



Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação

Desenvolvimento de lentes planares dielétricas para impressão 3D

Jorge Pedro da Costa Mendes Teixeira

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Doutor Sérgio A. Matos, Prof. Auxiliar, ISCTE-IUL

Co-orientador(a):

Doutor Jorge R. Costa, Prof. Associado, ISCTE-IUL

Setembro, 2016



## Resumo

A utilização de impressão 3D para o fabrico de lentes de baixo custo em micro-ondas e ondas milimétricas tem vindo a desenvolver-se, assim como a tecnologia subjacente. No estado de arte atual os materiais e as impressoras disponíveis apresentam ainda várias limitações que devem ser tidas em conta no desenho destas lentes.

Este trabalho apresenta um estudo sistemático de vários desenhos de lentes compatíveis com a impressora 3D disponível no nosso centro de investigação, Instituto de Telecomunicações. Desta forma, desenham-se lentes compostas por apenas um dielétrico (PLA).

É investigado a viabilidade da utilização de uma lente de Fresnel em ligações *backhaul* a 60 GHz. É feito também a comparação de lente de Fresnel compatível com impressão 3D com uma solução baseada em inserções metálicas. Por fim, implementa-se uma versão dielétrica da lente de seguimento mecânico proposto pelos orientadores desta tese para a banda Ka.

## Palavras chaves

Lentes planares dielétricas, lente Fresnel, impressão 3D, ondas milimétricas, banda ka, superfícies seletivas na frequência, seguimento mecânico.



## **Abstract**

3D printing is becoming a new trend in the lens design to device cost effective solutions in the microwave and millimeter-wave regions. This technology is in constant evolution. In the current state-of-art, the available 3D printing materials and printers still have some limitations that need to be tackled in the design process.

This work presents a systematic evaluation of several lens projects that are compatible with the available 3D printer of our research institute, *Instituto de Telecomunicações*. Accordingly, the proposed lenses are constituted by a single dielectric (PLA).

It is investigated the feasibility of using a 3D printed Fresnel lens for a *backhaul* connection at 60 GHz. Moreover, a comparison of an all dielectric Fresnel lens with an equivalent solution based on metallic insertions is performed at 30 GHz. Finally, the scanning properties of an offset Fresnel lens are analyzed at 30 GHz, following a new mechanical steering solution recently proposed by the supervisors of this thesis.

## **Keywords**

Dielectric planar lens, Fresnel lens, 3D-printing, millimeter-waves, ka-band, frequency selective surface, Mechanical scanning.



## Agradecimentos

Ao professor Sérgio Matos, que me despertou interesse em eletromagnetismo durante a minha licenciatura, e posteriormente em lentes planares. Agradeço principalmente pela forma como ele soube me orientar, mostrando-se sempre disponível, dedicado e disposto a ajudar.

Ao professor Jorge Costa, pelo seu elevado grau de conhecimento no desenvolvimento de lentes, possibilitando o meu acesso a fontes e referências importantes no desenvolvimento deste trabalho.

A minha companheira, mãe dos meus filhos Jessica Coelho, que tem estado ao meu lado desde o início do meu trajeto universitário, por ter sempre acreditado em mim, apoiado e incentivado a prosseguir, mesmo quando a vida nos surpreendia e mostrava-se difícil. Agradeço por me fazer ver de outro ponto de vista e principalmente por me ter dado uma família.

Aos meus gémeos Pedro e Lourenço Coelho Teixeira, que em apenas 29 meses de existência mudaram a minha vida, encheram-na de alegria e hoje são a razão pela qual tento ser melhor pai, namorado, filho, irmão, amigo, aluno e professor.



# Índice

<b>Capítulo 1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos .....	3
1.3. Estrutura.....	4
1.4. Contribuições originais.....	4
<b>Capítulo 2. Desenho de células unitárias para <i>transmitt arrays</i> .....</b>	<b>7</b>
2.1. Modelo analítico para caracterização das células.....	8
2.2. Validação teórica do método de análise das células.....	10
2.3. Perdas no dielétrico.....	14
2.4. Adaptação da impedância da célula unitária ao espaço livre .....	15
2.5. Conclusão .....	19
<b>Capítulo 3. Desenho de uma lente de Fresnel para 60GHz.....</b>	<b>21</b>
3.1. Introdução .....	21
3.2. Princípio de funcionamento e desenho da lente.....	22
3.3. Desenho das lentes.....	23
3.4. Fontes.....	24
3.4.1. Near field source.....	25
3.5. Escolha de células unitárias.....	26
3.6. Lentes Fresnel de altura variável .....	28
3.6.1. Escolha da fase constante - Near field source .....	28
3.6.2. Determinação da eficiência de radiação da lente a) .....	29
3.6.3. Resposta na frequência da lente .....	31
3.7. Lentes Fresnel com altura fixa .....	32
3.8. Conclusão .....	33

<b>Capítulo 4. Desenho de Lentes de Fresnel para 30 GHz com células dielétricas e com células metálicas.....</b>	<b>35</b>
4.1. Introdução .....	35
4.2. Célula unitária com placas metálicas .....	35
4.3. Lente Fresnel feita com inserções metálicas .....	37
4.4. Célula unitária dielétrica .....	37
4.5. Lente dielétrica .....	38
4.6. Comparação de resultados .....	38
4.7. Conclusões .....	40
<b>Capítulo 5. Lentes de seguimento para 30GHz.....</b>	<b>41</b>
5.1. Introdução .....	41
5.2. Princípio de funcionamento.....	42
5.3. Diretividade da lente a 30 GHz para seguimento entre 0 e 50°.....	43
5.4. Resposta na frequência da lente .....	44
5.5. Conclusão .....	46
<b>Capítulo 6. Conclusões.....</b>	<b>47</b>
6.1. Conclusões .....	47
6.2. Trabalho Futuro.....	48
<b>Referências .....</b>	<b>49</b>
<b>Anexo.....</b>	<b>53</b>
Programa usado para desenho das lentes .....	53

## Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de um desenho de um <i>transmitt arrays</i> . .....	7
Figura 2 – Células unitárias compatíveis com impressão 3D. a) tipo i): célula com altura variável b) tipo ii) célula com inserção de buraco. ....	8
Figura 3 – célula unitária periódica: a) com buraco, b) homogênea .....	9
Figura 4 – Comparação entre os resultados teóricos e simulados para a resposta de amplitude das células homogêneas e com buracos em função do volume do dielétrico. ....	11
Figura 5 – Comparação entre os resultados teóricos e simulados para a resposta de fase relativa para as células homogêneas e com buracos em função do volume do dielétrico.....	12
Figura 6 – Parâmetro $s_{21}$ em função da frequência para várias dimensões do buraco da célula considerando que o volume de ar é igual ao volume do dielétrico, $w = g/2$ . ....	13
Figura 7 – Efeito da tangente de perdas .....	15
Figura 8 – Célula unitária com dois transformadores $\lambda/4$ , um em cada extremidade da célula: a) transformador composto por um dielétrico uniforme. b) transformador composto por o mesmo dielétrico do que a restante célula e com um buraco. ....	15
Figura 9 – Amplitude versus fase das células com alturas diferentes com e sem transformadores $\lambda/4$ . ....	17
Figura 10 – Gráficos das células com buraco para 60GHz, com e sem transformadores $\lambda/4$ em função do atraso de fase. Transformador homogêneo é um dielétrico homogêneo. Transformador com buraco é um dielétrico que com buraco. ....	17
Figura 11 – Gráficos do parâmetro $s_{21}$ , para 50 e 70 GHz, das células homogêneas e com buraco, com e sem transformadores $\lambda/4$ em função do atraso de fase.....	19
Figura 12 – Lentes de Fresnel. a) com anéis cilíndricos concêntrico de altura diferente b) com células unitarias de secção quadradas, células tipo i) c) planar com célula quadrado com buracos, células tipo ii). d) planar com anéis cilíndricos concêntricos com altura constante.....	22
Figura 13 – Principio de funcionamento de uma lente de Fresnel convencional. ....	22
Figura 14 – Discretização de $60^\circ$ da fase ideal em função de $x$ com $F = 40mm$ para 60GHz. ....	23
Figura 15 – Exemplo da construção de uma lente do tipo d).....	24

Figura 16 – Descrição do método de iluminação da lente utilizando uma <i>near field source</i> [21].....	25
Figura 17 – Diagrama de radiação da diretividades das fontes: corneta e <i>near field source</i> .....	26
Figura 18 –Diretividade em função do termo $\phi_{contante}$ para vários métodos de seleção de células unitárias.....	27
Figura 19 - <i>Near field source</i> . a) Diretividade no plano H, b) amplitude normalizada do campo incidente no plano da lente.....	28
Figura 20 – Diretividade máxima das lentes a) e b) em função da fase constante para 60GHz. ....	29
Figura 21 – Diretividade máxima e ganho máximo realizado com lente a) em função da fase constante. ....	30
Figura 22 – a) lente com $F/D = 1,82$ 2 saltos de fase de $360^\circ$ b) lente com $F/D = 0,5$ , 5 saltos de fase de $360^\circ$ .....	30
Figura 23 – Resposta na frequência da lente b). ....	31
Figura 24 – Comparação da diretividade da lente a) e lente c).....	32
Figura 25 – Comparação da diretividade da lente c) e lente d).....	33
Figura 26 – Diagrama de radiação da fonte considerada.....	35
Figura 27 – Célula unitária com 3 placas metálicas capacitivas .....	36
Figura 28 – Resposta das células a) $ s_{21} $ e b) $\text{Arg}(s_{21})$ . ....	36
Figura 29 – Lente com placas metálicas .....	37
Figura 30 - Parâmetro $s_{21}$ das células unitária da lente dielétrica. a) $ s_{21} $ e b) $\text{Arg}(s_{21})$ . ....	38
Figura 31 – Lente dielétrica com $D = 155\text{mm}$ , $F = 77.5$ .....	38
Figura 32 – Diretividade da lente com metalizações e dielétrica em função da frequência.....	39
Figura 33 – Relação frente-trás da lente com metalizações e dielétrica em função da frequência.....	39
Figura 34 – Diagrama de radiação a 60GHz das lentes dielétricas e com metalizações .....	40
Figura 35 – Diagrama de radiação do <i>near field</i> $F = 100\text{mm}$ . ....	41
Figura 36 – Lente de Fresnel com offset.....	42
Figura 37 – Principio de seguimento de uma lente com seguimento. Tirado de [5] ..	43

Figura 38 – Gráfico da diretividade da lente dielétrica simulada em função do ângulo no zênite, para $a \in \{-27mm; 60mm\}$ . .....	44
Figura 39 – Desvio na frequência: a) do ângulo da direção de saída do lobo principal; b) diretividade máxima do lobo principal para três posições da lente $a=\{-27, 15, 60\}$ mm. ....	45
Figura 40 – Desvio na frequência do ângulo da direção de saída do lobo principal da lente com $a=0$ mm. ....	45

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parte real da permissividade relativa anisotrópica do PLA (valores medidos no IT). ....	10
Tabela 2 – Performance das simulações com e sem lente .....	26
Tabela 3 – Variação da diretividade em dBi relativamente máximo obtido para 30 GHz em função da frequência e do ângulo de saída do feixe. A zona a verde indica a zona que cumpre com o critério de 3 dB. ....	46

## Lista de Acrónimos

- HAP – Plataforma de alta altitude
- FSS – Superfície seletiva de frequência
- PLA – Acido polilático
- PEC – Condutor elétrico perfeito



# Capítulo 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

A evolução das comunicações móveis é sustentada pelo contínuo desenvolvimento de novos serviços aos utilizadores, cada vez mais exigentes em termos de largura de banda (vídeo 4K, realidade virtual sem fios, internet das coisas, etc.). A tendência é, portanto, de utilizar frequências mais elevadas. Atualmente existe uma grande investigação na área das ondas milimétricas (30-300GHz) para comunicações móveis o que virá a designar-se como 5G. Esta tecnologia potencialmente permitirá alcançar capacidades 100x acima do atual 4G para zonas com grande densidade populacional. O 5G poderá assim vir a ser uma alternativa economicamente vantajosa face as atuais comunicações por fibra ótica.

Nas comunicações via-satélite verifica-se a mesma tendência na utilização de frequências cada vez mais altas. A nova geração de satélites, que está a ser colocada em orbita, já permite realizar comunicação na banda K (20 – 40GHz). Assim a capacidade das comunicações via satélite tem vindo a tornasse uma alternativa viável na cobertura de zonas remotas onde é necessário a utilização de serviços de banda larga, como por exemplo num avião ou num comboio. Em particular as comunicações móveis via satélite de banda larga tem um grande potencial de crescimento. No entanto, existem vários desafios no desenvolvimento de antenas para estas aplicações. Pretende-se que as antenas sejam compactas, de baixo custo, apresentem um ganho elevado e ainda tenham capacidade de seguimento. Esta é uma área onde existe um intenso esforço de investigação.

Existe um problema semelhante no desenho das antenas para Plataformas de Alta Altitude (*HAP*). Esta tecnologia também permite ter uma cobertura de banda larga (com débitos similares ao WiMax) para cobrir áreas do mesmo tipo que as dos satélites. A vantagem é que as *HAP* estão entre 20 a 50Km o que implica que as antenas não precisem de ter um ganho tão elevado como no caso das comunicações via satélite, permitindo soluções mais compactas. Outra vantagem das *HAP* são a menor latência do que satélites, o que garante melhor qualidade de serviço, não estão restringidas por uma orbita, ou seja, podem mover-se livremente, [1] e [2] As *HAP* são assim também uma alternativa de baixa custo para o fornecimento de serviços de banda larga a zonas remotas com baixa ou nenhuma conexão a internet.

Para manter a comunicação estando num terminal móvel, a antena terá que ter a capacidade de seguimento. Na literatura existem três tipos de seguimento para este tipo de aplicação: mecânico

[3] -[5] , eletrónico [6] -[10] e híbrido [11] . Antenas com seguimento eletrónico (*phased arrays*) têm as vantagens de serem compactas e de fazerem seguimento a alta velocidade, por outro lado, a complexidade da rede de alimentação destas estruturas aumenta significativamente o custo destas antenas e implica a existência de perdas que na banda K são elevadas. Soluções híbridas usualmente utilizam meios mecânico para o seguimento no azimute e elétricos para o seguimento na elevação. Em comparação com seguimento eletrónico tem menor custo e um seguimento de 360° em azimute com menor distorção [12] embora com menor velocidade de seguimento. A soluções que permitem um menor custo baseiam-se em seguimento mecânico utilizando a rotação e inclinação mecânicas para fazer o varrimento em azimute e elevação respetivamente, usualmente com o auxílio de juntas de rotação [13] .

Existem várias tecnologias para o desenho deste tipo de antenas. As antenas refletoras são o método clássico de comunicação via satélite uma vez que tendem a ser de baixo custo, no entanto tornam-se soluções muito volumosas quando se pretende ganho elevados que podem chegar a ordem dos metros. Para reduzir a dimensão destas antenas tem vindo a ser feita uma grande aposta em antenas compostas por aberturas planares (também podendo se designadas por lentes planares). Existem soluções do tipo *reflect-arrays* [6] ou *transmit-arrays* [4] e que podem ser do tipo ativos ou passivos. Este trabalho centra-se na solução de *transmit-arrays* do tipo passivo uma vez que permite obter soluções mais simples de fabricar e de menor custo. Por outro lado, os *transmit-arrays* permitem colocar o elemento ativo da antena que ilumina a abertura (designado por *feed*) sem interferir com a zona de radiação da antena. Já no caso do *reflect-arrays* a zona em que é colocado o *feed* é a zona para onde a abertura radia. Mais especificamente, este trabalho centra-se no desenvolvimento de lentes planares dielétricas compatíveis com a impressão 3D. Pretende-se mostrar a viabilidade desta tecnologia para implementar este tipo de lentes de forma competitiva comparando com processos mais tradicionais de fabrico (mas mais complexos) como é o caso da litografia.

A utilização de lentes dielétricas planares não homogéneas do tipo *perforate dielectric lens* são utilizadas em vários contextos [13] [15] . Na literatura recente é possível encontrar desenho de lentes de Fresnel convencionais utilizando a técnica de impressão 3D [16] Contudo neste caso a impressão utilizada utiliza dois tipos de materiais diferentes o que não é possível fabricar com a impressora 3D disponível no laboratório do Instituto de Telecomunicações (IT). Neste trabalho abordam-se dois tipos de desenhos: i) lentes de Fresnel dielétricas para efetuar uma

ligação *backhaul* na banda não licenciada de 57-64 GHz. ii) lente de Fresnel dielétrica com seguimento mecânico na banda Ka para comunicações via satélite e HAP [5] .

Importa também contextualizar este trabalho no âmbito da investigação feita pelo grupo de antenas do IT-IUL. Neste grupo já existe uma vasta experiência no desenho de lentes planares através do processo litográfico. Este trabalho enquadra-se no esforço, ainda a decorrer, que tem a vindo ser feito em transferir esta experiência adquirida para soluções implementadas através da impressão 3D.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de lentes dielétricas compatíveis com a impressão 3D disponível no laboratório do IT do polo de Lisboa [17] . As limitações do material e do tipo de impressão que é possível fazer com a impressora disponível são tidas em conta nos desenhos apresentados. Pretende-se mostrar a viabilidade desta tecnologia em duas frequências através de dois desenhos:

- i) Desenvolvimento de lentes de Fresnel de baixo custo para efetuar uma ligação *backhaul* na banda não licenciada de 57-64 GHz.
- ii) Desenho de uma lente que implementa o conceito de seguimento apresentado em [5] para funcionar na banda Ka de transmissão (29,5-30 GHz).

O objetivo é mostrar através destes desenhos quais as vantagens e limitações que temos quando se pretende utilizar lentes compostas por um único dielétrico com perdas ainda significativas.

Em particular pretende-se responder a várias questões:

- 1) Qual a melhor geometria para as células puramente dielétricas compostas por ar?
- 2) Qual é o melhor desenho para uma lente Fresnel composta por apenas um dielétrico? São testadas quatro geometrias diferentes.
- 3) Como é que o desempenho de lente é afetado em função dos critérios de escolha das células unitárias?
- 4) Qual a influência da forma como se distribuem as células unitárias na lente?
- 5) Quais as vantagens/desvantagens deste modo de fabrico da lente face ao mesmo tipo de lente feita com metalizações (processo litográfico)?
- 6) Podem a nova técnica de seguimento mecânico proposta em [5] ser obtida através de impressão 3D com o mesmo nível de desempenho?

### **1.3. Estrutura**

De acordo com objetivos apresentados, este documento está organizado da seguinte forma. No Capítulo 2 são analisados dois tipos de células unitárias compatíveis com impressão 3D: células homogêneas com altura variável, células com altura fixa composta com uma inserção de ar com volume variável. É ainda apresentado um modo de otimização da resposta de amplitude para estas células baseado em inserções que funcionam com um transformador de  $\lambda/4$ . No Capítulo 3 estudam-se quatro tipos de geometrias para o desenho de uma lente de Fresnel que possa funcionar na banda dos 56-66 GHz. É feita a otimização desta lente de forma a cumprir os requisitos estabelecidos para esta aplicação de forma a por ser fabricado e testado no IT (polo Lisboa). No capítulo 4 desenha-se duas novas lentes de Fresnel para funcionar a 30 GHz, em que uma destas é feita com células dielétricas de altura constante e a outra lente é feita com células compostas por metalizações. No capítulo 5 estuda-se uma lente para seguimento mecânico para funcionar a 30 GHz feita com as células desenvolvidas no capítulo anterior. Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões e trabalho futuro.

