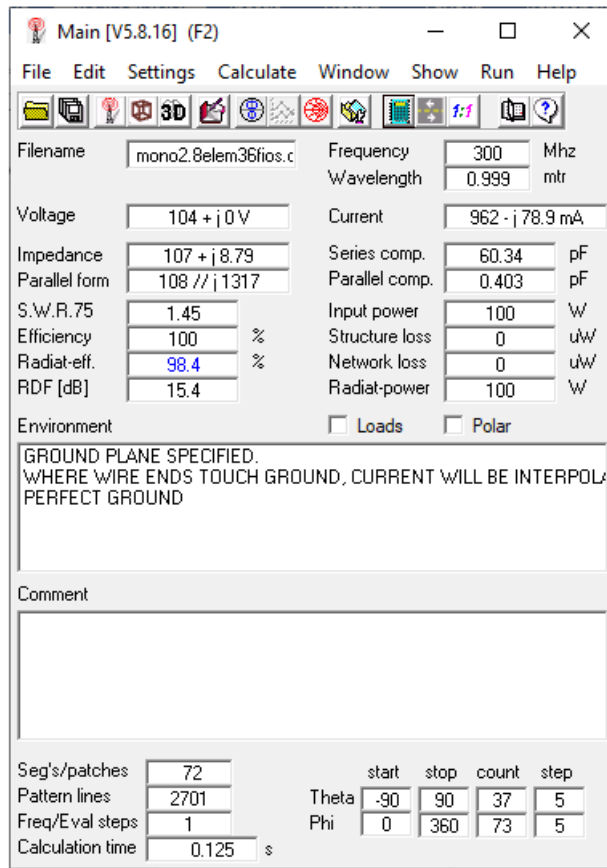


Figura 24: estruturas otimizadas, em GRADMAX

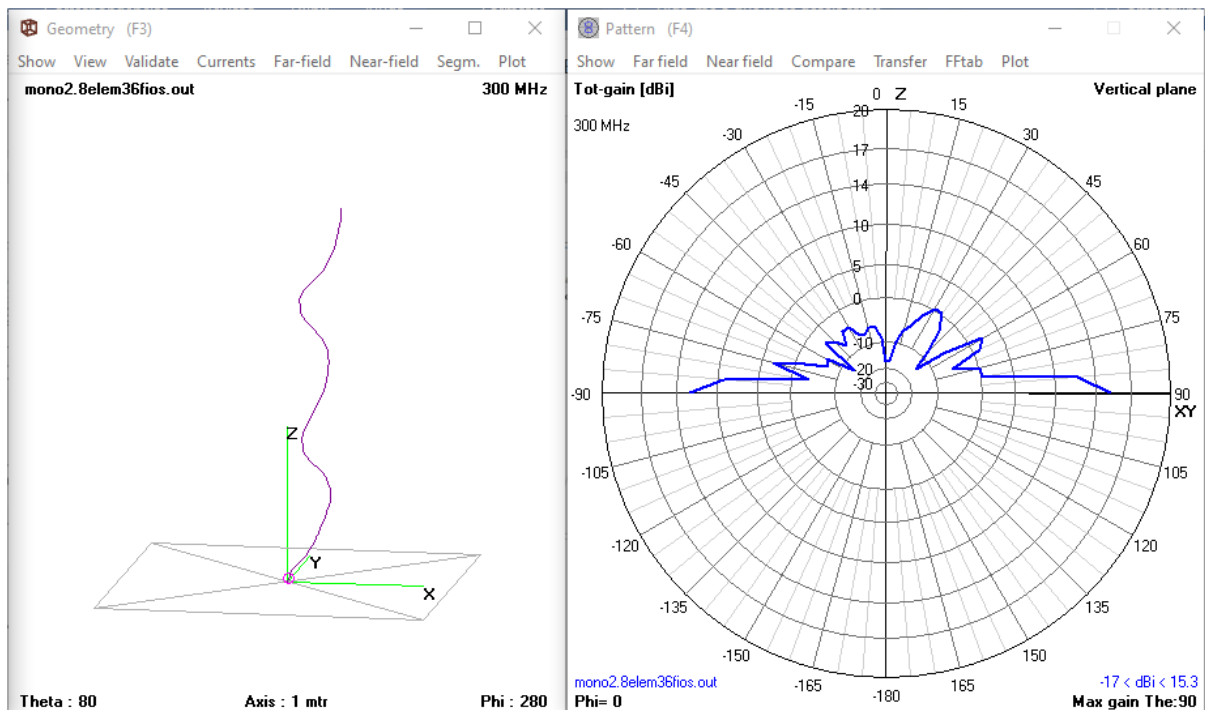
3.5 MONOPOLO DE 2,8λ OTIMIZADO

O monopolo de 2,8λ (correspondente dipolo de 5,6λ) possui um ganho de 15,93dB após a otimização em GRADMAX, com uma impedância de entrada de $Z_{in} = 184,56 + j46,74$ o número de segmentos usados foi de 4 para cada fio. Os dados dos 36 fios que compõem a estrutura de análise foram identificados por meio do software 4nec2. Assim, na Figura 25, a seguir, tem-se evidente o ganho de 15,3dB e a impedância de $Z_{in} = 107 + j8,79$ do monopolo citado já otimizado. O ganho em questão está bem próximo ao obtido em GRADMAX. Já a impedância de entrada possui valor alto para a parte real e valor baixo para a parte reativa. O número de segmento limitado pode justificar a diferença entre os valores obtidos.

A presente pesquisa, novamente, realizou simulações com o monopolo de 2,8λ, porém, com apenas seis fios. Realizou-se, então, a otimização por ângulo. A estrutura otimizada também foi construída em 4nec2. O ganho foi de 13,24dB em GRADMAX, e de 13,10 em 4nec2, consoante Figura 26 e Figura 27.



(a)



(b)

Figura 25: monopolo de $2,8\lambda$, 36 fios, em 4nec2

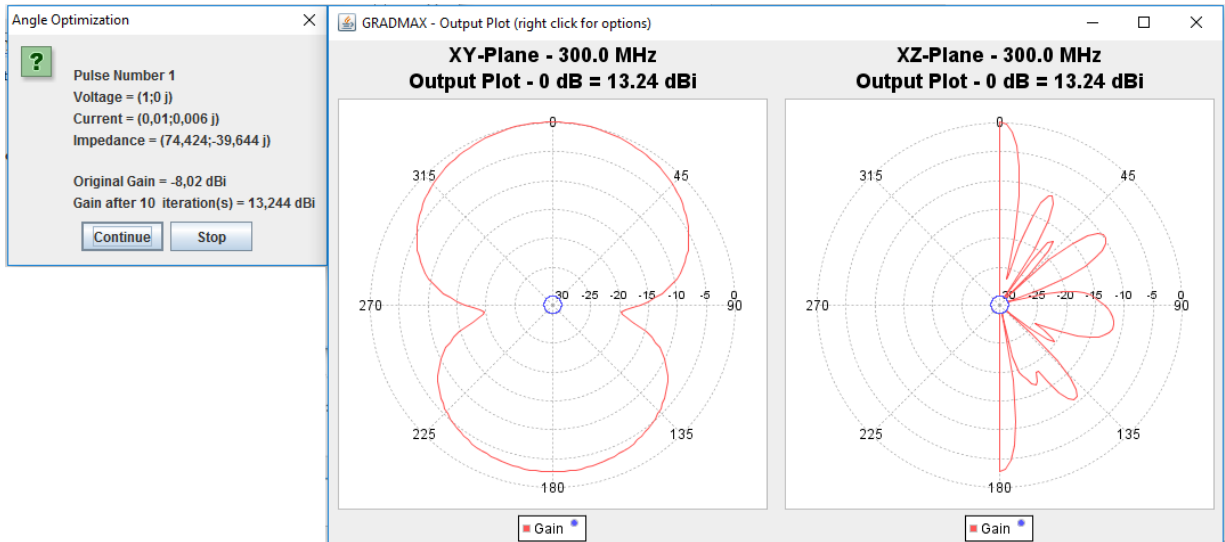
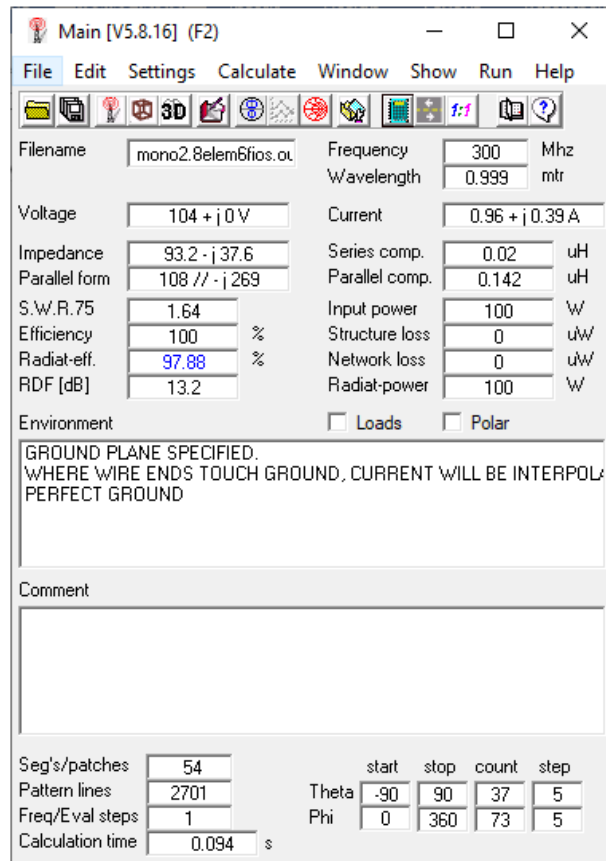
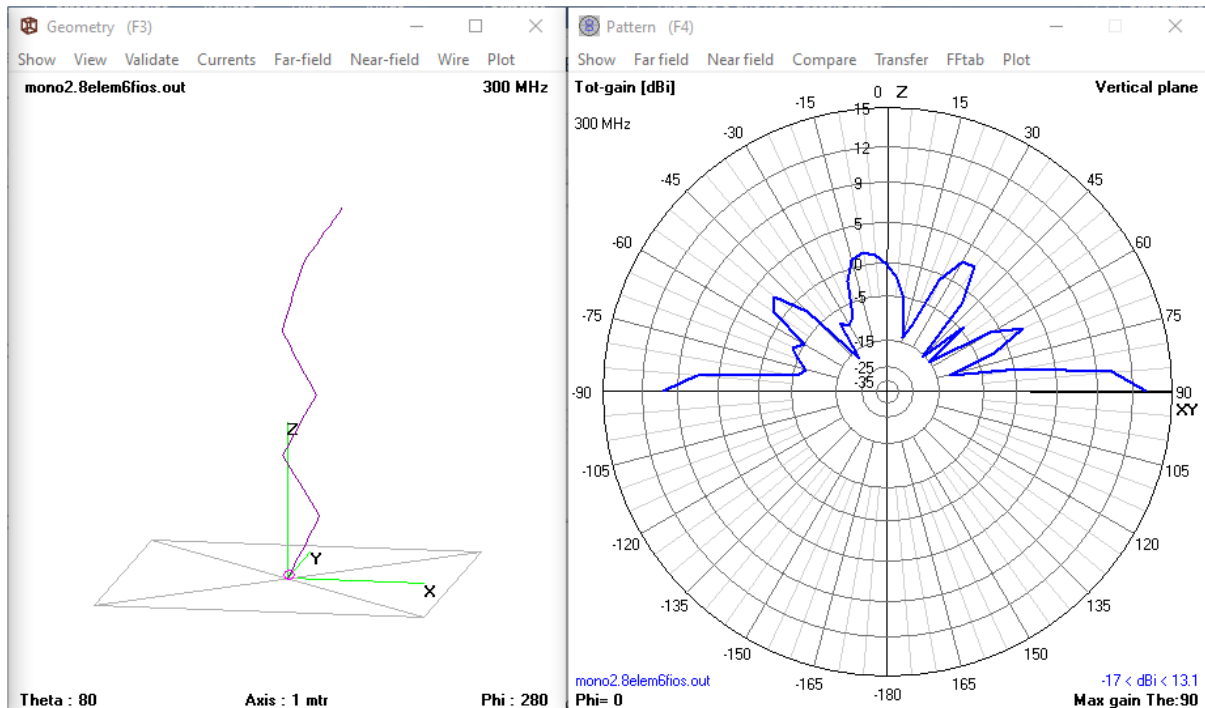


Figura 26: monopolo de $2,8\lambda$ com 6 fios, em GRADMAX



(a)



(b)

Figura 27: monopolo de $2,8\lambda$, com 6 fios, em 4nec2

3.6 MONOPOLO: 1 ELEMENTO SUBDIVIDIDO EM 2 FIOS

Fazendo uso de um monopolo formado por, apenas, dois fios, o fio número 1 encontra-se sempre conectado à terra, formando, assim, um ângulo de inclinação denominado alfa em direção ao eixo X e, logo após esse fio, conectado, encontra-se o fio n.º 2 com ângulo chamado de beta. Em uma análise inicial, foi construído um monopolo com as seguintes características: fio n.º 1 = 1λ ; fio n.º 2 = $0,5\lambda$, alfa = 35° ; e, fio n.º 2 perpendicular ao plano terra (ângulo beta de 90°), conforme Figura 28. Em GRADMAX o ganho inicial foi de 6,95dB (vide Figura 29 e Figura 30, a seguir) e, após a otimização passa para 11,09dB (vide Figura 31 e Figura 32, a seguir). Assim, com apenas dois fios, o elemento (monopolo) apresentou aumento em ganho de 4,14dB ($11,09\text{dB} - 6,95\text{dB}$); ou seja, a nova estrutura com os mesmos comprimentos apenas com a inclinação de dois fios tornou-se mais que o dobro em termos de ganho (linearmente) que a estrutura original. Vale destacar que a nova inclinação do fio n.º 1 é alfa $\approx 52^\circ$, e a inclinação do fio n.º 2 é beta $\approx 38^\circ$.

A mesma estrutura foi construída no programa 4nec2, conforme evidenciado na Figura 33, a seguir. Aquele programa confirma o cálculo obtido do ganho gerado após a otimização em GRADMAX.

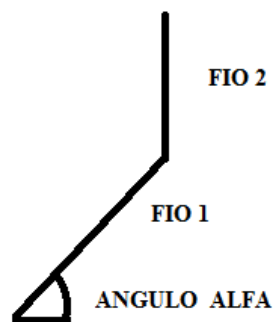
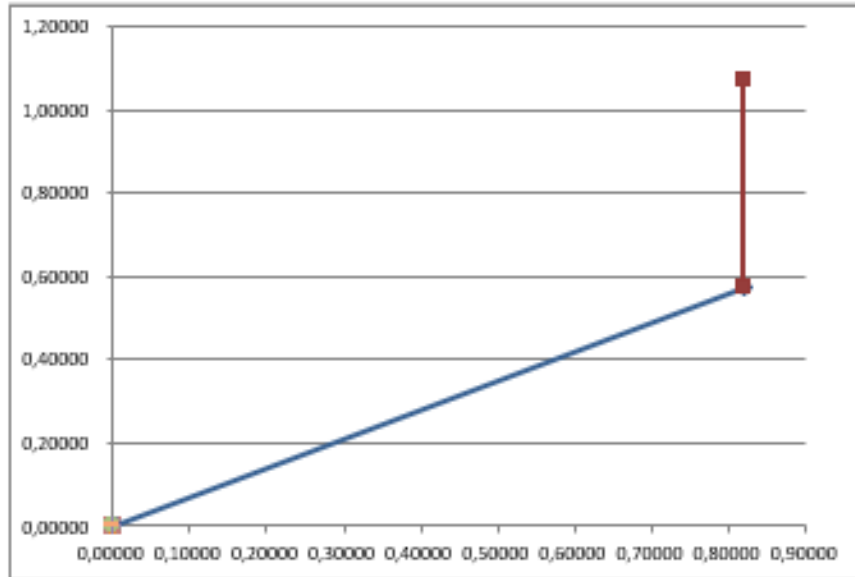


Figura 28: estrutura com 2 fios.

1 elemento com 2 fios (angulos ALFA=90° e BETA=90°)										
Nome	n° Fios	Free S	Free / Ground	n° Fontes	n° cargas	Frequencia	Fontes (Pulso / Mag / Fase)			
Mono	2	Free Space	2	1	0	300	1	1	1	0
							2	0	0	0
							3	0	0	0
							4	0	0	0
							5	0	0	0
							6	0	0	0
Fio 1	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	C1	C2	NS Segmentos	Raio
Fio 1	0,00000	0,00000	0,00000	0,81915	0,00000	0,57357	-1	0	100	0,005
Fio 2	0,81915	0,00000	0,57357	0,81915	0,00000	1,07357	1	0	49	0,005

(a)



(b)

Figura 29: monopolo de 2 fios, vista da estrutura

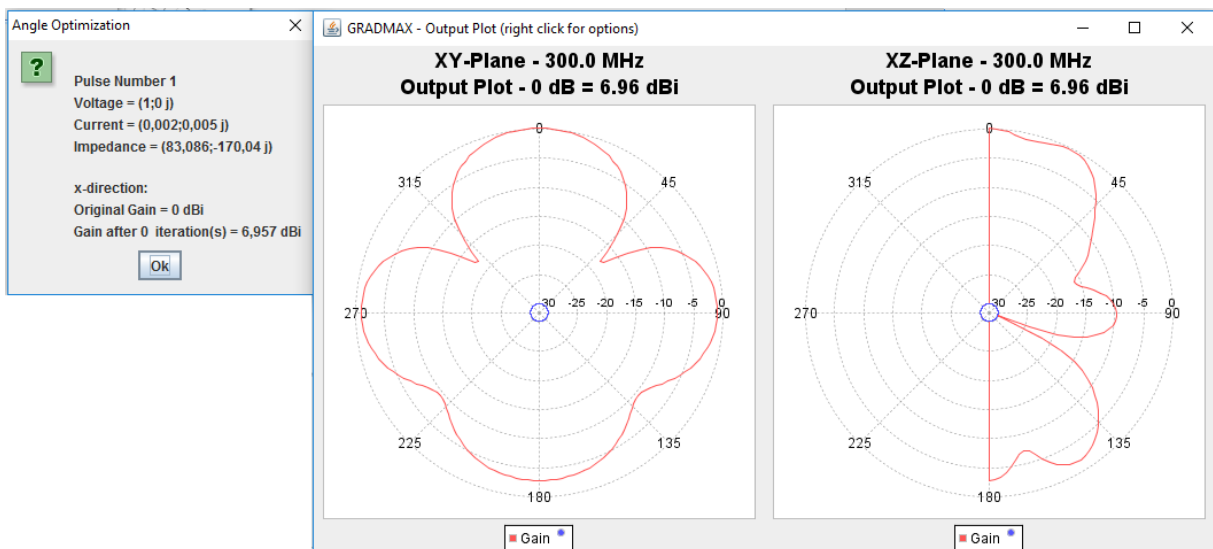
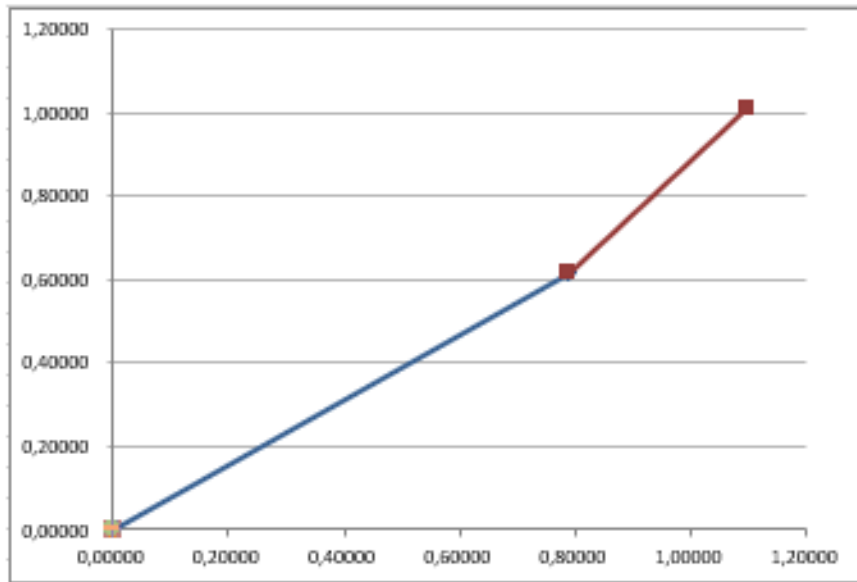


Figura 30: monopolo de 2 fios, em GRADMAX

1 elemento com 2 fios (angulos ALFA e BETA)										
Nome	n' Fios	Free S	Free / Ground	n' Fontes	n' cargas	Frequencia	Fontes (Pulso / Mag / Fase)			
Mono	2	Free Space	2	1	0	300	1	1	1	0
							2	0	0	0
							3	0	0	0
							4	0	0	0
							5	0	0	0
							6	0	0	0
Fio 1	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	C1	C2	NS Segmentos	Raio
Fio 1	0,00000	0,00000	0,00000	0,78884	0,00000	0,61459	-1	0	100	0,005
Fio 2	0,78884	0,00000	0,61459	1,09658	0,00000	1,00867	1	0	49	0,005

(a)



(b)

Figura 31: monopolo 2 fios, vista da estrutura otimizada

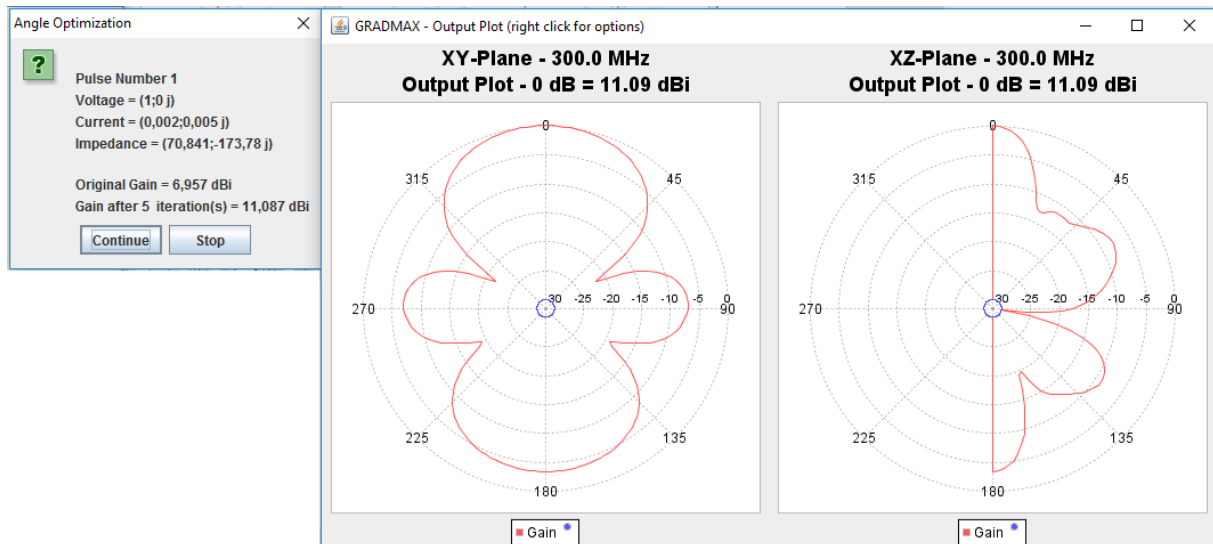
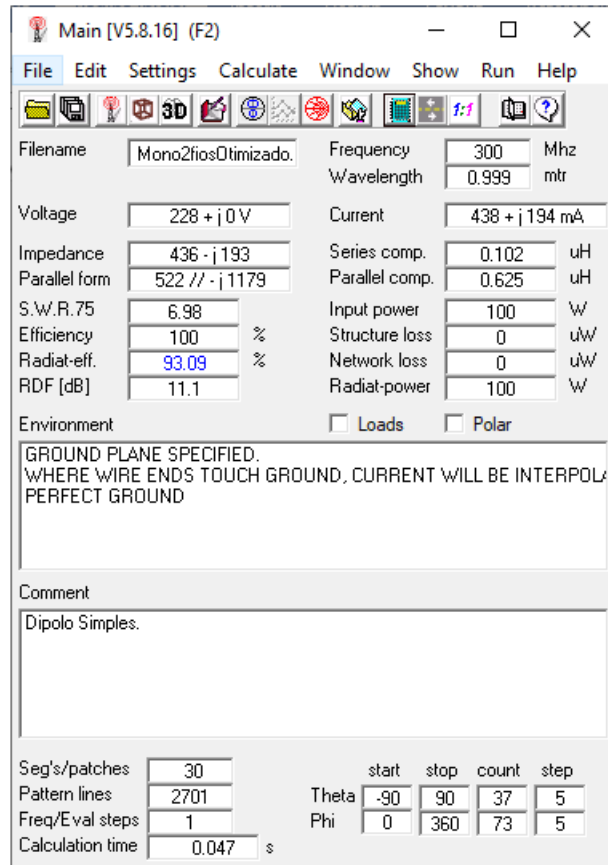
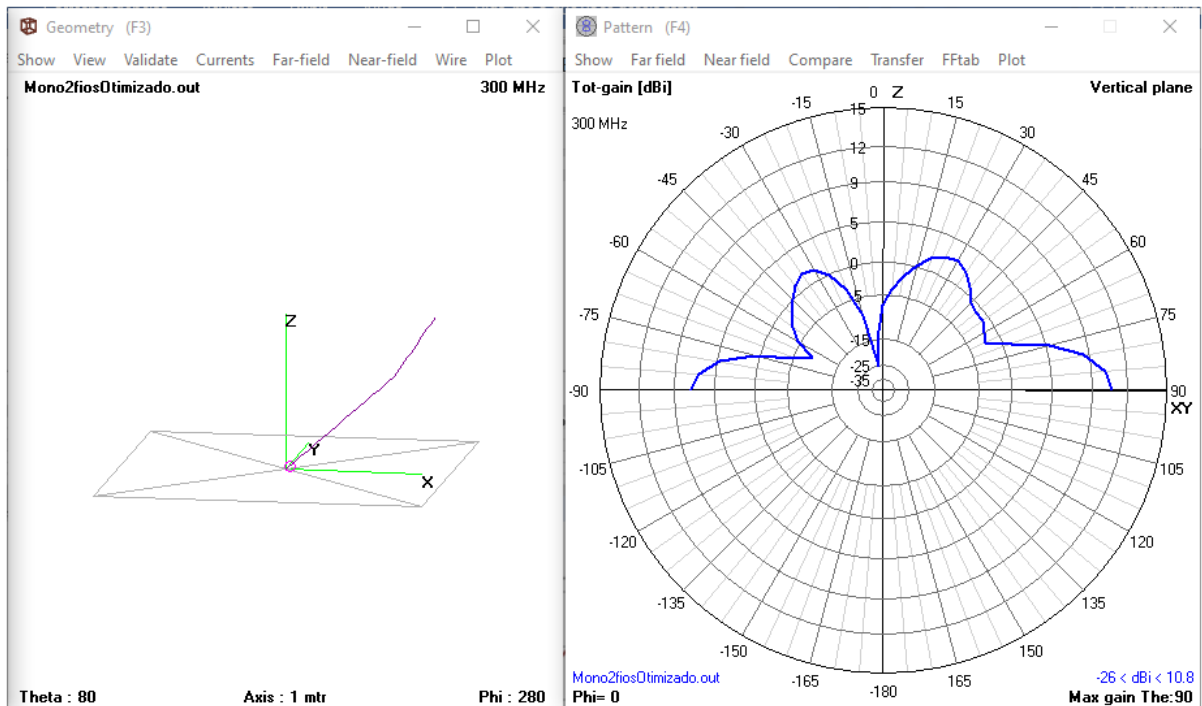


Figura 32: monopolo com 2 fios otimizado, em GRADMAX



(a)



(b)

Figura 33: monopolo de 2 fios otimizado, em 4nec2

3.7 MONOPOLO DE ARCO

Um novo ponto de partida para a otimização de monopolos se deu como arco de circunferência. Foi escolhido um arco de ângulo 90° conectado ao plano da terra na origem, conforme evidenciado na Figura 34, a seguir. O raio da circunferência foi consequência do tamanho do arco desejado, subdividido em seis fios conectados.

Para um arco de $0,5\lambda$, tem-se um $r \approx 0,3183\lambda$. Em GRADMAX, obteve-se um ganho de 3,5dB na direção X com $Z_{in} = 72 - j213$. Após a otimização por ângulo, foi obtido um ganho de 7,24dB e $Z_{in} = 84 - j214$. Os dados podem ser observados nas Figura 35 a 38.

Na Tabela 9, evidencia-se a mesma análise para vários comprimentos de arco e seus respectivos ganhos após a otimização em GRADMAX. Na Figura 39, é possível observar a estrutura do fio (arco com $2,5\lambda$) após a otimização que gerou ganho de 14,12dB na direção X.

A quantidade de fios interfere na estrutura final otimizada. Assim, é possível perceber, na Figura 40, que, para um arco de $1,5\lambda$ ou $2,5\lambda$ de seis ou 36 fios, a estrutura final (após a otimização) é bem diferente.

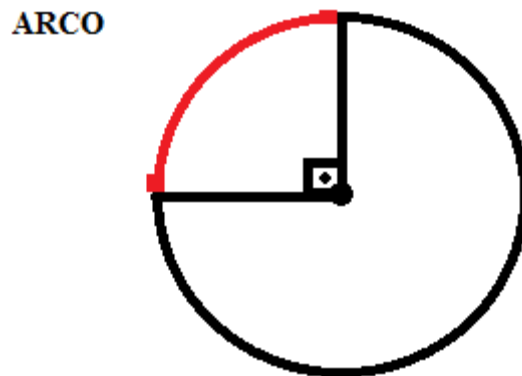


Figura 34: circunferência e arco.

$$\text{ARCO} = \frac{\alpha * \pi * r}{180}$$

Em que:

α : ângulo formado com relação ao centro da circunferência, em graus;

π : constante pi ;

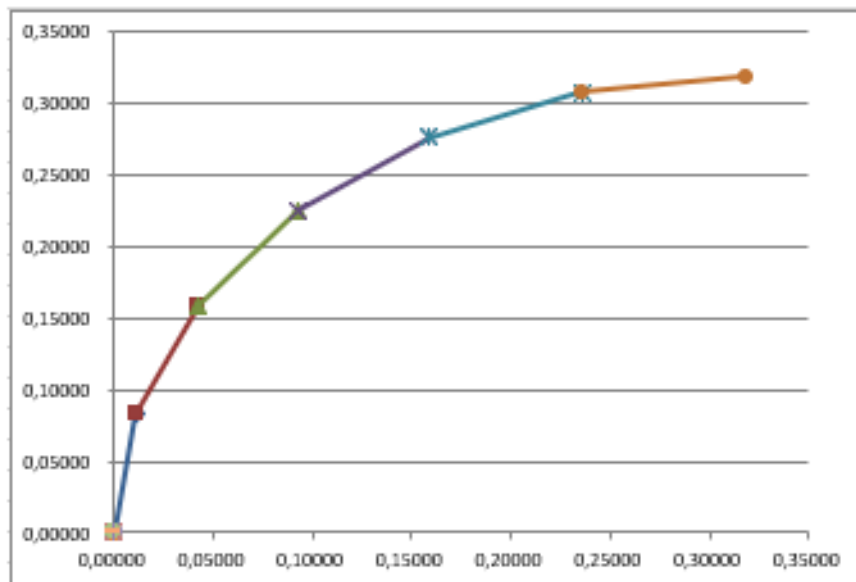
r : raio do centro da circunferência a qualquer ponto que a pertença.

Com um arco de $0,5\lambda$, tem-se um ponto de partida diferente dos exemplos anteriores. Em GRADMAX, por exemplo, o ganho foi de 4,26 dBi na direção x. São seis fios conectados que formam um elemento. Após a otimização, o ganho foi de 7,24dBi. Também é possível notar o formato da nova estrutura. Tais dados podem ser observados nas Figura 35 a 38. Nova simulação pode ser vista na Figura 39 para um arco de $2,5\lambda$ e na Figura 40 uma comparação de dois arcos de $1,5\lambda$ e $2,5\lambda$ para 6 e 36 fios.

Por fim, a Tabela 9 resume o ganho obtido para vários comprimentos de ondas. Novamente, vale destacar que a otimização por ângulo depende da inversão de fase, ou seja, acima de 1λ .

1 ELEMENTO COM 6 FIOS													
Nome	n° Fios	Free S	Free / Ground	n° Fontes	n° cargas	Frequencia	Fontes (Pulso / Mag / Fase)						
arco90	6	Free Space	2	1	0	300	1	1	1	0			
							2	0	0	0			
							3	0	0	0			
							4	0	0	0			
							5	0	0	0			
							6	0	0	0			
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	C1	C2	NS Segmentos	Raio			
Fio 1	0,00000	0,00000	0,00000	0,01085	0,00000	0,08238	-1	0	25	0,005			
Fio 2	0,01085	0,00000	0,08238	0,04265	0,00000	0,15915	1	0	25	0,005			
Fio 3	0,04265	0,00000	0,15915	0,09323	0,00000	0,22508	2	0	25	0,005			
Fio 4	0,09323	0,00000	0,22508	0,15915	0,00000	0,27566	3	0	25	0,005			
Fio 5	0,15915	0,00000	0,27566	0,23593	0,00000	0,30746	4	0	25	0,005			
Fio 6	0,23593	0,00000	0,30746	0,31831	0,00000	0,31831	5	0	24	0,005			

(a)



(b)

Figura 35: arco de $0,5\lambda$, vista da estrutura

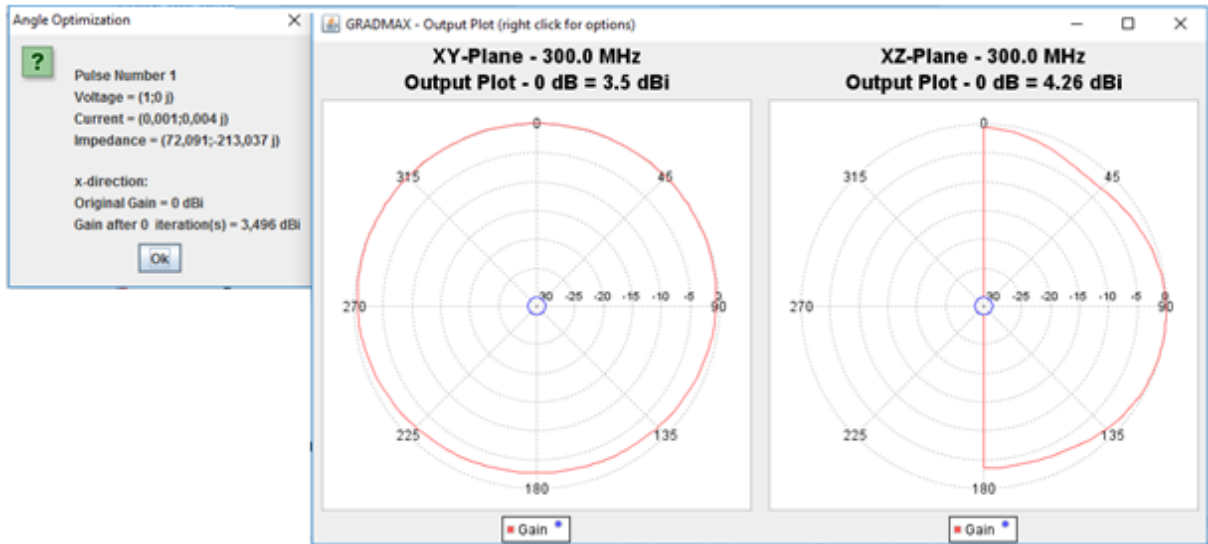
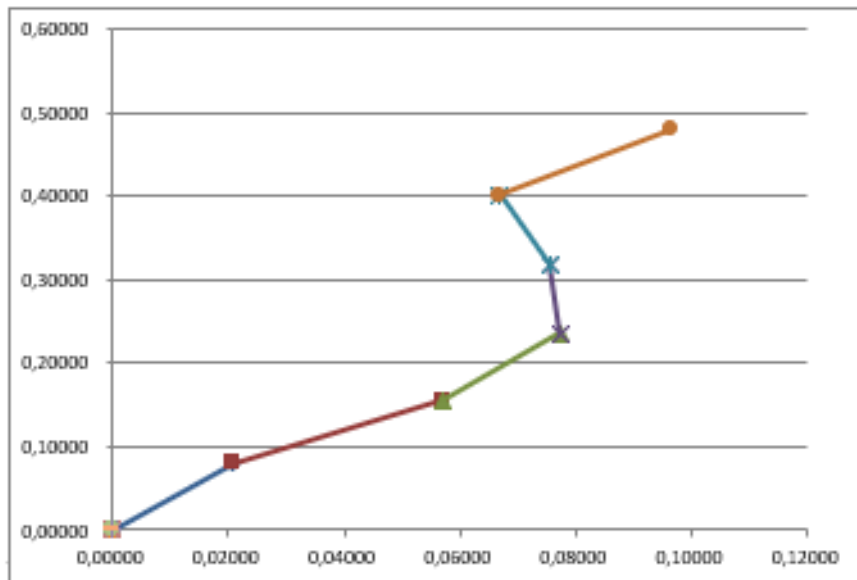


Figura 36: arco de $0,5 \lambda$, em GRADMAX

1 ELEMENTO COM 6 FIOS: ARCO

Nome	n° Fios	Free S	Free / Ground	n° Fontes	n° cargas	Frequencia	Fontes (Pulso / Mag / Fase)			
arco90	6	Free Space	2	1	0	300	1	1	1	0
							2	0	0	0
							3	0	0	0
							4	0	0	0
							5	0	0	0
							6	0	0	0
Fio 1	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	C1	C2	NS Segmentos	Raio
Fio 1	0,00000	0,00000	0,00000	0,02089	0,00000	0,08043	-1	0	25	0,005
Fio 2	0,02089	0,00000	0,08043	0,05704	0,00000	0,15525	1	0	25	0,005
Fio 3	0,05704	0,00000	0,15525	0,07718	0,00000	0,23586	2	0	25	0,005
Fio 4	0,07718	0,00000	0,23586	0,07558	0,00000	0,31894	3	0	25	0,005
Fio 5	0,07558	0,00000	0,31894	0,06690	0,00000	0,40159	4	0	25	0,005
Fio 6	0,06690	0,00000	0,40159	0,09634	0,00000	0,47929	5	0	24	0,005

(a)



(b)

Figura 37: arco de $0,5 \lambda$ otimizado, vista da estrutura

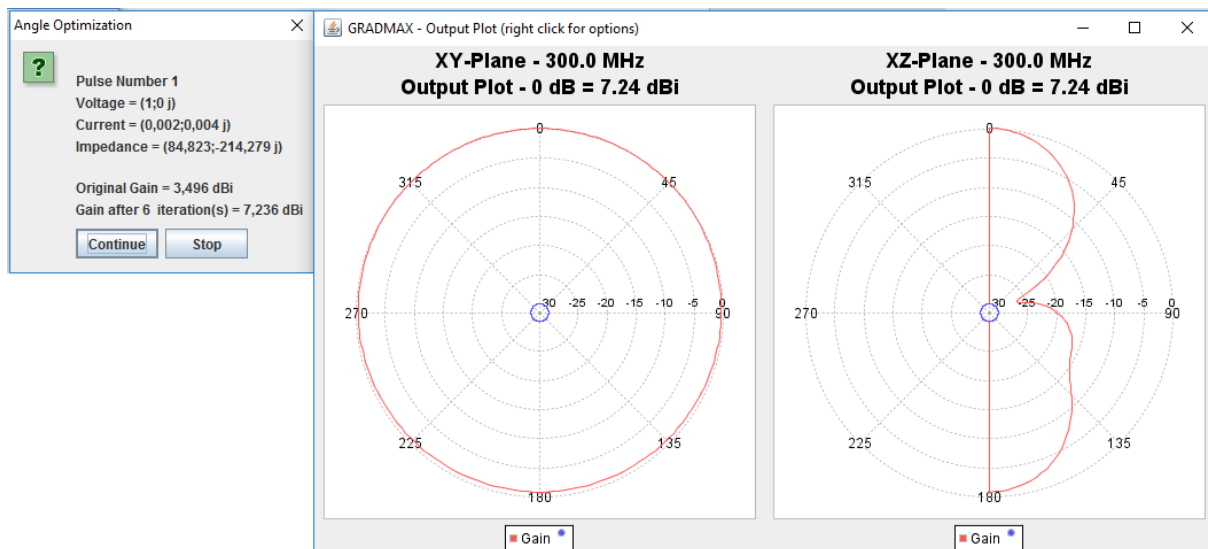


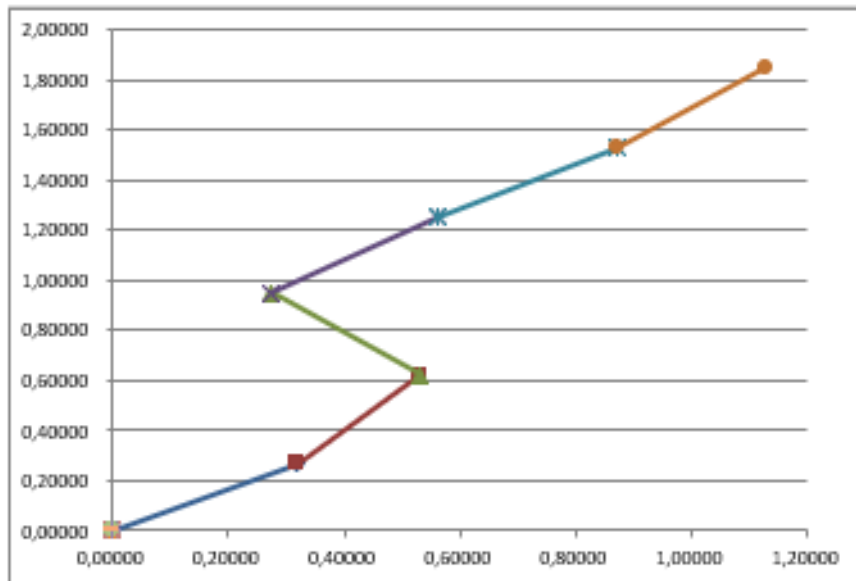
Figura 38: arco de $0,5 \lambda$ otimizado, em GRADMAX

Tabela 9: análise de vários arcos e otimizações na direção X.

Otimização de ARCO na direção X			
ARCO (λ)	Ganho dB (antes de otimizar)	Ganho dB (após otimização)	Observações
0,50	3,50	7,24	Não há inversão de fase
0,60	3,66	8,84	
0,70	4,99	10,01	
0,80	6,40	10,04	
0,90	7,13	9,74	
1,0	7,42	10,19	
1,5	6,94	12,15	
2,0	3,48	12,76	
2,5	2,08	14,12	Dipolo equivalente a 5λ
2,8	4,83	11,17	

1 ELEMENTO COM 6 FIOS: ARCO										
Nome	n° Fios	Free S	Free / Ground	n° Fontes	n° cargas	Frequencia	Fontes (Pulso / Mag / Fase)			
arco	6	Free Space	2	1	0	300	1	1	1	0
							2	0	0	0
							3	0	0	0
							4	0	0	0
							5	0	0	0
							6	0	0	0
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	C1	C2	NS Segmentos	Raio
Fio 1	0,00000	0,00000	0,00000	0,31902	0,00000	0,26617	-1	0	25	0,005
Fio 2	0,31902	0,00000	0,26617	0,53184	0,00000	0,62300	1	0	25	0,005
Fio 3	0,53184	0,00000	0,62300	0,27377	0,00000	0,94861	2	0	25	0,005
Fio 4	0,27377	0,00000	0,94861	0,56076	0,00000	1,24904	3	0	25	0,005
Fio 5	0,56076	0,00000	1,24904	0,86957	0,00000	1,52700	4	0	25	0,005
Fio 6	0,86957	0,00000	1,52700	1,12909	0,00000	1,85145	5	0	24	0,005

(a)



(b)

Figura 39: arco de $2,5\lambda$ após otimização, vista da estrutura

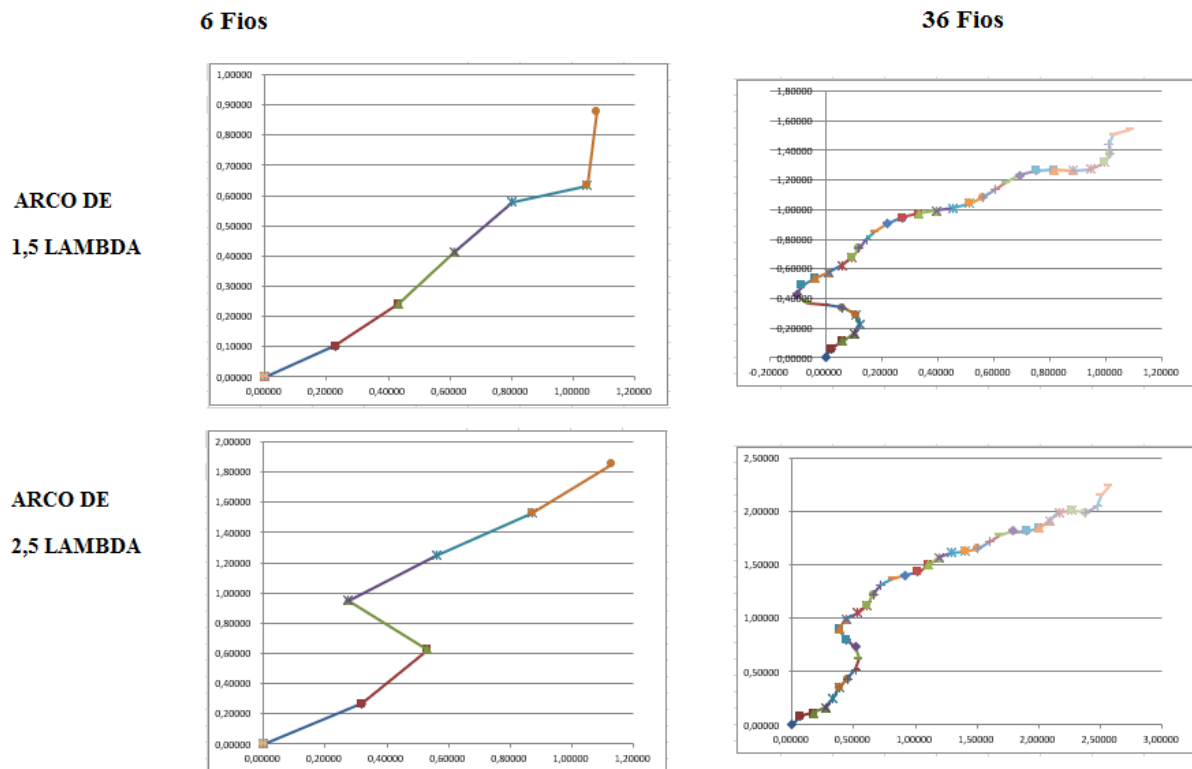


Figura 40: arcos de $1,5\lambda$ e $2,5\lambda$ com 6 e 36 fios otimizados, vista da estrutura

3.8 ANTENA EM 'V'

A antena em V é constituída por dois elementos, sendo um ponto comum de cada extremidade. Tem-se um ângulo formado no ponto comum. Há várias formas de posicionamento da antena em relação ao plano da terra. Nesse ínterim, o presente estudo destacou a antena posicionada na forma horizontal ao plano da terra. Em GRADMAX deu-se a otimização do monopolo equivalente. A estrutura foi subdividida em seis fios. Antes da otimização, o ganho foi de 7,75dBi e, logo após a otimização, 12,47dBi com $Z_{in} = 24-j84$, conforme evidenciado nas Figuras 41 a 43. O ganho equivalente do dipolo em 4nec2 foi de 9,31dBi, conforme Figura 44, a seguir. O ganho para uma abertura de 47° foi maior que o ganho da otimização para o mesmo elemento com a abertura = 90° (visto na seção Dipolo de $1,5\lambda$).

De fato, a antena V pode ser uma boa escolha em determinadas situações. Mas uma de suas características que deve ser notada é a variação da impedância de entrada, pois ela detém curta banda de operação — característica que limita o uso da estrutura. Nesse ínterim, tanto a impedância de entrada quanto o SWR podem ser observados na Figura 45.

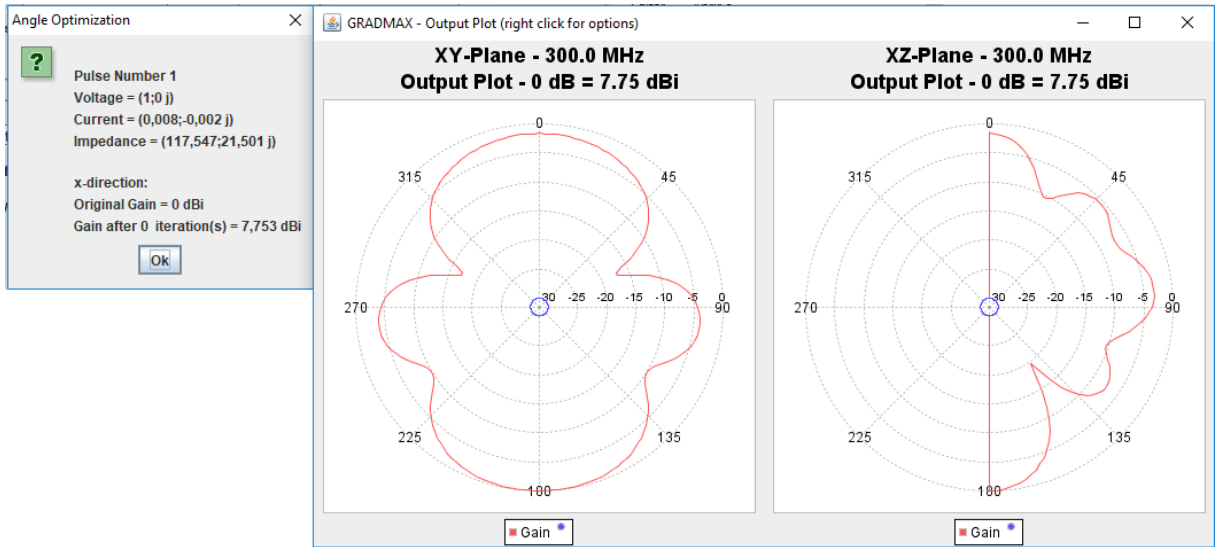


Figura 41: antena V alfa 47°, em GRADMAX

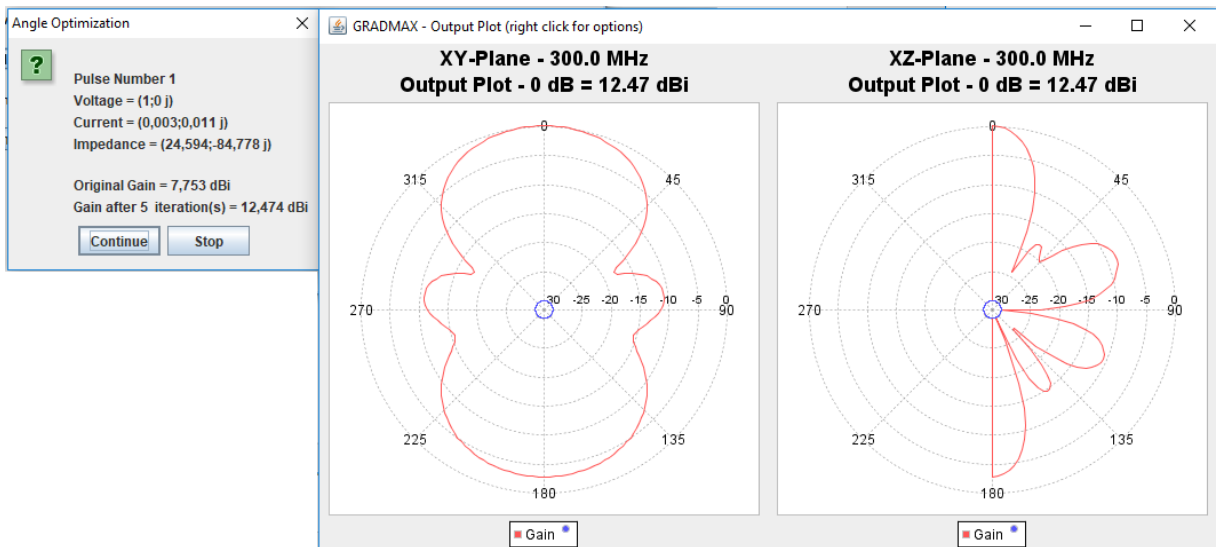
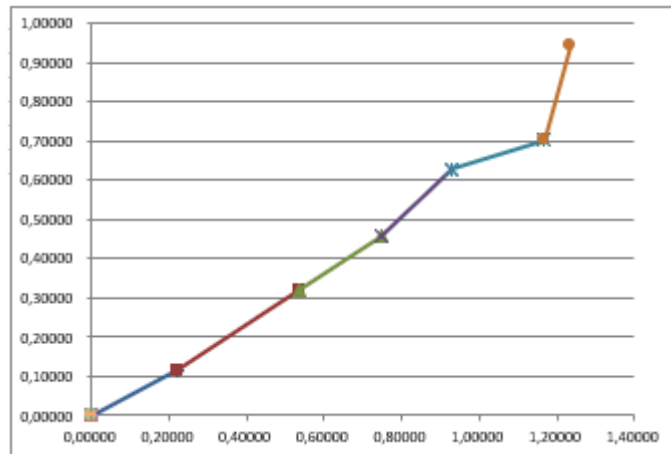


Figura 42: antena V alfa 47° otimizada, em GRADMAX

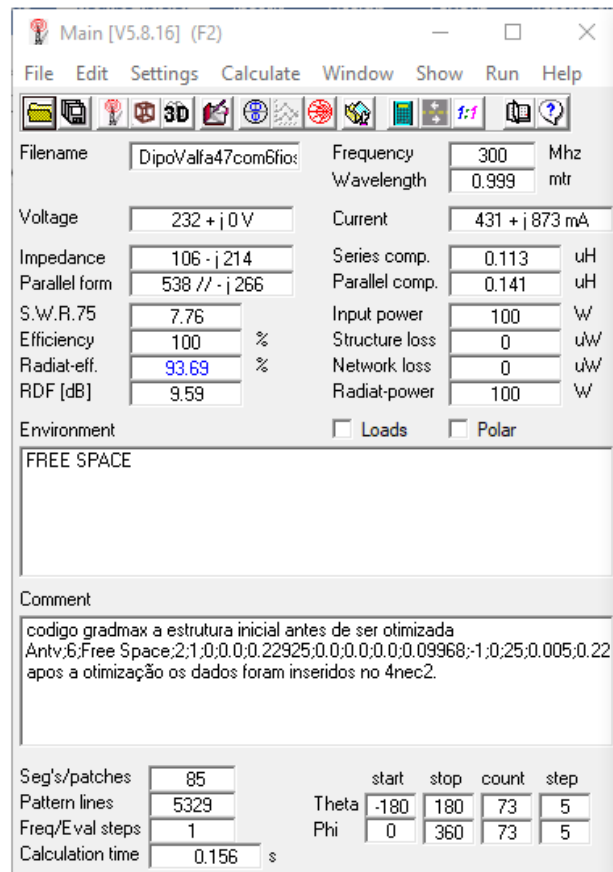
1 ELEMENTO COM 6 FIOS										
Nome	n' Fios	Free S	Free / Ground	n' Fontes	n' cargas	Frequencia	Fontes (Pulso / Mag / Fase)			
Antv	6	Free Space	2	1	0	300	1	1	1	0
							2	0	0	0
							3	0	0	0
							4	0	0	0
							5	0	0	0
							6	0	0	0
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	C1	C2	NS Segmentos	Raio
Fio 1	0,0000	0,0000	0,0000	0,22172	0,0000	0,11547	-1	0	25	0,005
Fio 2	0,22172	0,0000	0,11547	0,53805	0,0000	0,32020	1	0	25	0,005
Fio 3	0,53805	0,0000	0,32020	0,74757	0,0000	0,45653	2	0	25	0,005
Fio 4	0,74757	0,0000	0,45653	0,92935	0,0000	0,62814	3	0	25	0,005
Fio 5	0,92935	0,0000	0,62814	1,16816	0,0000	0,70209	4	0	25	0,005
Fio 6	1,16816	0,0000	0,70209	1,23467	0,0000	0,94306	5	0	24	0,005

(a)

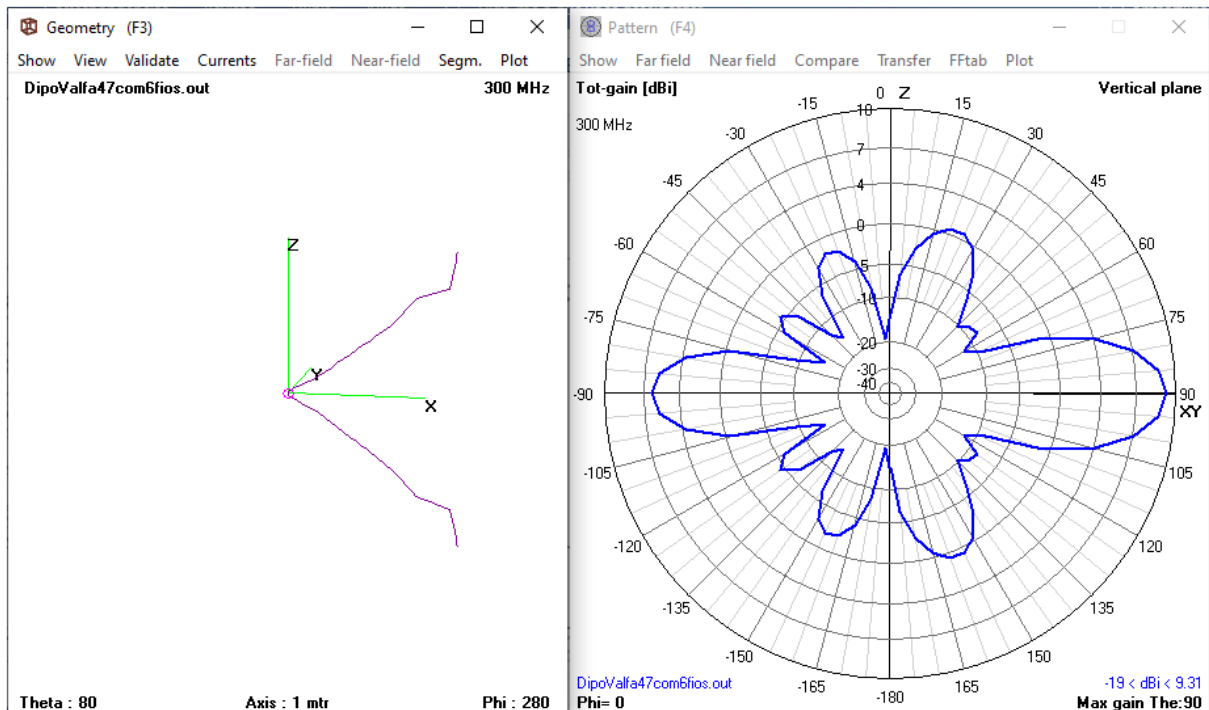


(b)

Figura 43: antena V alfa 47° otimizada, vista da estrutura

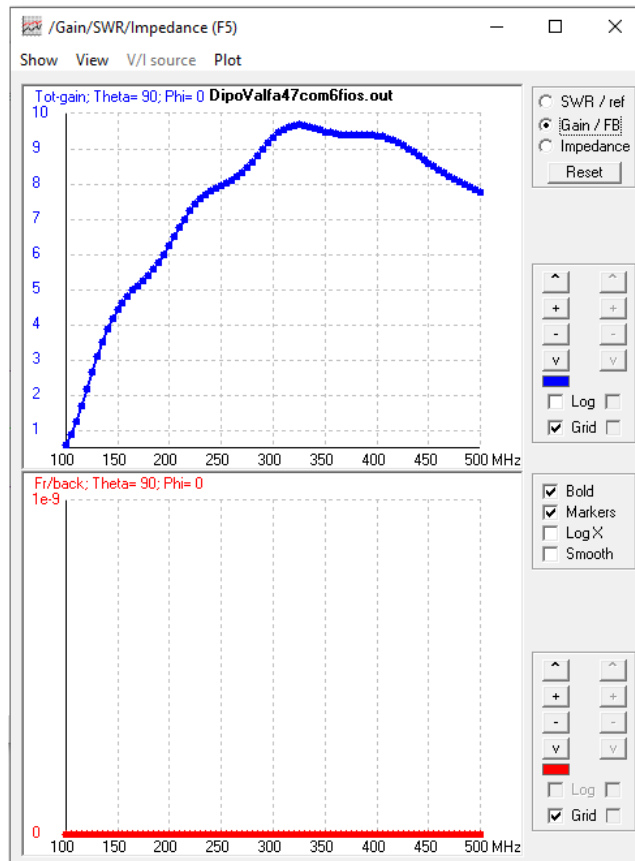


(a)

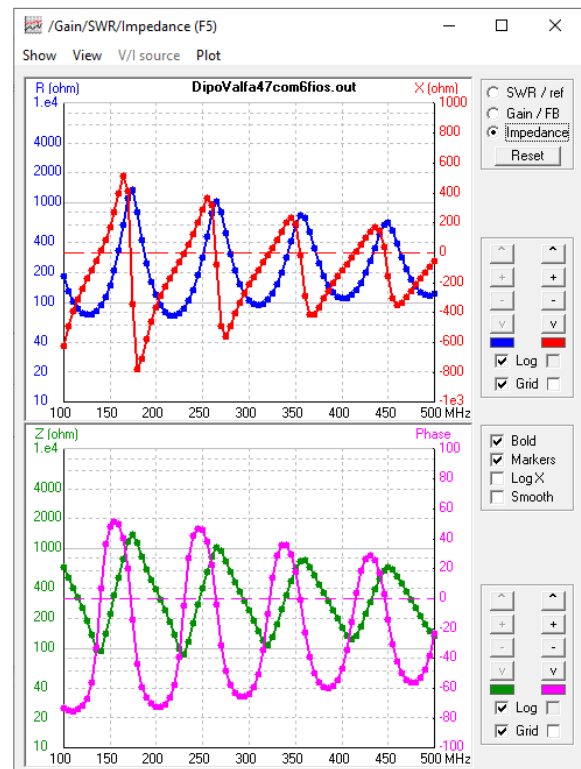
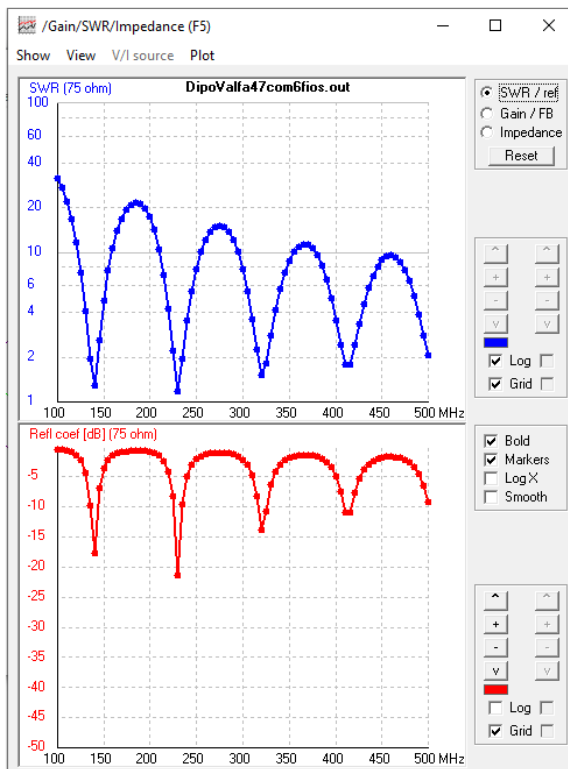


(b)

Figura 44: antena V alfa 47° otimizada, em 4nec2



(a)



(b)

Figura 45: antena V alfa 47° otimizada (banda), em 4nec2

4.0 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: YAGI

4.1 ANTENA YAGI

A antena yagi consiste de um único elemento alimentado (L). Os demais elementos são ditos parasitas (L_D ou L_R), conforme Figura 46:

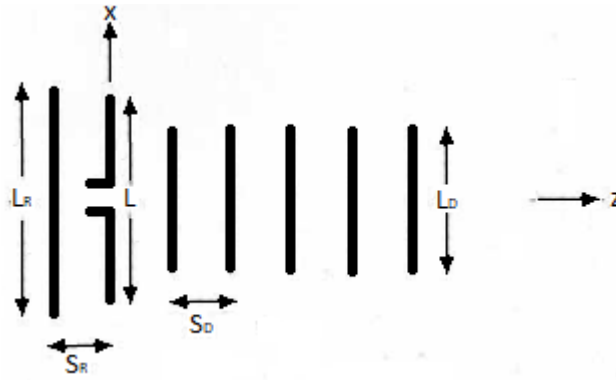


Figura 46: estrutura da antena yagi [4].

Foi simulado um antena yagi (com 3 elementos) com os parâmetros:: $L_R = 0,50\lambda$, $L = 0,47\lambda$ e $L_D = 0,44\lambda$, Raio (R) = $0,005\lambda$, $S_R = 0,2042\lambda$ e $S_D = 0,1971\lambda$ e número de segmento (N) = 50 em cada elemento. Nesse ínterim, na presente pesquisa, obteve-se, em GRADMAX, o valor de $Z_{in} = 19,14 + j36,64$ com ganho de 9,33dBi. Já em 4nec2, com N = 31, obteve-se: $Z_{in} = 17,7 + j46,6$, e ganho de 9,3dBi, consoante Figura 47e 48.