### **1.4. Contribuições originais**

Nesta dissertação de mestrado foi possível aprofundar alguns resultados existentes na literatura e adaptá-los a tecnologia de impressão 3D disponível no nosso grupo de investigação. Desta forma este trabalho permite dar suporte ao esforço que está a decorrer por parte deste grupo na utilização desta tecnologia. Enumeram-se alguns pontos que foram desenvolvidos neste trabalho que pode contribuir para a literatura existente sobre este tópico:

- 1) No capítulo 2 mostra-se que é possível ter um desenho de uma célula unitária compatível com impressão 3D que minimiza as reflexões internas das células e assim permitir uma melhor resposta de amplitude. Este desenho tem a vantagem, relativamente ao proposto em [1] de utilizar apenas um dielétrico, tornando compatível com a impressora 3D disponível.
- 2) No capítulo 3 faz-se um estudo comparativo de várias geometrias possíveis para uma lente de Fresnel e a respetiva otimização. Desta forma é feita a ponte entre o desenho mais convencional deste tipo de lentes baseado em cilindros com alturas diferentes e um desenho com uma lente com altura constante composta por células com geometria retangular que se coadunam com os movimentos da cabeça da impressora.

- 3) No capítulo 4 mostra-se que impressão 3D pode ser muito competitiva não só em termos de custo, mas também de performance quando comparada com uma lente baseada em inserções metálicas.
- 4) No capítulo 5 mostra-se que também é possível desenhar lentes de seguimento com base na impressão 3D. O desvio da inclinação do feixe com a frequência foi observado numa gama alargada de frequências sem que o feixe principal sofresse muita distorção. Mostra-se então que é possível ter com esta solução a conjugação de seguimento mecânico com seguimento de frequência.



## Capítulo 2. Desenho de células unitárias para *transmitt arrays*

Este trabalho centra-se no desenvolvimento de *transmitt arrays*. Estas estruturas são constituídas pela conjugação de vários elementos discretos (designados por células unitárias) que são desenhados para introduzir diferentes atrasos de fase. A disposição destes elementos é feita de acordo com a lei de fase pretendida. Desta forma é possível, por exemplo, transformar uma onda esférica numa onda plana, podendo assim o *transmitt array* funcionar como uma lente para focagem. Comparando com as lentes dielétricas convencionais [19], estas lentes são mais leves, têm um baixo perfil e apresentam perdas reduzidas. A geometria planar é também uma mais valia deste tipo de soluções.

Este trabalho centra-se no desenho de lentes com apenas uma banda de funcionamento (*single band*). Para este caso é suficiente desenhar uma família de células com atrasos de fase relativos entre os 0 e os 360° com um nível apropriado de discretização. Pretende-se ainda que estas células tenham boa transmissividade (idealmente 0 dB). Tendo em conta a equivalência entre fases relacionadas por saltos de 360° (*phase wrapping*), é possível compensar, para uma dada frequência, qualquer atraso da onda incidente. A lente tem assim um conjunto de zonas de transição que correspondem a saltos de 360°, de forma análoga ao que acontece numa *zoned lens* [20]. Note-se que este processo vai limitar a largura de banda máxima da lente.

A caracterização das células é feita através do parâmetro  $s_{21}$ , que relaciona a onda transmitida com a onda incidida entre dois portos [21]. Cada célula é analisada individualmente através de uma *Frequency Selective Surface* (FSS), i.e., de uma estrutura planar periódica composta pela célula unitária que se pretende caracterizar. Assume-se que a resposta da célula é a mesma quando colocada na lente apesar da perda periodicidade. Para que este pressuposto seja válido, designado por condição de periodicidade local [22], é necessário que as células desenhadas tenham geometrias similares.

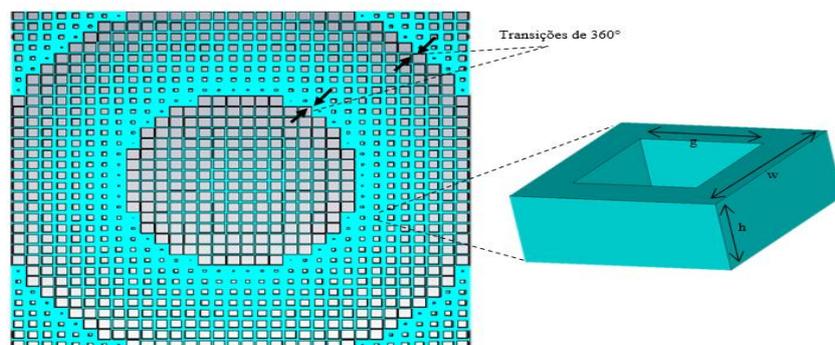


Figura 1 - Exemplo de um desenho de um *transmitt arrays*.

Para a análise das células unitárias foi utilizado o software CST MICROWAVE STUDIOS® [23]. São aplicadas condições fronteira periódicas às paredes transversais da célula unitária que se pretende analisar, originando assim uma FSS onde a célula é repetida periodicamente no plano perpendicular a direção da onda incidente. A resposta da célula é obtida através do cálculo do parâmetro  $s_{21}$  entre dois portos que estão colocados a uma distância de cerca de dois comprimentos de onda das superfícies da célula (ver Figura 2). Esta análise é feita considerando uma incidência normal de uma onda plana. A resposta de amplitude das células é caracterizada pelo módulo do parâmetro  $s_{21}$ . Por outro lado, a resposta de fase da célula corresponde ao argumento de  $s_{21}$ . Neste trabalho considera-se que atraso de fase da célula de referência é de  $360^\circ$  e decresce à medida que aumenta o volume de dielétrico. Como referido anteriormente, o processo de *phase wrapping* permite apresentar os valores de atraso de fase no intervalo de 0 a  $360^\circ$ .

Este trabalho centra-se no estudo de células unitárias compatíveis com impressão 3D. A impressora disponível no nosso laboratório [17], permite, para uma dada impressão, utilizar apenas um material com a mesma densidade. Assim a variação da resposta das células só pode ser obtida através da inserção de regiões de ar (ausência de material) num dado volume de dielétrico. Foram considerados dois tipos de células: i) células com altura variável, Figura 2a); ii) células com altura fixa e com uma inserção de ar de volume variável, Figura 2b). Uma lente construída com as células do tipo ii) tem a vantagem de não ter tantas transições abruptas de material como ocorria se fossem utilizadas células do tipo i). Note-se que os efeitos de difração causados por estas transições prejudicam o desempenho da lente.

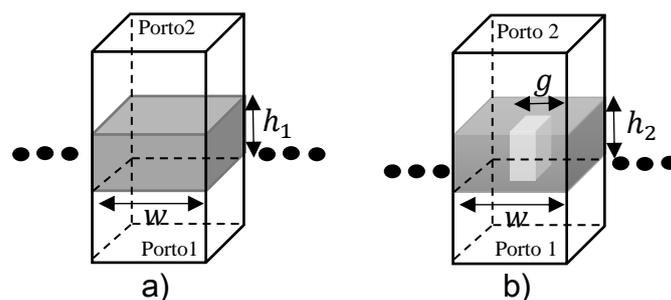


Figura 2 – Células unitárias compatíveis com impressão 3D. a) tipo i): célula com altura variável b) tipo ii) célula com inserção de buraco.

## 2.1. Modelo analítico para caracterização das células

Quando a célula unitária é constituída por um bloco homogéneo de dielétrico, Figura 2a), a análise usando FSS reduz-se ao problema clássico de incidência de uma onda plana numa placa

dielétrica homogénea infinita. O coeficiente de transmissão para uma placa com permitividade elétrica relativa  $\epsilon_r$  é dado por [21] .

$$T = s_{21} = \frac{\tau_1 \tau_2 e^{-jk_1 h}}{1 + \rho_1 \rho_2 e^{-2jk_1 h}} \quad (1)$$

Sendo  $\tau_1 = \rho_1 + 1 = \frac{2}{1+\sqrt{\epsilon_r}}$  os coeficientes de transmissão e reflexão entre a interface ar-dielétrico, respetivamente, e  $\tau_2 = \rho_2 + 1 = \frac{2\sqrt{\epsilon_r}}{1+\sqrt{\epsilon_r}}$  os coeficientes de transmissão e reflexão entre a interface do dielétrico-ar. O parâmetro  $k_1 = \sqrt{\epsilon_r} 2\pi/\lambda$  é o número de onda no dielétrico.

Para o caso de uma célula com inserção de um buraco, Figura 2b), o problema pode ser resolvido através de um processo de homogeneização [25] . A célula pode ser vista como um meio homogéneo equivalente com permitividade relativa

$$\epsilon_{r_{eff}} \approx \frac{V_{ar} + V_d \epsilon_r}{V_{ar} + V_d} \quad (2)$$

Onde  $V_d$  é o volume do dielétrico e  $V_{ar}$  é o volume de ar. De acordo com esta equação a permitividade relativa efetiva é uma média da permitividade ponderada pela razão entre o volume do ar e o volume ocupado pelo dielétrico. Trata-se de uma aproximação que assume que a dimensão dos buracos é inferior ao comprimento de onda [2] . Desta forma este problema reduz-se ao caso (1) onde se substitui  $\epsilon_r$  por  $\epsilon_{r_{eff}}$ . Esta substituição corresponde passar do problema da Figura 3a), que representa uma placa dielétrica perfurada, para o problema canónico de uma placa dielétrica homogénea, Figura 3b).

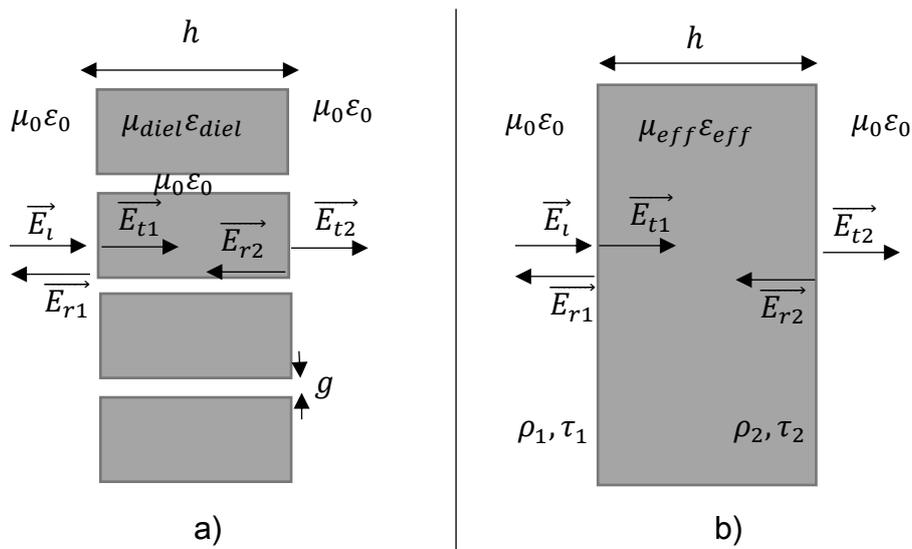


Figura 3 – célula unitária periódica: a) com buraco, b) homogénea

## 2.2. Validação teórica do método de análise das células

Para validar a análise teórica o método de análise das células unitárias, correspondendo às Equações (1) e (2), foram considerados dois tipos de células. A primeira, representada na Figura 2a), é um paralelepípedo quadrado de um material dielétrico homogêneo com lado  $w = \lambda_0/2$  (em que o  $\lambda_0$  é o comprimento de onda no espaço livre, para 60GHz temos  $\lambda_0 = 5$  mm) e altura  $h_1$ . Os diferentes atrasos de fase são alcançados variando a altura entre 1mm e 7,76mm, com incrementos de 0,02 mm alcançando uma discretização do intervalo de  $360^\circ$  de  $1^\circ$  (em média). O segundo tipo de células, Figura 3b), é semelhante ao caso anterior ( $w = \lambda_0/2$ ), com uma altura fixa ( $h_2 = 7,76$  mm), mas contendo um buraco com forma de um paralelepípedo de lado  $g$  (centrado com a célula) e altura  $h_2$ . O lado do buraco varia entre 0 mm e 2,3 mm, com incrementos de 0,1 mm alcançando aproximadamente  $346^\circ$  de atraso de fase máximo permitindo uma discretização média de  $15,6^\circ$ .

O dielétrico disponível no nosso laboratório é o PLA (ácido polilático), este material tem uma ligeira anisotropia, como se mostra na Tabela 1 através dos valores da permitividade relativa nos eixos principais. Contudo foi verificado que esta anisotropia não alterada significativamente a resposta das células. Desta forma, para efeitos de modelo teórico considera-se que o material é isotrópico com parte real de permitividade  $\epsilon' = 2,98$ . Por outro lado, este material tem perdas que podem ser caracterizadas pelo parâmetro

$$\tan(\gamma) = \frac{\epsilon'}{\epsilon''} \quad (3)$$

Considera-se então que a permitividade relativa deste dielétrico é dada por

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' = |\epsilon_r|e^{-j\gamma} = 2,98 - j 0.044. \quad (4)$$

Tabela 1 – Parte real da permitividade relativa anisotrópica do PLA (valores medidos no IT).

Permitividade Relativa	
$\epsilon'_{rx}$	2,98
$\epsilon'_{ry}$	2,98
$\epsilon'_{rz}$	2,78

Na Figura 4 (resposta de amplitude) e Figura 5 (resposta de fase) comparam-se as curvas teóricas, Equações (1) e (2), com os resultados simulados do parâmetro  $s_{21}$  em função do

volume do dielétrico para a frequência de 60 GHz. Para as células homogêneas estas curvas sobrepõem-se. O  $|S_{21}|$  varia com o volume do dielétrico de forma oscilatória, devido às múltiplas reflexões que acontecem dentro do dielétrico. Ao efeito das múltiplas reflexões somam-se as perdas do dielétrico, obtendo uma curva em que o valor médio da oscilação decai com a altura do dielétrico. Para as células com buracos, existem ligeiras diferenças ( $<0,1$  dB) entre as curvas obtidas teoricamente e por simulação uma vez que o modelo de homogeneização descrito pela Equação (2) é apenas uma aproximação. O comportamento das células pode ser interpretado a luz da teoria de uma linha de transmissão com perdas de comprimento  $h$  e impedância característica  $Z = Z_0\sqrt{\epsilon_r}$ . Assim resposta de amplitude das células do tipo i) é equivalente a manter a impedância da linha de transmissão fixa e variar o comprimento da linha, enquanto que para as células do tipo ii) o comprimento da linha é fixo, é a impedância característica da linha que varia. Deste modo compreende-se o porquê da resposta de amplitude das células do tipo i) tenha uma oscilação maior em função do volume de dielétrico do que no caso das células ii). A resposta de fase das células, apesar de ter uma pequena oscilação causada pelas múltiplas reflexões no interior do dielétrico, varia linearmente com o volume do dielétrico.

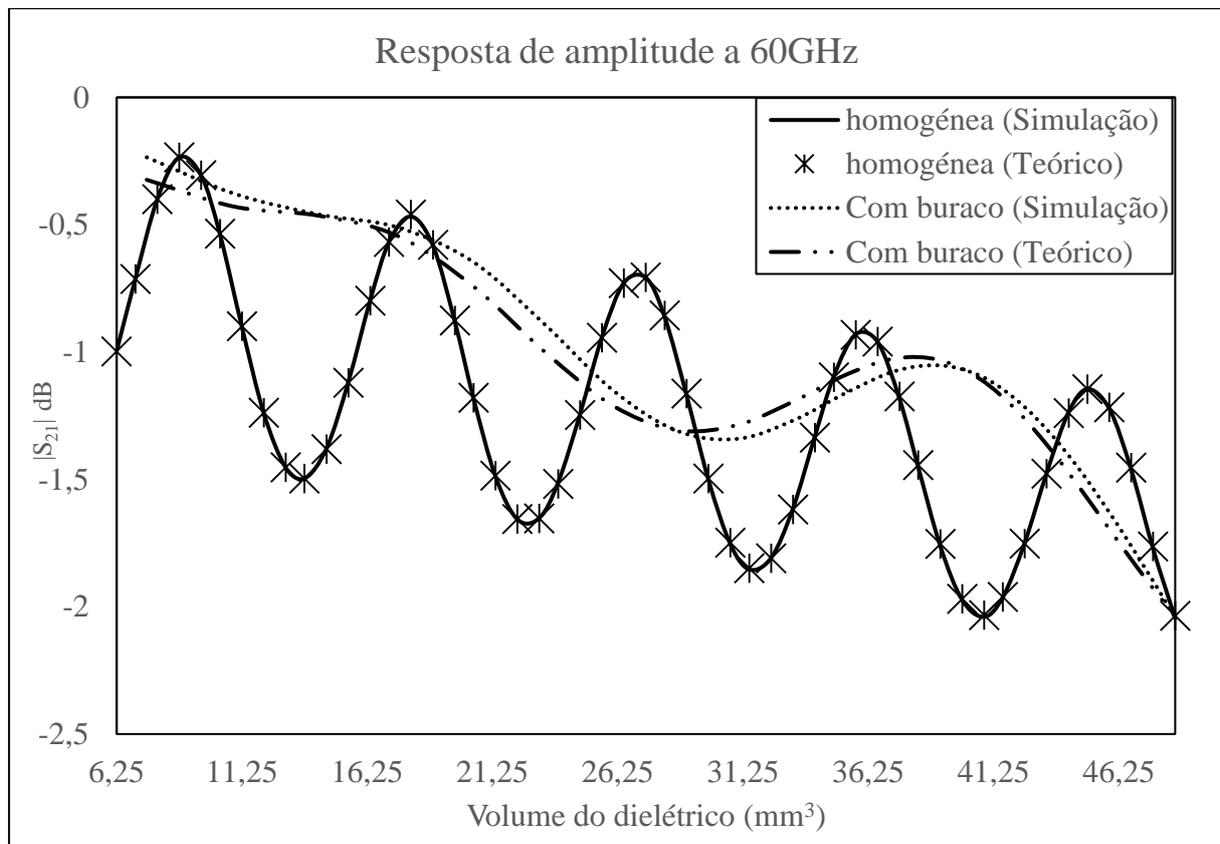


Figura 4 – Comparação entre os resultados teóricos e simulados para a resposta de amplitude das células homogêneas e com buracos em função do volume do dielétrico.