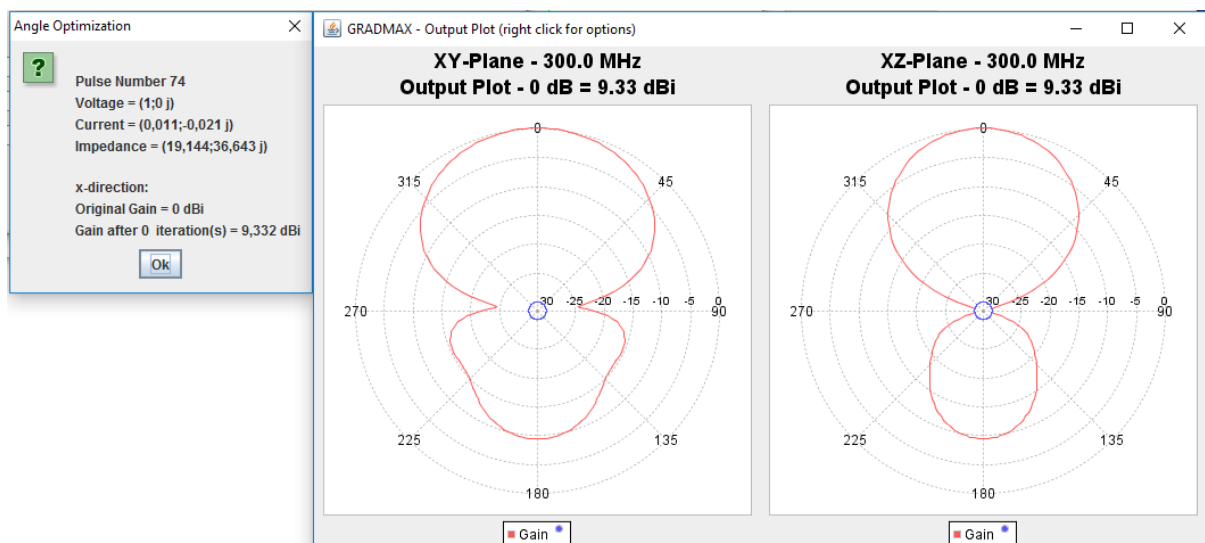
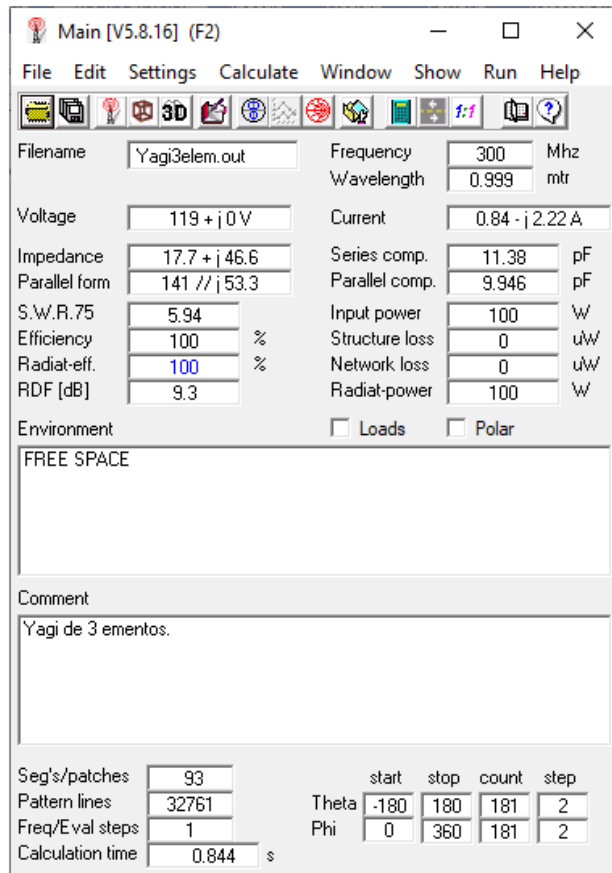
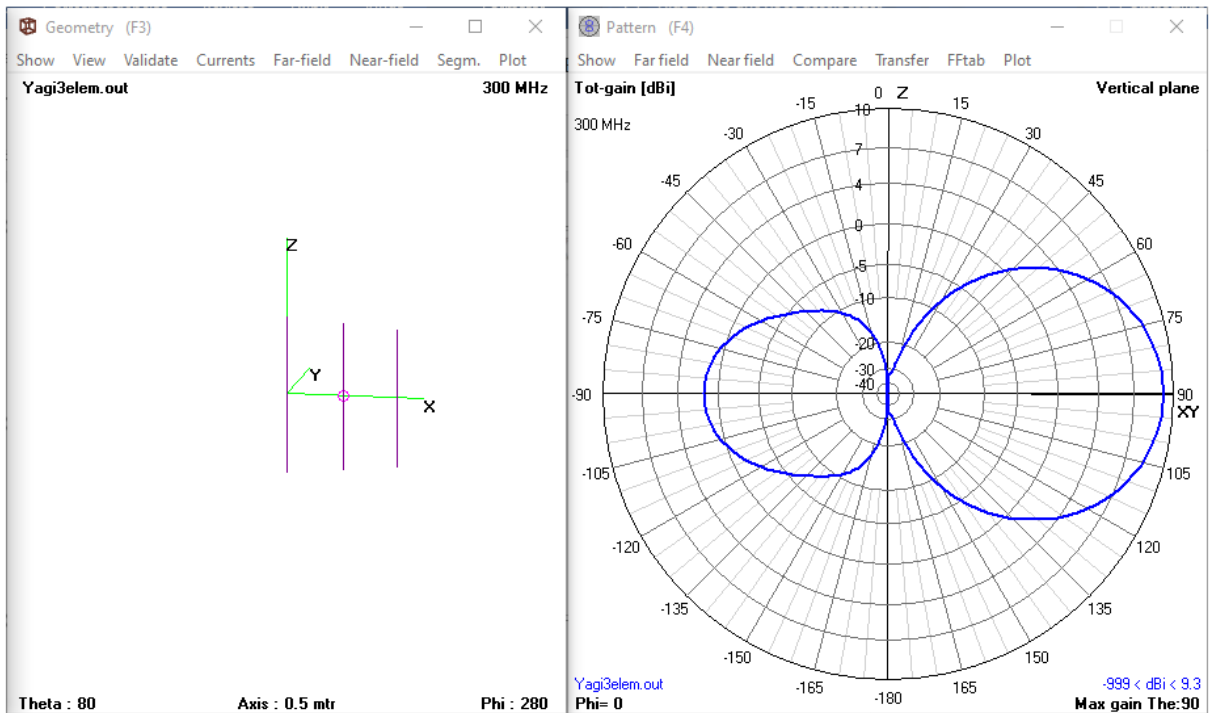


Figura 47: yagi de 3 elementos, em GRADMAX



(a)



(b)

Figura 48: yagi de 3 elementos, em 4nec2

Como feito, o dipolo de $0,5\lambda$ e seu equivalente monopolo de $0,25\lambda$ foram analisados para o caso de uma *array* tipo yagi. Para uma yagi de monopolos, com $N= 25$ em cada elemento, foi obtido, em GRADMAX, o valor de $Z_{in} = 9,512 + j19,412$ e ganho de 12,33dB. A simulação em 4nec2, também, foi realizada, conforme Figura 49 e 50 bem como Tabela 10.

Tabela 10: relação dipolo e monopolo de uma yagi reta em 4nec2

4nec2	Z_{in}	Ganho
Dipolo (N=31)	17,7 +j46,6	9,3 dBi
Monopolo (N = 15)	8,63 +j23,1	12,3 dBi
Relação Dipolo/Monopolo	2,05 (parte real) 2,01 (parte imaginaria)	-3,00 dBi

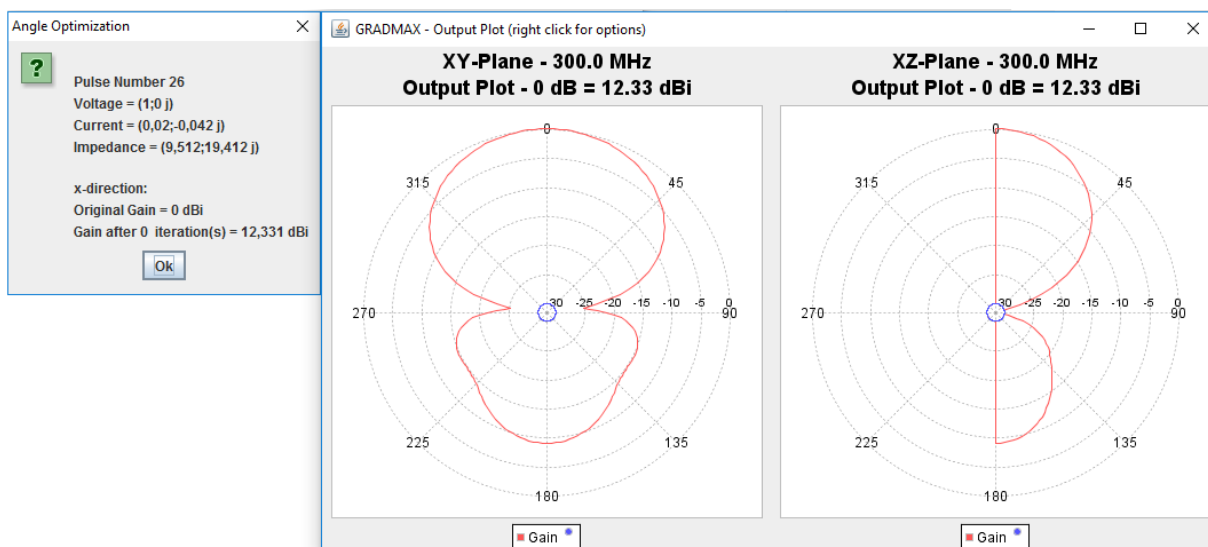
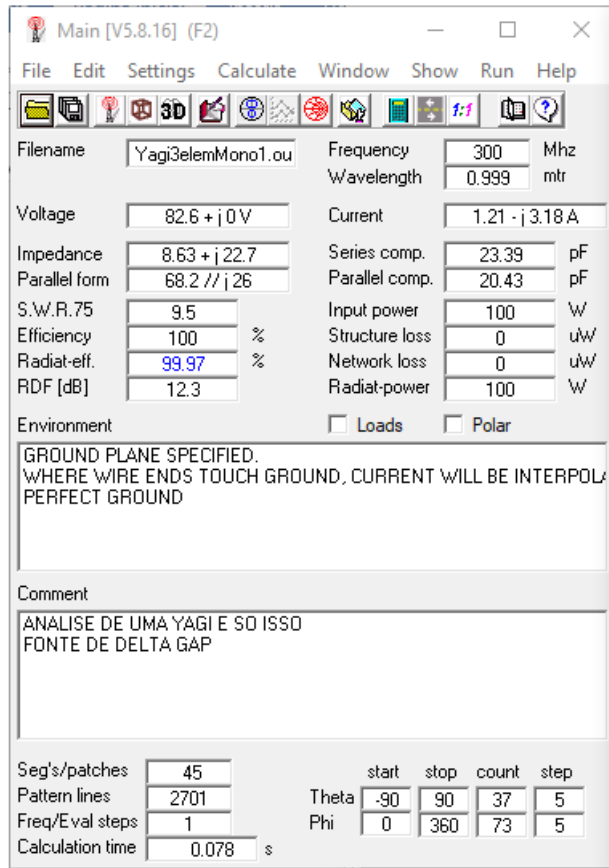
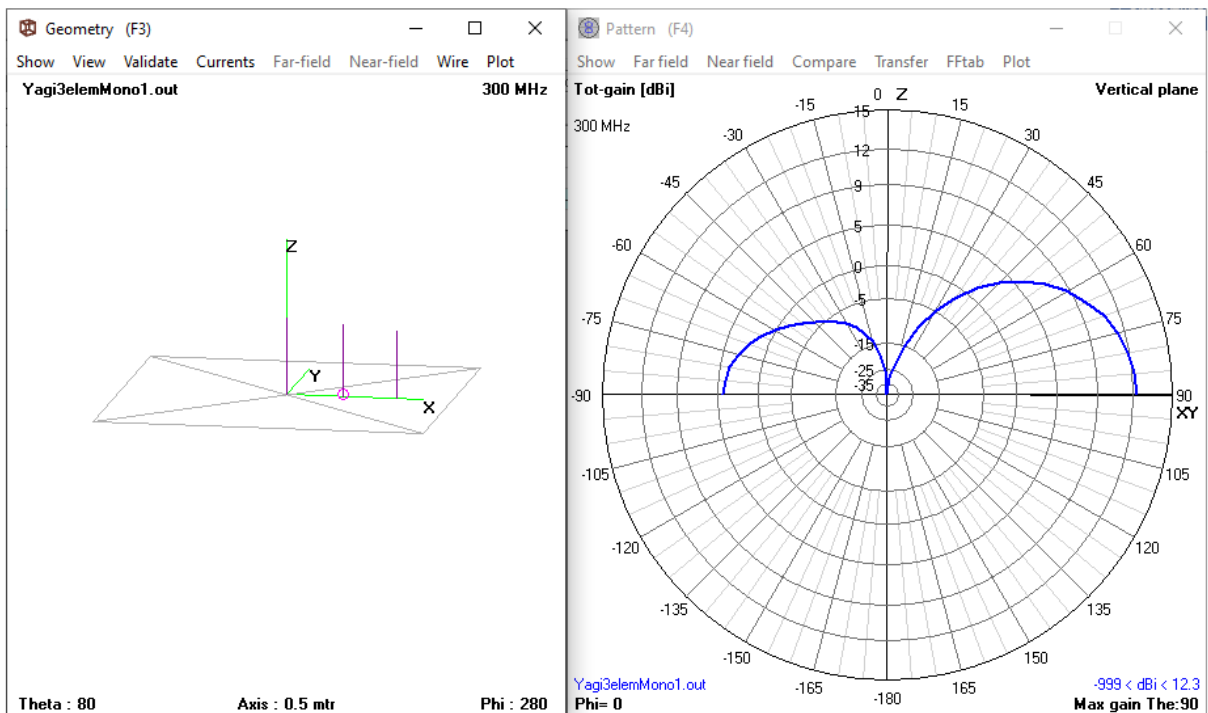


Figura 49: yagi de 3 monopolos, em GRADMAX



(a)



(b)

Figura 50: yagi de 3 monopolos, em 4nec2

Diante do exposto, foi possível observar que a mesma característica para a impedância de entrada e o ganho é mantida na estrutura de antena tipo yagi; ou seja, no modo monopolo tem-se uma redução, pela metade, na impedância de entrada comparada ao seu equivalente em dipolo. O ganho também possui uma relação de 3dB entre o dipolo e o monopolo — relação também encontrada para antenas compostas por apenas um elemento. A mesma relação pode ser observada em GRADMAX.

4.2 YAGI DE 3 ELEMENTOS RETA [6]

Aqui se empreendeu a análise de uma yagi retilínea com 3 monopolos, com as seguintes dimensões: $L_R = 0,25\lambda$, $L = 0,235\lambda$ e $L_D = 0,22\lambda$, com $Raio = 0,005\lambda$ e $S_R = 0,2042\lambda$ e $S_D = 0,1971\lambda$. Tal antena é o resultado após um processo de otimização [6]. Em GRADMAX, por exemplo, fez-se uso de $N = 10$. O resultado, após a simulação, pode ser observado na Figura 51, a seguir. Por conseguinte, a mesma estrutura foi analisada em 4nec2. Nas Figura 52 e 53, a seguir, podem ser observados os dados obtidos na simulação de 525Mhz e SWR, Ganho e Z_{in} para uma banda de 475Mhz até 675Mhz.

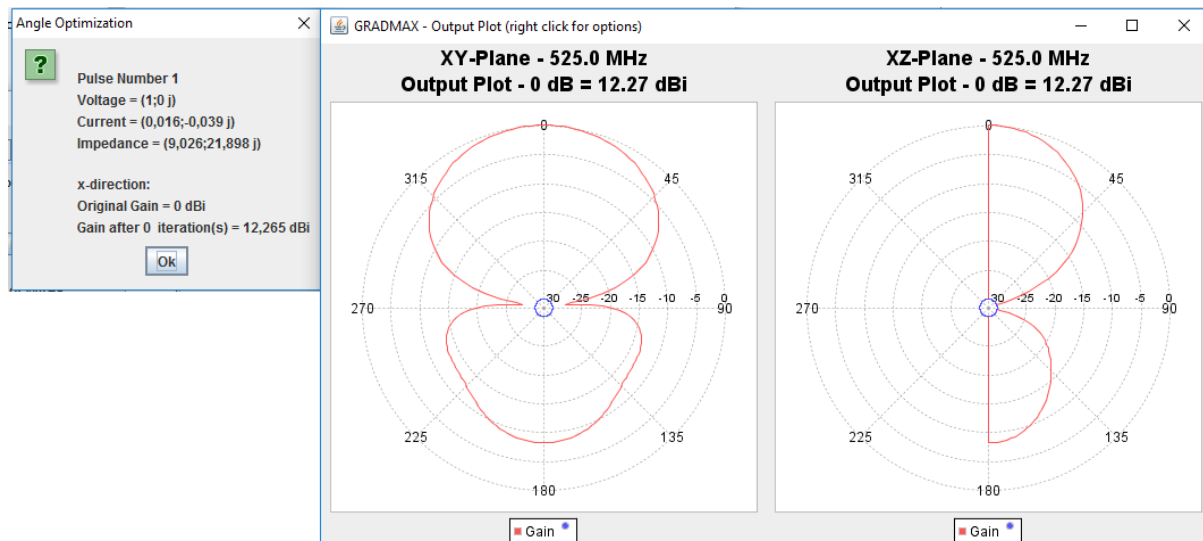
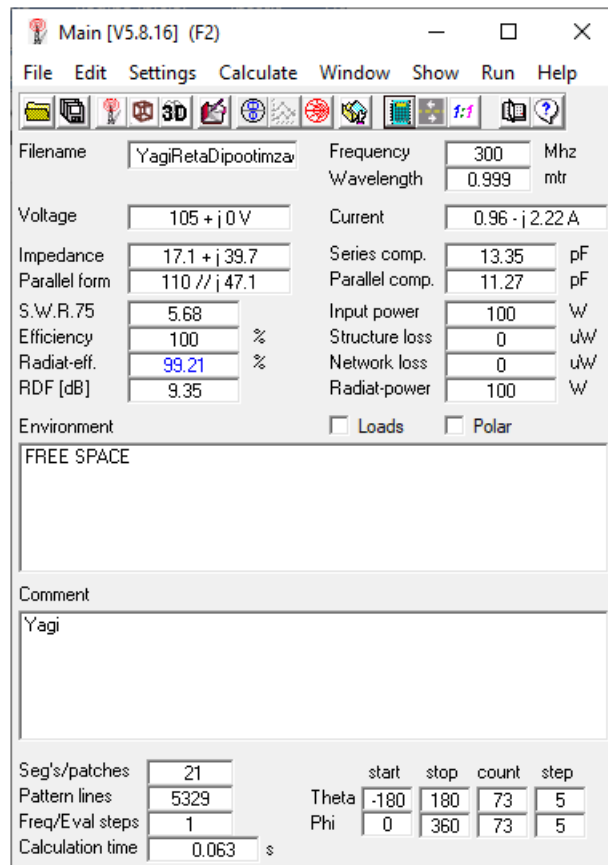


Figura 51: yagi de 3 monopolos retos, em GRADMAX [6]



(a)

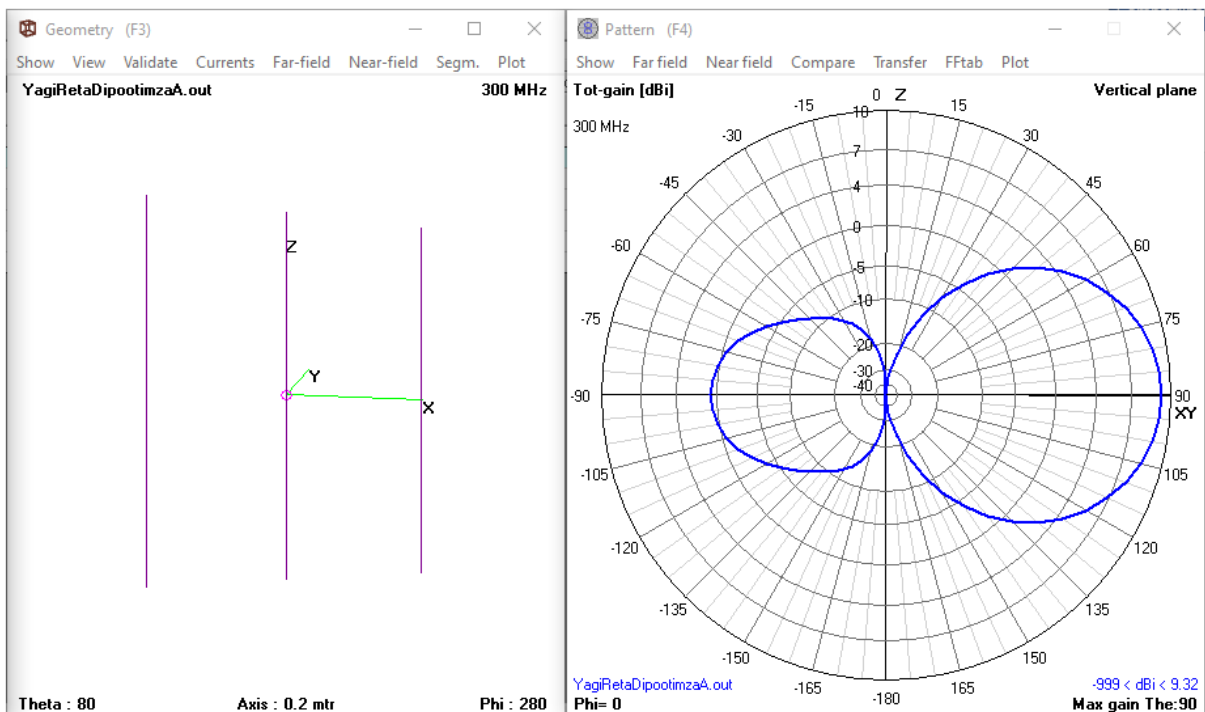
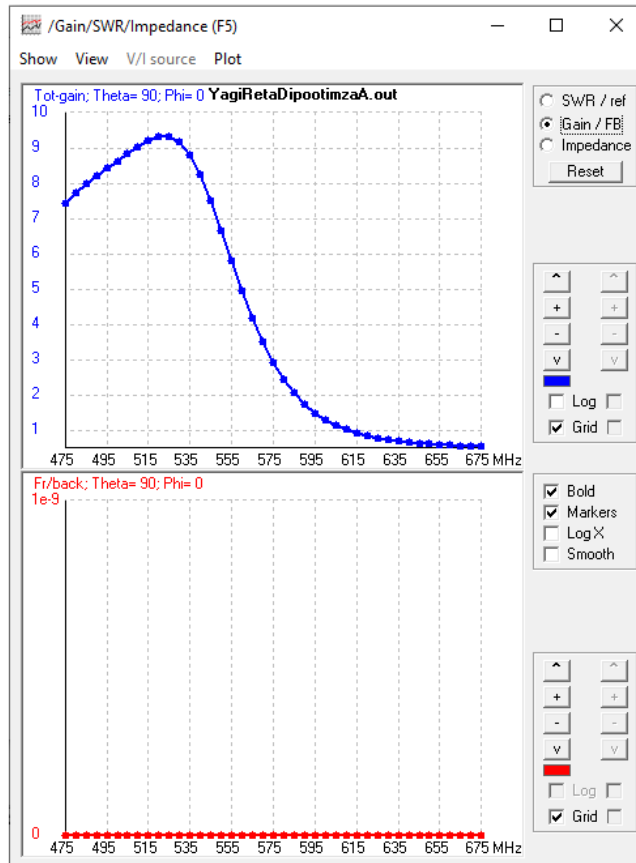


Figura 52: yagi de 3 elementos retos, em 4nec2 [6]



(a)

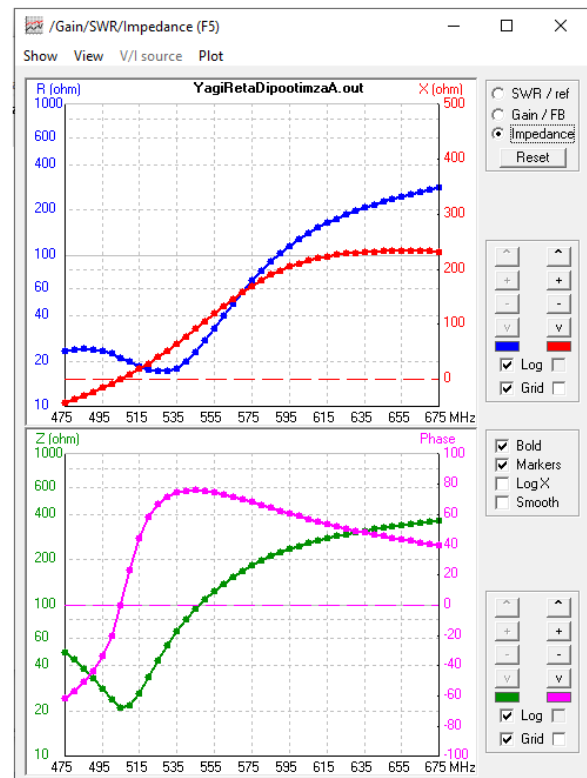
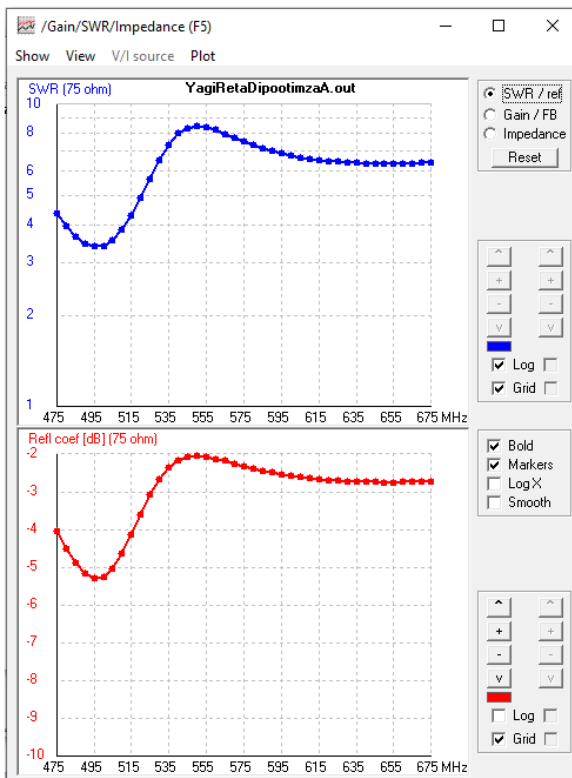


Figura 53: yagi de 3 elementos retos (banda)[6], em 4nec2

4.3 YAGI DE 3 ELEMENTOS CURVILÍNEA [12]

Fez-se uso da estrutura de um elemento otimizado de $0,75\lambda$ visto anteriormente, acrescido do mesmo elemento afastado $0,2\lambda$ (refletor). Realizou-se, então, a otimização por ângulo com a estrutura de dois elementos. Após a otimização, o primeiro elemento foi replicado (como um diretor) com afastamento de $0,2\lambda$. O terceiro elemento foi reduzido proporcionalmente tanto em altura quanto em comprimento. O fator foi de 0,9333. Posteriormente, deu-se a otimização por ângulo da estrutura com três elementos, logrando-se a convergência. A estrutura final foi analisada em 4nec2. Em GRADMAX o ganho foi de 15,0dBi e, em 4nec2, o ganho foi de 12,0dBi, conforme Figura 54 a 57.

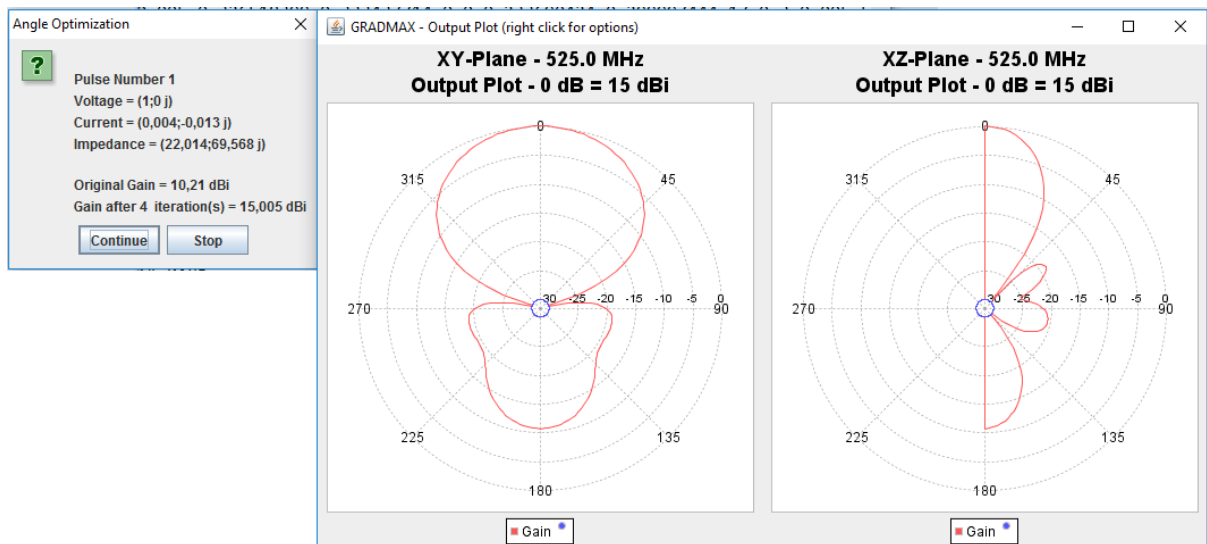
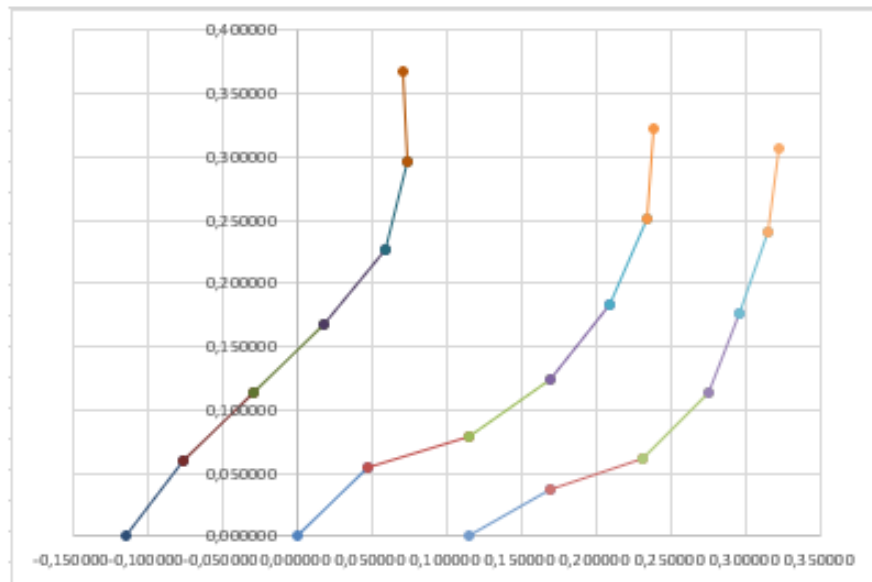


Figura 54: yagi de 3 monopolos curvilínea, em GRADMAX [12]

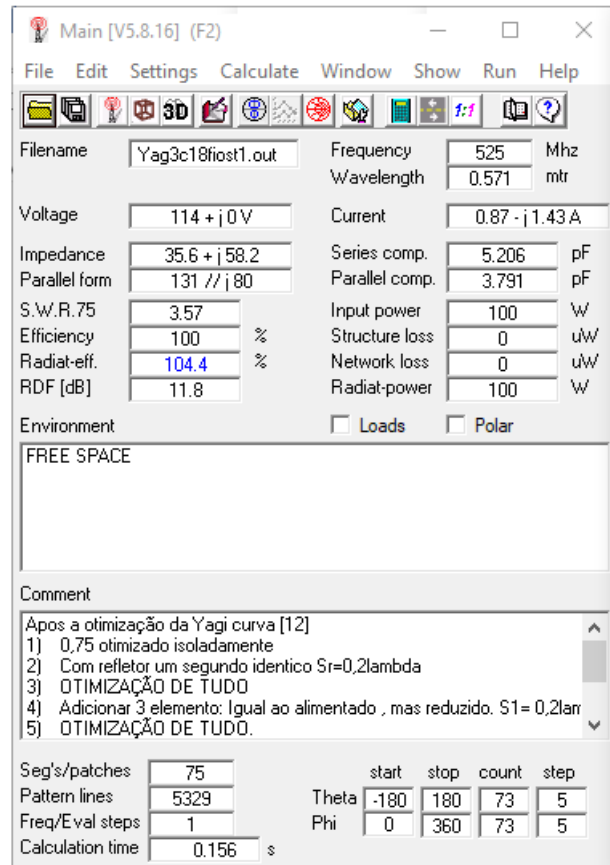
Codigo para 18 fios - Gradmax (1 fonte)										
Nome	n° Fios	Free S	Free / Ground	n° Fontes	n° cargas	Frequencia	Fontes (Pulso / Mag / Fase)			
Yagi	18	Free Space	2	1	0	525	1	1	1	0
							2	0	0	0
							3	0	0	0
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	C1	C2	NS Segmentos	Raio
Fio 1	0,000000	0,0	0,000000	0,047121	0,0	0,053680	-1	0	10	0,005
Fio 2	0,047121	0,0	0,053680	0,114144	0,0	0,078380	1	0	5	0,005
Fio 3	0,114144	0,0	0,078380	0,168675	0,0	0,124513	2	0	3	0,005
Fio 4	0,168675	0,0	0,124513	0,208979	0,0	0,183485	3	0	3	0,005
Fio 5	0,208979	0,0	0,183485	0,233166	0,0	0,250693	4	0	3	0,005
Fio 6	0,233166	0,0	0,250693	0,238639	0,0	0,321912	5	0	3	0,005
Fio 7	-0,114286	0,0	0,000000	-0,076322	0,0	0,060504	-7	0	10	0,005
Fio 8	-0,076322	0,0	0,060504	-0,029337	0,0	0,114304	7	0	5	0,005
Fio 9	-0,029337	0,0	0,114304	0,017589	0,0	0,168155	8	0	3	0,005
Fio 10	0,017589	0,0	0,168155	0,058811	0,0	0,226490	9	0	3	0,005
Fio 11	0,058811	0,0	0,226490	0,073624	0,0	0,296365	10	0	3	0,005
Fio 12	0,073624	0,0	0,296365	0,070397	0,0	0,367721	11	0	3	0,005
Fio 13	0,114286	0,0	0,000000	0,169611	0,0	0,037194	-13	0	10	0,005
Fio 14	0,169611	0,0	0,037194	0,231576	0,0	0,061789	13	0	5	0,005
Fio 15	0,231576	0,0	0,061789	0,274233	0,0	0,113021	14	0	3	0,005
Fio 16	0,274233	0,0	0,113021	0,296100	0,0	0,175999	15	0	3	0,005
Fio 17	0,296100	0,0	0,175999	0,314706	0,0	0,240016	16	0	3	0,005
Fio 18	0,314706	0,0	0,240016	0,321600	0,0	0,306325	17	0	3	0,005

(a)



(b)

Figura 55: yagi de 3 monopolos curvilínea, vista da estrutura [12]



(a)

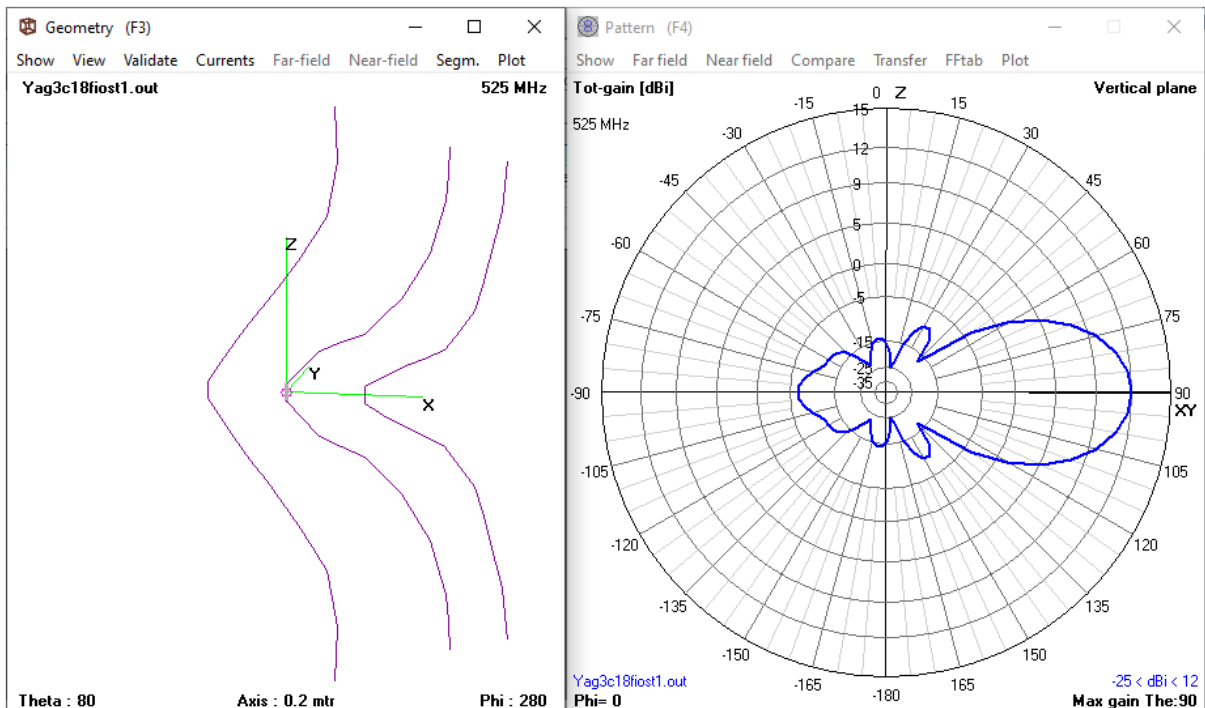
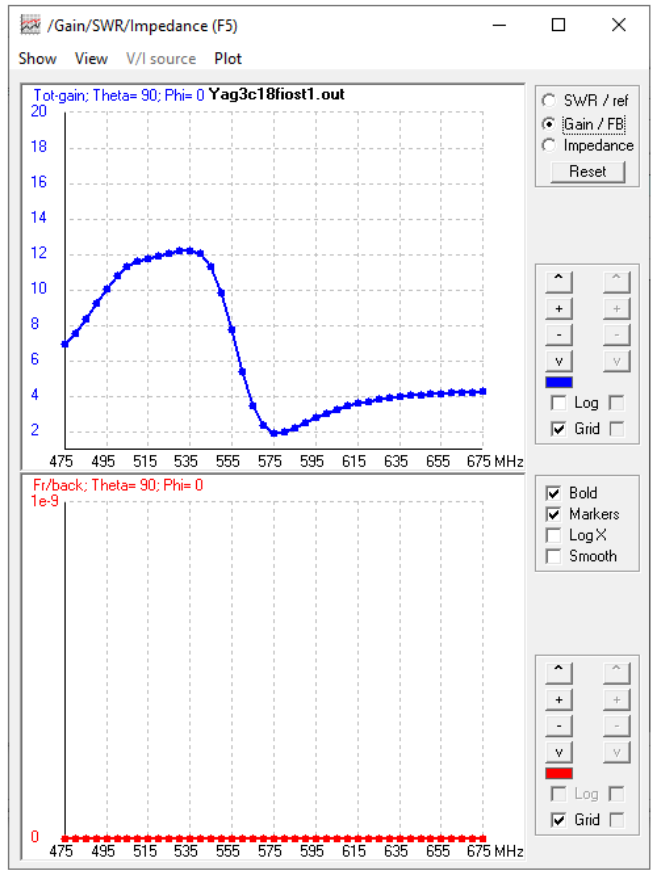


Figura 56: yagi de 3 elementos curvilíneos, em 4nec2 [12]



(a)

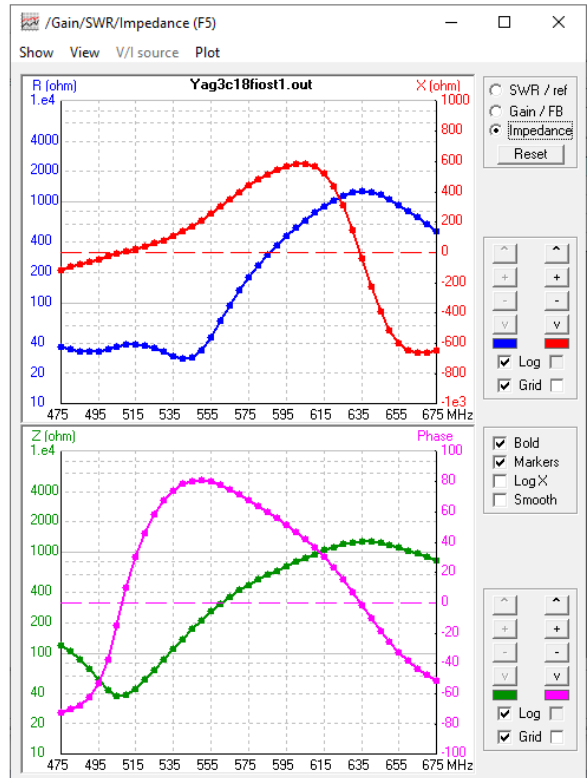
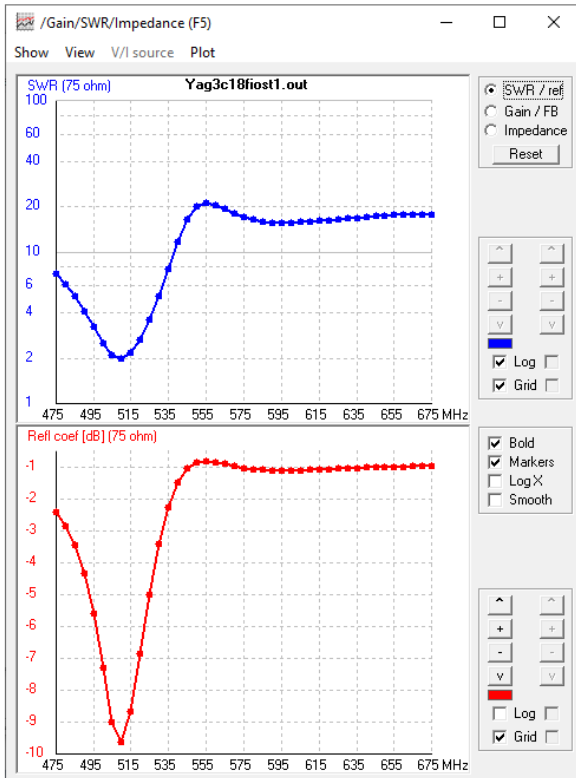


Figura 57: yagi de 3 elementos curvilínea (banda), em 4nec2 [12]

4.4 YAGI DE 3 ELEMENTOS DE 1,5 λ

Analisou-se um *array* de três elementos retos e idênticos, inicialmente, com uma alimentação no elemento central, de distância: $S_R = 0,2042 \lambda$ e $S_D = 0,1971 \lambda$. O ganho foi de 8,09dBi, conforme evidenciado na Figura 58, a seguir. A antena yagi se diferencia devido ao seu refletor ser um pouco maior que o alimentador e seus diretores serem menores que seu alimentador. Realizando a otimização (7 interações) da estrutura, foi obtido um ganho de 11,89 dBi, em GRADMAX. Os resultados podem ser observados nas Figura 59 e 60.

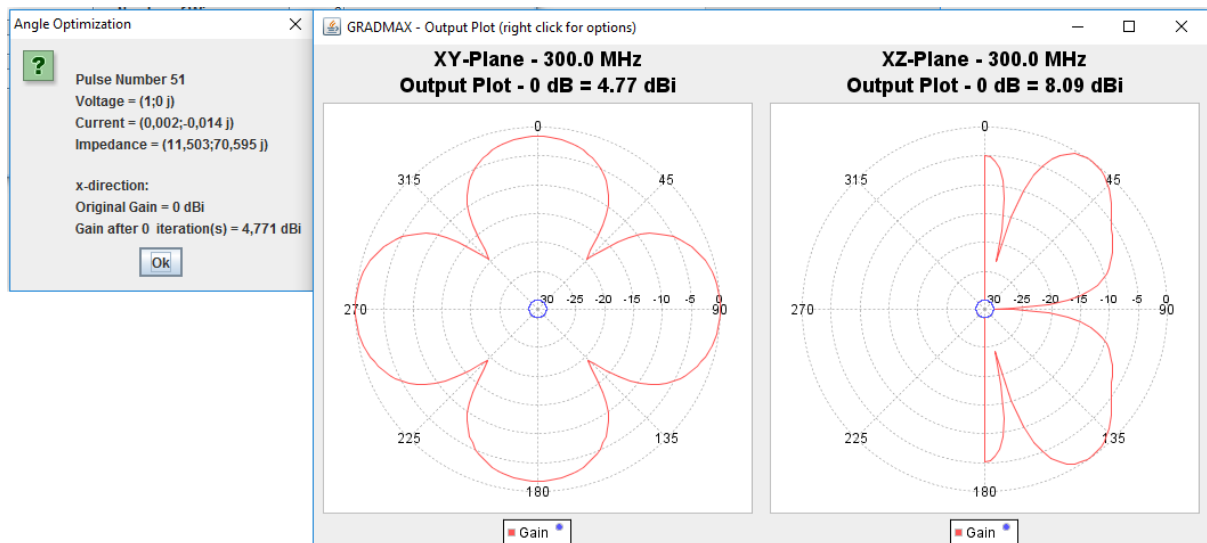
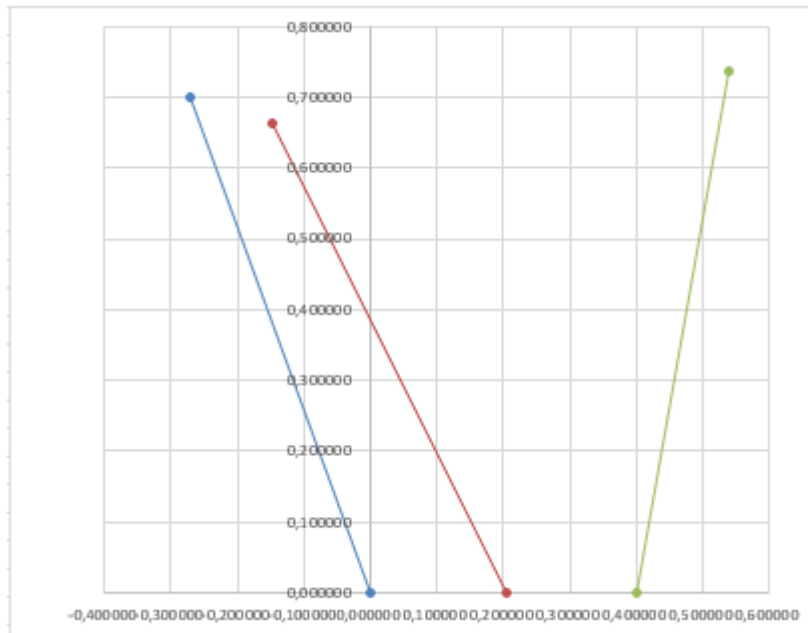


Figura 58: yagi de 3 monopolos retos de 0,75 λ , sem otimização, em GRADMAX

Codigo para 3 fios - Gradmax										
Nome	n Fios	Free S	Free / Ground	n Fontes	n cargas	Frequencia	Fontes(Pulso / Mag / Fase)			
Yagi3retos	3	Free Space	2	1	0	300	1	51	1	0
							2	0	0	0
							3	0	0	0
Fio 1	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	C1	C2	NS Segmentos	Raio
Fio 1	0,000000	0,0	0,000000	-0,271453	0,0	0,699152	-1	0	50	0,005
Fio 2	0,204200	0,0	0,000000	-0,146824	0,0	0,662784	-2	0	50	0,005
Fio 3	0,401300	0,0	0,000000	0,538884	0,0	0,737272	-3	0	49	0,005

(a)



(b)

Figura 59: yagi de 3 monopolos de $0,75\lambda$ retos otimizados, vista da estrutura

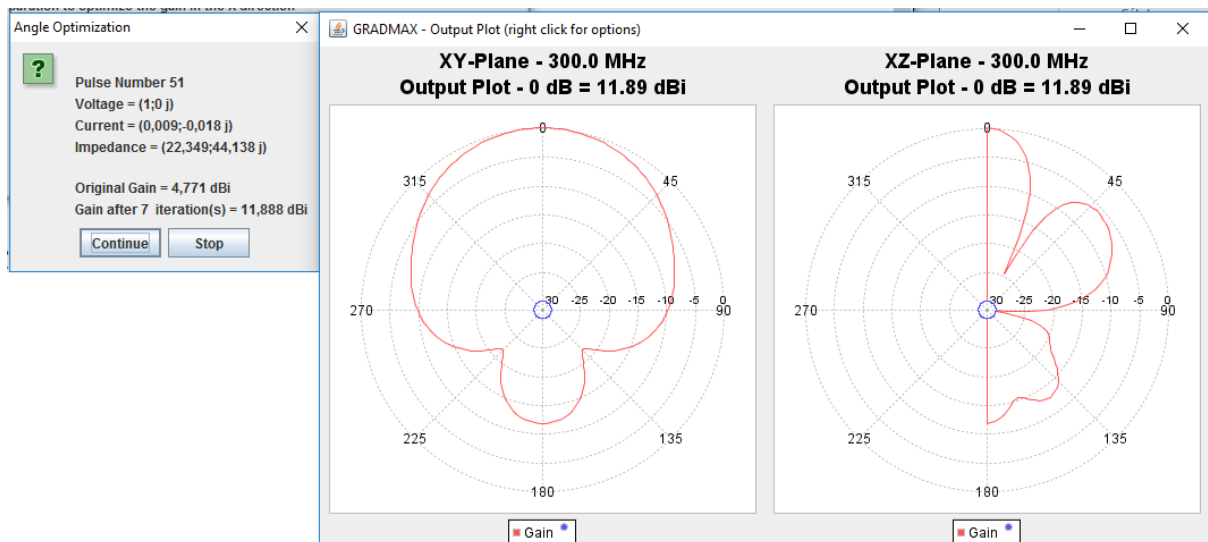


Figura 60: yagi de 3 monopolos de $0,75 \lambda$ retos otimizados, em GRADMAX

Realizando uma nova otimização e partindo de outro ponto, fez-se uso dos três elementos já otimizados isoladamente, formando um *array* (em cada elemento, $0,75 \lambda$) (vide Figura 17). Com essa estrutura, foi formado o Yagi de três elementos. Inicialmente, o ganho foi de 8,07dBi e, após a otimização, foi de 12,24dBi (em GRADMAX) e 11,90dBi (em 4nec2), conforme Figura 61 a 63.

Por fim, em 4nec2, foi construída a otimização final dos dois procedimentos acima realizados. Tanto com três elementos retos ($0,75 \lambda$ retos) quanto com três elementos otimizados separadamente ($0,75 \lambda$ otimizados isoladamente), conforme Figura 64 e 65.

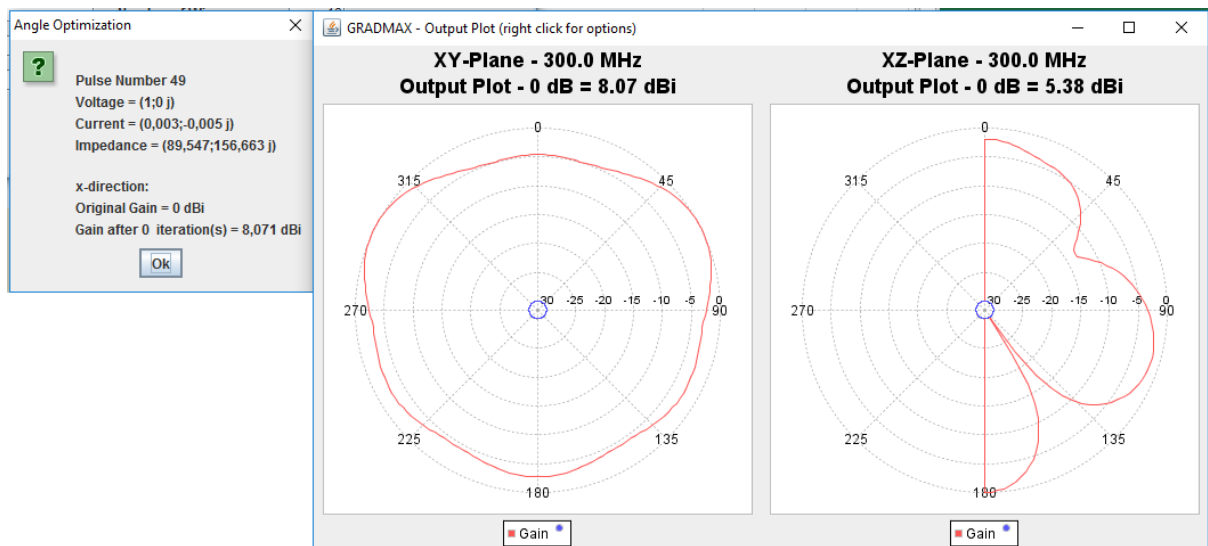


Figura 61: yagi de 3 monopolos de $0,75\lambda$ otimizados isoladamente, em GRADMAX

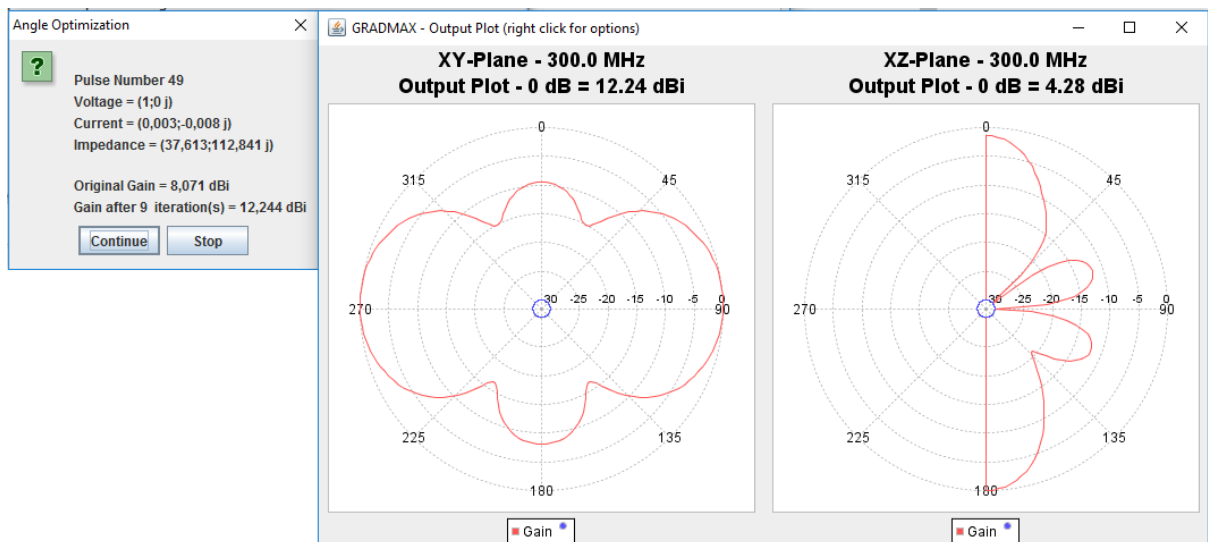
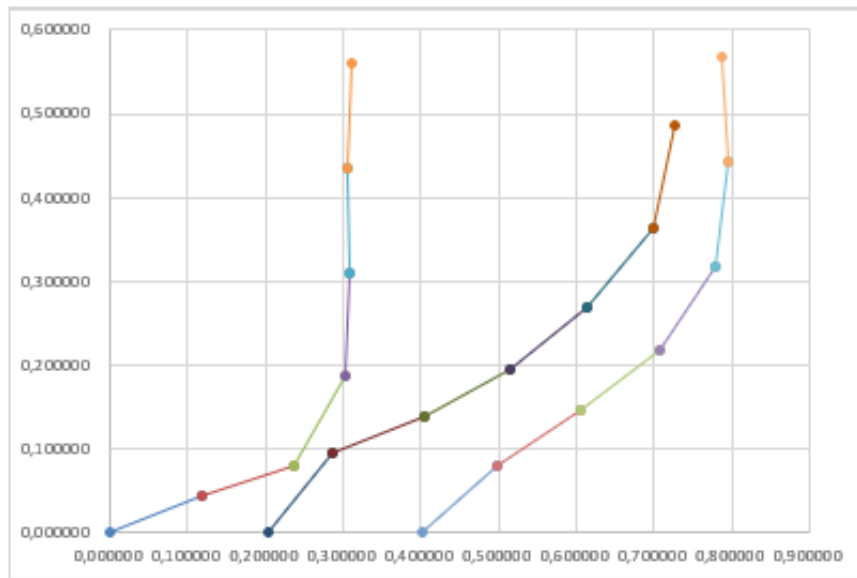


Figura 62: yagi de 3 monopolos de $0,75\lambda$ otimizados isoladamente após 9 otimizações, em GRADMAX

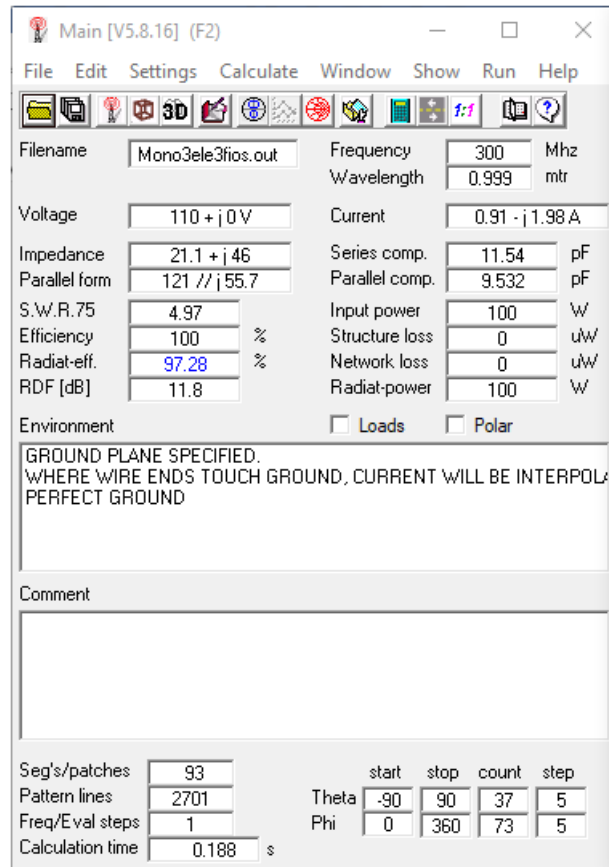
Codigo para 18 fios - Gradmax										
Nome	n° Fios	Free S	Free / Ground	n° Fontes	n° cargas	Frequencia	Fontes (Pulso / Mag / Fase)			
yagi3	18	Free Space	2	1	0	300	1	43	1	0
							2	0	0	0
							3	0	0	0
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	C1	C2	NS Segmentos	Raio
Fio 1	0,000000	0,0	0,000000	0,117325	0,0	0,043125	-1	0	8	0,0050
Fio 2	0,117325	0,0	0,043125	0,237351	0,0	0,078035	1	0	8	0,0050
Fio 3	0,237351	0,0	0,078035	0,301483	0,0	0,185330	2	0	8	0,0050
Fio 4	0,301483	0,0	0,185330	0,307073	0,0	0,310205	3	0	8	0,0050
Fio 5	0,307073	0,0	0,310205	0,304729	0,0	0,435183	4	0	8	0,0050
Fio 6	0,304729	0,0	0,435183	0,311934	0,0	0,559971	5	0	8	0,0050
Fio 7	0,204200	0,0	0,000000	0,286003	0,0	0,094516	-7	0	8	0,0050
Fio 8	0,286003	0,0	0,094516	0,403605	0,0	0,136879	7	0	8	0,0050
Fio 9	0,403605	0,0	0,136879	0,514184	0,0	0,195166	8	0	8	0,0050
Fio 10	0,514184	0,0	0,195166	0,614577	0,0	0,269639	9	0	8	0,0050
Fio 11	0,614577	0,0	0,269639	0,697793	0,0	0,362914	10	0	8	0,0050
Fio 12	0,697793	0,0	0,362914	0,725371	0,0	0,484834	11	0	8	0,0050
Fio 13	0,401300	0,0	0,000000	0,498312	0,0	0,078827	-13	0	8	0,0050
Fio 14	0,498312	0,0	0,078827	0,604491	0,0	0,144789	13	0	8	0,0050
Fio 15	0,604491	0,0	0,144789	0,706477	0,0	0,217065	14	0	8	0,0050
Fio 16	0,706477	0,0	0,217065	0,779975	0,0	0,318175	15	0	8	0,0050
Fio 17	0,779975	0,0	0,318175	0,794626	0,0	0,442313	16	0	8	0,0050
Fio 18	0,794626	0,0	0,442313	0,787560	0,0	0,567113	17	0	8	0,0050

(a)



(b)

Figura 63: yagi de 3 monopolos de $0,75\lambda$ otimizados isoladamente, após 9 otimizações, vista da estrutura



(a)

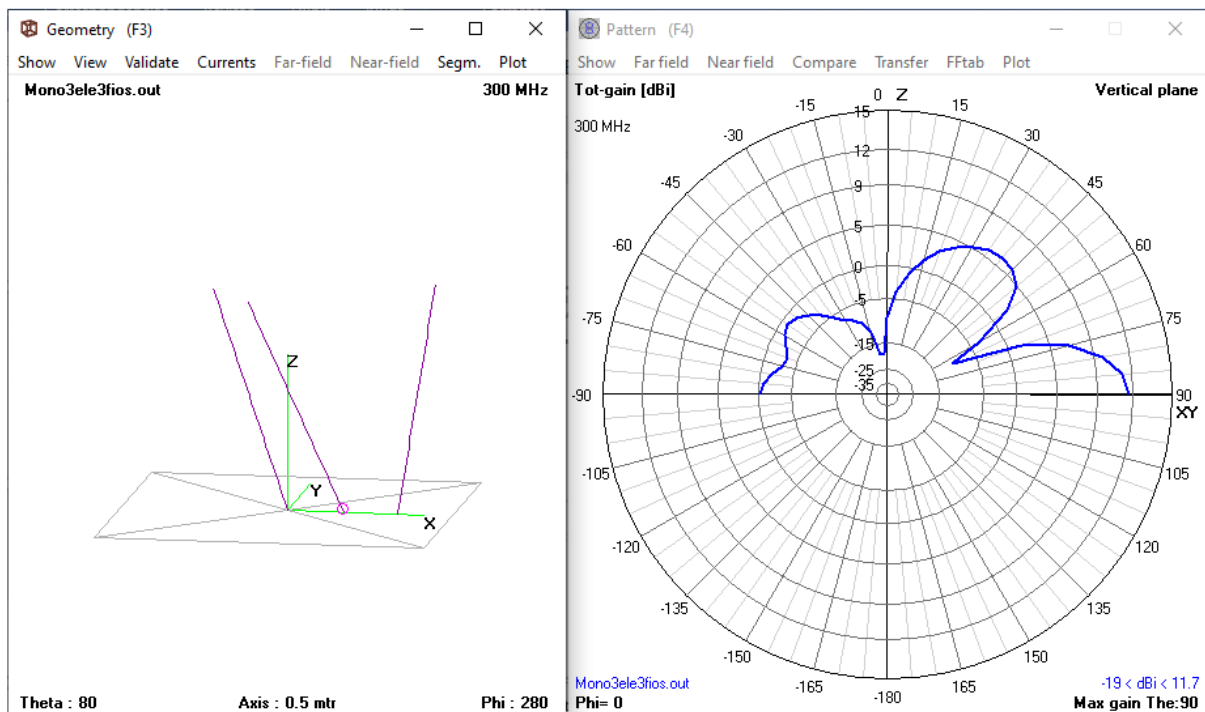
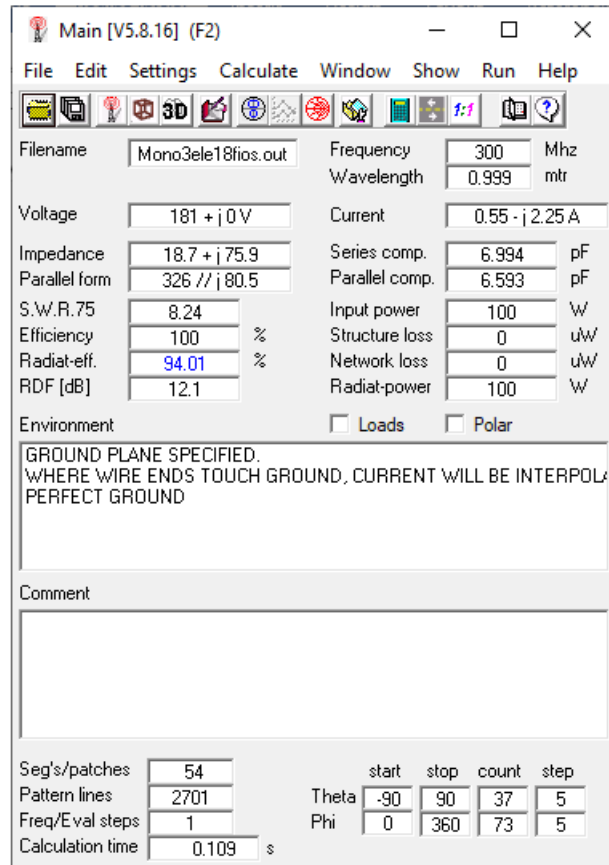
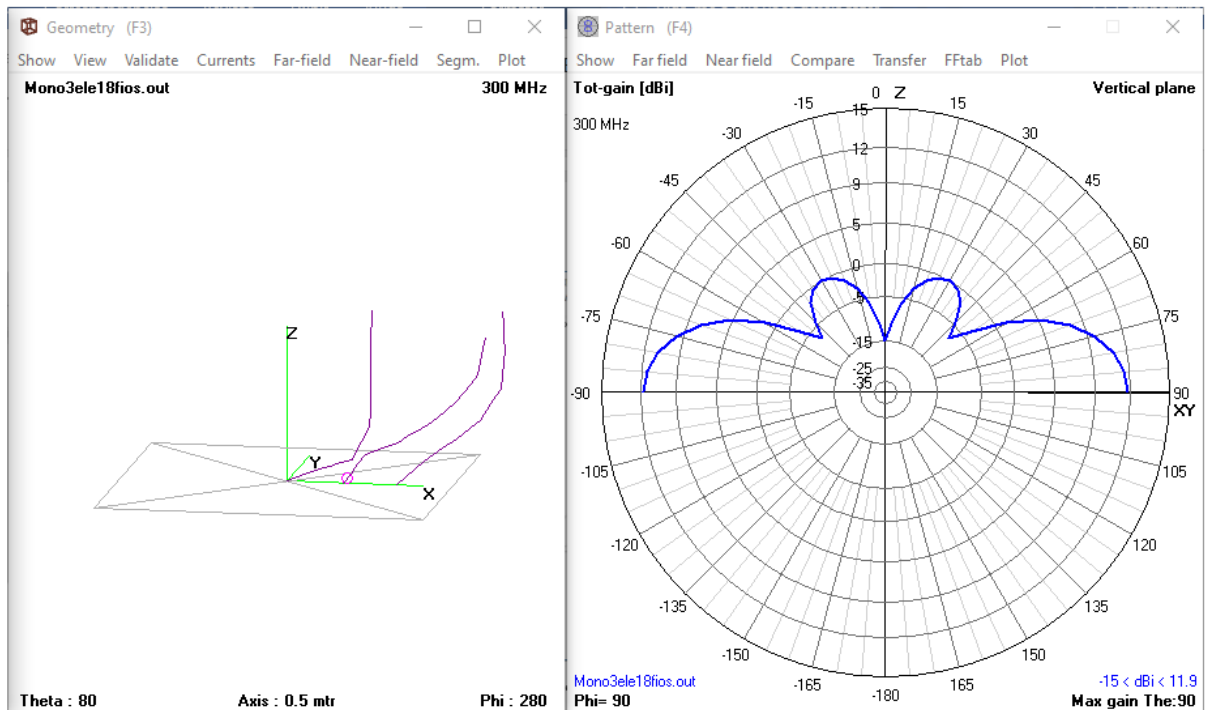


Figura 64: yagi de 3 monopolos de $0,75 \lambda$ retos otimizados, representado em 4nec2



(a)



(b)

Figura 65: yagi de 3 monopolos otimizados isoladamente após otimização do conjunto, em 4nec2

Todo o processo com três elementos foi resumido na Tabela 11, evidenciando melhora no ganho da antena. Assim, na primeira simulação com elementos retos formando o *array*, houve ganho de 3.79dB (11,88 – 8,09). Para os elementos inicialmente já otimizados, o aumento no ganho foi de 4,17dB (12,24 – 8,07). Os resultados para 4nec2 foram ligeiramente menores. Contudo, no caso de elementos já otimizados isoladamente, ocorreu proximidade de elementos, situação que pode gerar resultados duvidosos e imprecisos ou até mesmo não reais.