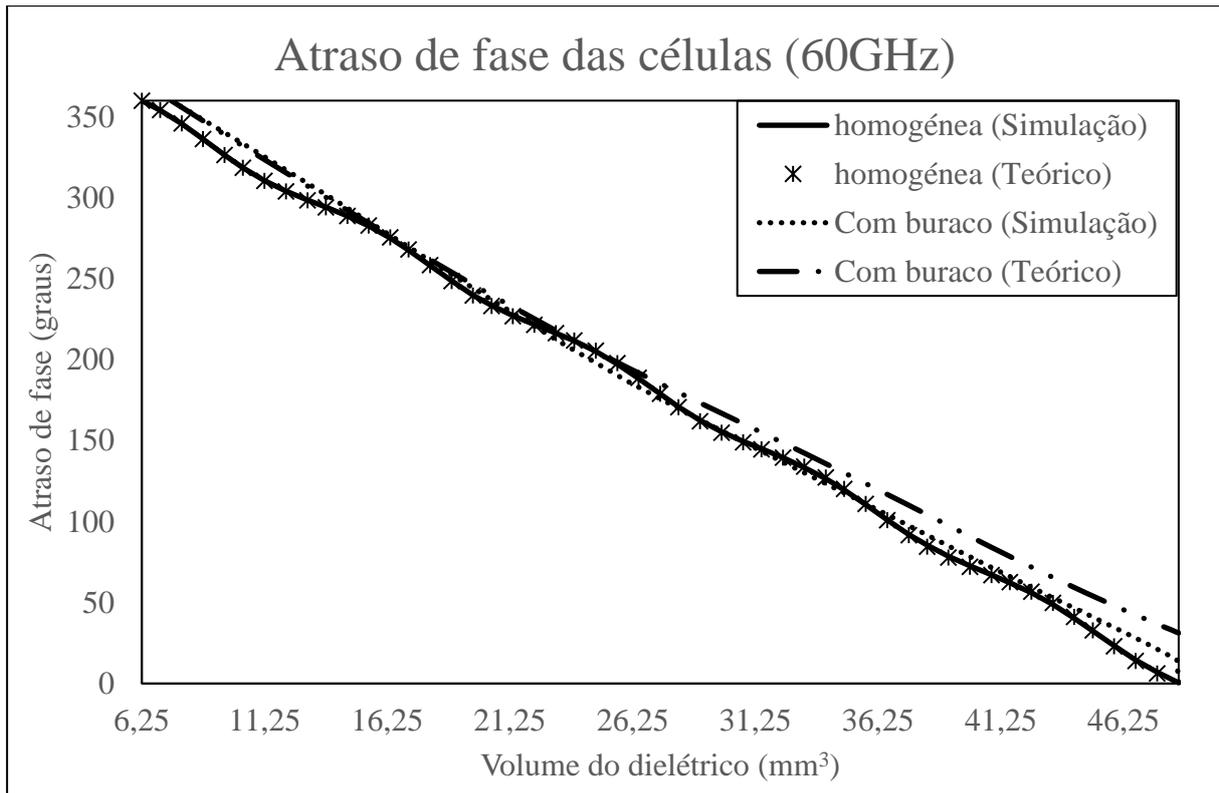


Figura 5 – Comparação entre os resultados teóricos e simulados para a resposta de fase relativa para as células homogêneas e com buracos em função do volume do dielétrico.

Conclui-se desta comparação que o desenho das células pode ser obtido diretamente pelas Equações (1) e (2). Note-se que a aproximação de meio equivalente (2) é válida apenas quando as dimensões da célula são inferiores ao comprimento de onda. Assim espera-se que haja uma maior diferença entre o modelo teórico e os resultados simulados à medida que se aumenta o tamanho célula. Para confirmar esta observação, considerou-se uma célula em que o volume de ar e de dielétrico são iguais ( $V_{ar} = V_d$ ) e com altura constante ( $h_2 = 7,76 \text{ mm}$ ). Para esta célula variou-se apenas as dimensões transversais da célula de acordo com  $w = g\sqrt{2}$  (por forma a garantir que  $V_{ar} = V_d$ ). Segundo o modelo teórico, Equação (2), a permitividade do meio equivalente é  $\epsilon_{r_{eff}} = 1,99$ , fazendo com que o curva de  $s_{21}$  seja sempre a mesma. No

entanto, como se constata na

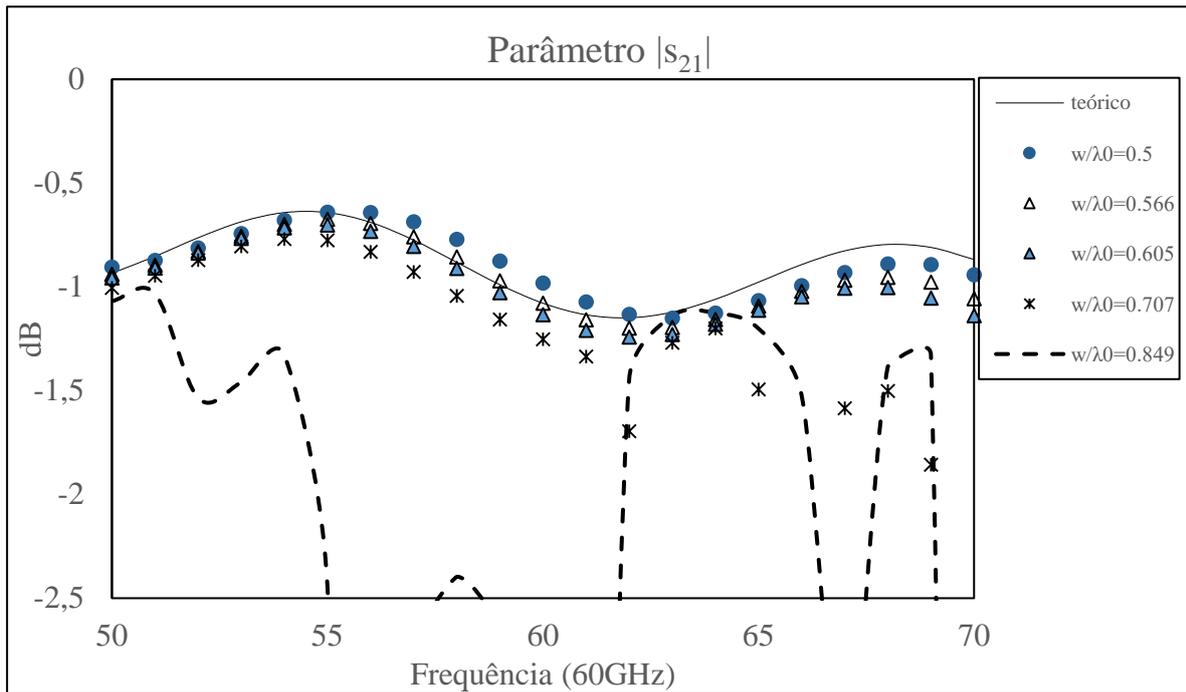


Figura 6, o aumento das dimensões da célula altera significativamente a resposta de amplitude da célula, especialmente para as frequências mais altas. Neste trabalho utilizam-se os valores de  $w/\lambda_0 = 0.5$  no desenho de células para 60 GHz e  $w/\lambda_0 = 0.25$  no desenho de células para 30 GHz.

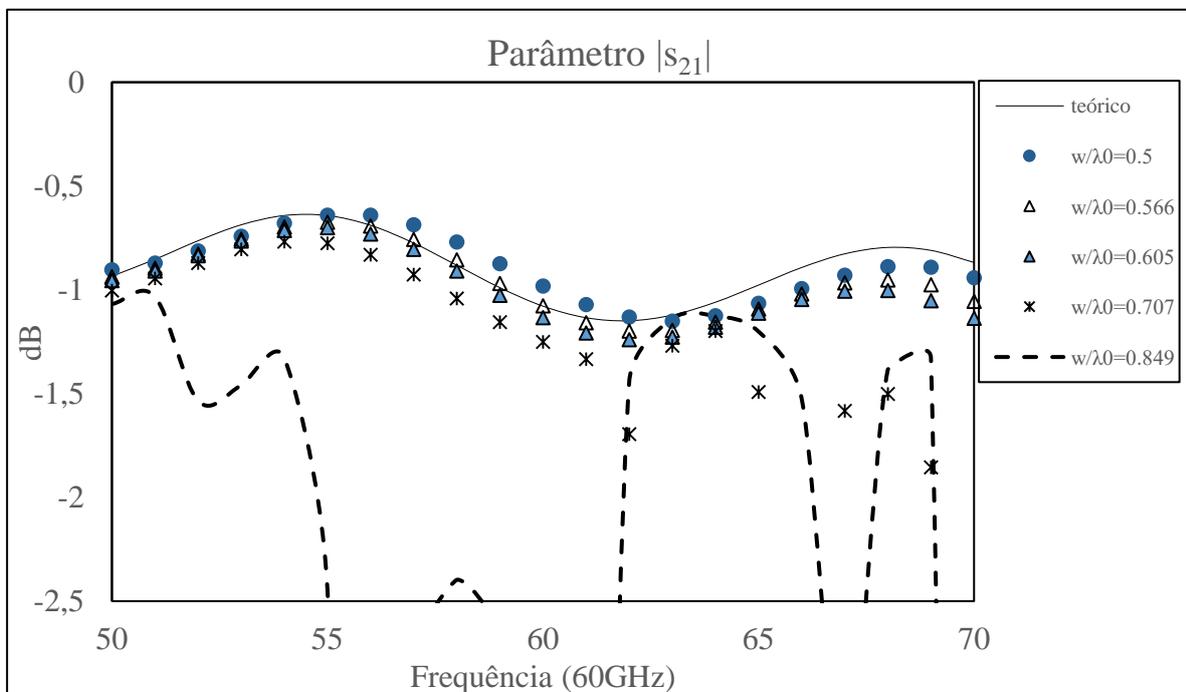


Figura 6 – Parâmetro  $s_{21}$  em função da frequência para várias dimensões do buraco da célula considerando que o volume de ar é igual ao volume do dielétrico,  $w = g\sqrt{2}$ .

### 2.3. Perdas no dielétrico

O PLA pode ser considerado como um dielétrico de baixas perdas com constante de atenuação dada por [21] :

$$\alpha \cong \frac{\omega\sqrt{\varepsilon'}}{2c} \tan(\gamma) \quad (5)$$

Considerando apenas o raio principal incidente (i.e., desprezando as reflexões internas no dielétrico) a atenuação é dada por  $\alpha h$ , onde  $h$  é altura da célula (ver Figura 7). Assim, a altura máxima da é limitada pelo critério de atenuação definido para a respostas das células. Por outro lado, é necessária uma altura mínima para obter o máximo de atraso de fase requerido,  $\Delta\phi$ . Se considerarmos a célula de referência como sendo apenas constituída por ar e a célula com maior atraso a que é constituída por apenas dielétrico, a altura mínima desta célula é dada por

$$h > \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{\sqrt{\varepsilon'} - 1} \quad (6)$$

Na Figura 7 apresentam-se as curvas do parâmetro  $s_{21}$  para a célula do tipo i) considerando o dielétrico como PLA com e sem perdas. Consta ainda no gráfico a curva correspondendo à diferença entre o caso com perdas e sem perdas. Como esperado esta curva oscila em torno do valor médio de atenuação dado por  $\alpha h$  de acordo com (5). Mostra-se assim que as perdas do material utilizado são significativas e devem ser tidas em conta no desenho das células.

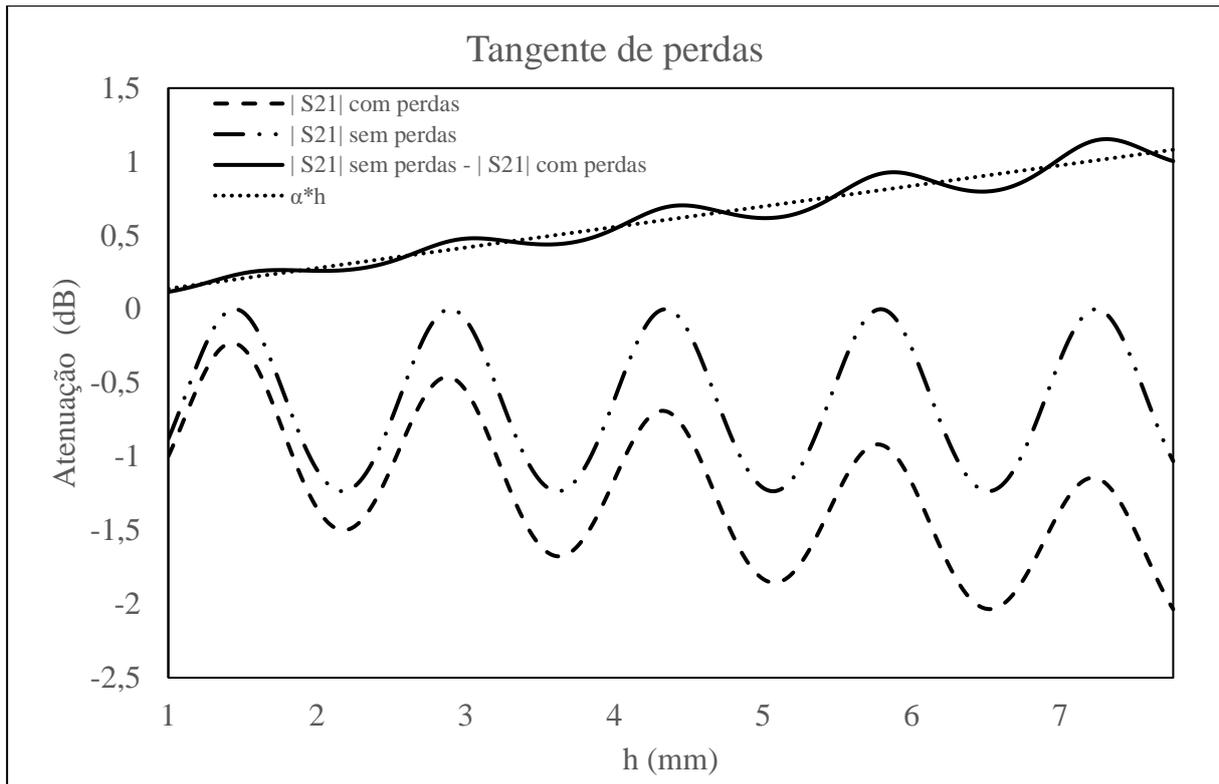


Figura 7 – Efeito da tangente de perdas

## 2.4. Adaptação da impedância da célula unitária ao espaço livre

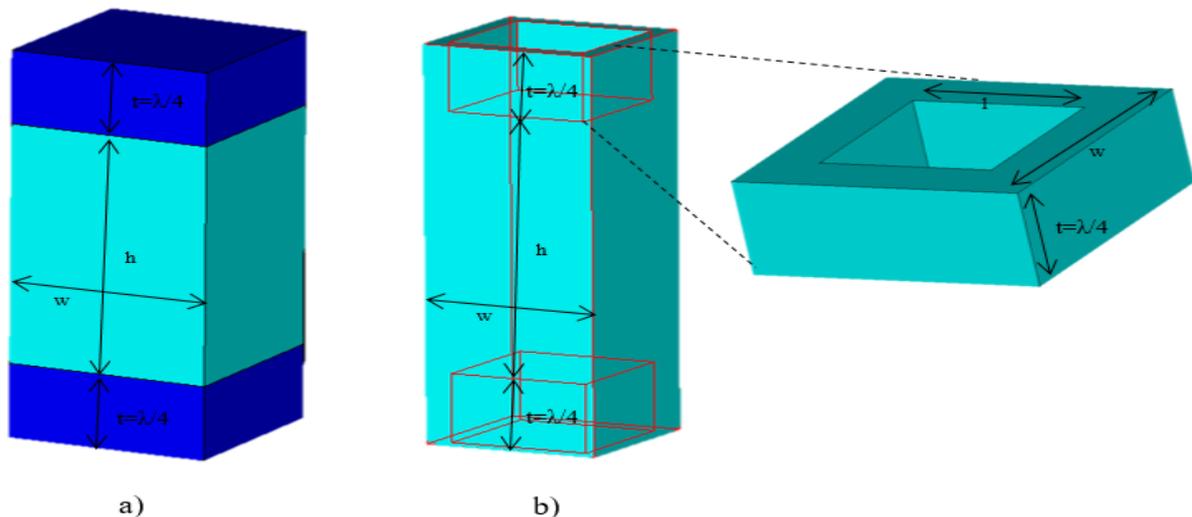


Figura 8 – Célula unitária com dois transformadores  $\lambda/4$ , um em cada extremidade da célula: a) transformador composto por um dielétrico uniforme. b) transformador composto por o mesmo dielétrico do que a restante célula e com um buraco.

Na Figura 7 verifica-se que o módulo  $s_{21}$  oscila significativamente em função da altura da célula, o que pode ser visto com um problema de desadaptação de uma linha transmissão a uma

carga (meio ar). Assim uma das formas de melhorar a transmissão das células é aplicar a adaptação de um transformador de  $\lambda/4$  a este problema, como descrito em [18] :

$$\varepsilon_{r_{tanf}} = \sqrt{\varepsilon_{r_{ar}} + \varepsilon'} \quad (7)$$

$$t = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\varepsilon_{r_{tanf}}}} \quad (8)$$

Em [18] foi usado um transformador  $\lambda/4$ , denominado como superfície anti refletora, obtido através da inserção de um dielétrico homogéneo com permitividade diferente da célula ( $\varepsilon_{r_{tanf}}$ ). Aqui propomos atingir o mesmo objetivo utilizando o mesmo dielétrico da célula unitária perfurado de acordo com (2). De (2) obtém-se a área necessária de ar,  $A_{ar}$ , de forma que a permitividade seja igual a  $\varepsilon_{r_{tanf}}$ . Podemos trabalhar em termos de área porque no transformador os volumes do ar e do dielétrico tem a mesma altura  $t$ .

$$A_{ar} = w^2 \frac{\varepsilon_{r_{tanf}} - \varepsilon_r}{1 - \varepsilon_r} \quad (9)$$

Para confirmar esta teoria comparou-se a adaptação feita por um meio homogéneo com permitividade dada por (7) com a adaptação feita por uma placa dielétrica de PLA com buraco equivalente (de acordo com (2)). Para células do tipo *i*) (dielétrico homogéneo com altura variável) as superfícies anti refletoras são as mesmas para todas as células. Para as células do tipo *ii*) estas superfícies são desenhadas célula a célula de acordo com (9) onde  $\varepsilon_{r_{tanf}}$  é dado por (7) substituindo  $\varepsilon'$  por  $\varepsilon_{eff}$ .

Considere-se que a largura da célula é 2,5 mm, para uma frequência de trabalho de 60 GHz. Para a célula do tipo *i*) temos de acordo com (7) e (8) que  $\varepsilon_{r_{tanf}} \cong 1,73$  e  $t = 0,95mm$ . Para implementar o transformador correspondente a  $\varepsilon_{r_{tanf}} \cong 1,73$  utiliza-se o desenho da Figura 8b) em que o buraco quadrado inserido no dielétrico da célula (PLA) tem lado  $l = 1,989mm$ , de acordo com (9), a altura  $t = 0,95mm$ . Na Figura 9 representa-se a resposta de amplitude de várias células em função do atraso de fase correspondente obtido variando a altura entre 2mm a 8,9mm. Confirma-se que existe uma concordância entre os resultados obtidos pelos dois tipos de transformadores (dielétrico homogéneo e dielétrico perfurado). A vantagem do uso deste transformador é que é possível eliminar as oscilações na resposta de amplitude das células causadas pelas reflexões internas (i.e., fazer a adaptação). Desta forma torna-se possível ter  $|s_{21}| > -1,2$  dB qualquer que seja o nível de discretização escolhido, enquanto que sem o transformador para obter uma resposta de amplitude semelhante é necessário escolher alturas

de células que correspondam aos máximos de resposta de amplitude (neste caso corresponderia a 5 valores diferentes de fase ver Figura 9).

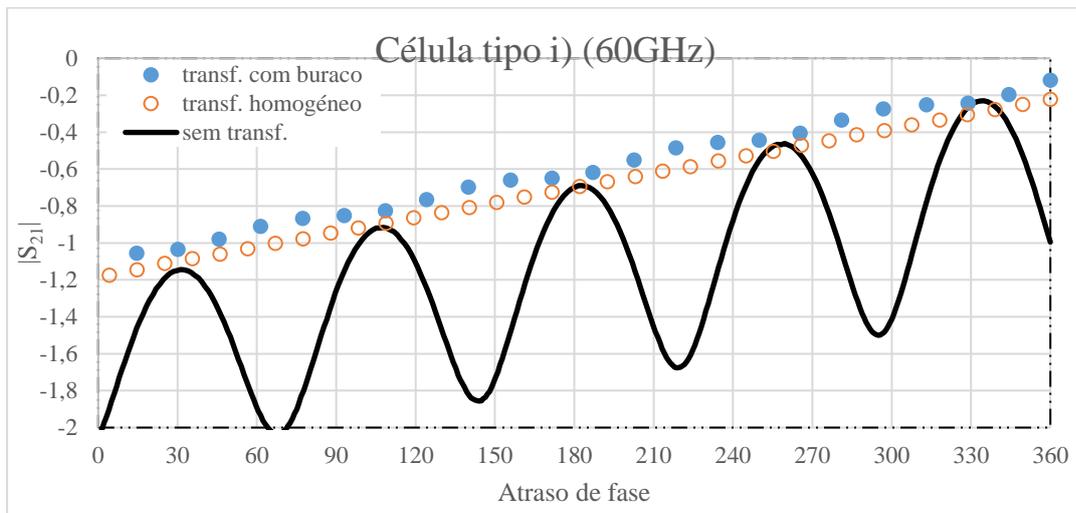


Figura 9 – Amplitude versus fase das células com alturas diferentes com e sem transformadores  $\lambda/4$ .