Tabela 11: resumo dos resultados *array* de 3 elementos

3 monopolos retos e idênticos de $0,75\lambda$			
	Sem otimizar	Otimização do <i>array</i>	
	Ganho em GRADMAX	GRADMAX	4nec2
Retos	8,09 dBi	11,88 dBi (7 interações)	11,70 dBi
Otimizados isoladamente	8,07 dBi	12,24 dBi (9 interações)	11,90 dBi

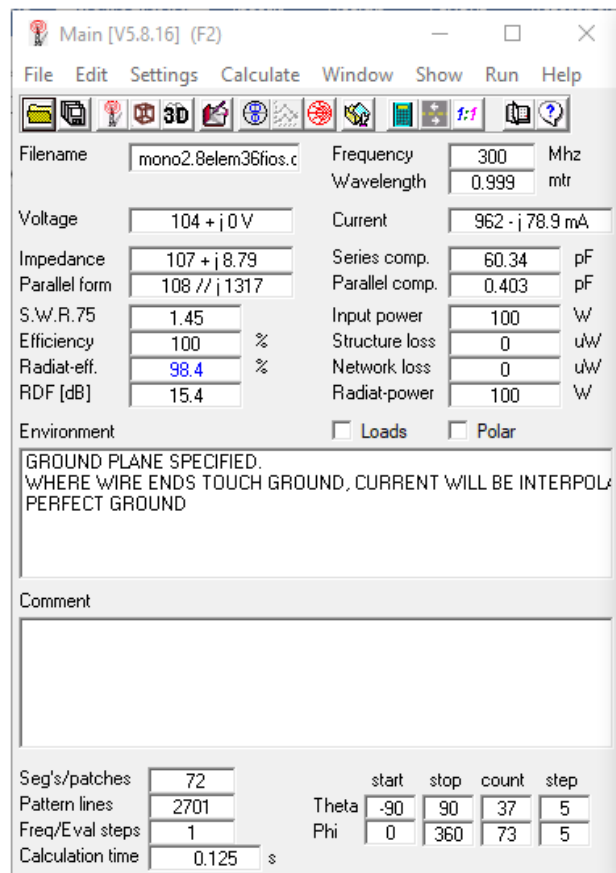
4.5 YAGI DE $2,8\lambda$

Fazendo uso da estrutura otimizada para o monopolo de $2,8\lambda$ em 4nec2 (com 36 fios), obteve-se ganho de 15,3dB; em GRADMAX, foi de 15,93dB — diferença (0,63dB) que se deve devido aos números de segmentos distintos e por serem programas com algoritmos semelhantes, mas não idênticos. Nesse ínterim, foi possível observar impedância de entrada de $Z_{in} = 107 + j8,79$; ou seja, um valor bem próximo da ressonância, conforme Figura 66. Foi acrescentado um elemento próximo ao monopolo com o objetivo de melhorar o ganho da estrutura.

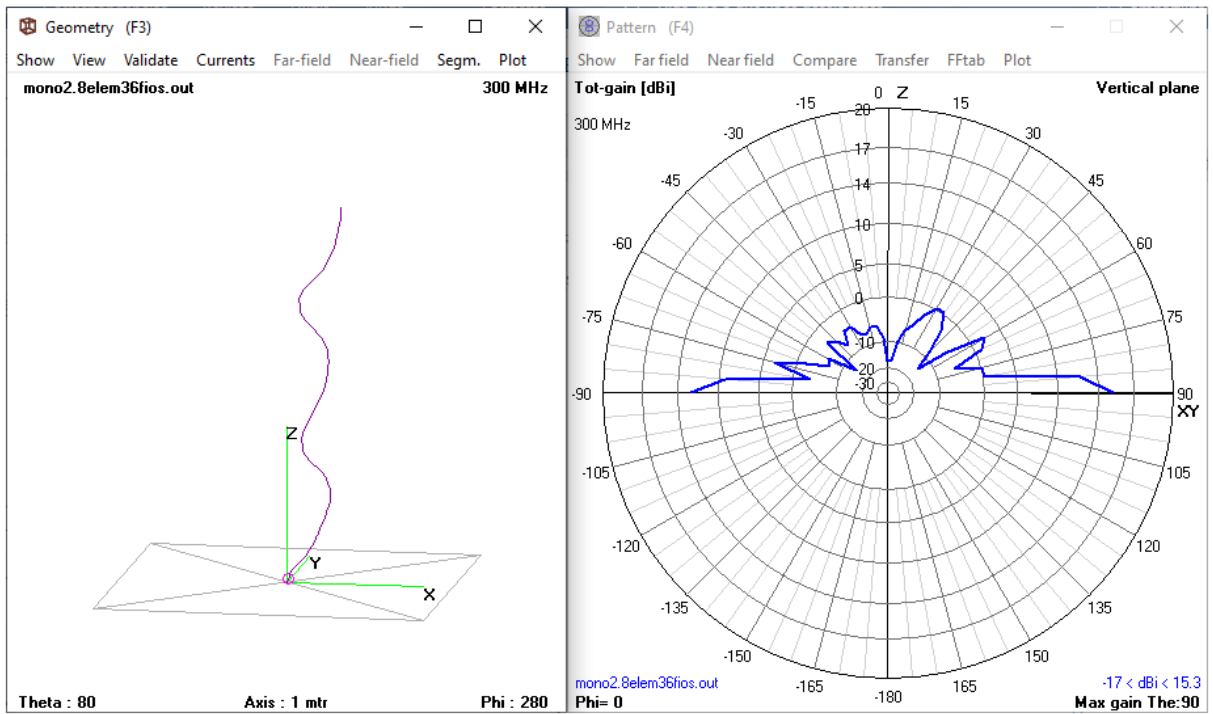
Como uma escolha inicial, foi adicionado elemento idêntico de $2,8\lambda$ com 36 fios a uma distância de $0,25\lambda$. Tal refletor adicionado foi multiplicado por uma variável. A variável tem o objetivo de aumentar ou diminuir a estrutura proporcionalmente. Com o uso da ferramenta de otimização de 4nec2 (*Optimizer and Evaluator*), chegou-se a uma distância de $0,148\lambda$ e fator de proporcionalidade de 0,98. A adição do refletor pode ser observada na

Figura 67, a seguir. O ganho logrou 17,4dB, com uma impedância de entrada de $Z_{in} = 128 + j140$.

Já com o refletor adicionado foi acrescentado um novo elemento; porém, como se fosse um diretor. Foi utilizado fator de proporcionalidade igual a 0,98, sendo a distância inicial de $0,4\lambda$. Após utilizar a ferramenta de otimização de 4nec2, chegou-se a um fator de proporcionalidade de 0,96 e distância de $0,78\lambda$. Os novos valores revelaram ganho de 17,8dB e impedância de entrada de $Z_{in} = 104 + j 130$. O resultado de 4nec2 pode ser observado na Figura 68.

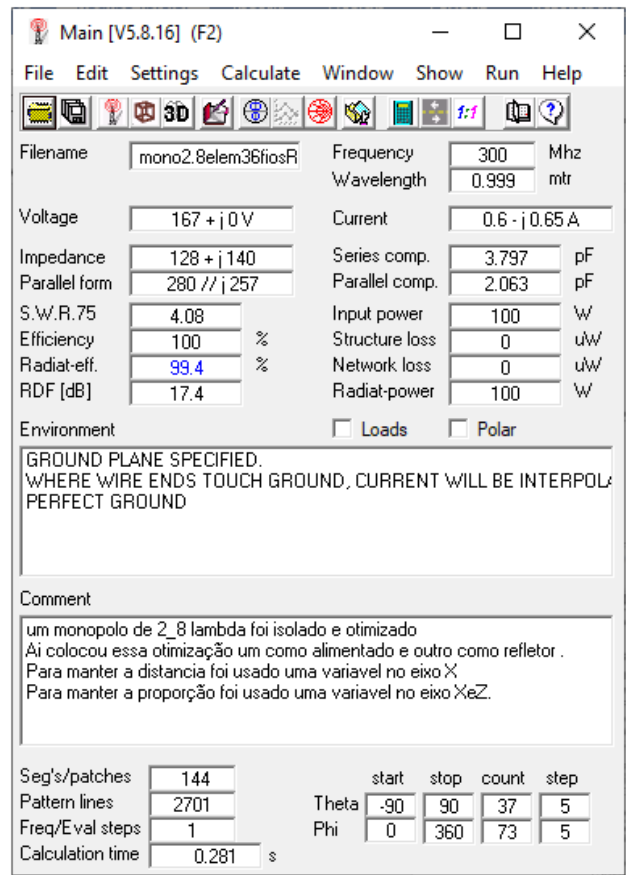


(a)



(b)

Figura 66: monopolo $2,8\lambda$, em 4nec2



(a)

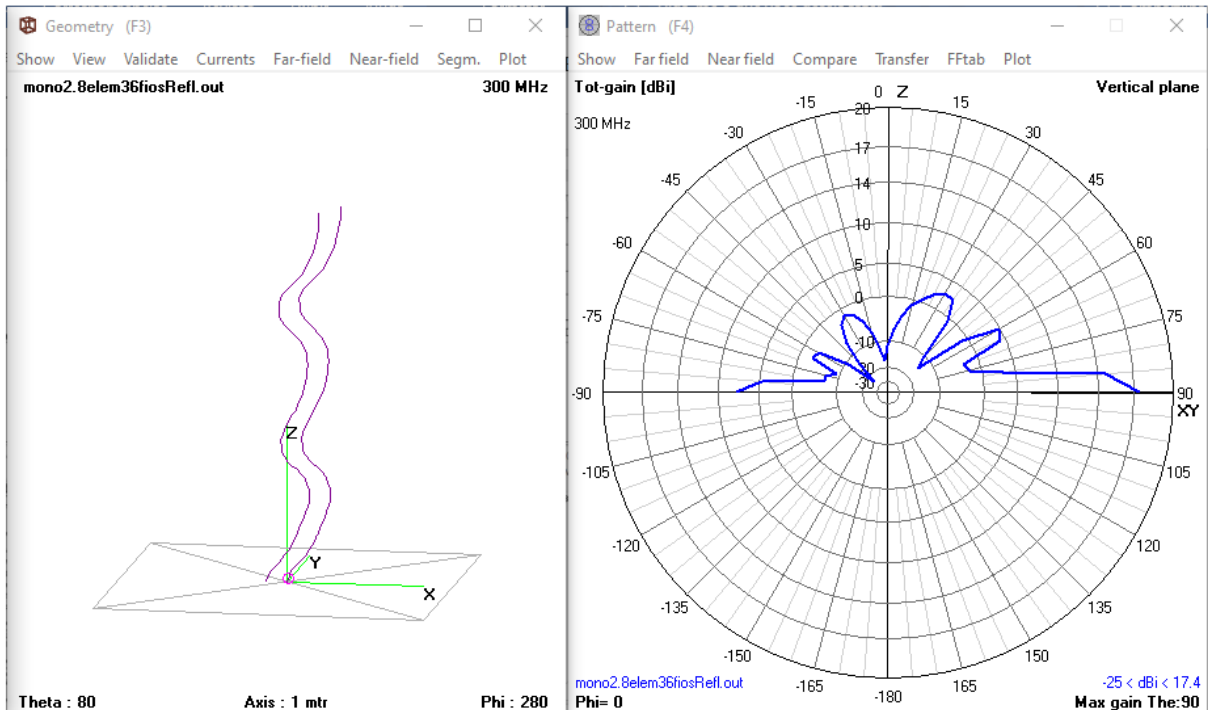
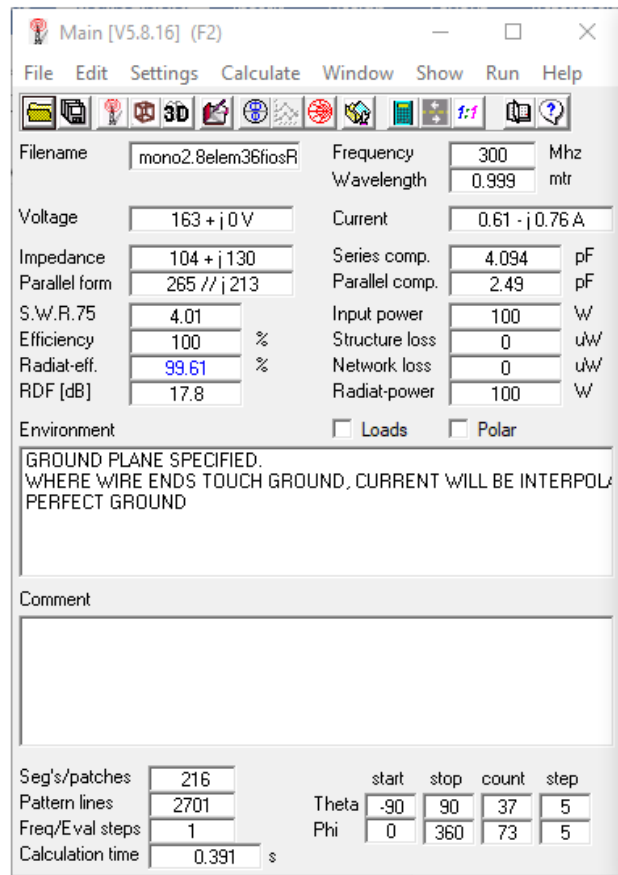
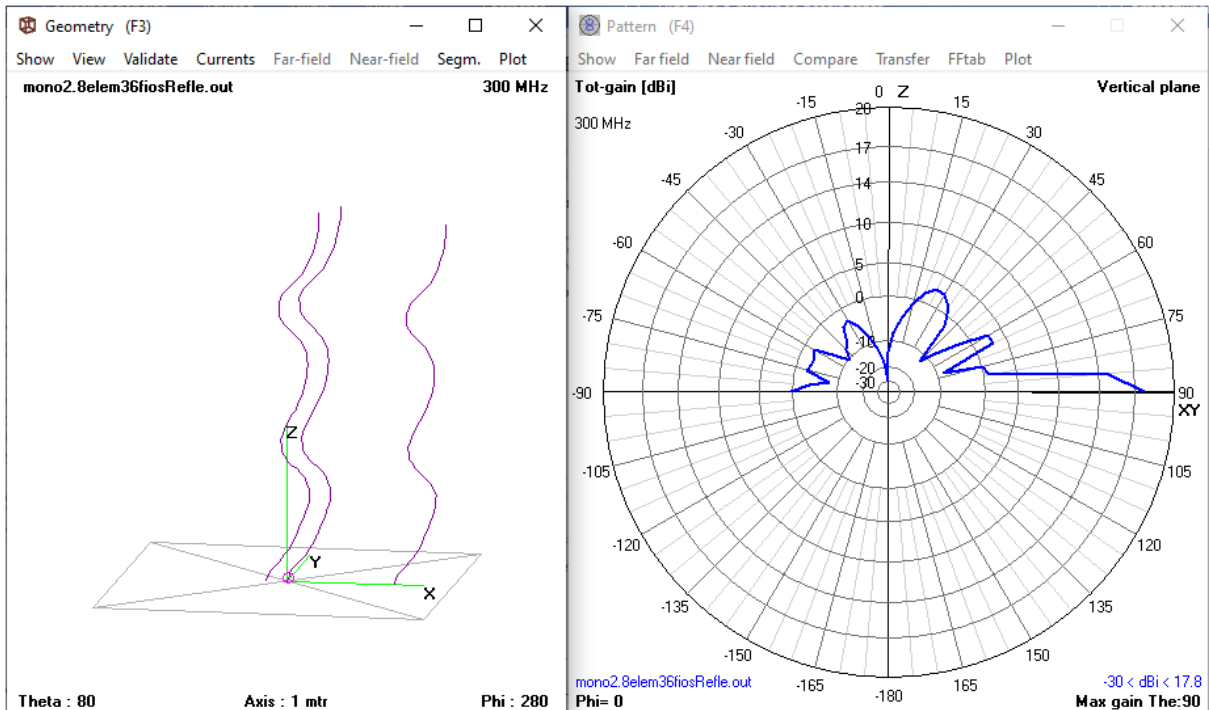


Figura 67: conjunto de 2 Monopolos de $2,8\lambda$, em 4nec2, com refletor, em 4nec2



(a)



(b)

Figura 68: conjunto de 2 monopolos de $2,8\lambda$, em 4nec2, com refletor e diretor, em 4nec2

A nova estrutura yagi com 3 elementos possui elevado ganho. Contudo, mostrou pouco acréscimo no ganho após cada etapa. Com, apenas, um elemento já otimizado inicialmente (36 fios), o ganho foi de 15,93dB. Ao acrescentar um elemento (refletor), também otimizado, o ganho foi de 17,39dB e, ao adicionar o terceiro elemento (diretor), o ganho chegou a 17,8dB. Ganhos adicionais de 1,46dB (ao adicionar refletor) e 0,41dB (ao adicionar diretor).

5.0 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: LOG PERIÓDICA

5.1 ANTENA LOG PERIÓDICA

Antenas tipo *log* periódicas possuem uma linha de transmissão conectando todos os elementos que compõe o *array*, conforme Figura 69. Para uma análise da referida antena, inicialmente, a presente pesquisa fez uso dos valores apontados na Tabela 12 [4].

No *software* 4nec2, se deu a simulação com $N = 31$ e impedância característica da linha de transmissão que compõe a *log* periódica $Z_0 = 75 \Omega$. O valor da impedância de entrada para a frequência de 100Mhz foi de $Z_{in} = 20,2 - j0,68$ com ganho de 8,25dBi, conforme Figura 70.

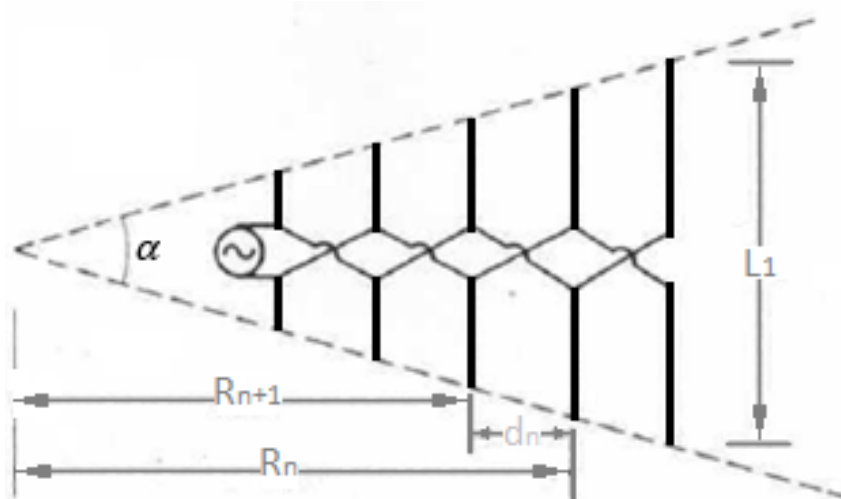
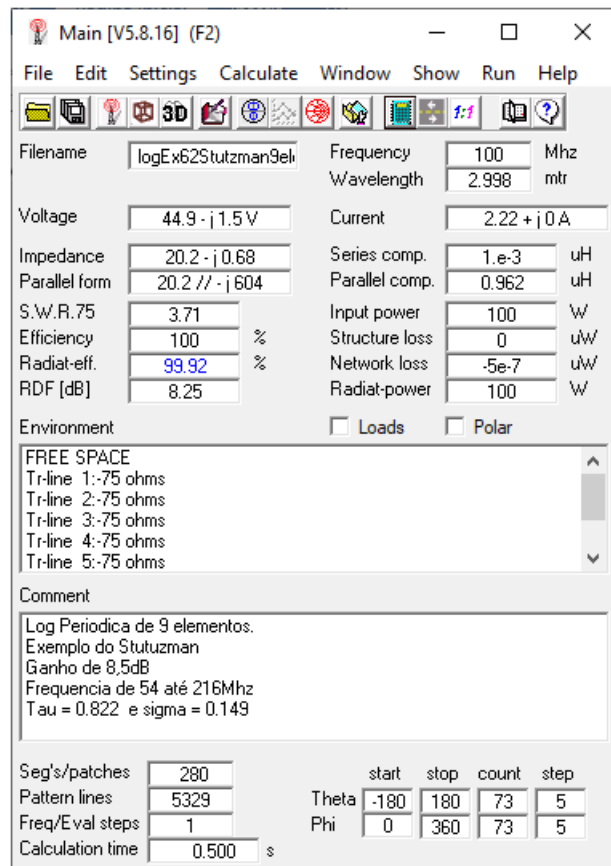


Figura 69: estrutura de antena log periódica [4]

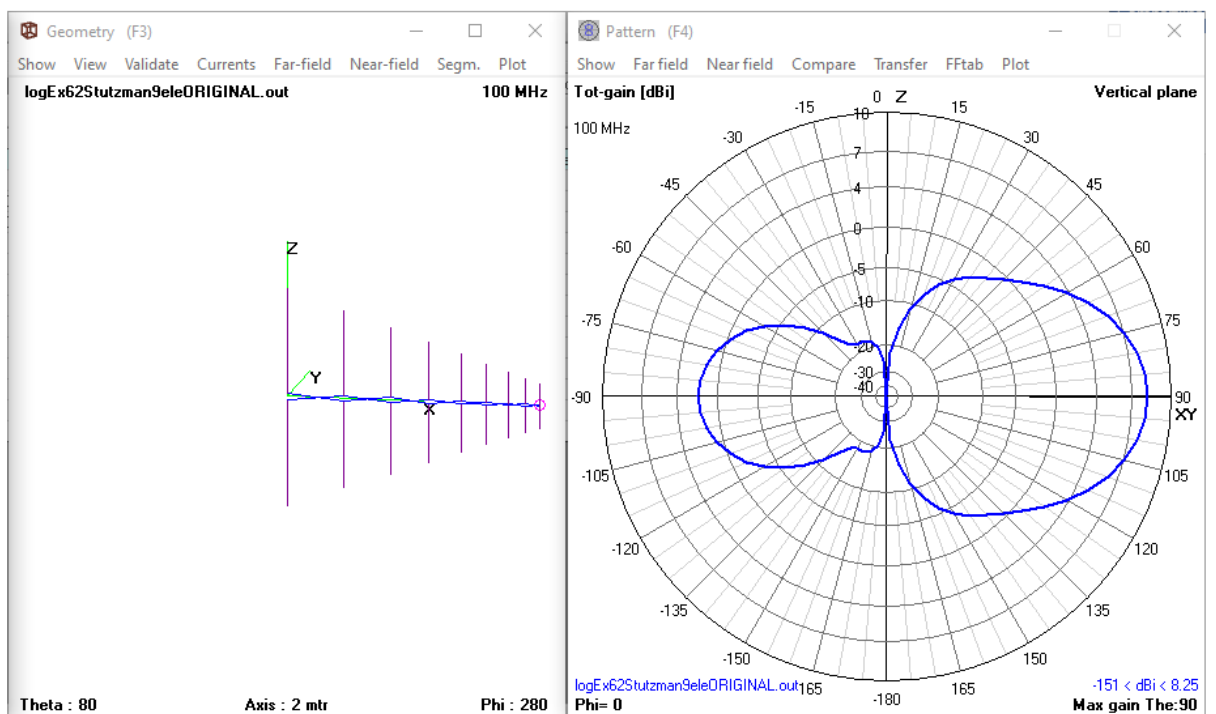
Tabela 12: parâmetros de Log periódica

Log periódica – frequência de 54Mhz a 216Mhz			
$\tau =$	0,822	Ganho (esperado) 8,5dB	
$\sigma =$	0,149		
Raio =	0,005 metros		
Comprimentos (metros)		Distancias (metros)	
L1 =	2,78	D1 =	0,827
L2 =	2,28	D2 =	0,679
L3 =	1,88	D3 =	0,559
L4 =	1,54	D4 =	0,459
L5 =	1,27	D5 =	0,378
L6 =	1,04	D6 =	0,310
L7 =	0,856	D7 =	0,255
L8 =	0,704	D8 =	0,209
L9 =	0,578		

A estrutura de *log* periódica não pode ser facilmente construída na forma de monopolos devido à existência da linha de transmissão. Porém, de modo aproximado, em simulação, fez-se uso de *array* de monopolos, cada qual alimentado por uma fonte de tensão equivalente à tensão percebida no ponto onde se encontra a linha de transmissão. Nesse ínterim, foi possível comparar os resultados obtidos tanto no modo dipolo quanto no modo monopolos. Utilizando LOGYAGI [3] que calcula antenas *log* periódicas e yagis, com base em MoM com funções senoidais, e traz, em sua saída/resposta, as tensões em cada elemento, conforme Figura 71. Essas tensões serão utilizadas tanto em GRADMAX quanto 4nec2 para simular monopolos de *log* periódicas. Em 4nec2, com $N = 12$, formou-se o conjunto de monopolos. Assim, percebeu-se que a Z_{in} , em modo monopolo, não corresponde à metade de Z_{in} em modo dipolo como visto para elementos isolados e yagi nos capítulos anteriores. Assim, não será possível manter relação de equivalência no modo dipolo da *log* periódica com o conjunto de monopolos com as várias fontes. É preciso destacar que o objetivo de tal ação foi a otimização do ganho em uma determinada frequência. E, como pode ser visto, o ganho, ainda, mantém a relação de 3dB (entre monopolos e dipolos) como será visto tanto em 4nec2 quanto em GRADMAX. Na Figura 72, evidenciam-se os resultados obtidos com a estrutura de *log* periódica em modo monopolo.



(a)



(b)

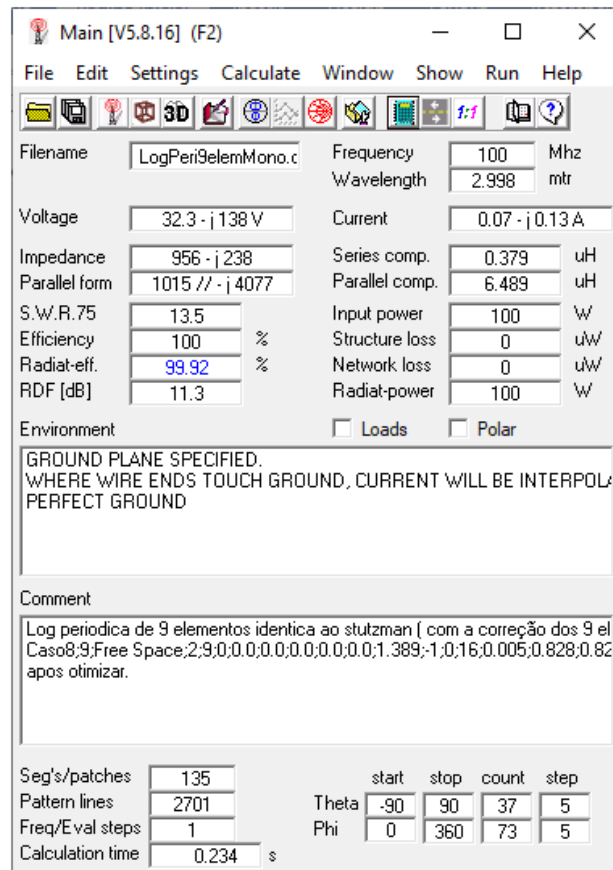
Figura 70: simulação de log periódica de 9 elementos, em 4nec2

UMA ANTENA FORMADA POR 9 DIPOLOS COM 0 REFLETOR(ES) E 0 DIRETOR(ES),
 OPERANDO EM 100000000Hz E ANALISADA COM 12SEGMENTOS POR DIPOLO, TEM-SE
 RESISTENCIA DE ENTRADA = 21.20HMS, REATÂNCIA DE ENTRADA = -.50HMS

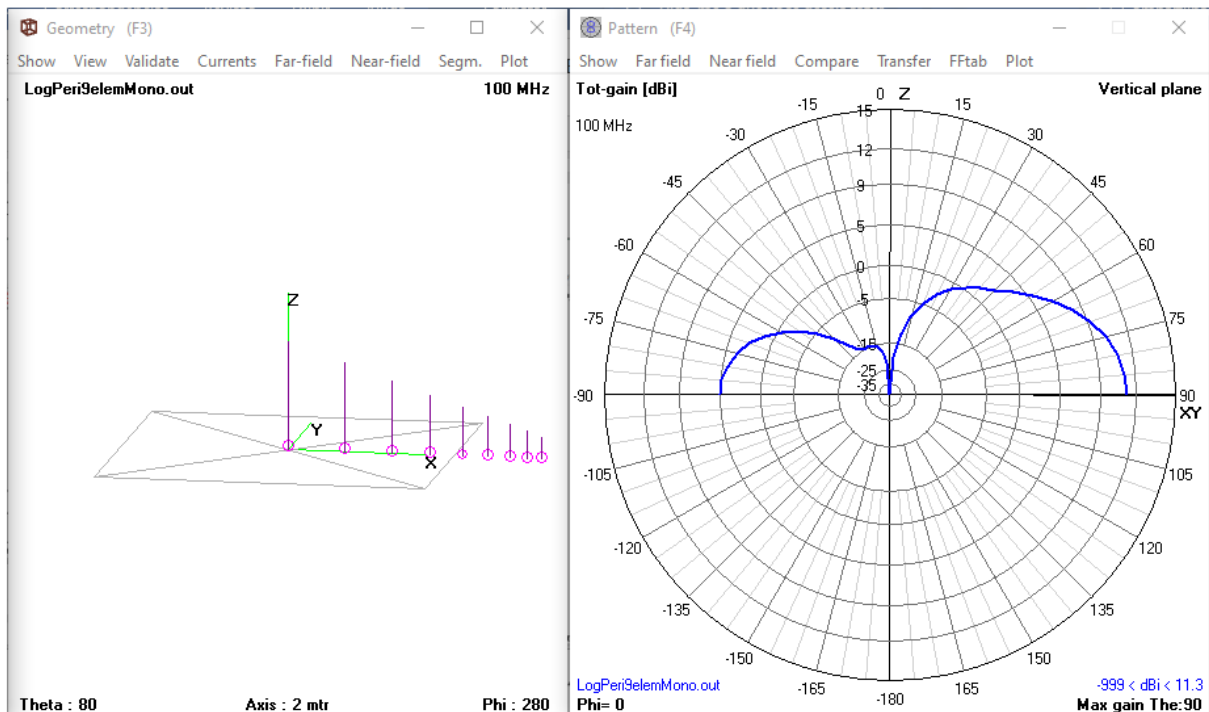
,ND	,COMPRIMENTO		,ESPAÇAMENTO		,RAIO		,VOLTAGEM		,CORRENTE	
	,M	,N	,M	,N	,M	,N	,MOD	,FASE	,MOD	,FASE
,1	2.778	.9259	.828	.2759	.0050	.00167	89.1	-76.8	.059	-33.4
,2	2.283	.7611	.680	.2268	.0050	.00167	17.7	-87.2	.060	-154.8
,3	1.877	.6256	.559	.1864	.0050	.00167	93.4	103.8	.250	13.6
,4	1.543	.5143	.460	.1532	.0050	.00167	50.0	-72.7	.567	-138.2
,5	1.268	.4227	.378	.1260	.0050	.00167	20.3	-147.6	.092	147.6
,6	1.042	.3475	.311	.1035	.0050	.00167	59.5	80.1	.344	151.8
,7	.857	.2856	.255	.0851	.0050	.00167	59.1	-82.5	.240	17.7
,8	.704	.2348	.210	.0700	.0050	.00167	36.3	119.0	.069	-154.6
,9	.579	.1930	.000	.0000	.0050	.00167	21.2	-1.4	.054	66.8

,NA TABELA ACIMA, OS RESULTADOS PARA VOLTAGEM (VOLTS) E CORRENTE (AMPÈRES),
 ,FORAM OBTIDOS APLICANDO-SE UMA FONTE DE CORRENTE UNITÁRIA NA ENTRADA DO
 ,DIPOLO 9. NOTA-SE QUE:
 ,ND = ORDEM DO POSICIONAMENTO DO DIPOLO; M = RESULTADO EM METROS;
 ,N = VALOR NORMALIZADO COM RELAÇÃO AO COMPRIMENTO DE ONDA DE 3.000METROS
 ,O GANHO (SEM PERDAS NA LINHA E ELEMENTOS DA ANTENA) É DE 8.31dB
 ,A IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA DA LINHA DE TRANSMISSÃO DA LOG É DE 750HMS.

Figura 71: dados de saída do programa LOGYAGI, em Fortran [3]



(a)



(b)

Figura 72: log periódica 9 monopolos, em 4nec2

O presente estudo procedeu a otimização da *log* periódica da Figura 72, a fim de demonstrar a melhora no ganho do conjunto. Para tanto, foi confeccionado, em GRADMAX, um conjunto de monopolos com cada elemento alimentado por uma tensão, culminando na otimização em ganho na direção X. Na Figura 73, evidencia-se tal ganho, sem otimização, da estrutura a ser analisada. Inicialmente, registrou-se ganho de 11,2dBi (3 dB a mais que a estrutura *log* periódica com a linha de transmissão, como visto anteriormente ao se analisar estrutura em monopolo). Valor similar encontrado na simulação em 4nec2 (Figura 72).

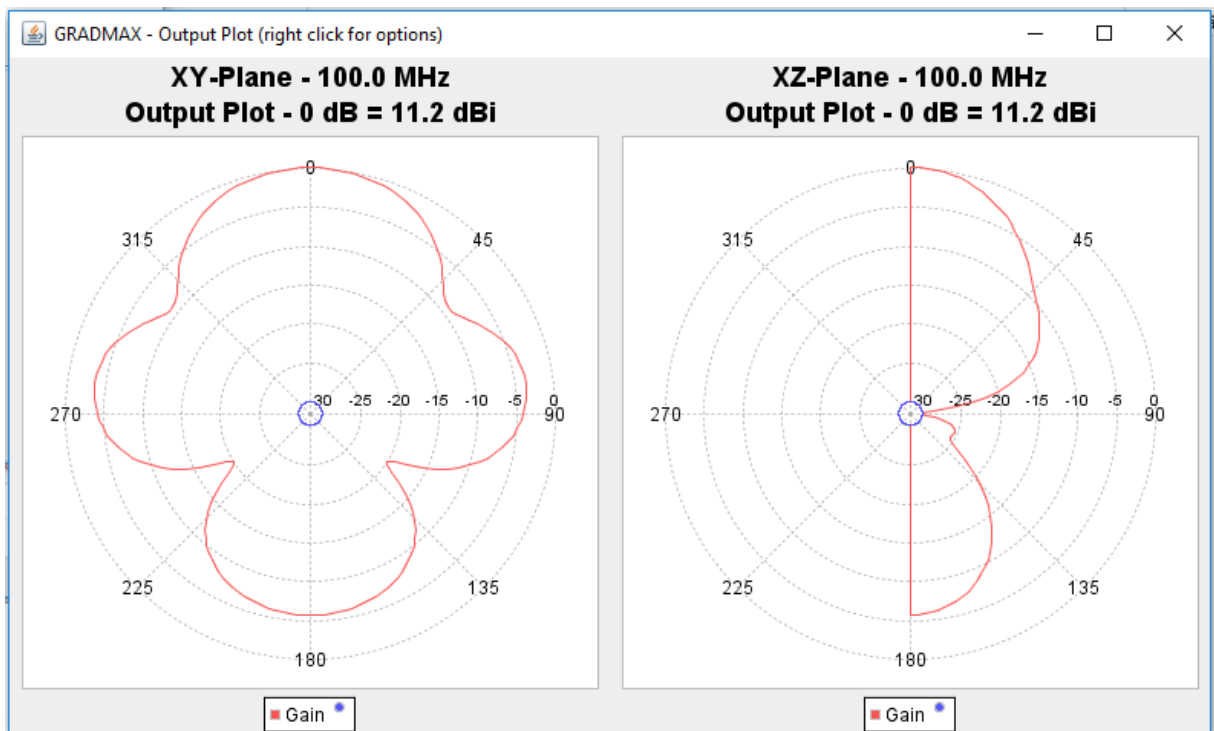
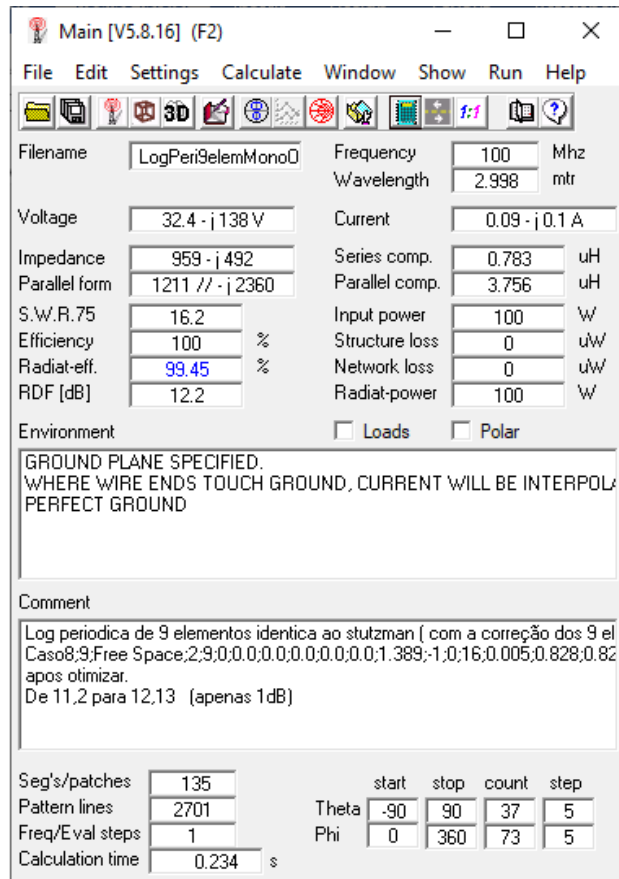
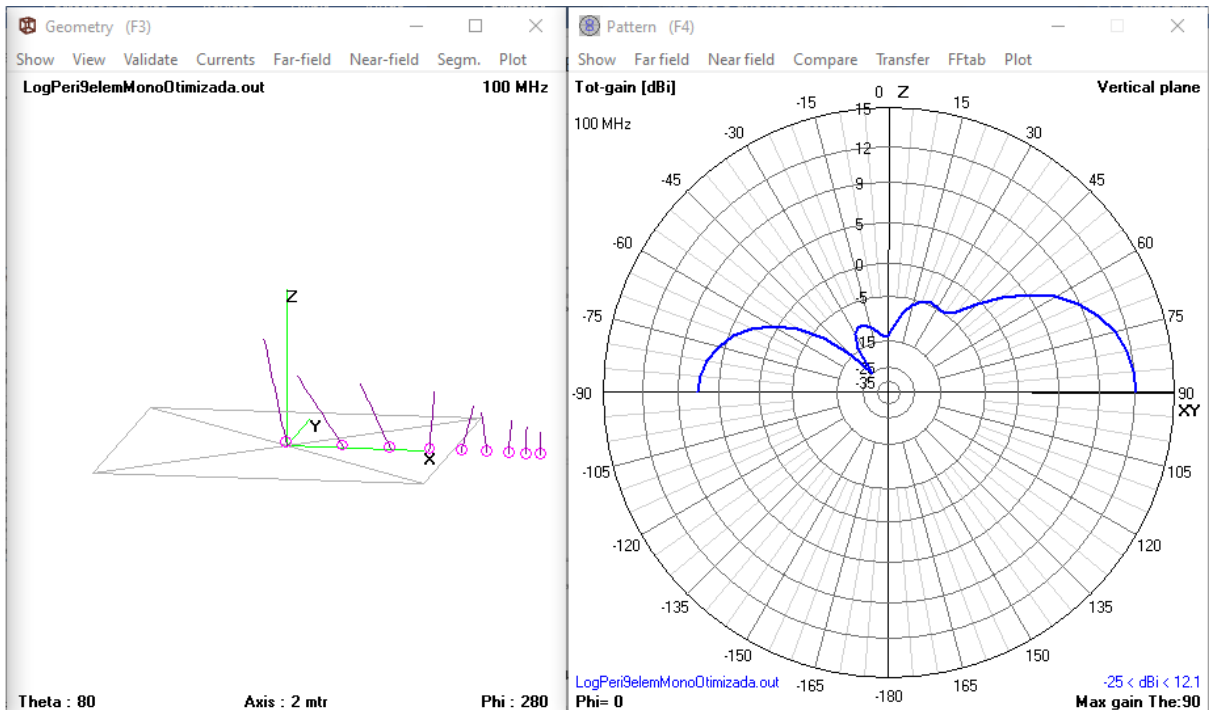


Figura 73: log periódica 9 monopolos, em GRADMAX

Posteriormente, deu-se a otimização em ângulo. Com quatro interações, chegou-se à convergência da estrutura, obtendo ganho final de 12.13dBi. A estrutura otimizada foi simulada no *software* 4nec2, podendo ser melhor observada e analisada tanto sua estrutura física final quanto outros parâmetros consoantes Figura 74. Nessa simulação, não houve intersecção de elementos, mas, apenas, seu reposicionamento em ângulo, ao passo que cada elemento possui, apenas, um fio. Assim, ocorreu a inclinação de cada elemento após a otimização por ângulo.



(a)



(b)

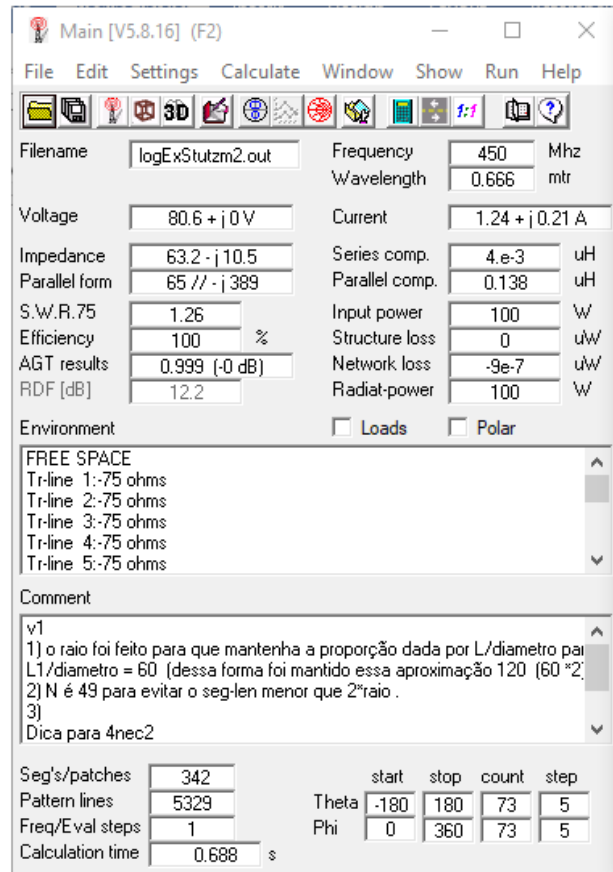
Figura 74: log periódica 9 monopolos otimizada, em 4nec2

Na presente pesquisa, foi possível simular em GRADMAX uma antena *log* periódica em que cada elemento detinha uma fonte de tensão. Na prática, a construção não se mostra viável devido à complexidade de construção de várias fontes defasadas. Porém, apenas para fins de análise, simulação e otimização, tal ação pode ser realizada, sendo seu resultado devidamente analisado. Logo, tem-se uma prévia e, assim, uma visão dos resultados que podem ser alcançados sobre tal estrutura.

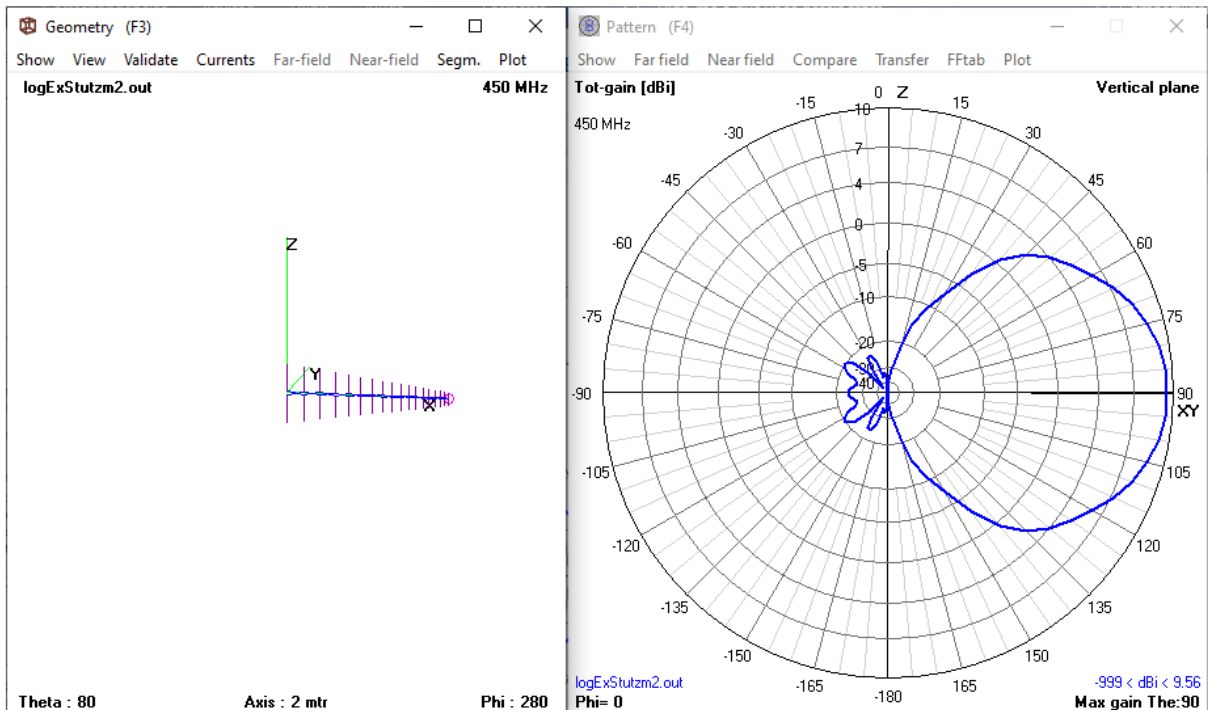
É preciso destacar que a impedância de entrada não possui uma relação equivalente entre o modo dipolo e seu monopolo devido à linha de transmissão que faz parte da antena. Contudo, como o objetivo, nesta dissertação, é a otimização do ganho, percebeu-se a existência da relação 3dB e do diagrama de radiação. A otimização em GRADMAX ocorre devido à característica de inversão de fase de correntes ao longo do comprimento. Mas tal inversão se dá em elementos acima de 1λ . No caso de *log* periódicas, a inversão da fase ocorre devido à característica da linha de transmissão na distribuição da voltagem em diferentes fases no decorrer de sua extensão, fazendo com que alguns elementos estejam em fase positiva e, outros, em fase negativa.

5.2 LOG PERIÓDICA DE 18 ELEMENTOS REFERÊNCIA

A estrutura a seguir é uma antena *log* periódica conhecida na literatura [4]. Possui 18 elementos e opera na faixa de frequência entre 200Mhz a 600Mhz. Foi projetada para operar com ganho de 10dBi, com parâmetros de construção: $\tau = 0,917$ e $\sigma = 0,169$ [4]. Para a frequência de 450Mhz, a antena apresenta ganho de $G = 9,56\text{dBi}$ em $4\text{nec}2$. O SWR, abaixo de 2 em toda a banda de operação da antena e ganho com valores médios entorno de 9dBi, conforme Figura 75 e 76.

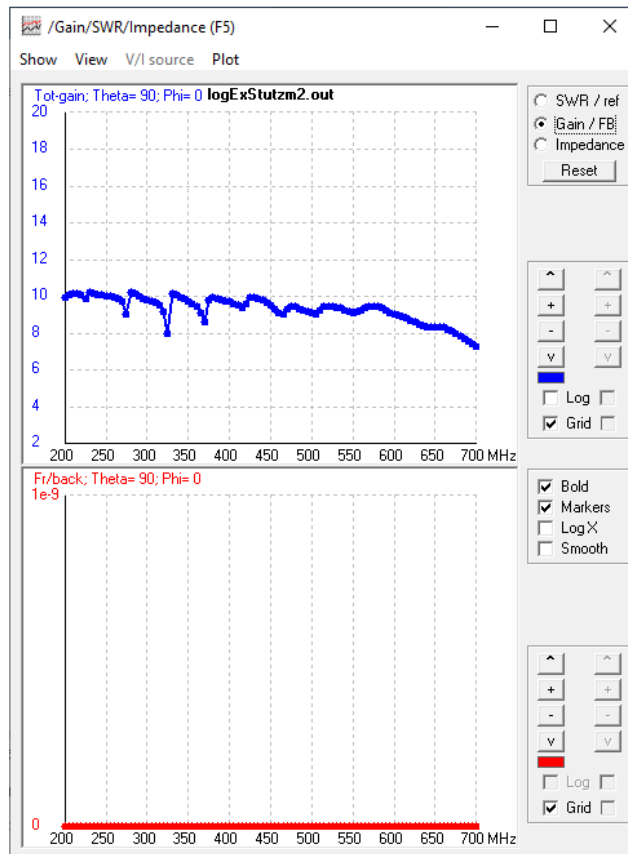


(a)

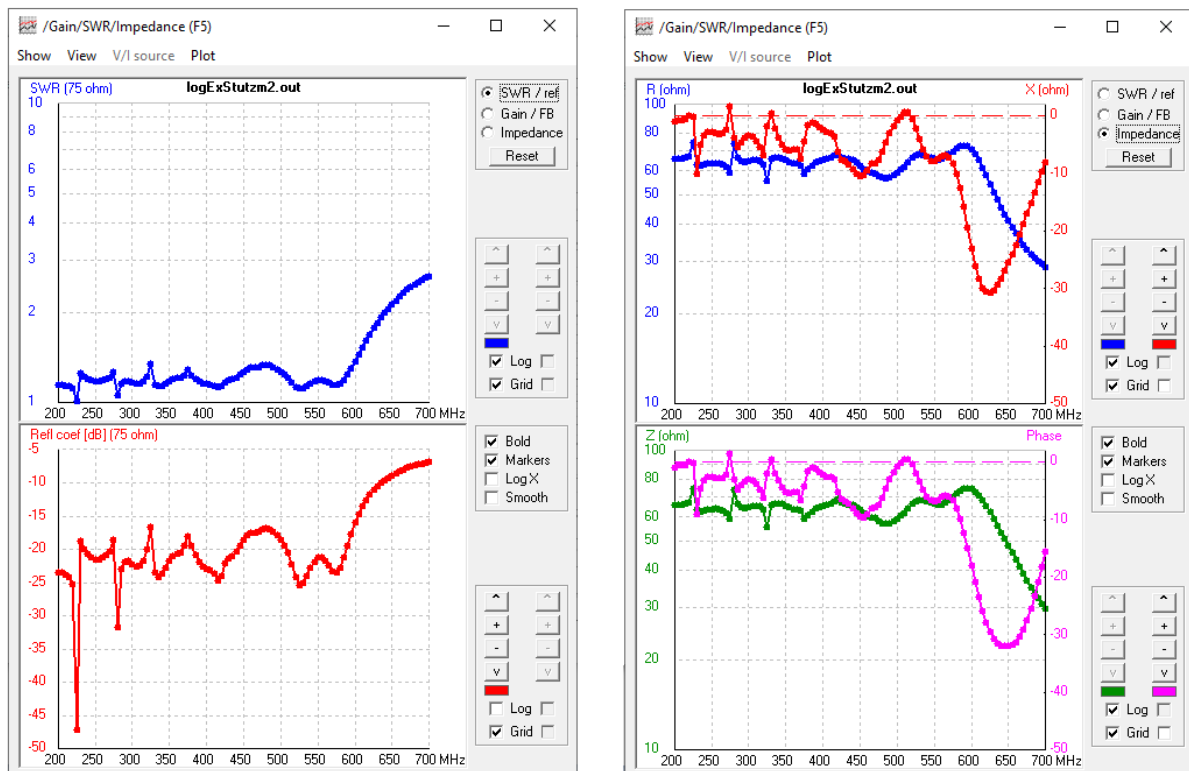


(b)

Figura 75: log periódica 18 elementos, em 4nec2



(a)



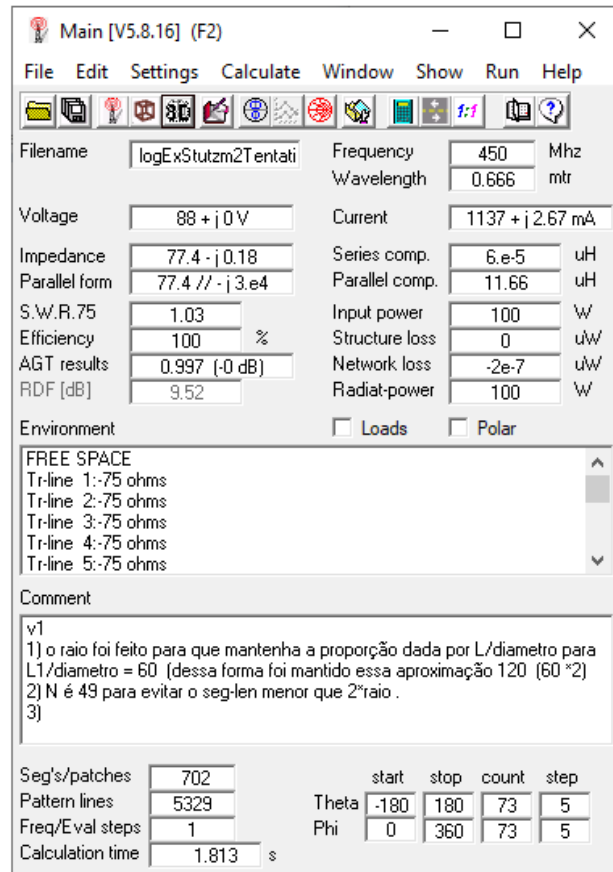
(b)

Figura 76: log periódica 18 elementos SWR, ganho, Impedância, em 4nec2

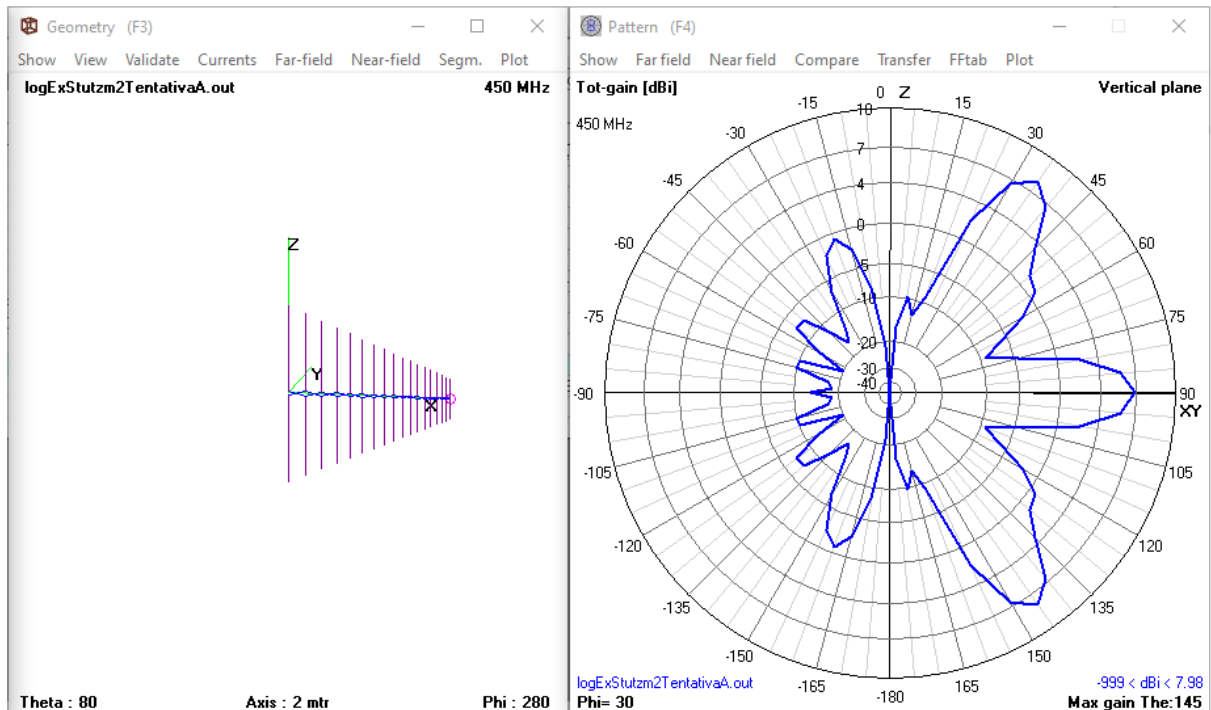
Como a inversão de fase somente se dá com elementos acima de 1λ , promoveu-se a triplicação do comprimento de cada elemento, acarretando a inversão de fase na distribuição de corrente nos elementos da antena. A Figura 77 foi analisada em 450Mhz após a alteração dos comprimentos de cada elemento, mantendo todos os demais parâmetros. Na Figura 78, apresentam-se os parâmetros na faixa de 100Mhz a 700Mhz. Os elementos foram multiplicados por três (apenas o comprimento). A antena foi analisada na banda de: 66,66 até 200Mhz, conforme Figura 79. Contudo, todos os demais parâmetros não foram alterados. Logo, a antena não tem sua construção de forma otimizada, conforme a literatura [4]. Mesmo com essa alteração fora dos padrões de construção de log periódicas, o ganho se manteve constante e o SWR abaixo de 2 por uma boa parte do espectro.

Fazendo uso de [8], obtiveram-se as tensões em cada elemento para a estrutura (triplicada). Os resultados podem ser observados na Figura 80. De posse desses valores (tensões), promoveu-se a montagem em GRADMAX para a otimização em determinada frequência. A frequência escolhida foi de 300Mhz (dentro da faixa inicial de 200Mhz a 600Mhz). O ganho naquele *software* (sem otimizar) foi de 13,04dB. E, após três otimizações, o ganho passou para 14dB. Contudo, houve intersecção de elementos, conforme evidenciado na Figura 81.

Na simulação em questão, foi possível perceber que o ponto de partida é um dos elementos determinantes para o ganho final da estrutura.

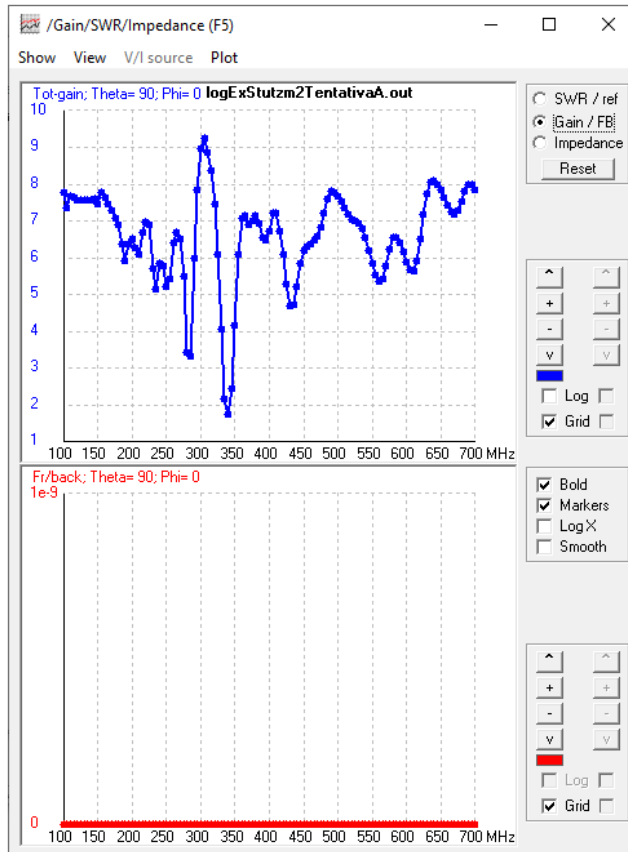


(a)

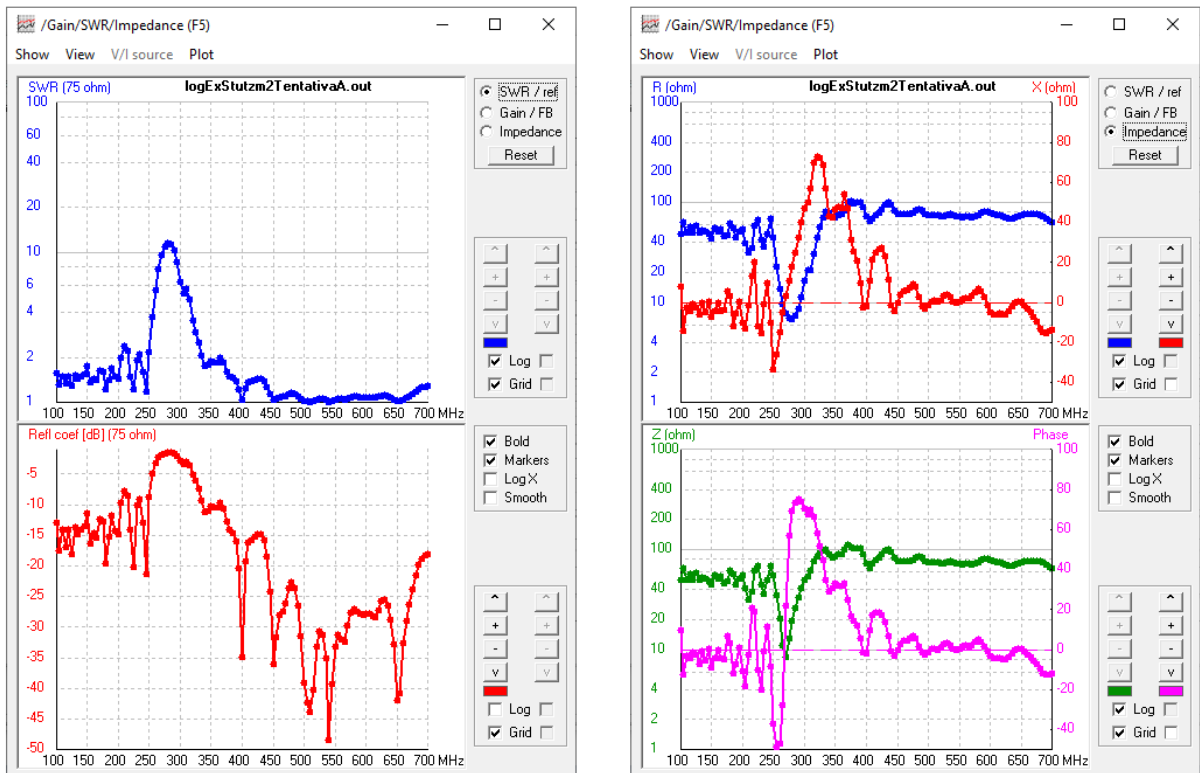


(b)

Figura 77: log periódica triplicação do comprimento, em 4nec2

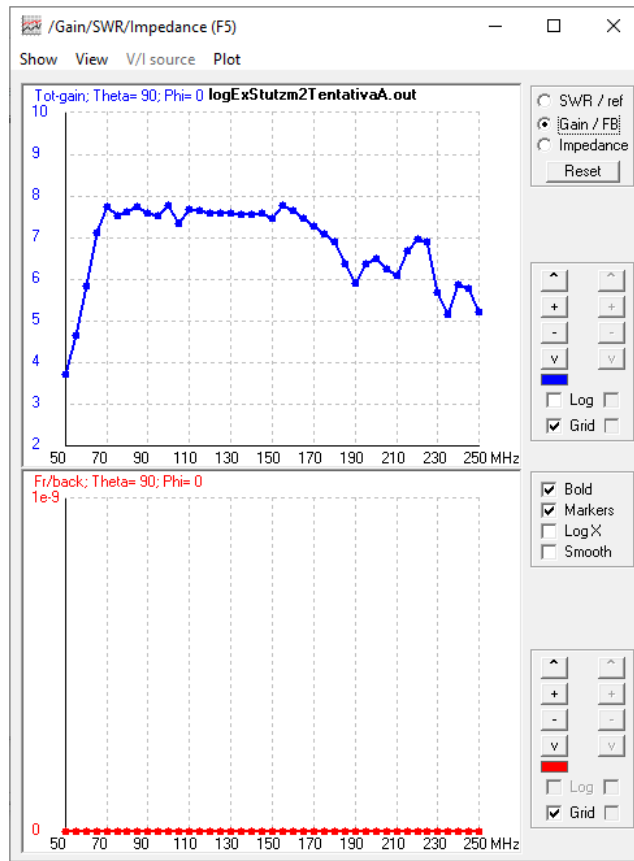


(a)