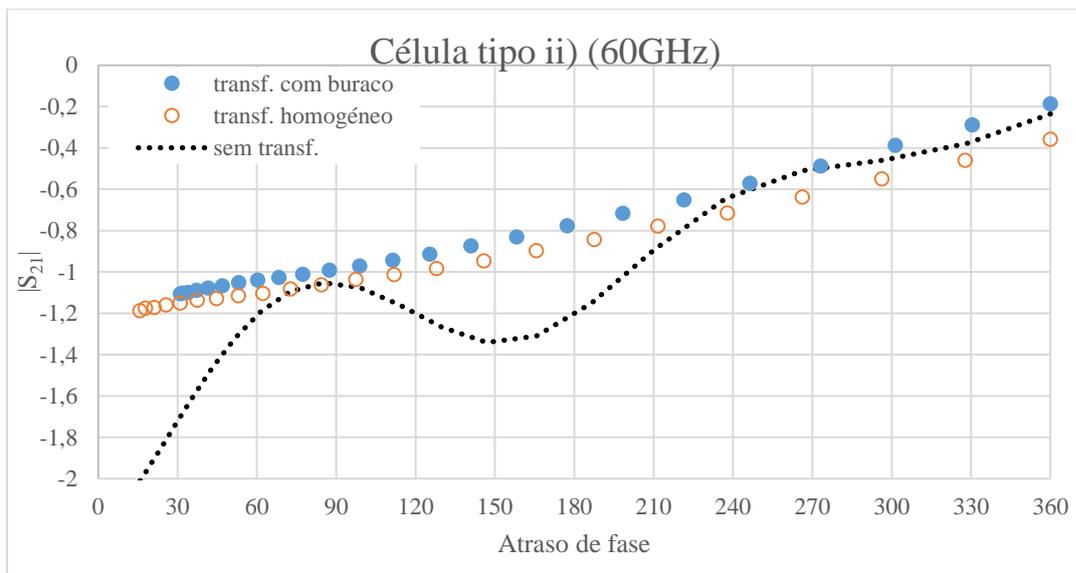
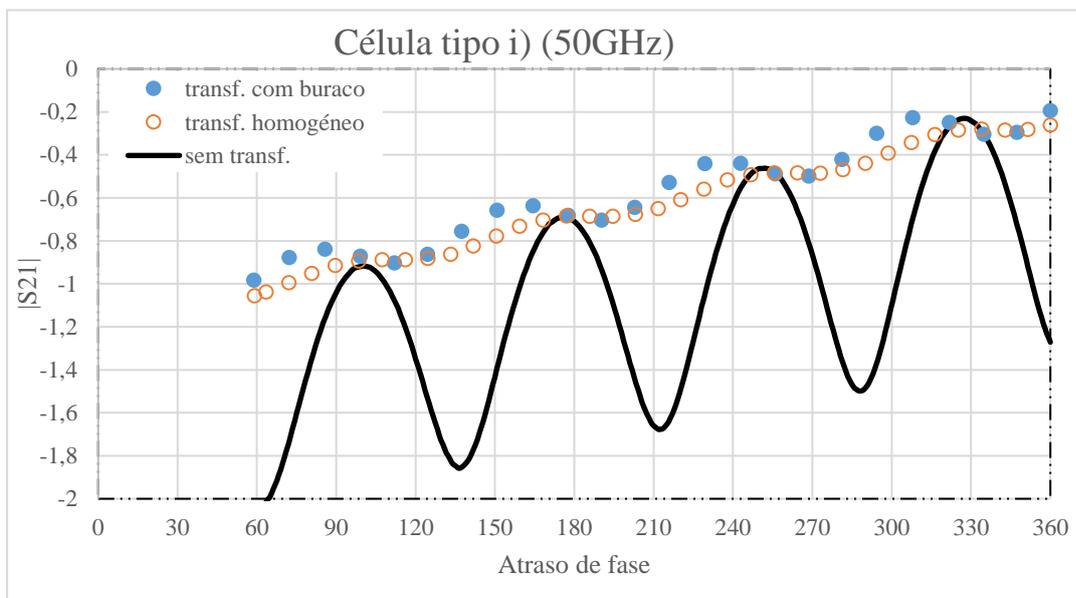
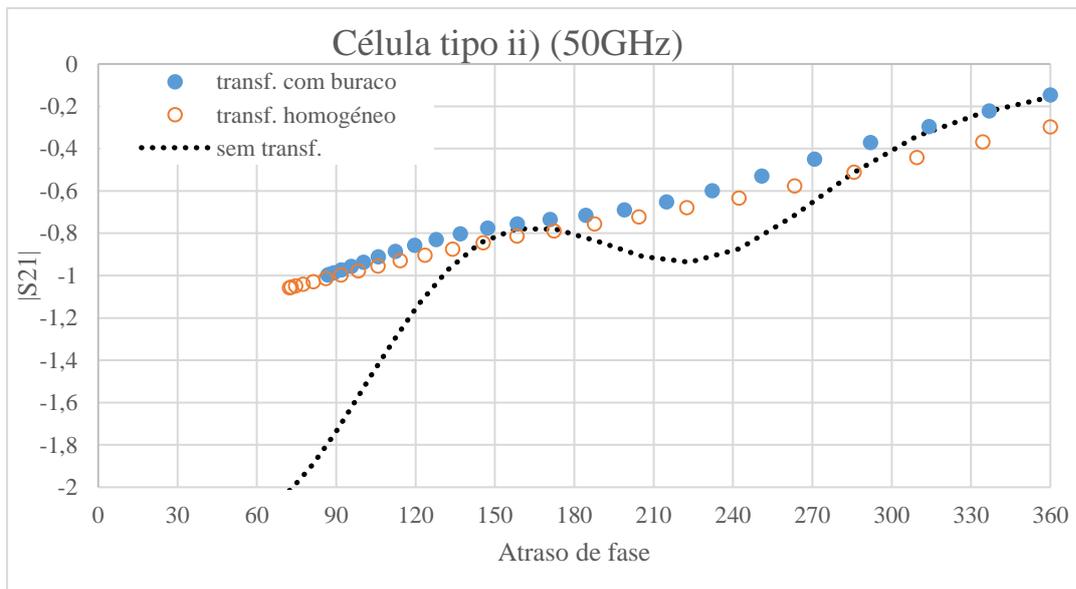


Figura 10 – Gráficos das células com buraco para 60GHz, com e sem transformadores  $\lambda/4$  em função do atraso de fase. Transformador homogéneo é um dielétrico homogéneo. Transformador com buraco é um dielétrico que com buraco.

Considere-se agora células do tipo ii) com altura fixa de  $h_2 = 10 \text{ mm}$  em que a dimensão do lado do buraco,  $g$ , varia entre 0 a 2,3mm (de acordo com as limitações da impressora 3D disponível). Na Figura 10 representa-se a respetiva resposta das células utilizando novamente uma representação amplitude versus fase. A conclusão é semelhante à anterior. No entanto a

resposta sem o transformador não oscila da mesma forma uma vez que cada célula tem permitividade diferente como explicado anteriormente.

Uma das desvantagens do uso do transformador  $\lambda/4$ , é que as células têm maior altura. Outra desvantagem do uso do transformador  $\lambda/4$  é a limitação da largura de banda [26]. Na Figura 11 apresenta-se para os mesmo transformadores e tipos de células a resposta destas células a 50 GHz e 70 GHz. Verifica-se que embora existam mais oscilações na resposta de amplitude das células do que em 60GHz, o resultado continua a ser melhor do que no caso sem transformadores. Nestes gráficos também se constata que o atraso máximo é menor para frequências mais baixas uma vez que altura elétrica das células é também menor.



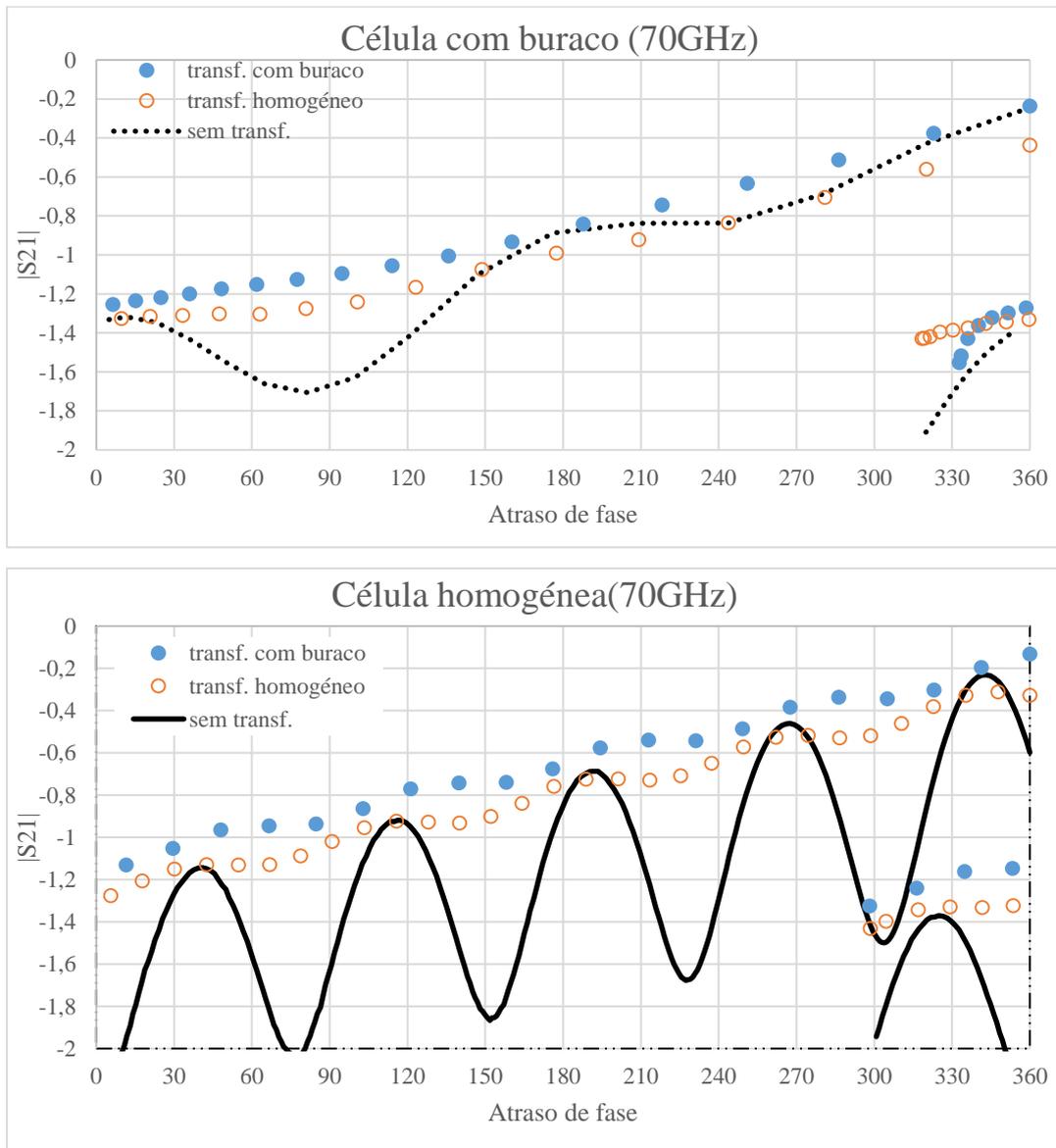


Figura 11 – Gráficos do parâmetro  $s_{21}$ , para 50 e 70 GHz, das células homogéneas e com buraco, com e sem transformadores  $\lambda/4$  em função do atraso de fase.

## 2.5. Conclusão

Neste capítulo analisaram-se dois tipos de células unitárias, no caso i) a célula é composta por um dielétrico com altura variável; no caso ii) a altura da célula é constante variando a permitividade efetiva da célula através da introdução de um buraco no dielétrico. Ambas as células têm a forma de um paralelepípedo.

A escolha dos parâmetros geométricos destas células (altura  $h$ , largura  $w$  e dimensão dos buracos  $g$ ) deve ter em conta vários fatores. Mostra-se que as perdas do material utilizado na impressão 3D (PLA) limita superiormente a altura máxima da célula. Por outro lado, altura da

célula tem de permitir atingir um atraso de fase próximo dos  $360^\circ$ . A largura da célula,  $w$  deve ser inferior ao comprimento de onda, tipicamente  $w/\lambda_0 \leq 0.5$ , de forma a permitir ter variações suficientemente rápidas de fase ao longo da lente que permitam seguir uma dada lei de fase com um erro de discretização baixo. Esta condição permite ainda evitar a propagação de modos de ordem superior que surgem em estruturas periódicas (*Floquet modes*). Para o desenho das células do tipo i) apenas a precisão de impressão limita inferiormente o tamanho da célula. Para as células do tipo ii) o tamanho do buraco das células está limitado pela precisão da impressão 3D, o que implica uma largura mínima de célula.

Neste trabalho mostra-se que o desenho deste tipo de células pode ser feito analiticamente, poupando o tempo de simulação (na ordem das horas) necessário para obter a resposta das células utilizando uma análise baseada em FSS.

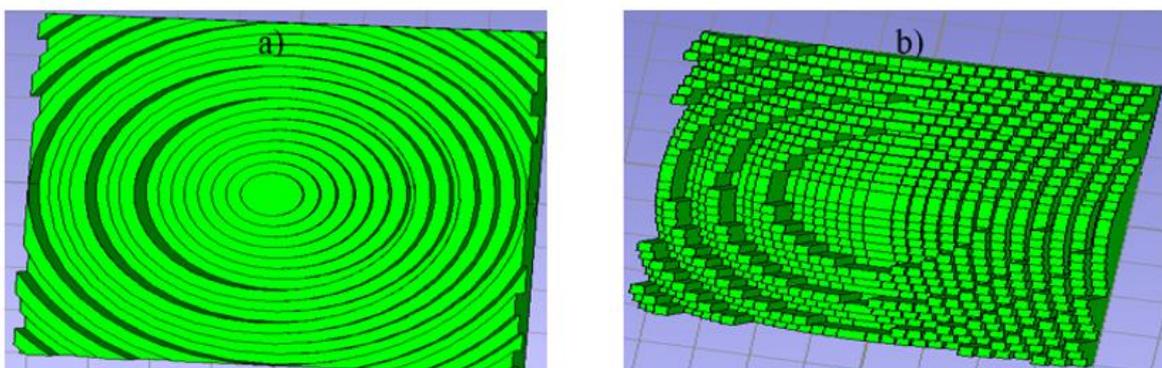
Mostra-se ainda que ao utilizar um transformador  $\lambda_0/4$  é possível adaptar a célula ao ar e assim permitir que a resposta de amplitude das células seja semelhante para qualquer grau de discretização. A vantagem do desenho apresentado é que a célula e o transformador são implementados usando um único dielétrico, tornando-se compatível com impressão 3D, o que não acontecia no desenho encontrado na literatura.

## Capítulo 3. Desenho de uma lente de Fresnel para 60GHz

### 3.1. Introdução

Neste capítulo apresentam diferentes desenhos para uma lente de Fresnel na banda V onde existe uma faixa de frequências não licenciadas de 57-64 GHz [27] . Utiliza-se apenas um material dielétrico (PLA) para a construção da lente de forma a ser compatível com a impressão 3D disponível no laboratório do IT [17] . Com base nos contactos feitos no âmbito da ação COST IC1102 foi possível obter especificações que permitem demonstrar a viabilidade deste tipo de lente de baixo custo para efetuar uma ligação *backhaul*. Pretende-se assim que a lente tenha um ganho superior a 30 dBi em toda a banda de 56-66 GHz para uma lente com área de  $80 \times 80 \text{ mm}^2$ .

Na Figura 12 representa-se os quatro tipos de lentes de Fresnel analisados. Nas lentes, a) e b) a correção de fase é obtida variando a altura do dielétrico. O caso a) corresponde a abordagem mais clássica no desenho de lentes constituída por anéis cilíndricos concêntricos com altura variável. Contudo, é preferível evitar contornos de impressão circulares dado que impressão é feita num reticulado retangular. Surge assim a motivação para o desenho da lente b) que é composta por células unitárias quadradas com altura diferente (células do tipo i) de acordo com a designação introduzida no capítulo anterior). Como se mostra este processo de discretização reduz o ganho da lente de cerca de 1dB face a lente a). As transições abruptas que ocorrem entre as transições de células com alturas diferentes podem originar efeitos de difração que vão degradar o desempenho da lente. Nos desenhos c) e d) estas transições são minimizadas ao considerar-se células com uma altura fixa composta com buracos de tamanho variável. Na lente c) são utilizadas células unitárias do tipo ii) (de acordo com a descrito no capítulo anterior). Posteriormente considera-se buracos com forma circular, lente d), para perceber se existe vantagem em considerar uma discretização polar da lente em vez de cartesiana.



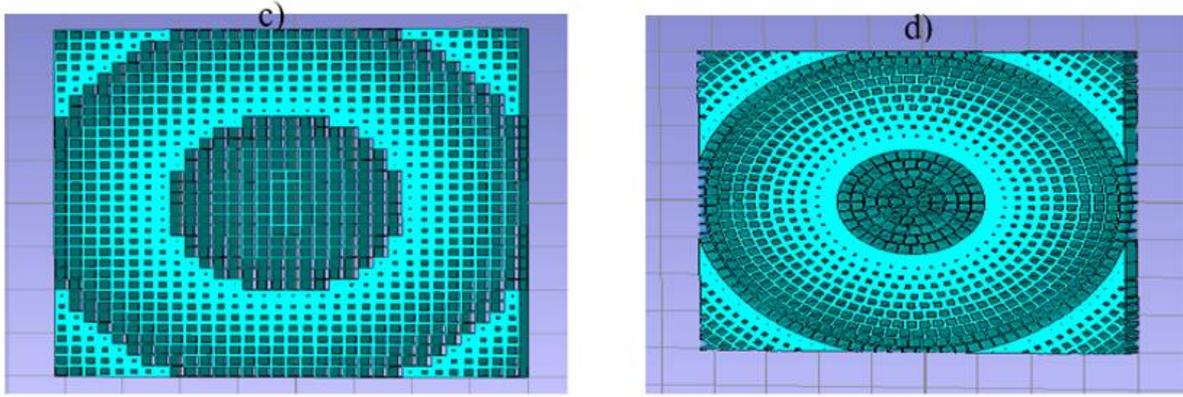


Figura 12 – Lentes de Fresnel. a) com anéis cilíndricos concêntrico de altura diferente b) com células unitarias de secção quadradas, células tipo i) c) planar com célula quadrado com buracos, células tipo ii). d) planar com anéis cilíndricos concêntricos com altura constante.

### 3.2. Princípio de funcionamento e desenho da lente

A lente de Fresnel é desenhada de forma a transformar uma onda esférica incidente numa onda plana. A Figura 13 mostra o princípio de funcionamento deste tipo de lente, em que  $\theta$  é o ângulo de zénite,  $h$  a altura,  $D$  o diâmetro e  $F$  a distancia focal da lente.