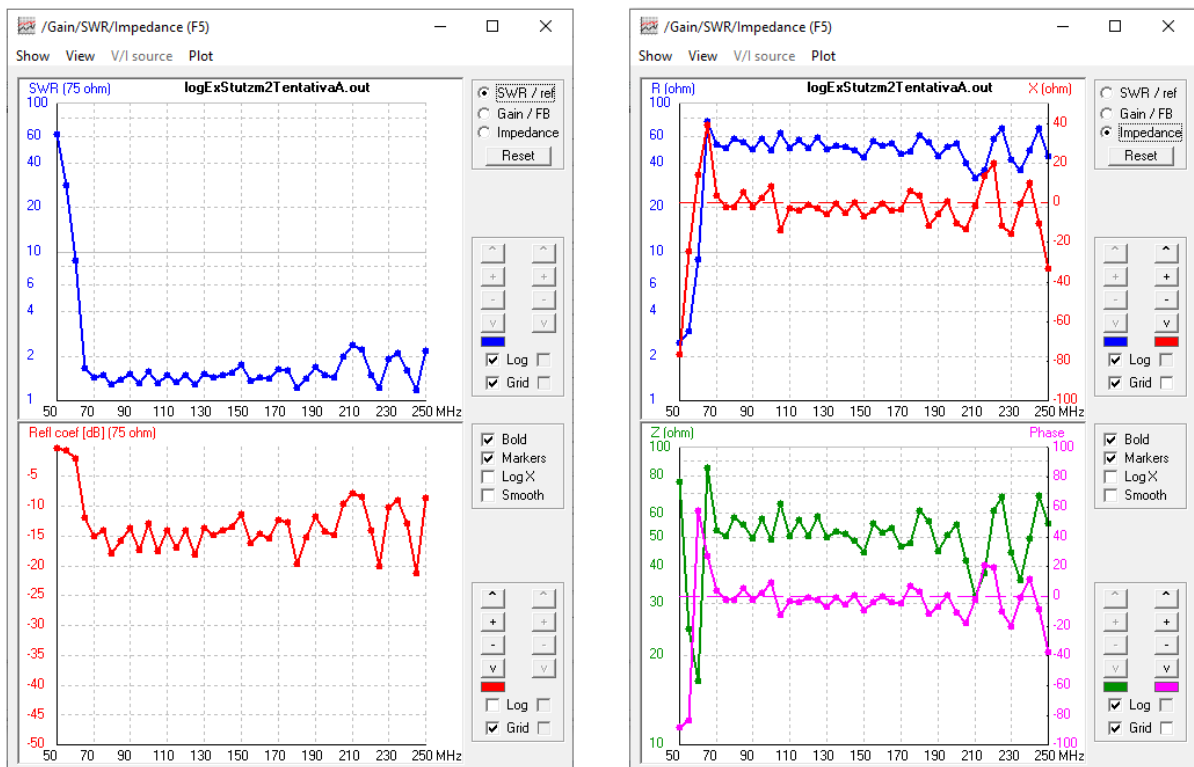


(b)

Figura 78: log periódica SWR, ganho, impedância (100Mhz a 700Mhz), em 4nec2



(a)



(b)

Figura 79: nova faixa de frequência: SWR, ganho e Zin (66Mhz a 200Mhz), em 4nec2

UMA ANTENA FORMADA POR 18 DIPOLOS COM θ REFLETOR(ES) E θ DIRETOR(ES),
 OPERANDO EM 300000000Hz E ANALISADA COM 10SEGMENTOS POR DIPOLO, TEM-SE
 RESISTENCIA DE ENTRADA = 16.2OHMS, REATÂNCIA DE ENTRADA = 47.4OHMS

ND	COMPRIMENTO		ESPAÇAMENTO		RAIO		VOLTAGEM		CORRENTE	
	M	N	M	N	M	N	MOD	FASE	MOD	FASE
1	2.250	2.2500	.254	.2535	.0063	.00625	14.7	144.4	.056	-148.9
2	2.063	2.0633	.232	.2324	.0057	.00573	4.5	122.8	.007	149.8
3	1.892	1.8920	.213	.2131	.0053	.00526	15.0	-34.1	.016	31.6
4	1.735	1.7350	.195	.1954	.0048	.00482	2.2	-122.3	.007	76.3
5	1.591	1.5910	.179	.1792	.0044	.00442	14.1	140.2	.137	83.4
6	1.459	1.4589	.164	.1643	.0040	.00405	19.5	-18.2	.248	-27.2
7	1.338	1.3378	.151	.1507	.0037	.00372	22.2	-129.2	.156	-84.6
8	1.227	1.2268	.138	.1382	.0034	.00341	26.2	117.2	.126	-165.4
9	1.125	1.1250	.127	.1267	.0031	.00312	26.1	-10.2	.062	104.2
10	1.032	1.0316	.116	.1162	.0029	.00287	24.2	-141.9	.010	5.6
11	.946	.9460	.107	.1065	.0026	.00263	24.8	83.6	.015	43.2
12	.867	.8675	.098	.0977	.0024	.00241	27.1	-58.5	.006	-67.1
13	.795	.7954	.090	.0896	.0022	.00221	27.7	152.8	.050	47.0
14	.729	.7294	.082	.0821	.0020	.00203	27.9	-.5	.065	-80.3
15	.669	.6688	.075	.0753	.0019	.00186	28.2	-155.5	.112	113.8
16	.613	.6133	.069	.0691	.0017	.00170	30.2	45.5	.153	-45.7
17	.562	.5624	.069	.0691	.0016	.00156	34.1	-118.8	.525	152.8
18	.516	.5157	.000	.0000	.0014	.00143	50.1	71.1	.587	-5.4

NA TABELA ACIMA, OS RESULTADOS PARA VOLTAGEM (VOLTS) E CORRENTE (AMPÈRES),
 FORAM OBTIDOS APLICANDO-SE UMA FONTE DE CORRENTE UNITÁRIA NA ENTRADA DO
 DIPOLO 18. NOTA-SE QUE:

- ND = ORDEM DO POSICIONAMENTO DO DIPOLO; M = RESULTADO EM METROS;
- N = VALOR NORMALIZADO COM RELAÇÃO AO COMPRIMENTO DE ONDA DE 1.000METROS
- O GANHO (SEM PERDAS NA LINHA E ELEMENTOS DA ANTENA) É DE 8.90dB
- A IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA DA LINHA DE TRANSMISSÃO DA LOG É DE 75OHMS.

Figura 80: resultados, em Fortran [3]

Codigo para 18 fios - Gradmax										
Nome	n° Fios	Free S	Free /Ground	n° Fontes	n° cargas	Frequencia	Fontes (Pulso / Mag / Fase)			
LogEve63Stutzman	18	Free Spaci	2	18	0	300	1	1	14,7	144,4
							2	9	4,5	122,8
							Total de 18 fontes, conforme Figura 80.			
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	C1	C2	NS Segmentos	Raio
Fio 1	0,000000	0,0	0,000000	-0,221746	0,0	1,102930	-1	0	8	0,0063
Fio 2	0,253500	0,0	0,000000	0,168661	0,0	1,028136	-2	0	8	0,0057
Fio 3	0,485900	0,0	0,000000	0,239069	0,0	0,913220	-3	0	8	0,0053
Fio 4	0,639060	0,0	0,000000	0,732507	0,0	0,866835	-4	0	8	0,0048
Fio 5	0,894530	0,0	0,000000	0,906883	0,0	0,795384	-5	0	8	0,0044
Fio 6	1,073730	0,0	0,000000	1,133940	0,0	0,726961	-6	0	8	0,0040
Fio 7	1,238030	0,0	0,000000	1,140464	0,0	0,661767	-7	0	8	0,0037
Fio 8	1,388730	0,0	0,000000	1,396090	0,0	0,613336	-8	0	8	0,0034
Fio 9	1,526930	0,0	0,000000	1,538993	0,0	0,562341	-9	0	8	0,0031
Fio 10	1,653630	0,0	0,000000	1,770377	0,0	0,502404	-10	0	8	0,0029
Fio 11	1,769830	0,0	0,000000	1,704144	0,0	0,468397	-11	0	8	0,0026
Fio 12	1,876330	0,0	0,000000	1,831651	0,0	0,431423	-12	0	8	0,0024
Fio 13	1,974030	0,0	0,000000	2,024825	0,0	0,394473	-13	0	8	0,0022
Fio 14	2,063630	0,0	0,000000	2,037659	0,0	0,363784	-14	0	8	0,0020
Fio 15	2,145730	0,0	0,000000	2,142215	0,0	0,334422	-15	0	8	0,0019
Fio 16	2,221030	0,0	0,000000	2,256429	0,0	0,304620	-16	0	8	0,0017
Fio 17	2,290130	0,0	0,000000	2,232796	0,0	0,275314	-17	0	8	0,0016
Fio 18	2,352330	0,0	0,000000	2,382796	0,0	0,256801	-18	0	8	0,0014

(a)

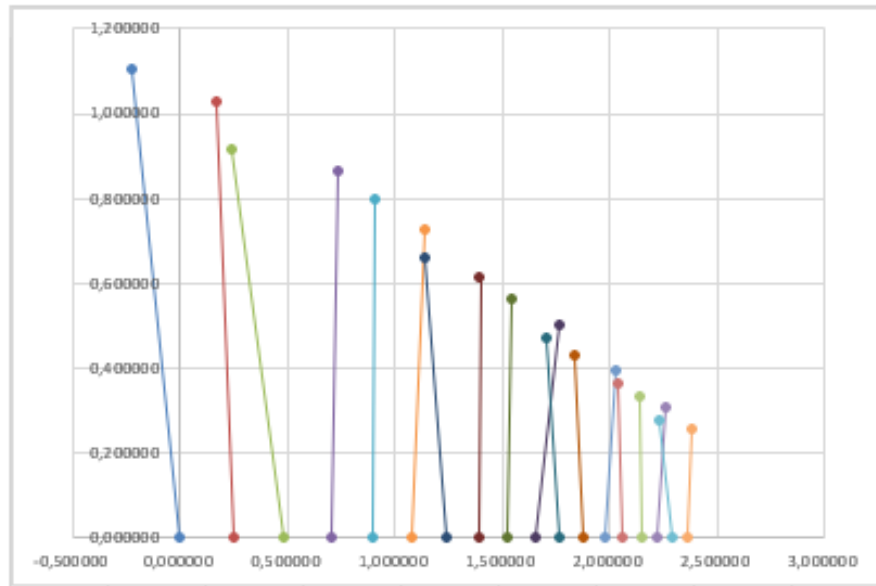


Figura 81: dados GRADMAX após otimização, vista da estrutura

5.3 LOG PERIÓDICA DE 3 ELEMENTOS DE $1,5\lambda$ [17]

A presente pesquisa confeccionou uma estrutura fictícia de uma *log* periódica (fora dos parâmetros convencionais na literatura), de três elementos apenas, cada um de tamanhos iguais a $1,5\lambda$, dada uma frequência de análise de 300Mhz. Tal estrutura foi alimentada por uma linha de transmissão de 75Ω . Assim, utilizando [8], obteve-se o resultado das voltagens de cada elemento, conforme Figura 82.

```

UMA ANTENA FORMADA POR 3 DIPOLOS COM 0 REFLETOR(ES) E 0 DIRETOR(ES),
OPERANDO EM 300000000Hz E ANALISADA COM 26SEGMENTOS POR DIPOLO, TEM-SE
RESISTENCIA DE ENTRADA = 115.70HMS, REATÂNCIA DE ENTRADA = 110.70HMS
,-----
,|ND| COMPRIMENTO | ESPAÇAMENTO|          RAI0          |          VOLTAGEM          |          CORRENTE          |
,|  |-----|-----|          |          |          |          |          |
,|  |   M   |   N   |   M   |   N   |   M   |   N   |   MOD | FASE |   MOD | FASE |
,|---|-----|-----|          |          |          |          |          |
,| 1| 1.500|1.5000| .204| .2041| .0050| .00500| 84.2 | 13.6|1.282| -48.8|
,| 2| 1.500|1.5000| .197| .1971| .0050| .00500| 113.9|-144.4|2.350| 122.7|
,| 3| 1.500|1.5000| .000| .0000| .0050| .00500| 160.1| 43.7|1.622| -28.5|
,-----
,NA TABELA ACIMA, OS RESULTADOS PARA VOLTAGEM (VOLTS) E CORRENTE (AMPÈRES),
,FORAM OBTIDOS APLICANDO-SE UMA FONTE DE CORRENTE UNITÁRIA NA ENTRADA DO
,DIPOLO 3. NOTA-SE QUE:
,ND = ORDEM DO POSICIONAMENTO DO DIPOLO;          M = RESULTADO EM METROS;
,N = VALOR NORMALIZADO COM RELAÇÃO AO COMPRIMENTO DE ONDA DE 1.000METROS
,O GANHO (SEM PERDAS NA LINHA E ELEMENTOS DA ANTENA) É DE 5.60dB
,A IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA DA LINHA DE TRANSMISSÃO DA LOG É DE 750HMS.

```

Figura 82: resultados de LOGYAGI

Com os resultados da “VOLTAGEM” em cada elemento do array, realizou-se a construção dos monopolos em GRADMAX, conforme Figura 83. E, ainda, fez-se a otimização por ângulo da estrutura, consoante Figura 84 e 85.

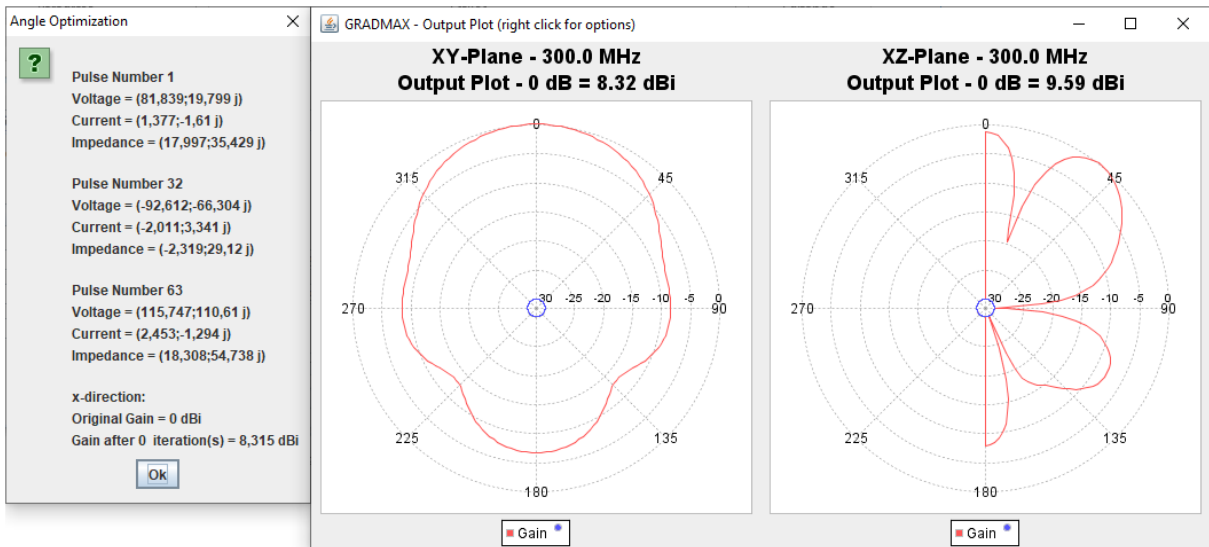
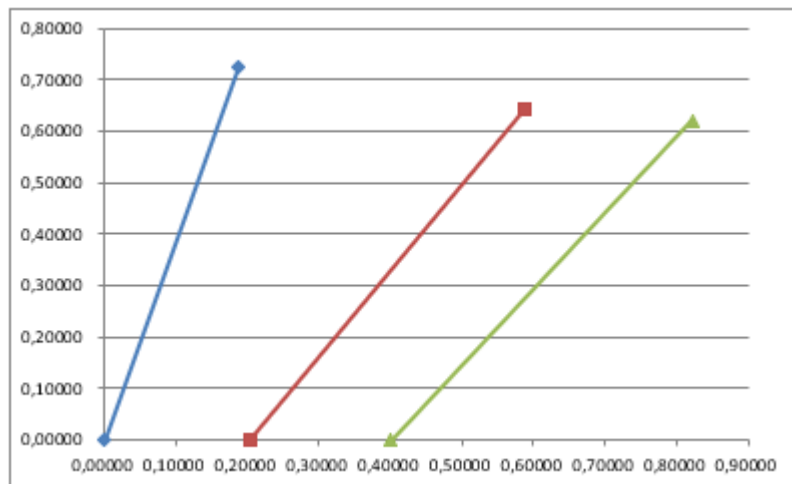


Figura 83: *log* periódica 3 monopolos e 3 fontes 0,75λ cada, em GRADMAX

Codigo para 3 fios - Gradmax										
Nome	n' Fios	Free S	Free / Ground	n' Fontes	n' cargas	Frequencia	Fontes (Pulso / Mag / Fase)			
Log3elem	3	Free Space	2	3	0	300	1	1	84,2	13,6
							2	32	113,9	-144,4
							3	63	160,1	43,7
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	C1	C2	NS Segmentos	Raio
Fio 1	0,00000	0,0	0,00000	0,18855	0,0	0,72591	-1	0	50	0,005
Fio 2	0,20410	0,0	0,00000	0,58875	0,0	0,64385	-2	0	50	0,005
Fio 3	0,40120	0,0	0,00000	0,82258	0,0	0,62044	-3	0	49	0,005

(a)



(b)

Figura 84: *log* periódica 3 monopolos e 3 fontes otimizada, vista da estrutura

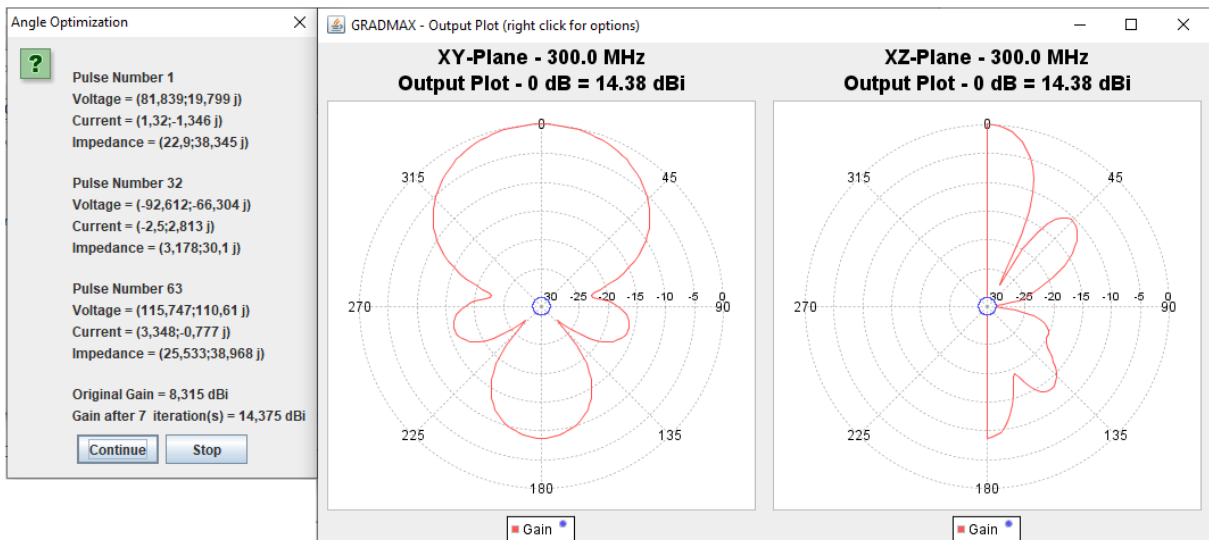


Figura 85: *log* periódica 3 monopolos e 3 fontes otimizados, em GRADMAX

A mesma estrutura foi subdividida e analisada com seis fios em cada elemento, totalizando, assim, 18 fios. A desvantagem dessa etapa é a diminuição de N , pois há um limite no código do *software* GRADMAX. Contudo, o ganho culmina em bons resultados mesmo com a diminuição de N , conforme observado nas simulações com, apenas, um elemento.

Nas Figura 87 e Figura 87, a seguir, deu-se a construção com 18 fios e fez-se a devida otimização (em 6 interações). Por fim, fez-se a construção, em 4nec2, no formato de dipolos, conforme Figura 88 e Figura 89.

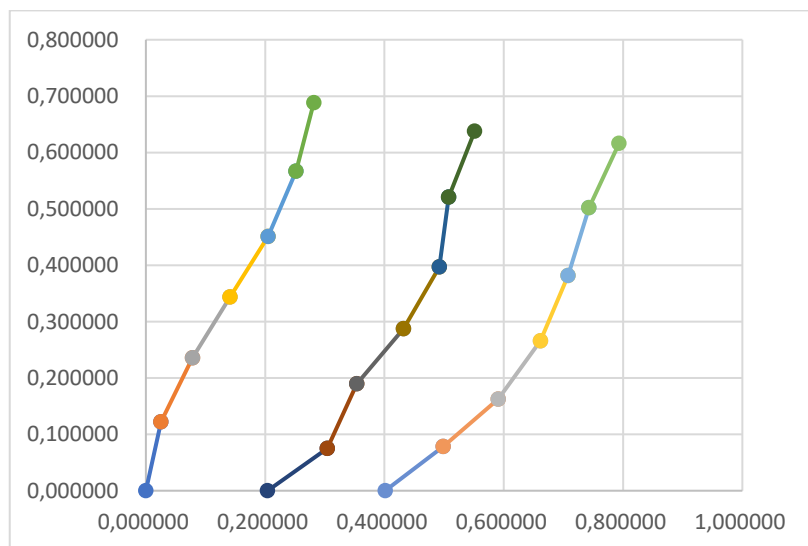


Figura 86: *log* periódica 3 monopolos e 3 fontes, subdividido e otimizado, vista da estrutura

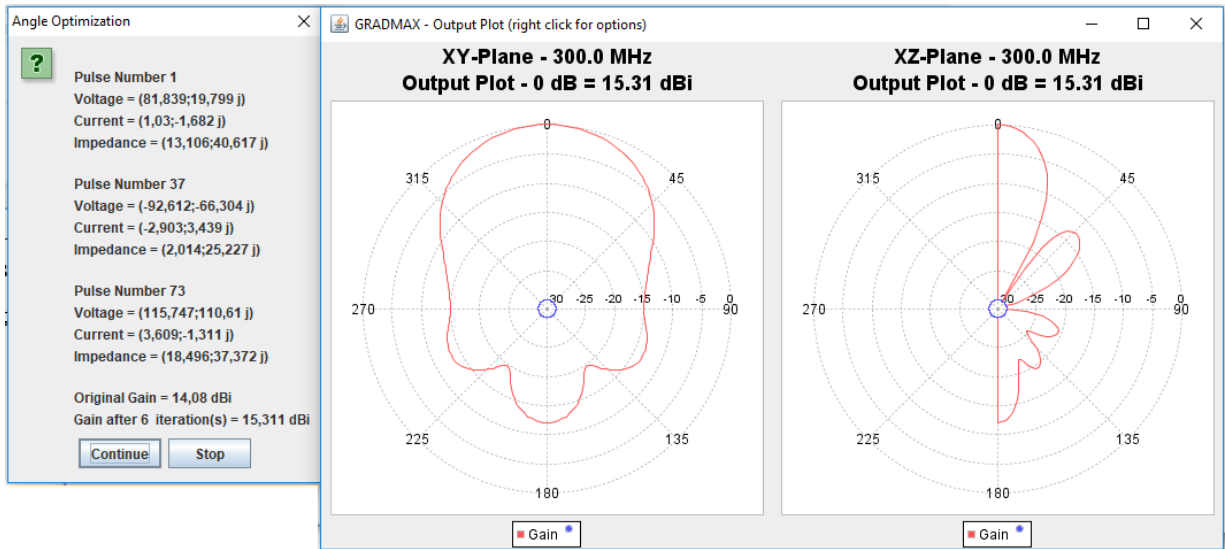
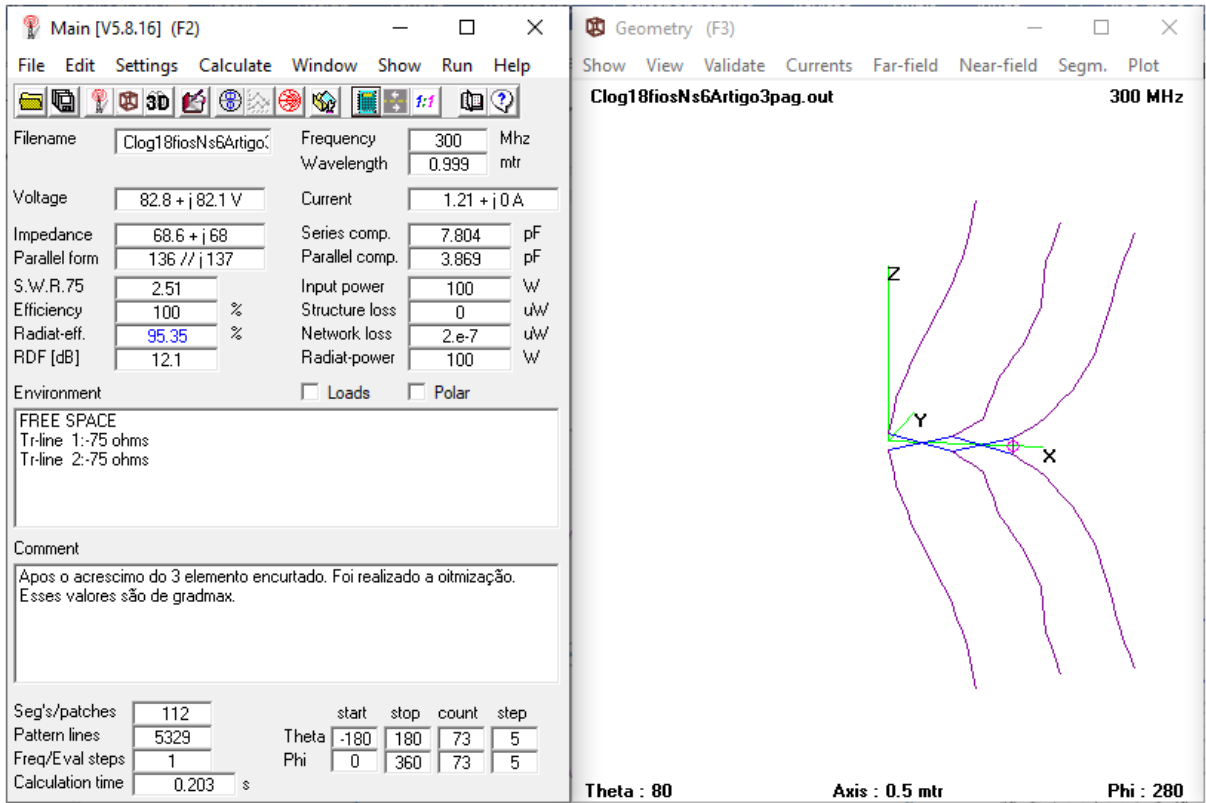
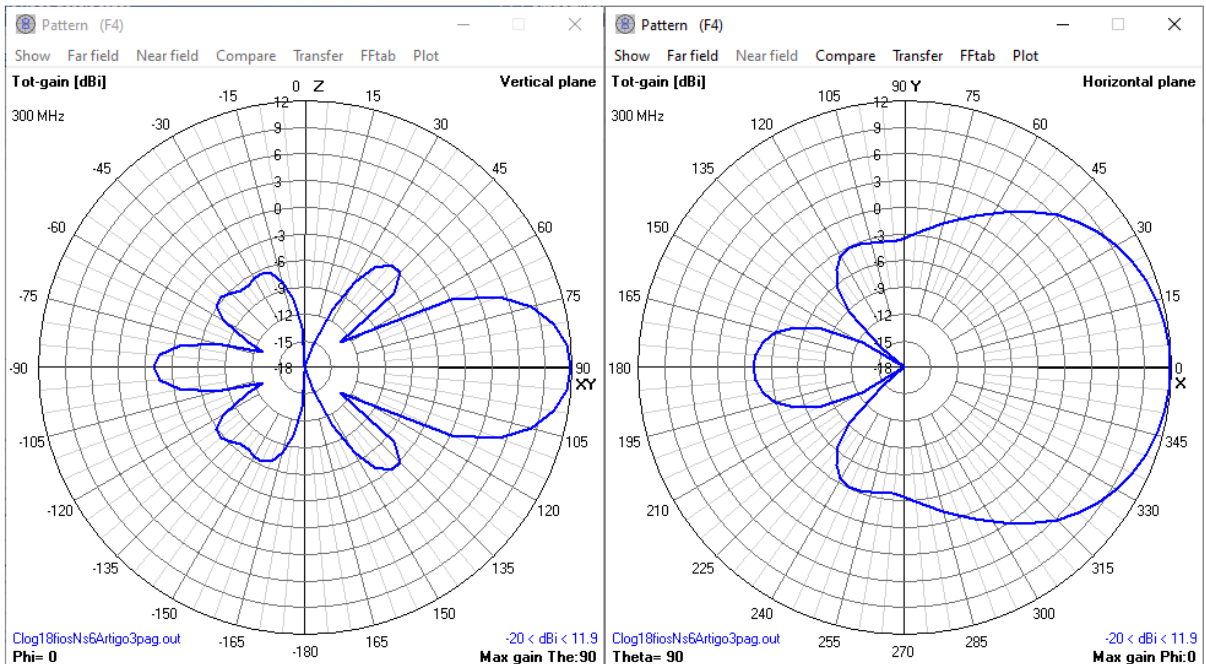


Figura 87: *log* periódica 3 monopolos e 3 fontes, subdividido, otimizado, em GRADMAX

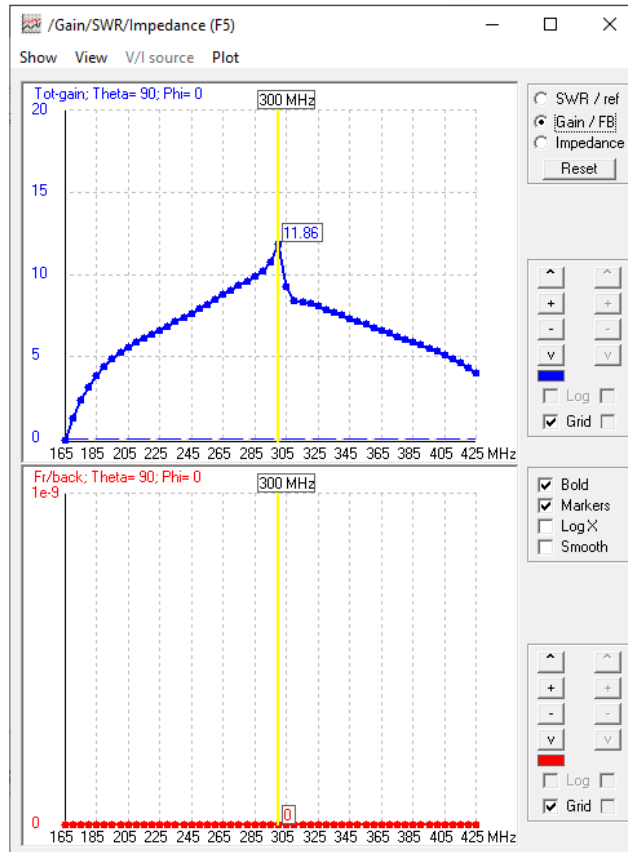


(a)

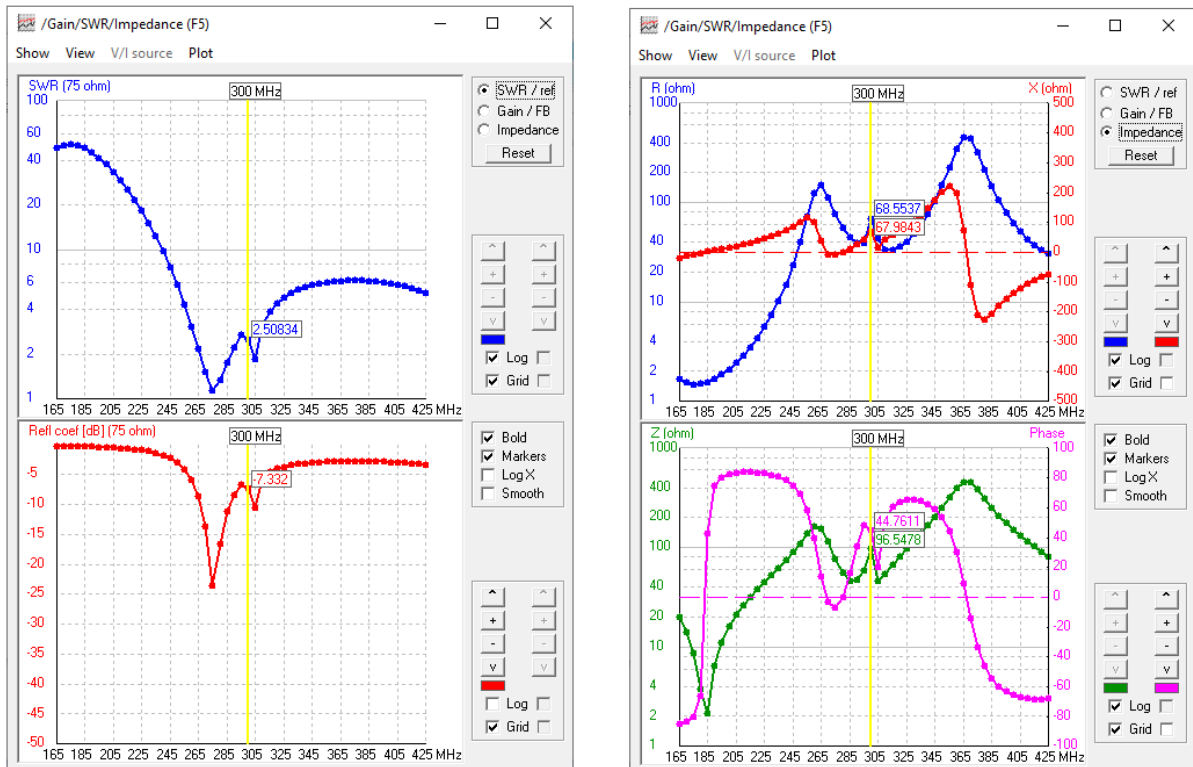


(b)

Figura 88: nova *log* periódica de 3 elementos, em dipolos, otimizada, em 4nec2



(a)



(b)

Figura 89: (a): análise de Ganho. (b): SWR (esquerda) e Zin (direita). Banda: 165Mhz a 425Mhz, em 4nec2

Com a otimização, a subdivisão e a nova otimização, identificou-se um aumento de ganho de 6,06 dB (14,38 – 8,32), e, com 18 fios, um ganho acumulado de 6,99 dB (15,31 – 8,32). Na simulação em 4nec2, adicionou-se a linha de transmissão na estrutura otimizada (agora em dipolos) e realizou-se análise em banda para verificar o comportamento de seus parâmetros. Como visto em 300Mhz, o ganho foi de 11,9dB (com apenas 3 elementos). Percebe-se que o ganho manteve certa amplitude e um desvanecimento em ambos os lados da frequência. Tal característica típica de antenas log periódicas tradicionais (elementos retos). De fato, percebeu-se que não há, apenas, uma possibilidade de estrutura ótima. Cada ponto de partida converge para um determinado máximo. É claro que a busca é o máximo global. Os valores encontrados podem ser, apenas, um máximo local (convergência).

5.4 LOG PERIÓDICA DE SEIS ELEMENTOS COM FATOR DE ENCURTAMENTO

A presente pesquisa simulou uma antena *log* periódica com seis elementos otimizados (monopolo de $0,75\lambda$), conforme Tabela 13. Nesse ínterim, identificou-se uma estreita banda com resultados satisfatórios, aproximadamente 30Mhz nas proximidades de 300Mhz. E, ainda, foi possível perceber baixo SWR (abaixo de 2), ganho médio de 9dB e estabilidade na impedância de entrada. Fora da faixa, a antena em questão operou com baixa eficiência. Os dados podem ser observados nas Figura 90 e Figura 91.

Conforme o exposto, vale destacar que a antena projetada não opera com eficiência satisfatória, fazendo perceber, mais uma vez, a importância do ponto de partida da estrutura construída e complexidade da busca de uma estrutura otimizada com bom desempenho em uma banda larga de frequência.

Tabela 13: log periódica de 6 elementos

Antena log periódica de 6 elementos ($\tau = 0,96$)			
Comprimento (metros)		Distancia (metros)	
L1=	0,7500	D1=	Origem
L2=	0,7200	D2=	0,2700
L3=	0,6912	D3=	0,2592
L4=	0,6635	D4=	0,2488
L5=	0,6370	D5=	0,2521
L6=	0,6115	D6=	0,2293

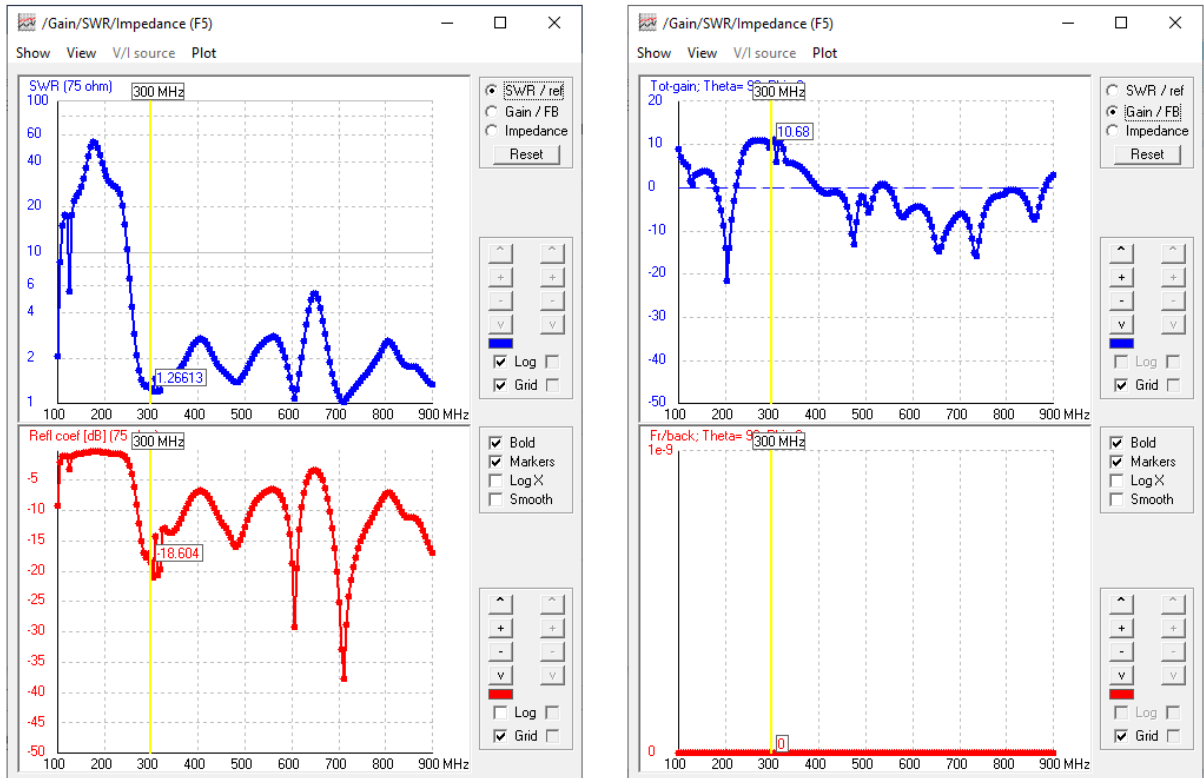


Figura 90: SWR e ganho da log periódica de 6 elementos, em 4nec2

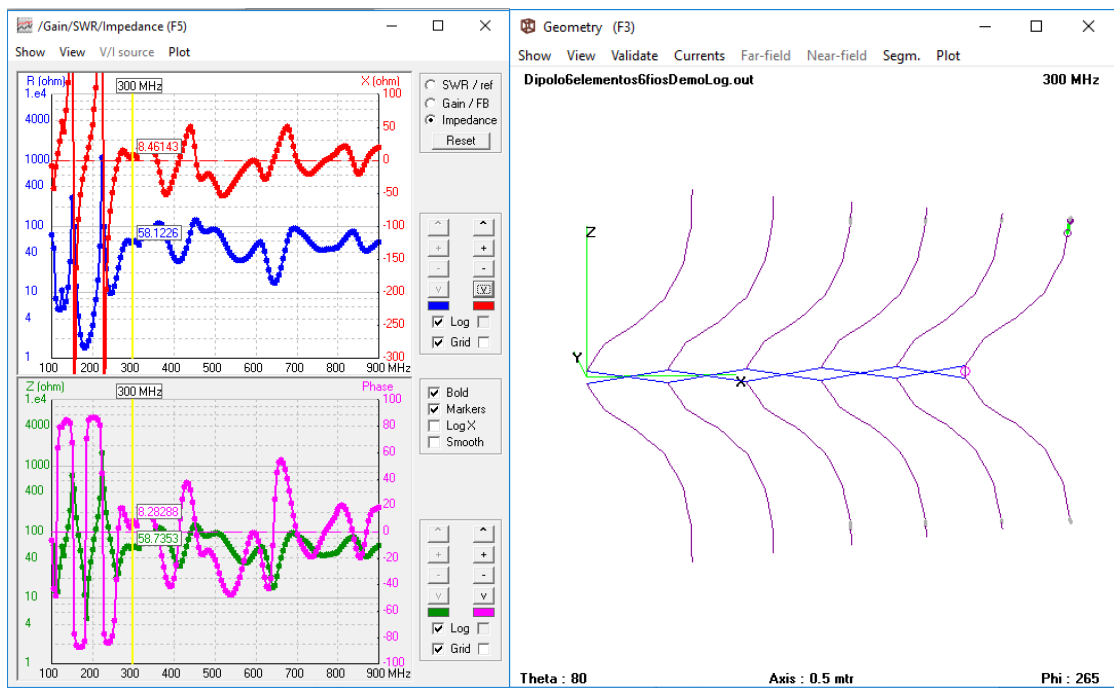
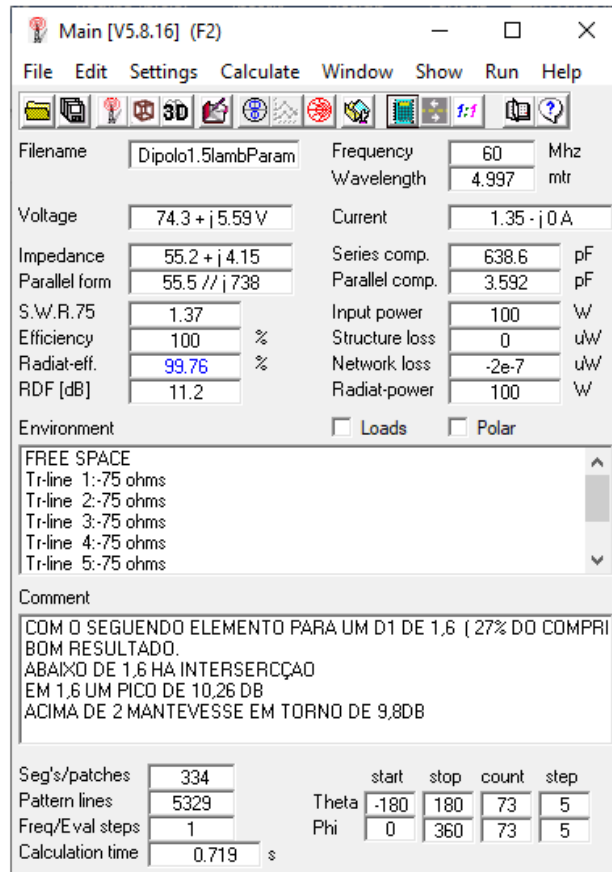


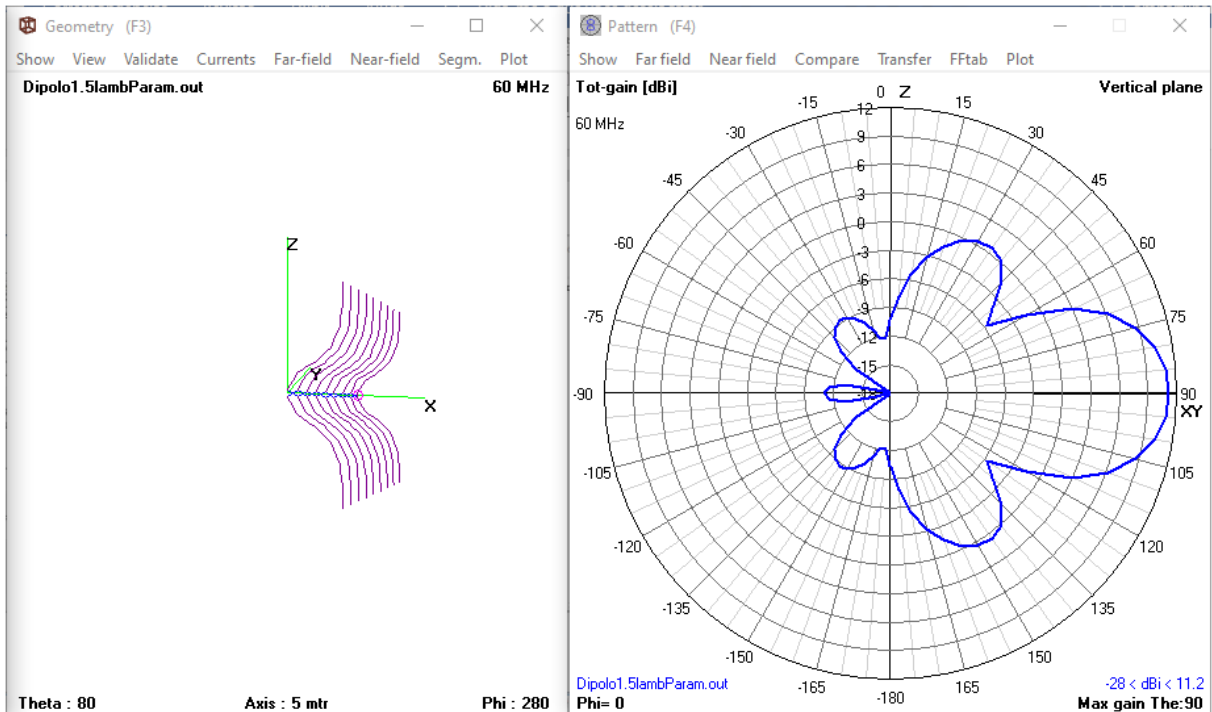
Figura 91: Zin e estrutura da log periódica de 6 elementos simulada, em 4nec2

5.5 LOG PERIÓDICA DE NOVE ELEMENTOS COM FATOR DE ENCURTAMENTO

Fazendo uso do monopolo de $0,75\lambda$, foi simulada uma antena log periódica de nove elementos. O comprimento dos elementos foi reduzido por um fator $\tau = 0,9644$, e o espaçamento proporcional a um fator $\sigma = 0,0203$. Tanto o fator de encurtamento para o comprimento quanto de espaçamentos foram escolhidos entre os melhores resultados obtidos após simulações. Assim, sendo cada elemento da antena otimizado, a alimentação se deu via linhas de transmissão de 75Ω , com a fonte unitária no menor elemento. O ganho produzido foi de 11,20dB em dipolos. Os resultados podem ser observados nas Figura 92 e Figura 93.

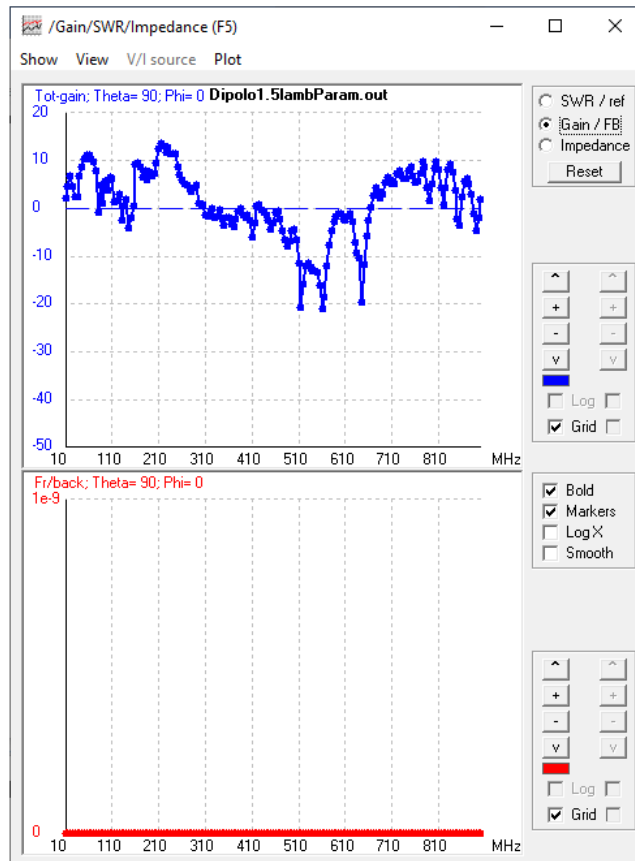


(a)

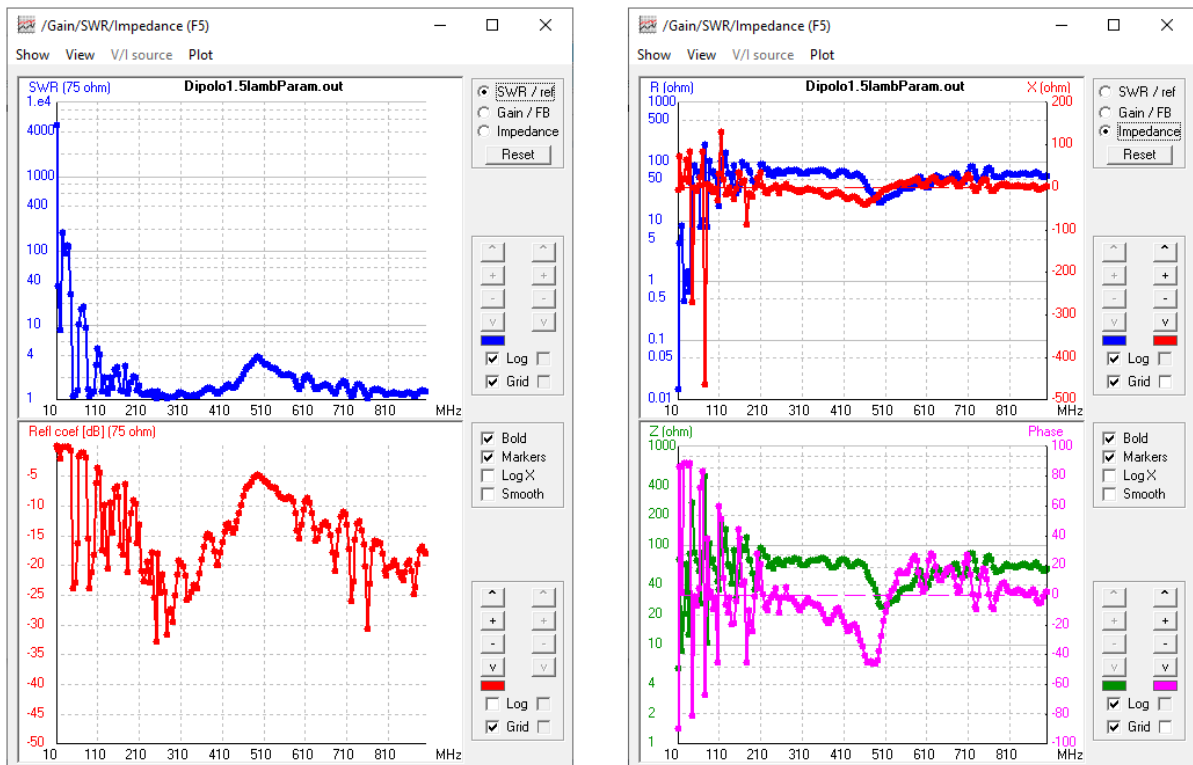


(b)

Figura 92: log periódica de 9 elementos com fator de encurtamento, em 4nec2



(a)



(b)

Figura 93: ROE, ganho e Zin de um log periódica de 9 elementos, em 4nec2

5.6 DISCUSSÃO E RESULTADOS

Diante do exposto, alguns resultados apresentaram bom aumento no ganho após a otimização. Nesse ínterim, é possível destacar três simulações, a saber: 1) yagi, de três elementos retilínea [6]; 2) curvilínea [12]; e, 3) log periódica, de três elementos curvilíneos [17]. No primeiro caso — yagi retilínea —, houve ganho de dipolos de 9,32 dB (12,27 dB - Figura 51 e 9,32 dB – Figura 52). Já na yagi curvilínea, o ganho em dipolos chegou a 12dB (15.0 dB — Figura 54 e 12.0 — Figura 56). Para a *log* periódica, teve-se, também, 11,9 dB (15,31 dB — Figura 87 e 11,9dB — Figura 88).

As yagis apresentam uma banda estreita de operação em determinada frequência que já é esperada nesse tipo de estrutura. Para o caso de antena *log* periódica, a banda de operação se estende por cerca de 200Mhz (200Mhz até 400Mhz), com um ganho superior a 8dBi. Uma característica de antenas *log* periódicas é a independência de frequência. Denominar uma antena de três elementos como: *log* periódica pode parecer precipitado, mas uma de suas características apresentada foi a independência de frequência em uma banda relativamente grande. Pode ser visto que a mudança de frequência (até certo limite) ficou mantida certa constância em seus parâmetros (diagrama de radiação, ganho, impedância de entrada, entre outros) que são relevantes para a operação da antena.

Bons resultados foram percebidos nas simulações realizadas. Contudo, não significa que se promoveram todas as simulações possíveis. De fato, bons resultados podem ser encontrados. Assim, no decorrer do presente estudo, não foram encontradas na literatura otimizações por ângulo em relação às antenas do tipo *log* periódicas. Algumas estruturas (yagi, por exemplo) se fazem presentes em pesquisas [9], [14], [18], [19] e [21].

Na Figura 94, a seguir, compararam-se as três estruturas supramencionadas. Para tanto, realizou-se análise em uma faixa de frequência de 375Mhz até 675Mhz suficiente para abranger as 3 antenas em destaque. Na primeira simulação, com uma yagi retilínea, a banda apresentou ganho acima de 8dBi, de 50Mhz (490Mhz até 540Mhz). A segunda estrutura, uma banda de 70Mhz (485Mhz até 550MHz). Por fim, a terceira estrutura, uma banda de 150Mhz (430Mhz até 580Mhz).

Observou-se, em relação à banda, uma característica de simetria em relação ao eixo X (frequências), além de um ROE abaixo de 2 em boa parte da frequência. Não houve queda abrupta na frequência, mas, sim, certa linearidade.

Realizou-se comparação entre a *log* periódica de três elementos proposta com uma antena tradicional de nove elementos encontrada na literatura [4]. O ganho estimado para a

antena de nove elementos foi de 8,5dB. Para tanto, foram utilizados os parâmetros de uma antena com parâmetros de construção: τ e σ [4]. Na Figura 95, as antenas com apenas três elementos apresentaram ganhos superiores à antena com nove elementos, em determinadas bandas. Os resultados de ROE e Z_{in} não foram incluídos, pois não foi implementada estrutura de casamento de impedância, que pode melhorar tanto o ROE quanto Z_{in} . As bandas estão sobrepostas, conforme seus respectivos ganhos.

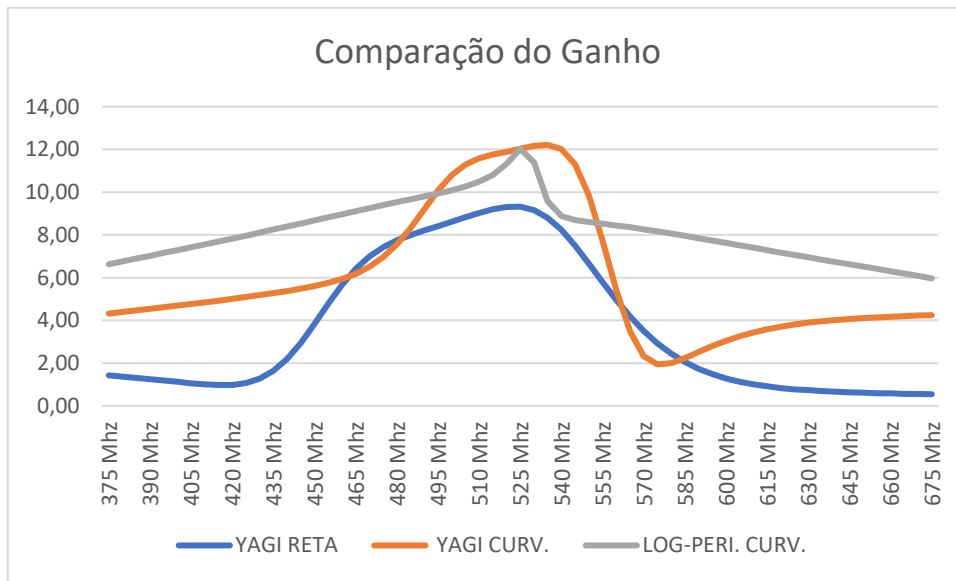


Figura 94: comparação yagi retilínea, yagi curvilínea e log periódica

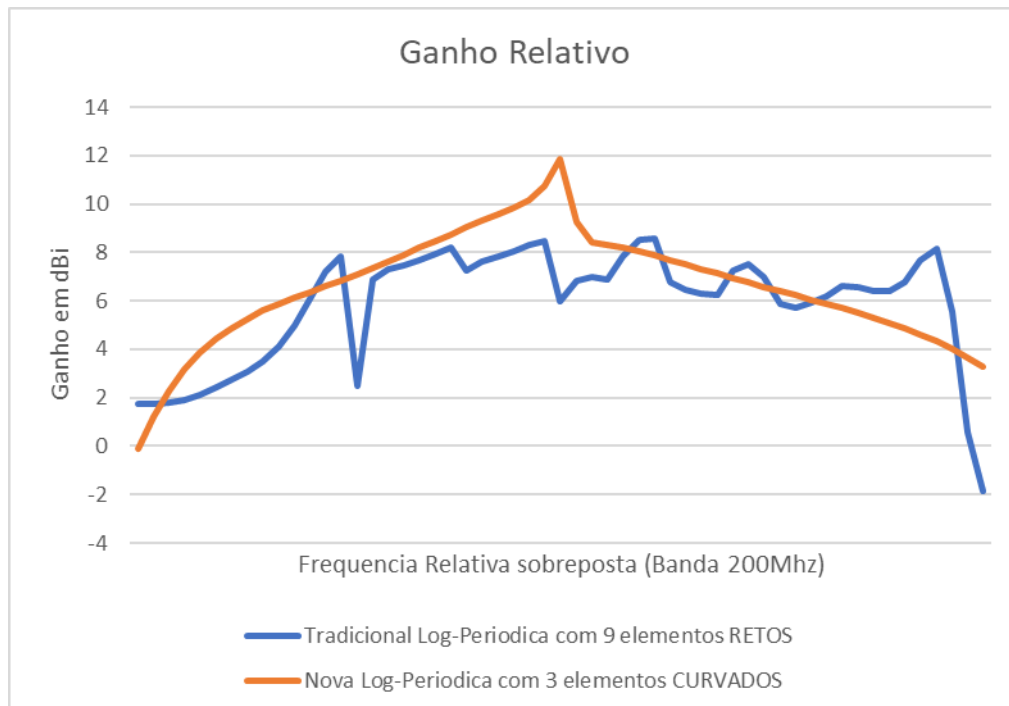


Figura 95: comparação log's: elementos retos e curvados

6.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

No presente estudo, foi observada, nas simulações, uma característica entre estruturas equivalentes de monopolos e dipolos, sendo possível observar a relação de 3dB no caso do ganho entre as estruturas. Também se procedeu a otimização de elementos isolados com vários comprimentos de ondas. E, ainda, algumas estruturas do tipo yagi também foram observadas e otimizadas.

Fazendo uso do *software* GRADMAX, foi possível otimizar uma estrutura de dipolos, cada qual alimentado por uma fonte de tensão independentes (via monopolos equivalentes). Para a obtenção das tensões independentes, foi utilizado um código em Fortran que analisa *log* periódicas. Posteriormente, fez-se o equivalente no formato dipolo, observando-se o ganho e as demais características da antena via *software* 4nec2. Nesse ínterim, foi possível verificar que, mesmo não desenvolvendo a análise de antenas *log* periódicas com o uso das tensões, é possível a análise em GRADMAX e, por conseguinte, sua otimização. Por fim, procedeu-se uma comparação entre as estruturas yagi e *log* periódicas tanto com elementos retos quanto otimizados.

No mercado de antenas atuais para a televisão digital, têm-se vários modelos de antenas *log* periódicas. Destas, grande parte faz uso de elementos retilíneos com dimensões abaixo de meio comprimento de onda. Algumas estruturas vendidas fogem ao modelo tradicional, com o acréscimo de elementos parasitas, espaçamentos não convencionais, estruturas em “V”, entre outras características que, às vezes, não são percebidas. Uma das vantagens de qualquer tipo de antena é que, depois de construída e observada como uma boa antena, ela pode facilmente ser copiada.

No presente estudo, foi possível perceber a melhoria no ganho de antenas de mais de 3dB (3db = dobro). Os resultados obtidos mostraram-se promissores e vantajosos, ao mesmo tempo em que, em outras situações, se deu alguma intersecção ou grande proximidade de elementos, tornando o dado obtido não confiável. Às vezes, em algumas estruturas, os resultados foram bem definidos em ambos programas simulados. Em relação às simulações, não se podem considerar algumas perdas, ao passo que algumas características são desprezadas. Porém, as perdas, sendo menores que o acréscimo no ganho, tornarão a otimização uma alternativa de melhoria. A otimização demonstra que existe

algum potencial de pesquisa para a temática supramencionada. As antenas *log* periódicas operam em uma banda maior do que aquelas com um único elemento ou antenas yagi.

Entre as simulações realizadas, a estrutura de antena que teve destaque foi a *log* periódica com 3 elementos. Manteve-se ganho considerável e parte dos parâmetros ficaram, relativamente, estáveis com a variação da frequência. Uma característica desejável.

Ainda na presente pesquisa, uma antena de três elementos com linha de transmissão apresentou bons resultados em frequência, logrando 12dBi no formato de dipolo. Vale destacar a cautela na utilização de uma estrutura com três elementos, denominando-a *log* periódica. Contudo, uma das características de antenas independentes na frequência (até certa banda) foi apresentada pela antena otimizada. Assim, não se pode descartar a possibilidade de existência de uma antena com vários elementos otimizados (oito ou 18, por exemplo) que mantêm as características de antenas *log* periódicas apontadas atualmente na literatura. Novamente, a busca por um resultado ótimo global é desejada, mas os resultados podem ser, apenas, máximos pontuais.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

No presente estudo, também foi possível constatarem-se resultados ruins e outros que não ofertam ganho significativo quando da comparação de uma estrutura mais complexa de construção de antena com uma estrutura mais simples. Assim, como trabalho futuro, é possível a exploração de vários aspectos: tais como: a construção e a medida de antenas otimizadas; a construção de um código que promova todo o processo; o aumento do número de segmentos nos *softwares*, promovendo a obtenção de resultados mais precisos; apesar de haver outros métodos mais eficientes, a exploração do comportamento da matriz admitância da estrutura e da linha de transmissão pode trazer caminho a ser traçado em busca de uma otimização e a exploração de otimização por ângulo em novos pontos de partida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. M. Sampaio, *Televisão Digital*, 1ed, Erica, 2012.
- [2] C. A. Balanis, *Antennas Theory: Analysis and Design*, 3ª ed. : John Wiley and Sons, New York, 2005.
- [3] R.F. Harrington, "Matrix Methods for Field Problems", *IEEE Trans. Antennas and Propagat.* , Vol.55, N° 2, pp. 136-149, Fev, 1967.
- [4] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenas Theory and Design* 3ª ed.: John Wiley and Sons, 2012.
- [5] A.J. Julian, J.C. Logan e J.W. Rockway, "Mininec: A Mini-Numerical Electromagnetic Code", Technical Document 516, Naval Ocean Systems Center, San Diego, Set, 1982.
- [6] TERADA, Marco Antônio Brasil. *Otimização de antenas de fios através do método do gradiente modificado*. Brasília, 1991. 120 f. Tese(M)-unb/ene.
- [7] <http://www.qsl.net/4nec2/> acessado em junho/2017.
- [8] SILVA, Franklin da Costa. *Análise de antenas log-periódica de dipolos e yagi-uda através do método dos momentos*. Brasília , 1986. 114 f. Tese(M)-unb/ene.
- [9] F. M. Landstorfer and R.R. Sacher, "Optimisation of Wire Antennas", 1ed., John Wiley, 1985.
- [10] S. N. Makarov, *Antenna and EM Modeling with Matlab*, John Wiley, 2002.
- [11] J. D. Kraus and R. J. Marhefka, *Antennas for all applications*, McGraw-Hill, 2002.
- [12] TERADA, Marco Antonio Brasil; SOARES, A. J. M., SILVA, F.C. ; FONSECA, S.B.A., "Otimização de Antenas de Fios Através do Método do Gradiente Modificado." *TELEMO92: X Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e V Simpósio Brasileiro de Microondas*, 1992, pp. 7-12, Brasília - DF.
- [13] TERADA, Marco Antonio Brasil, SOARES, A. J. M, SILVA, F.C. e FONSECA, S.B.A., "GRADMAX: Um Programa Para Análise e Otimização de Antenas de Fios. In: *TELEMO92 (Software Educacional): X Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e V Simpósio Brasileiro de Microondas*, 1992, pp. 15-18, Brasília - DF.
- [14] Richard Schneider and John Ross, "Antennas for the New Airwaves," *IEEE Spectrum Magazine*, pp. 44-49, February 2009.
- [15] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Antena-tv.jpg> acessado em junho/2017.
- [16] <http://www.casadosuporte.com.br/antena-digital-externa-log-28-elementos-uhf-hdtv--cabo-coaxial--mastro-de-fixacao-sl2800k-339717.aspx/p> acessado em junho/2017.
- [17] Tomé, P.V.B. e Terada, M.A.B., "Optimization of Shaped Log-Periodic Antennas", *IMOC* 2019.
- [18] TERADA, Marco Antonio Brasil; CORREIA, D. ; SOARES, A.j.m. . Optimization of Gain, Impedance and Bandwidth in Yagi-Uda Antennas Using Genetic Algorithm. In: *1999 SBMO/IEEE MTT-S, AP-S and LEOS International Microwave and Optoelectronics Conference*, 1999, Rio de Janeiro - RJ. *Proceedings of 1999 SBMO/IEEE MTT-S, AP-S and LEOS International Microwave and Optoelectronics Conference*, 1999.

- [19] TERADA, Marco Antonio Brasil; SILVA, V. ; SILVA, F.c. ; SOARES, A.j.m. ; FONSECA, S.b.a. . Optimization of Loop Antennas. In: COMPUMAG 97 - International Conf. on the Computation of Electromagnetic Fields, 1997, Rio de Janeiro. Proceedings of COMPUMAG 97 - International Conf. on the Computation of Electromagnetic Fields, 1997. p. 439-440.
- [20] Popovic, B. D.; Dragovic, M. B.; Djordjevic, A. R.: 'Analysis and Synthesis of Wire Antennas'. Research Studies Press, Chichester, 1982.