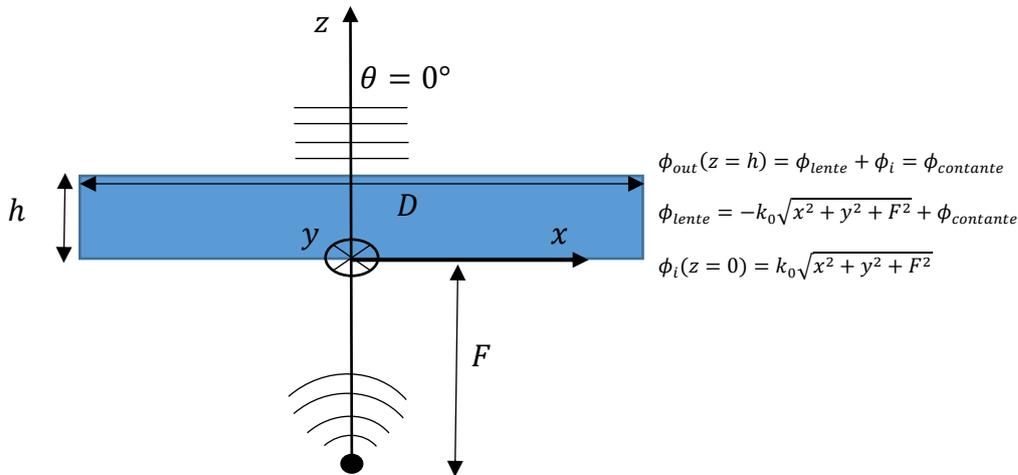


Figura 13 – Princípio de funcionamento de uma lente de Fresnel convencional.

Na superfície inferior da lente a fase da onda incidente é dada por

$$\phi_i(z = 0) = k_0\sqrt{x^2 + y^2 + F^2} \quad (10)$$

No caso ideal a fase à saída da lente é simplesmente dada pela soma da fase da onda incidente com a fase introduzida pela lente,  $\phi_{lente}(x, y)$ . Pretende-se que a fase de saída tenha uma fase constante (onda plana)

$$\phi_{out}(z = 0) = \phi_i + \phi_{lente} = \phi_{constante} \quad (11)$$

Com base nas equações (10) e (11) obtém-se que a lei de fase da lente é

$$\phi_{lente} = -k_0\sqrt{x^2 + y^2 + F^2} + \phi_{constante} \quad (12)$$

A fase  $\phi_{constante}$  pode ter um valor arbitrário, que apesar de não alterar o princípio de funcionamento da lente tem implicações na forma como as células unitárias e os respetivos saltos de  $360^\circ$  estão distribuídos na lente. Como se mostra este parâmetro pode ser otimizado para aumentar o ganho da lente.

### 3.3. Desenho das lentes

A construção de uma lente baseada em células unitárias, lentes b) c) e d), é feita da seguinte forma. Depois de obtida a família de células que se pretende utilizar (de acordo com o método descrito no capítulo anterior) a lente é construída escolhendo a célula com resposta de fase mais próxima da lei ideal  $\phi_{lente}(x, y)$  calculada no ponto onde estará o centro da célula unitária. Existe um erro de fase inerente a este método associado ao nível de discretização de fase do intervalo de 0 a  $360^\circ$  obtido pela família de células. Sabe-se que este tipo de lentes é relativamente robusta a este tipo de erro de fase. Muitas vezes são utilizadas soluções com apenas 6 níveis de discretização [4] (ver Figura 14).

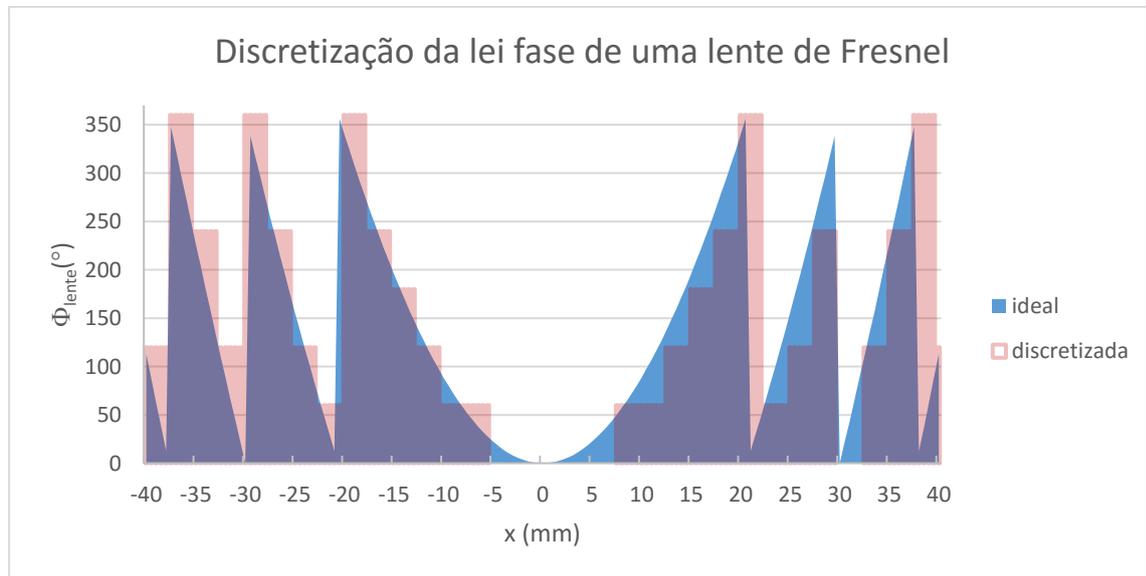


Figura 14 – Discretização de  $60^\circ$  da fase ideal em função de  $x$  com  $F = 40mm$  para 60GHz.

Dado que existe simetria de revolução na lei de correção de fase é possível construir esta lente utilizando em vez de células unitárias cilindros concêntricos com alturas diferentes, lente a).

Para a geometria quadrada, lente b) e c), as células são paralelepípedos com seção quadrada de lado  $w = 2,5 mm$ . No caso das lentes a) e d) a diferença entre o raio exterior e o raio interior

dos cilindros considerados é igual a  $w$ . Na lente d) considera-se um buraco cilíndrico como representado na Figura 15.

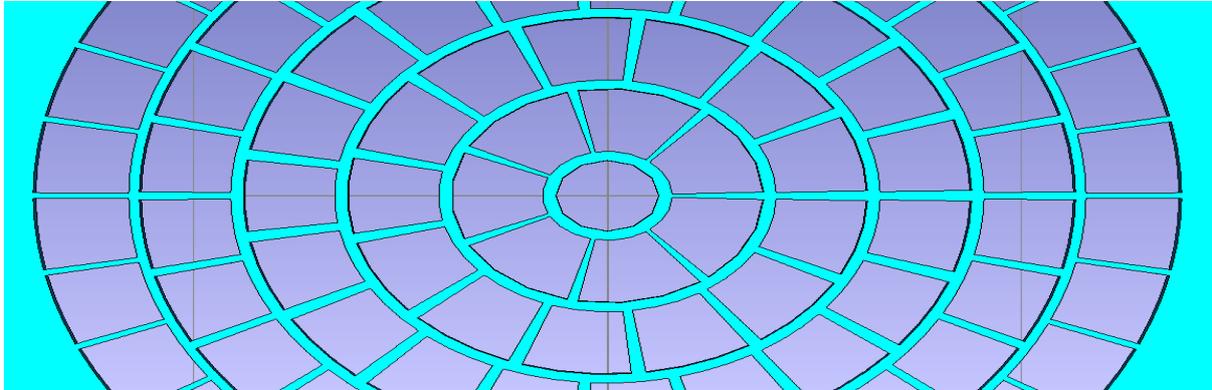


Figura 15 – Exemplo da construção de uma lente do tipo d).

### 3.4. Fontes

A avaliação das lentes desenvolvidas é feita através da comparação dos diagramas de radiação obtidos por simulação de onda completa. A ferramenta de simulação utilizada é o CST MICROWAVE STUDIO ® [23]. Para iluminar a lente foram considerados duas fontes: *near field source* e uma corneta de 60GHz de forma a garantir um *edge tapering* de cerca de -10 dB (valor típico usado nestas lentes [28]).

A iluminação da lente com um *near field source* é um método aproximado apresentado em [21] que permite poupar significativamente os recursos computacionais necessários para simular a lente. Neste método não é necessário desenhar uma nova fonte quando se pretende mudar o valor de  $F/D$ , sendo possível aumentar a distância focal mantendo o mesmo volume de simulação. Contudo o nosso software de simulação não dá informação de ganho quando é utilizado este tipo de fonte.

A corneta padrão de 60GHz simulada é a que está disponível no nosso laboratório que apresenta um ganho de 19,8dBi nesta frequência. Para a diretividade da fonte e o diâmetro da lente ( $D=80$  mm) a distância focal para garantir -10 dB de iluminação da lente é dado por

$$F = \frac{D}{2\tan(\theta)} = 145,72mm \quad (13)$$

Onde  $\theta \approx 15,37^\circ$ , corresponde a metade da largura do lobo principal a 10 dB do diagrama de radiação da corneta.

### 3.4.1. Near field source

O *near field source* é um modo de criar uma fonte equivalente a uma fonte real. A equivalência é alcançada substituindo uma fonte real por uma caixa onde são definidas correntes elétricas e magnéticas equivalentes [19]. Este método está esquematizado na Figura 14 mostrando que é possível criar uma pequena região equivalente à iluminação produzida por uma corneta. O campo na caixa é do definido pela seguinte expressão, de acordo com [29]:

$$\vec{E}_{in}(x, y, z) = \frac{e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} e^{-jk_0\sqrt{x^2+y^2+(z-F)^2}} \vec{u}_y}{\sqrt{x^2+y^2+(z-F)^2}} \quad (14)$$

Onde  $\sigma$  é o desvio padrão que é escolhido de forma que a iluminação da lente tenha um *tapering* de cerca de -10 dB para um dado valor de  $F$ .

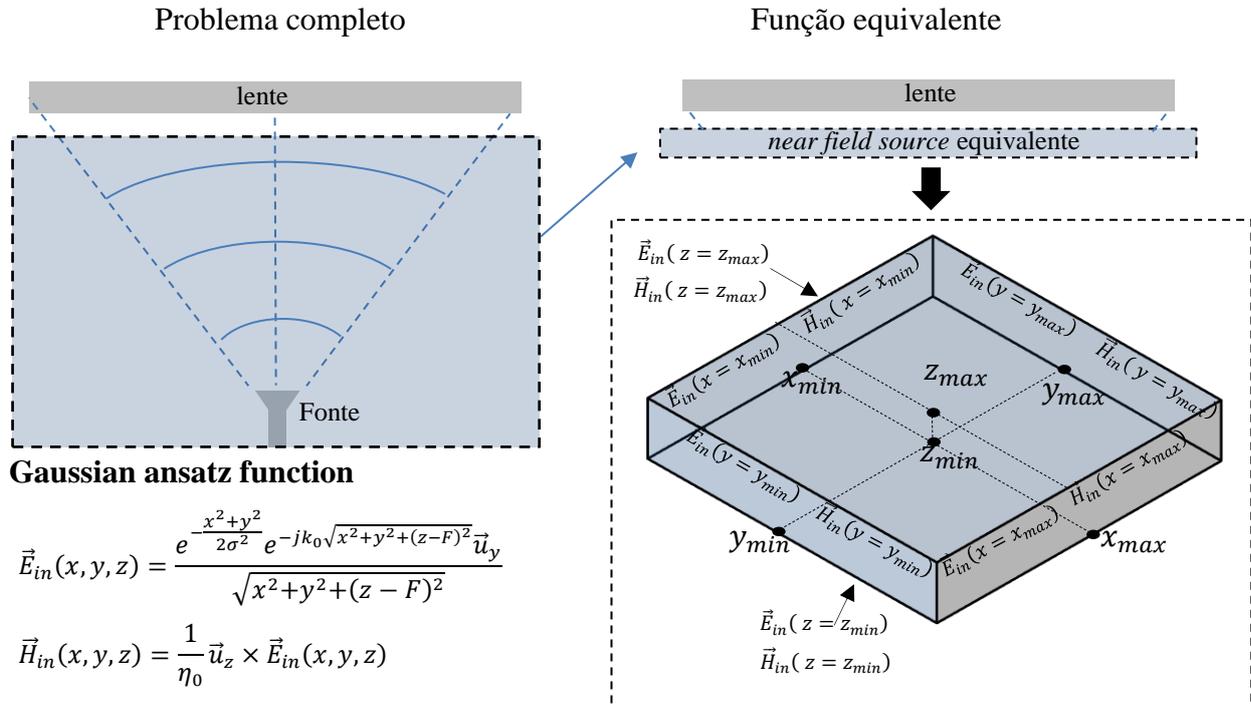


Figura 16 – Descrição do método de iluminação da lente utilizando uma *near field source* [21]

Na Figura 17 representam-se os diagramas de radiação da corneta e de um *near field source* utilizados para iluminar as lentes desenhadas considerando a mesma distância focal.

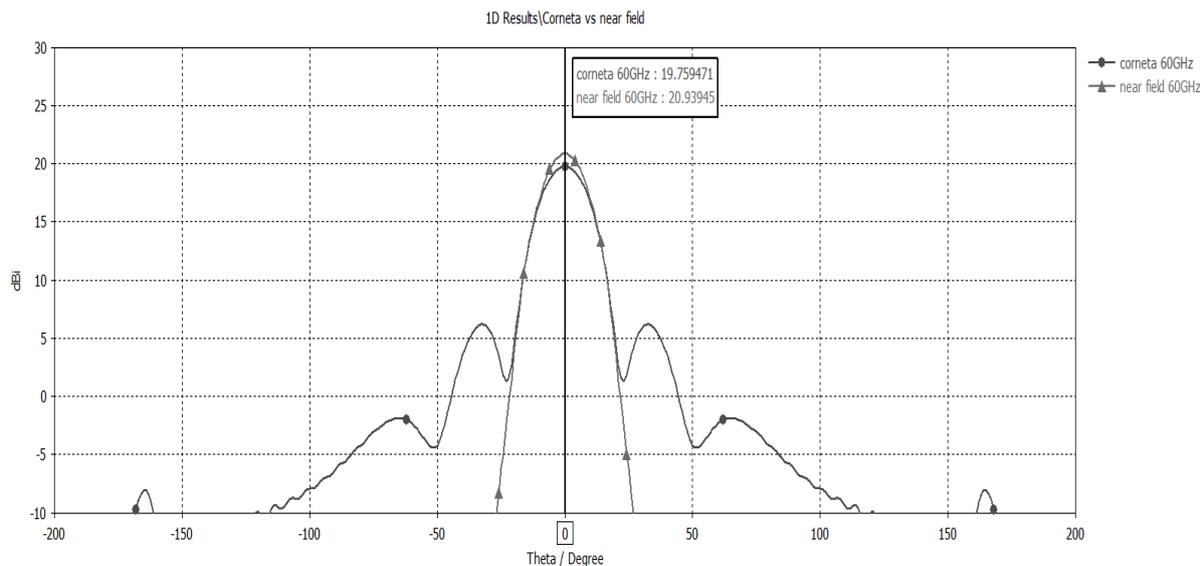


Figura 17 – Diagrama de radiação da diretividades das fontes: corneta e *near field source*.

Na Figura 17 compara-se para estes dois tipos de iluminação (corneta e *near field source*) a complexidade computacional e tempo de simulação necessários. A complexidade computacional do problema pode ser quantificada com base no número de *mesh cells* utilizados pelo simulador. Estas simulações foram executadas num computador com as seguintes configurações: processador Intel® Core™ i7-4700MQ CPU @ 2,40GHz e memória RAM com 8GB.

Tabela 2 – Performance das simulações com e sem lente

	Com lente		Sem lente	
	<i>Near field source</i>	Corneta	<i>Near field source</i>	Corneta
Número de <i>mesh cells</i>	3 394 872	22 204 680	299 568	376 350
Tempo de simulação	0 h 15 m 4 s	1 h 16 m 57 s	29s	61s

### 3.5. Escolha de células unitárias

Nesta secção estuda-se qual o melhor critério para a escolha do número de células unitárias a utilizar. Trata-se de definir um valor mínimo para a resposta de amplitude da célula é um nível mínimo de discretização do intervalo de fase de 0 a 360°. Em [3] considera-se um salto de fase de 90°, o que significa que a lente é composta por 4 células diferentes. Em [4] foi usado um salto de fase de 60° e em [5] o critério usado foi um critério de amplitude superior a -0.5 dB na banda de funcionamento com uma discretização média de 2° do intervalo de fase de 0° a 330°.

Neste estudo considera-se lente do tipo a). Para estas simulações o PLA foi modelado com permitividade  $\epsilon_r = 2,585$  e  $\tan(\gamma) = 0,009813$  em vez dos valores da Tabela 1, porque à data destas simulações ainda não tinham sido medidos no laboratório do IT o valor de permitividade do PLA utilizado. A iluminação da lente foi feita com um *near field source*, com  $F = 40mm$  ( $F/D = 0,5$ ). Para uma coleção de células do tipo ii) (ver capítulo 2) usámos 6 critérios de seleção de células: saltos de fase de  $10^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $60^\circ$ , todas as células simuladas (discretização média de  $2^\circ$ ); todas as células simuladas em que  $|s_{21}|$  é maior do que  $-1dB$  e as células com melhor  $|s_{21}|$ , correspondendo aos máximos que se podem observar na Figura 4. Como referido na secção 3.2,  $\phi_{contante}$  permite modificar a ordem que as células estão distribuídas na lente o que vai modificar a resposta real da lente. Na Figura 18 representa-se a diretividade máxima obtida em função da fase constante  $\phi_{contante}$  para os diferentes métodos de seleção. Neste gráfico podemos ver que todos os diferentes métodos de pré-seleção atingem um valor próximo de  $31,4dB$ . Deste estudo conclui-se que para este tipo de lentes é possível considerar um nível de discretização baixo ( $60^\circ$ ). O parâmetro fundamental parece ser a fase inicial  $\phi_{contante}$  que permite achar para uma dada classe de células a distribuição óptima das células. Assim para o desenho da lente de Fresnel não é considerado nenhum critério adicional para a escolha das células para além do que é descrito no capítulo 2.

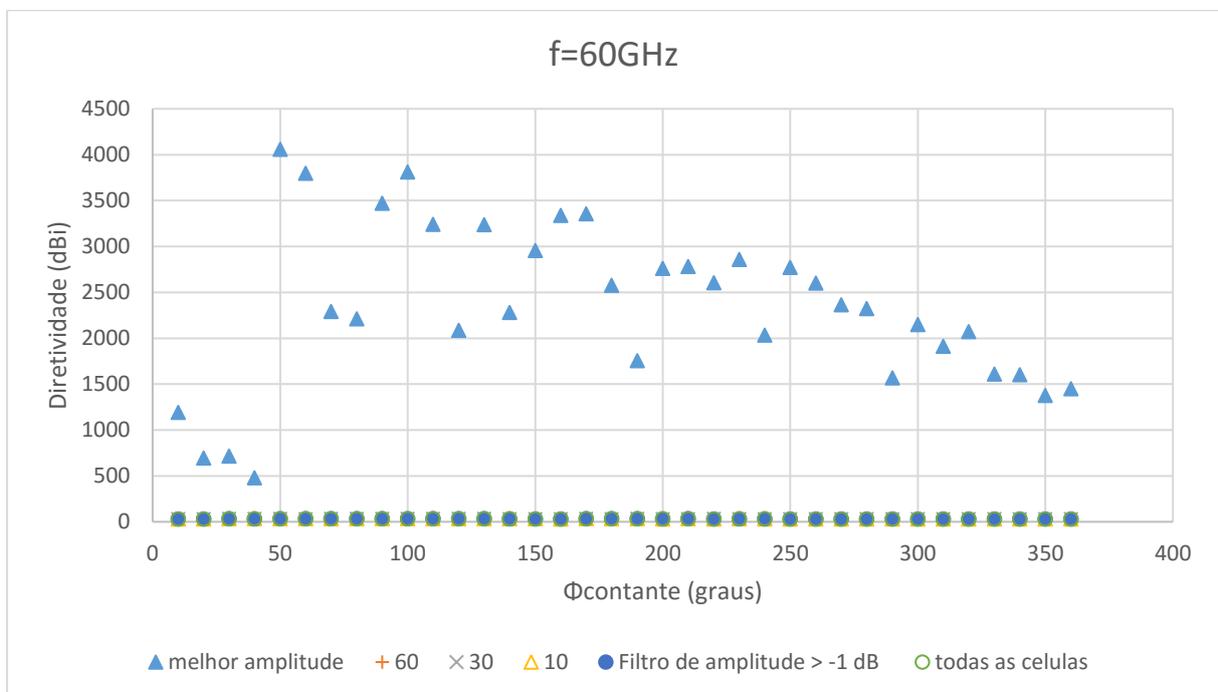


Figura 18 –Diretividade em função do termo  $\phi_{contante}$  para vários métodos de seleção de células unitárias.

### 3.6. Lentes Fresnel de altura variável

Nesta secção compara-se a diretividade das lentes com alturas diferentes quando se considera geometria circular, lente a), e geometria cilíndrica, lente b). Como referido anteriormente, é necessário ter em conta que a forma como as células são distribuídas pode influenciar a diretividade da lente. Assim na Subsecção 3.6.1 mostra-se a influencia da escolha do termo de fase constante no desempenho destas lentes. Para cada valor de  $\phi_{constante}$  é necessário correr uma nova simulação, assim este estudo é feito considerando uma iluminação do tipo *near field source*. Desta primeira comparação verifica-se que o desenho da lente a) permite obter uma diretividade maior. Na Subsecção 3.6.2 considera-se que a lente é iluminada utilizando uma corneta de 19,8 dBi o que permite determina-se a eficiência de radiação desta lente e quantificar qual a melhoria no desempenho da lente quando  $F/D$  aumenta de 0,5 para 1,82. Na Subsecção 3.6.3 faz-se a análise na frequência da melhor solução encontrada na subsecção anterior.

#### 3.6.1. Escolha da fase constante - Near field source

Nas simulações desta secção considera-se um *near field source* com  $\sigma = 31,507$  de forma a obter na extremidade da lente uma iluminação com -10dB de amplitude relativamente ao centro (*edge taper*). A distância focal utilizada foi  $F = 40mm$  (correspondendo a um  $F/D = 0,5$ ). Na Figura 19a) mostra-se o diagrama de radiação desta fonte que tem diretividade igual a 9,8 dBi e na Figura 19b) representa-se a o gráfico da amplitude no plano onde é colocado a lente.

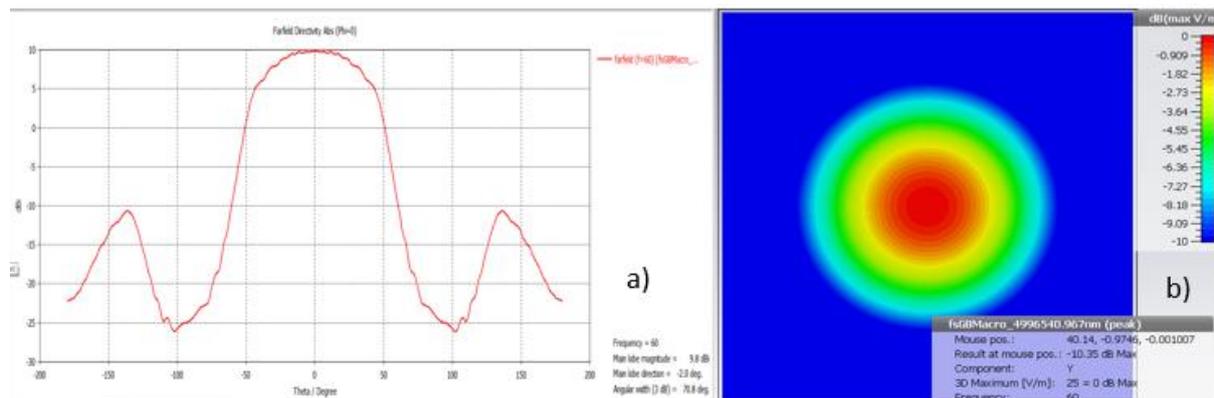


Figura 19 - *Near field source*. a) Diretividade no plano H, b) amplitude normalizada do campo incidente no plano da lente.

Considerou-se 36 valores diferentes de  $\phi_{constante}$  entre 0 e  $360^\circ$  para aferir qual é o melhor valor de diretividade que é possível obter com cada tipo de lente. Como na secção anterior, o PLA foi modelado com permitividade  $\epsilon_r = 2,585$  e  $\tan(\gamma) = 0,009813$  em vez dos valores da

tabela 1. A altura da lente varia entre 1mm a 9,18mm de forma a obter um atraso de fase total de 360°.

Na Figura 20 comparam-se as diretividades máximas das duas lentes em função da fase constante,  $\phi_{constante}$ , para 60GHz. A lente com geometria circular tem diretividade máxima de 31,4dB e a lente com geometria quadrada tem diretividade máxima igual a 30,5dB. Assim mostra-se que existe um ganho significativo em utilizar a geometria cilíndrica no desenho de uma lente Fresnel com alturas diferentes, lente a). Por outro lado, mostra-se ainda que otimização de  $\phi_{constante}$  pode melhorar até cerca de 0.8 dB na performance destas lentes.

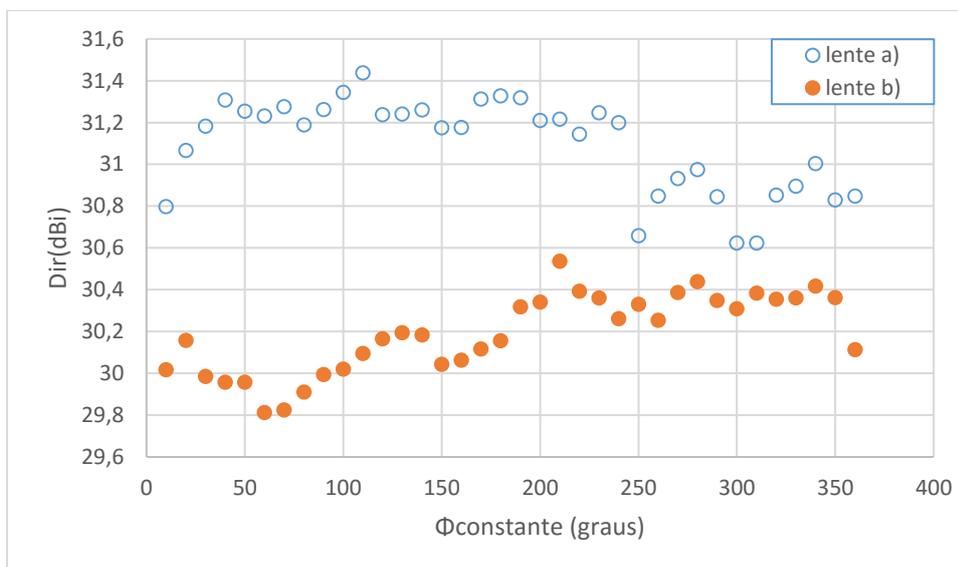


Figura 20 – Diretividade máxima das lentes a) e b) em função da fase constante para 60GHz.

### 3.6.2. Determinação da eficiência de radiação da lente a)

Para o cálculo da eficiência de radiação da lente é necessário comparar o ganho com a diretividade. Nesta secção consideramos que a iluminação da lente é feita com a corneta de 60GHz disponível no laboratório do IT. A corneta tem o diagrama de radiação representado na Figura 17. De acordo com (13) a uma distancia focal considerado é  $F = 145,72mm$  ( $F/D=1,82$ ). Para comparar os dois tipos de iluminação considera-se um *near field source* em que  $F = 145,72mm$ . Nas simulações desta secção o PLA já é caracterizado pela permitividade relativa apresentada na Tabela 1,  $\tan(\gamma) = 0,0148$ . A altura da lente varia entre 1mm a 7,76mm de forma a garantir um atraso de fase entre 0 e 360°. Os resultados destas simulações estão apresentados na Figura 21. Nesta figura apresentam-se as diretividade desta antena obtida com os dois tipos de iluminação e o ganho correspondente para uma corneta a 60GHz. As curvas

das diretividades das lentes iluminadas pela corneta e pelo *near field* têm padrões similares. Obtém-se que a eficiência da antena é de 84%. O ganho máximo realizado é  $\sim 32,3$  dB para uma fase inicial de  $280^\circ$ . Assim constata-se que o aumento do valor de  $F/D$  permitiu melhorar significativamente o desempenho da lente. Para  $F/D=0,5$  a diretividade máxima obtida usando uma fonte do tipo *near field source* foi de 31,4 dB (ver subsecção anterior) enquanto que para  $F/D = 1,82$  a diretividade para o mesmo tipo de fonte foi de 33,4 dB. Este aumento de desempenho é esperado. O aumento de  $F/D$  implica uma lei de fase com variação mais lenta ao longo da lente o que leva a ter um menor número de saltos de fase de  $360^\circ$ , passa de 5 para 2 saltos (ver Figura 22).

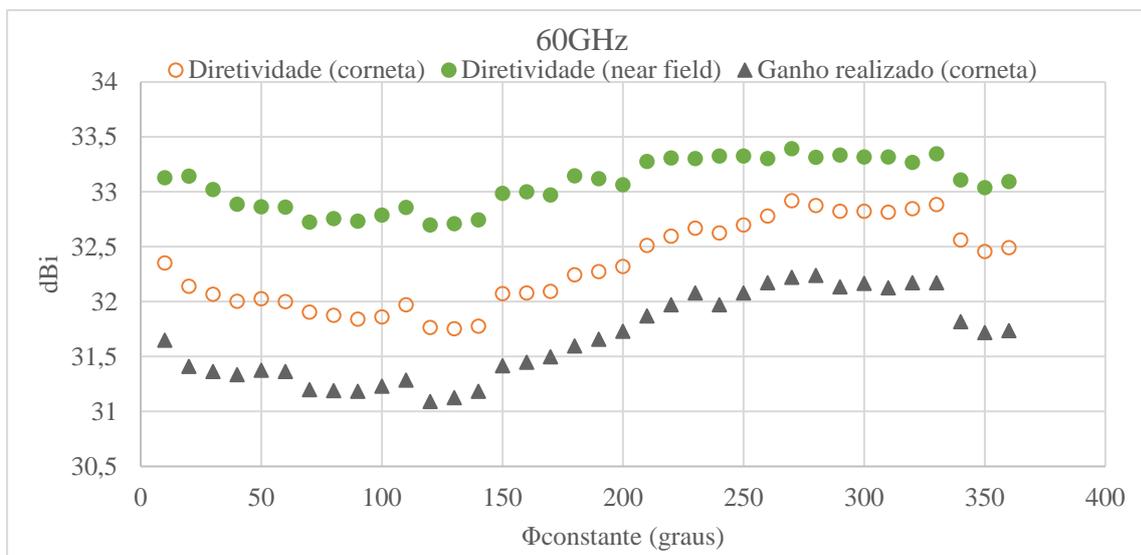


Figura 21 – Diretividade máxima e ganho máximo realizado com lente a) em função da fase constante.

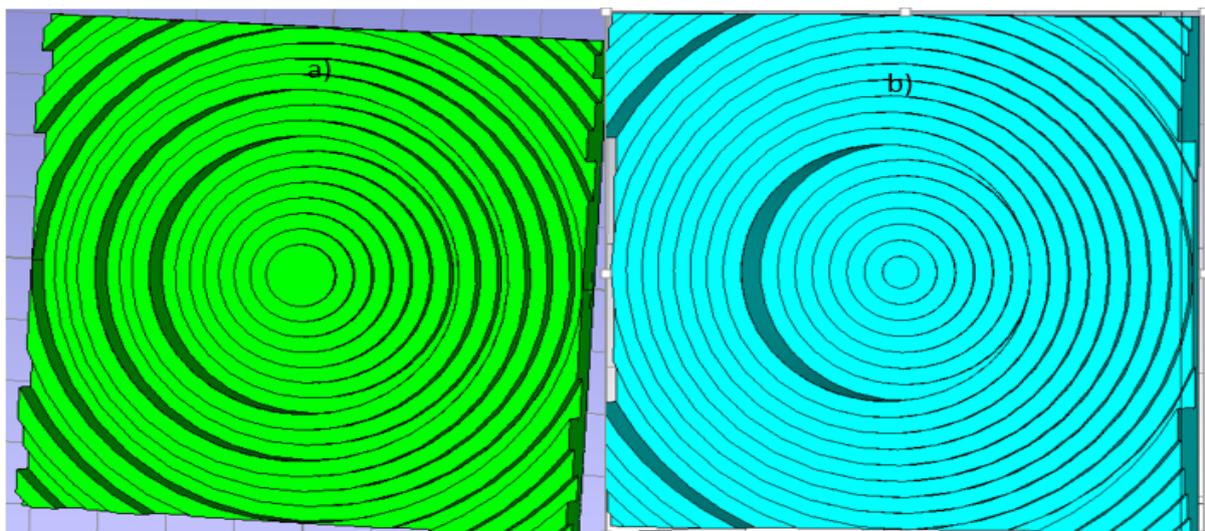


Figura 22 – a) lente com  $F/D = 1,82$  2 saltos de fase de  $360^\circ$  b) lente com  $F/D = 0,5$ , 5 saltos de fase de  $360^\circ$ .

### 3.6.3. Resposta na frequência da lente

Nesta secção apresenta-se a resposta na frequência da melhor solução para a lente encontrada na subsecção anterior, correspondendo ao caso com fase constante de  $280^\circ$ . Na Figura 23 estão representadas as curvas da diretividade máxima e ganho realizado máximo em função da frequência. A partir desse gráfico podemos verificar que a largura a 3dB da lente é de 30GHz sendo a frequência mínima 50GHz e máxima 80GHz. Note-se que devido a *phase wrapping* a correção da lente degrada-se para frequências mais afastadas da frequência de desenho (60 GHz). Esta degradação traduz-se no aparecimento de lobos secundários, assim considerando que o nível de lobo secundários deve ser menor que -10dB, a largura de banda da lente é de 22 GHz, sendo a frequência mínima 50GHz e máxima 72GHz. O que implica que a lente apresenta uma largura banda relativa de cerca de 36%. Nesta simulação apenas se considerou a influência do modo fundamental do guia que tem uma frequência de corte de 40 GHz. O segundo modo (não considerado nas simulações) ocorre a partir dos 80 GHz.

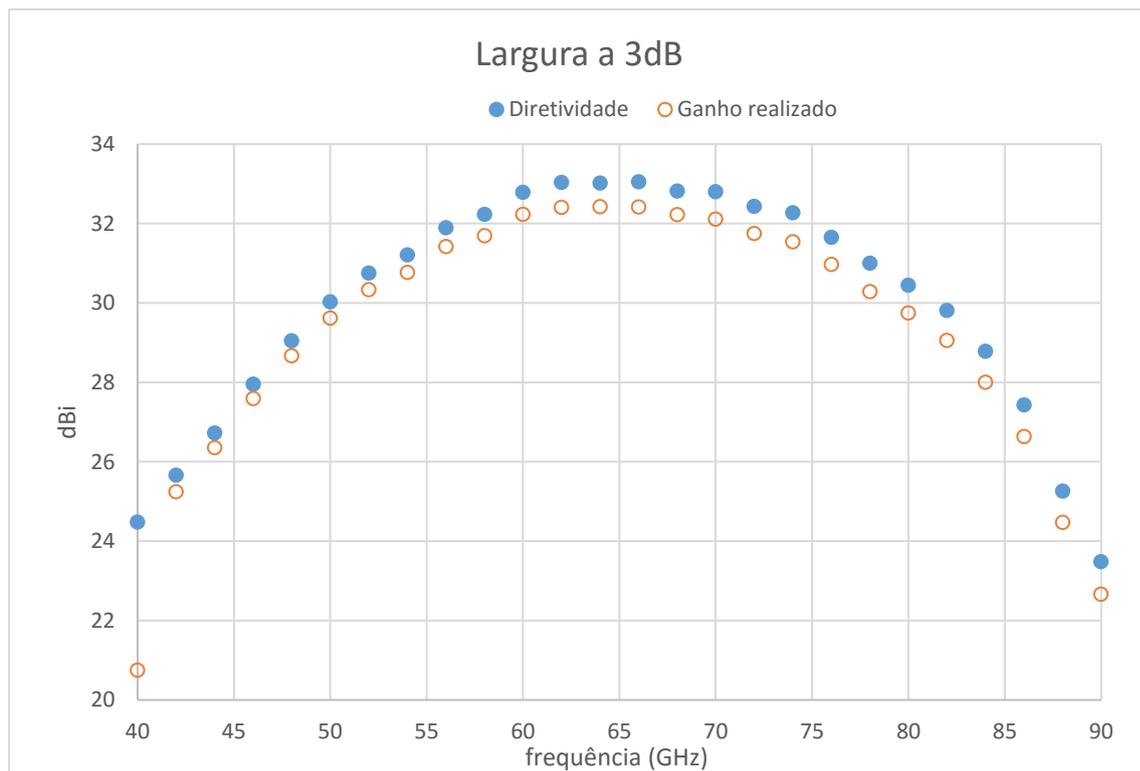


Figura 23 – Resposta na frequência da lente b).

Esta lente cumpre assim as especificações pretendidas. Aguarda-se disponibilidade do equipamento de fabrico e de medida para poder confirmar experimentalmente estes resultados.

### 3.7. Lentes Fresnel com altura fixa

Nesta secção faz-se um estudo semelhante ao feito anteriormente considerando agora lentes com altura fixa  $h_2 = 7,76mm$ : lentes c) e d). Na lente c) as células têm lado  $w = 2,5mm$ , e o buraco tem um lado que varia entre 0mm a 2,3mm. Compara-se a resposta desta lente com a lente a) que se provou ser a melhor opção quando se considera altura diferentes. Esta lente é constituída por anéis cilíndricos concêntricos com altura que varia de 1mm a 7,76mm e o  $r_{ext} - r_{int} = w$ . As lentes contêm o mesmo material que é o PLA. A fonte usada é o *near field* com  $F = 145,52mm$  ( $F/D=1,82$ ).

Na Figura 24 mostra-se a diretividade máxima das duas lentes em função da fase constante. Verifica-se que é possível obter um desempenho ligeiramente superior ao caso com a lente c).

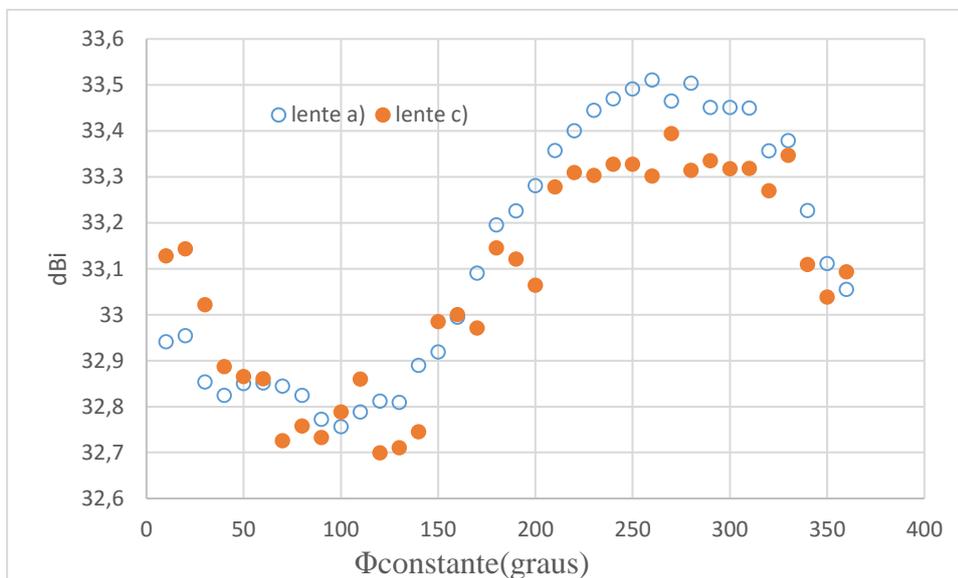


Figura 24 – Comparação da diretividade da lente a) e lente c).

Finalmente, para sabermos a influência da forma dos buracos, comparam-se as lente c) e d), Figura 25 . Nesta figura podemos ver que não existe ganho significativo em usar uma geometria circular quando temos altura fixa (diferenças de cerca de 0.1 dB). Note-se que esta conclusão é a oposta do que acontece quando a lente tem alturas diferentes. Por outro lado, como já referido, a geometria cartesiana é preferível do ponto de vista de impressão 3D.

Nestes diagramas de radiação também se confirmou que na banda pretendida (56-66 GHz) a diretividades é superior a 32,7 dB. Assumindo uma eficiência de radiação semelhante à calculada na Subsecção 3.6.2 de -0,8 dB, e tendo em conta que o método de fonte equivalente parece estar a sobrestimar o comportamento da lente da corneta cerca de 1 dB (ver Subsecção

3.6.2) estima-se que o ganho mínimo desta lente esteja sempre acima de 30 dB na banda. O que novamente cumpre os requisitos estabelecidos para o desenho desta lente.

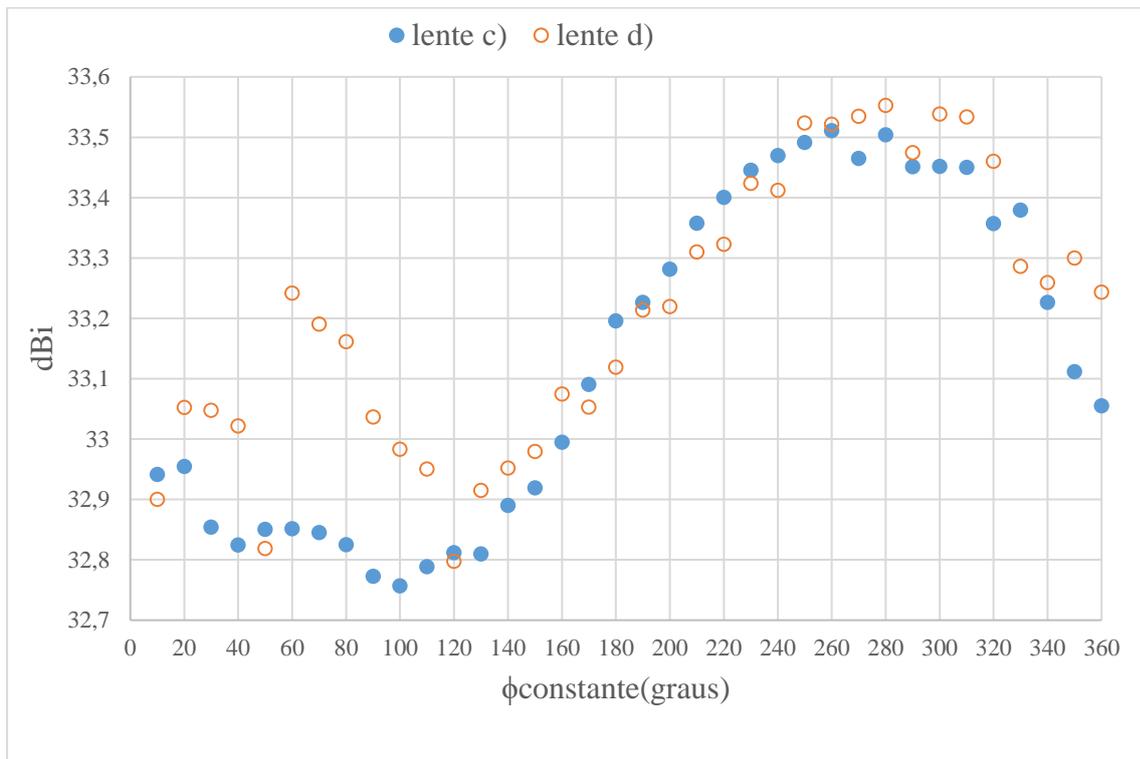


Figura 25 – Comparação da diretividade da lente c) e lente d).

Desta análise verifica-se que a melhor solução para impressão 3D será a lente do tipo c) com a escolha apropriada de fase inicial. Esta lente também cumpre com as especificações pretendidas. Aguarda-se disponibilidade do equipamento de fabrico e de medida para poder confirmar experimentalmente estes resultados.

### 3.8. Conclusão

Neste capítulo provou-se que é possível aplicar a tecnologia de impressão 3D disponível no laboratório do IT para obter lentes planares capazes de cumprir as especificações para efetuar uma ligação *backhaul*. Esta tecnologia além de baixo custo tem uma largura de banda elevada dado a características não ressonantes das células.

Mostrou-se que o termo de fase  $\phi_{constante}$  é o principal parâmetro que permite otimizar o desempenho da lente. Nestas lentes verifica-se que a discretização escolhido para a resposta de fase das células pode ser relativamente baixo (cerca de  $60^\circ$ ).

Como esperado obteve-se uma melhoria significativa na performance da lente quando aumentamos o valor de  $F/D$  de 0,5 para 1,82, permitindo cumprir os requisitos estabelecidos para lente.

Conclui-se que o melhor desenho das lentes testados é o caso c). A geometria retangular desta lente é adequada à impressão 3D. Além do mais, o facto da lente ter uma altura constante permite evitar a perda de diretividades causa pelos efeitos de difração que ocorrem nas transições de células com alturas diferentes.

Com base nos resultados obtidos, espera-se que estes tipos de lentes conseguiam ser fabricadas com os seguintes parâmetros: uma eficiência de radiação na ordem dos 80%, uma eficiência de abertura na ordem dos 50% e uma largura de banda relativa de cerca de 30%.

## Capítulo 4. Desenho de Lentes de Fresnel para 30 GHz com células dielétricas e com células metálicas

### 4.1. Introdução

Neste capítulo pretende-se comparar o desempenho de uma lente de Fresnel feita com células constituídas por elementos metálicos do tipo apresentado em [4] com uma lente equivalente passível de ser impressa com a impressora 3D disponível. A frequência de trabalho é neste caso 30 GHz de acordo com [4] .

Usamos a mesma fonte do tipo *near field source* para as duas lentes com diretividade de 9,8dBi para 30GHz, Figura 26. A distância focal considerada neste problema é de  $F = 77,5\text{mm}$  e o *tapering* foi ajustado para obter uma iluminação de -10dB no final da lente em relação ao centro. Este estudo é feito utilizando um valor de  $F/D=0,5$ .

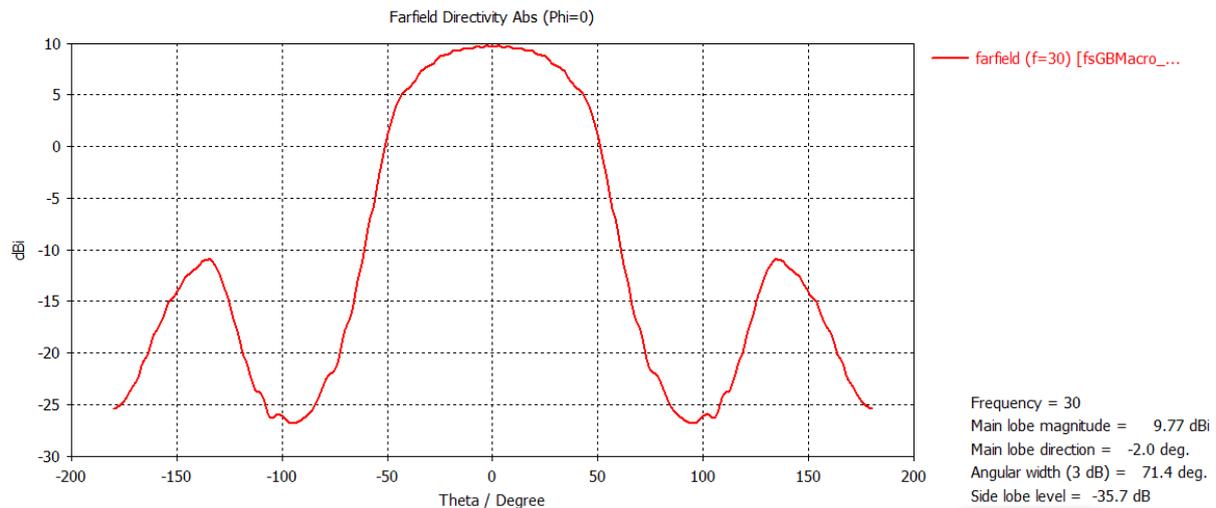


Figura 26 – Diagrama de radiação da fonte considerada.

### 4.2. Célula unitária com placas metálicas

A Figura 27 representa uma célula unitária com placas metálicas capacitivas em que a célula é um paralelepípedo, com secção quadrada de lado  $s = 3\text{mm}$  e altura  $h = 1\text{mm}$ . As placas metálicas são PECs (*perfect electric conductor*) quadradas com altura infinitamente pequeno, as placas nas extremidades têm lado  $a1$  e a placa central tem de lado  $a2$ . O dielétrico pode ser considerado sem perdas e tem permitividade relativa igual a  $\epsilon_r = 2,2$ . Os diferentes atrasos de fases são alcançados devido a variação de  $a1$  e  $a2$ , que variam entre 0mm e 2,85mm [4] . O obtida uma discretização de  $10^\circ$  do intervalo entre  $70^\circ$  e  $360^\circ$ .

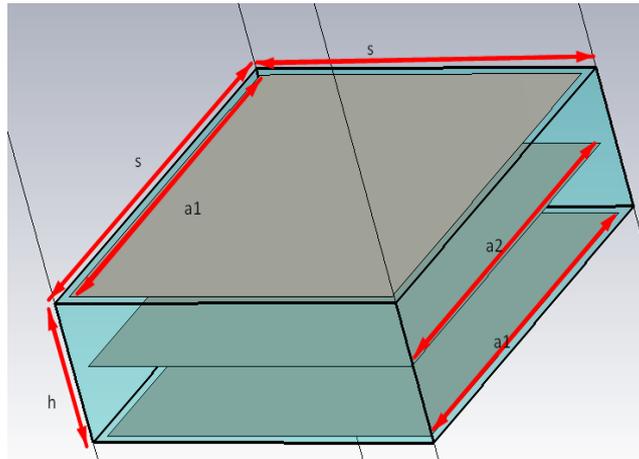


Figura 27 – Célula unitária com 3 placas metálicas capacitivas

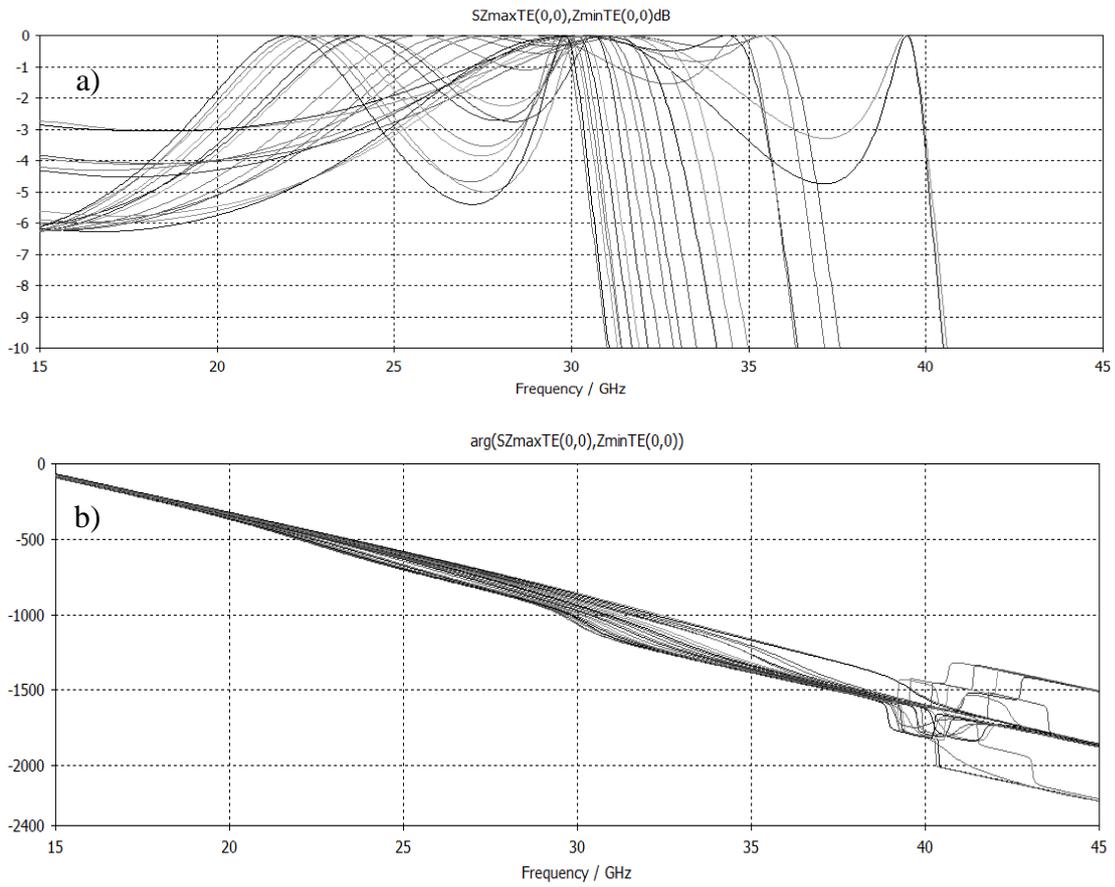


Figura 28 – Reposta das células a)  $|s_{21}|$  e b)  $Arg(s_{21})$ .

### 4.3. Lente Fresnel feita com inserções metálicas

O desenho da lente segue o processo descrito no capítulo anterior. O diâmetro da lente considerado é de  $D = 155\text{mm}$  e a distância focal é de  $77,5\text{ mm}$  ( $F/D=0,5$ ). A altura da lente é de apenas  $1\text{ mm}$  de acordo com a geometria das células unitárias. A lente correspondente está representada na Figura 29.

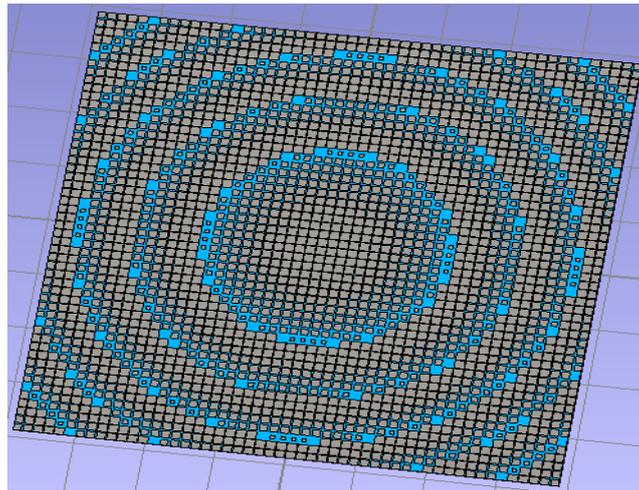
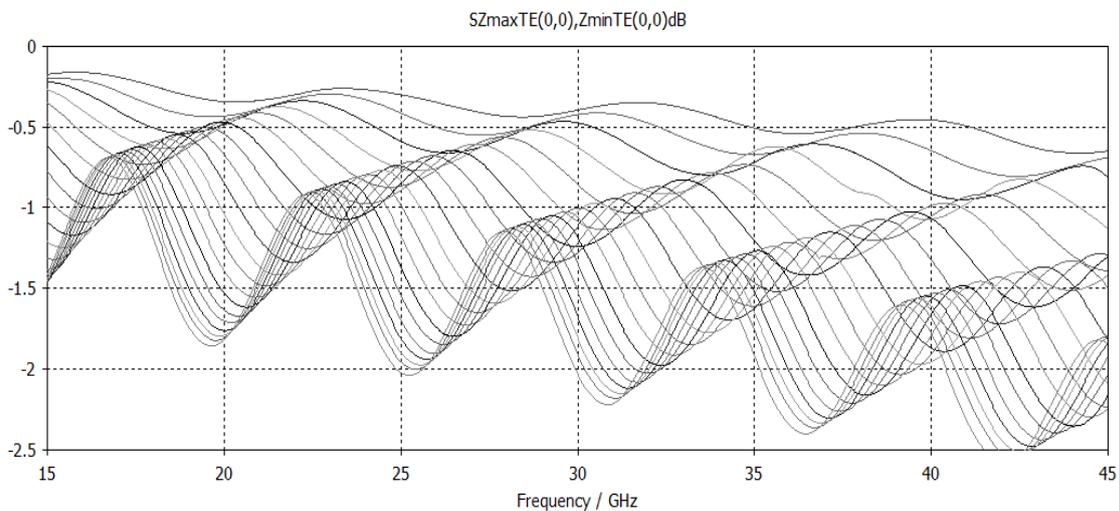


Figura 29 – Lente com placas metálicas

### 4.4. Célula unitária dielétrica

As células consideradas são do tipo ii) (de acordo com a capítulo 2). Neste caso  $w = 2,5\text{mm}$  e altura  $h = 15,5\text{mm}$ . A dimensão do buraco  $g$  varia entre  $0\text{ mm}$  a  $2,1\text{ m}$  de acordo com a limitações de precisão da impressora 3D. O dielétrico é o PLA com permitividade relativa descrita na Tabela 1 e tangente de perdas igual a  $0,0148$ . A Figura 30 mostra a resposta das células obtidas através de simulação numérica.



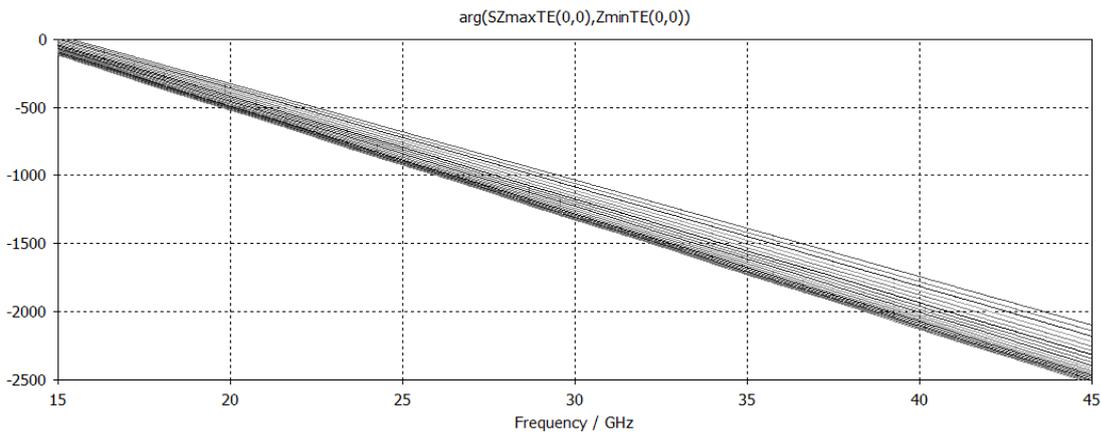


Figura 30 - Parâmetro  $S_{21}$  das células unitária da lente dielétrica. a)  $|S_{21}|$  e b)  $\text{Arg}(S_{21})$ .

#### 4.5. Lente dielétrica

Como no caso anterior o diâmetro da lente considerado é de  $D = 155\text{mm}$  e a distância focal é de  $77.5\text{ mm}$  ( $F/D=0,5$ ). A altura da lente é de  $15,5\text{ mm}$  de acordo com a geometria das células unitárias. A lente correspondente está representa na Figura 31.

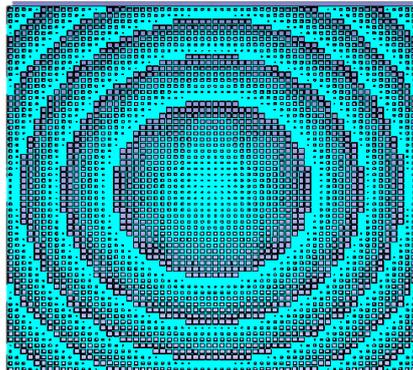


Figura 31 – Lente dielétrica com  $D = 155\text{mm}$ ,  $F = 77.5$

#### 4.6. Comparação de resultados

Nas Figura 32 e Figura 33 compara-se o desempenho destas duas lentes em termos relação frente-trás. Como esperado a lente dielétrica exibe uma largura de banda elevada que contrasta com a banda mais estreita da lente com metalizações, Figura 32. Outra desvantagem da solução com metalizações é que esta lente exibe um maior nível de reflexões, Figura 33. Mostra-se assim que, para este caso, a lente dielétrica tem um desempenho significativamente melhor para  $F/D$  baixos. Para  $30\text{GHz}$  a diretividade da lente dielétricas é  $30,9\text{dBi}$  e para a lente metálica é  $30,2\text{dBi}$ . Dado que estimamos que a eficiência de radiação da lente dielétrica seja na ordem dos

80% (ver capítulo 3) esperasse que para 30 GHz os ganhos das duas lentes sejam muito similares.

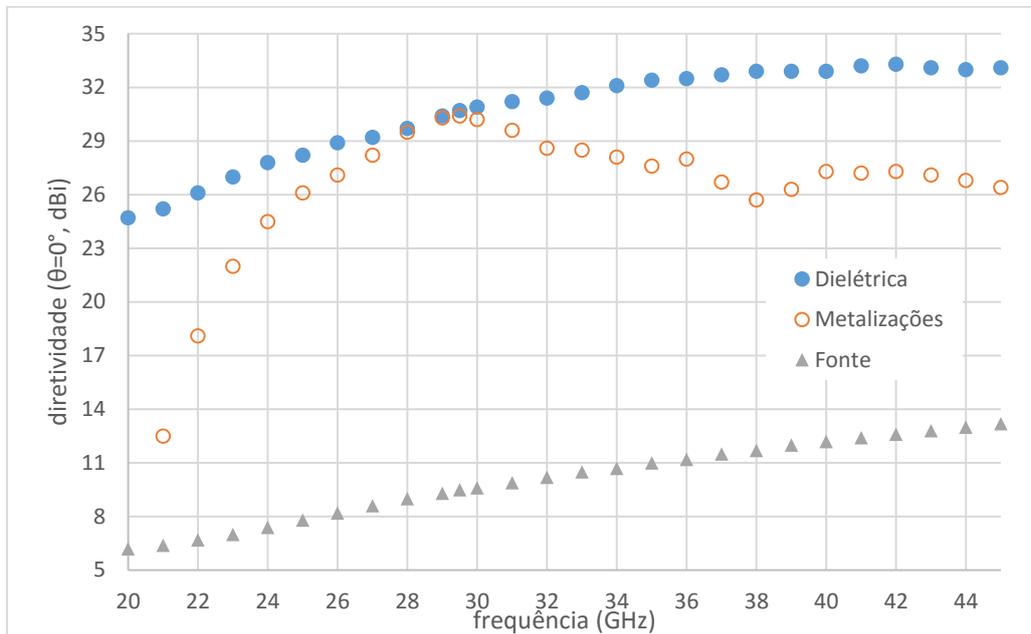


Figura 32 – Diretividade da lente com metalizações e dielétrica em função da frequência.

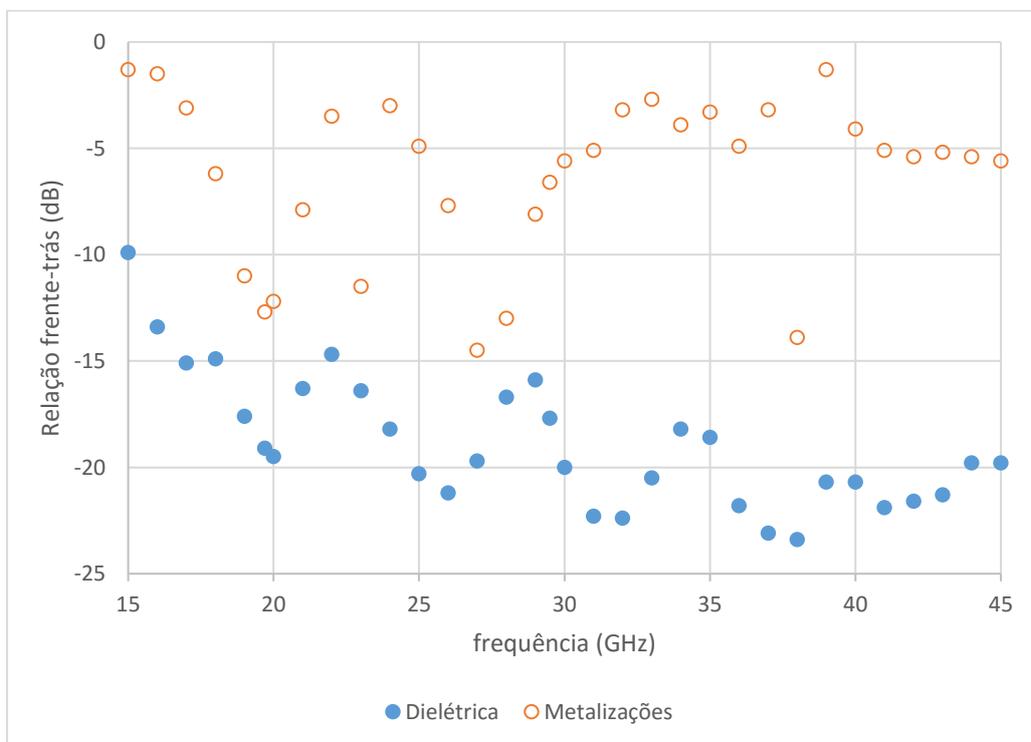


Figura 33 – Relação frente-trás da lente com metalizações e dielétrica em função da frequência.

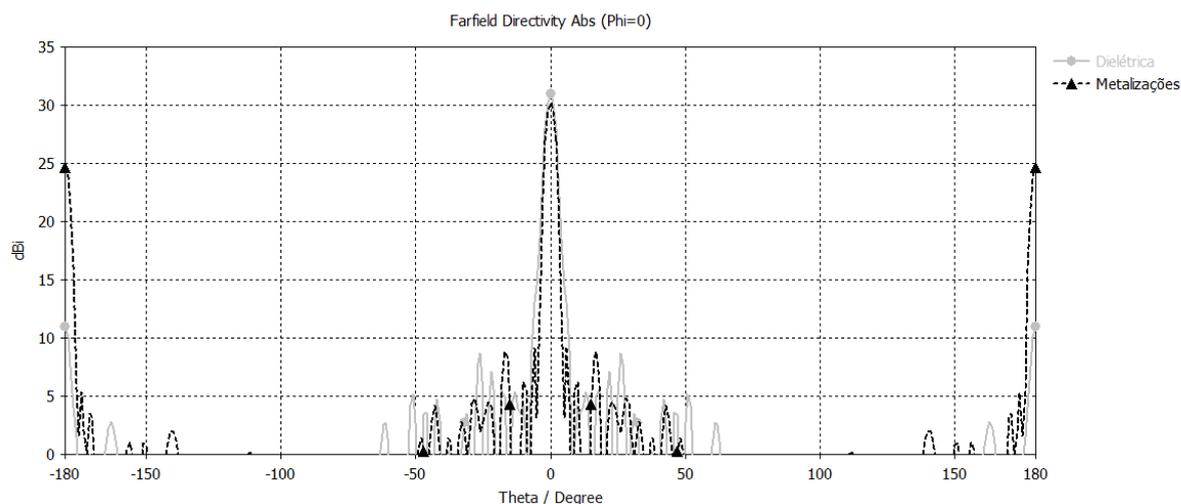


Figura 34 – Diagrama de radiação a 60GHz das lentes dielétricas e com metalizações

#### 4.7. Conclusões

As células com metalizações permitem ter uma altura da lente mais pequena (1 mm versus 15,5 mm no caso em análise). As perdas do dielétrico utilizado na solução com metalizações são muito menores. Contudo, estas lentes exibem uma largura de banda menor do que no caso dielétrico.

As células metálicas exibem um nível de reflexões elevado que não se verificou nas células dielétricas. Assim deste estudo mostra-se que o desenho de lentes de Fresnel dielétricas são uma alternativa viável para fabrico deste tipo de lentes.

Outro aspeto importante a realçar nesta comparação, é que o processo de desenho das células dielétricas é muito mais rápido, uma vez que é suportado com uma formulação analítica. Esta vantagem é cada vez mais evidente quando temos desenhos de células com inserções metálicas com várias camadas. Nestes casos, devido ao elevado número de graus de liberdade, é necessário gastar muito tempo na otimização do desenho das metalizações.

## Capítulo 5. Lentes de seguimento para 30GHz

### 5.1. Introdução

A capacidade de seguimento é importante nas comunicações por satélites e HAP, porque permite que a comunicação se mantenha mesmo que os alvos estejam em movimento. Neste capítulo pretende-se apresentar uma versão compatível com impressão 3D da solução de seguimento feita com células com inserções metálicas apresentada em [5]. Neste artigo desenhou-se uma antena com os seguintes parâmetros: seguimento em elevação de  $[0^\circ, 50^\circ]$ , distância focal  $F=100$  m, ganho  $29\text{dBi}$  e perdas de seguimento  $3\text{dB}$ . A lente utilizada tem forma retangular com  $D_x = 195\text{mm}$  e  $D_y = 145\text{mm}$  e altura  $h = 3,15\text{mm}$ .

Neste estudo utiliza-se um *near field source*, com diagrama de radiação da fonte da Figura 35, e diretividade de  $12,5\text{dBi}$ . As células utilizadas são as mesmas que foram desenvolvidas no capítulo anterior. A lente dielétrica desenhada, Figura 36, tem a mesma dimensão da abertura da lente de [5], contudo a altura é  $h = 15,5\text{mm}$ . Com esta fonte o *tapering* no final da lente em relação ao centro é de  $-10\text{dB}$  (como tem sido considerado ao longo deste trabalho). Note-se que em [5] o *tapering* considerado é de  $-15$  dB.

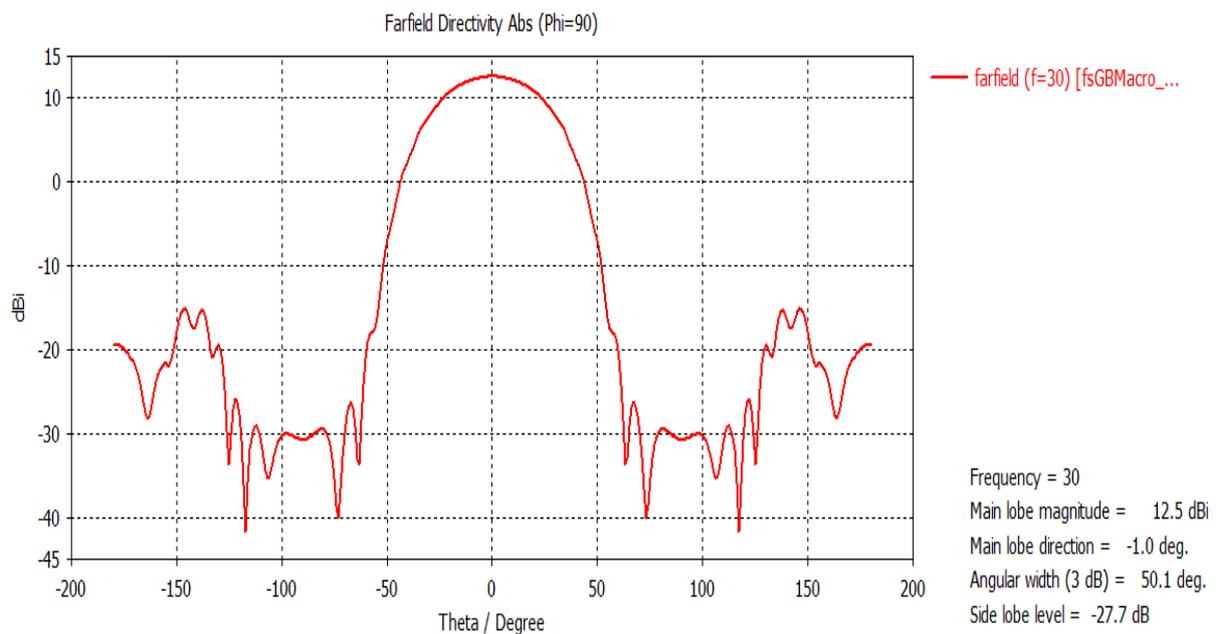


Figura 35 – Diagrama de radiação do *near field*  $F = 100\text{mm}$ .

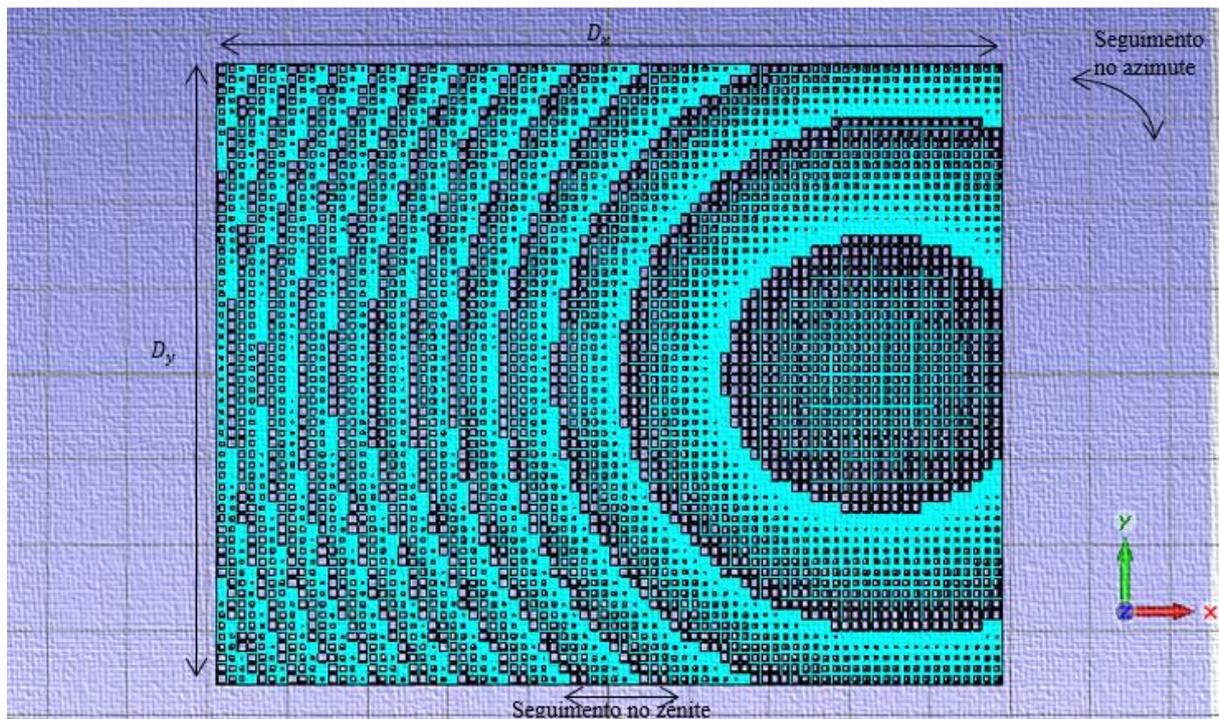


Figura 36 – Lente de Fresnel com offset.

Na simulação a lente foi deslocada no eixo x de um valor mínimo igual a -60mm ( $a = 0,6$ ) a 30mm ( $a = -0,3$ ) com intervalos de 15mm como em [5] .

## 5.2. Princípio de funcionamento

Nesta secção mostra-se resumidamente o princípio de funcionamento da antena proposta em [5] , Figura 37 – Princípio de seguimento de uma lente com seguimento. Tirado de [5] . Assume-se que a fonte ilumina a lente com uma radiação Gaussiana, em que a variação de fase é circular dada pela expressão:

$$\phi_{in}(x, y) = -k_0\sqrt{(x - a)^2 + y^2 + F^2} \quad (15)$$

De forma em que a lente seja capaz de produzir uma inclinação com ângulo  $\alpha$ , a sua lei de fase terá de ser:

$$\phi_{lente}(i, j) = -k_0\sqrt{xf(i)^2 + yf(j)^2 + F^2} + k_0\sin(\alpha_0) + \phi_{contante} \quad (16)$$

O que implica que a fase que a onda tem para  $a = 0$  é:

$$\phi_{out}(0^+) = k_0\sin(\alpha_0) + \phi_{contante} \quad (17)$$

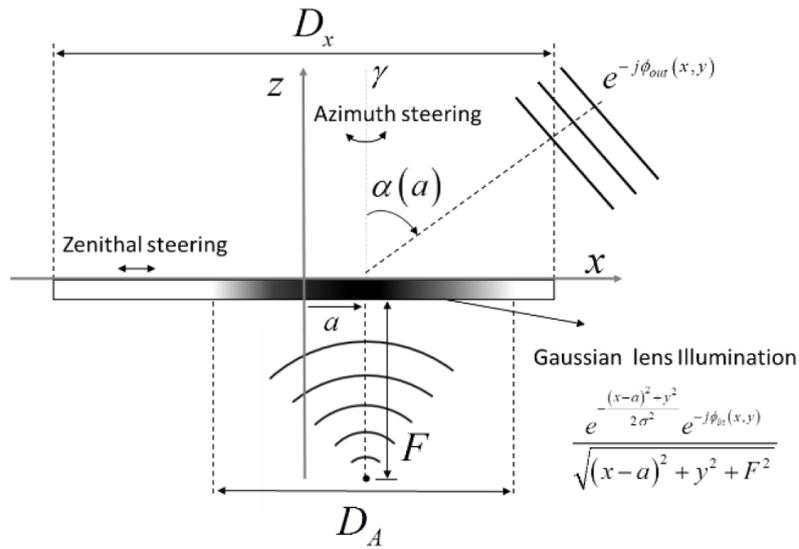


Figura 37 – Princípio de seguimento de uma lente com seguimento. Tirado de [5] .

O deslocamento da lente ou fonte ( $a$ ) implica que feixe inclina de acordo com a seguinte equação (aproximadamente):

$$\alpha(a) = \arcsin \left[ \sin(\alpha_0) - \frac{2a/F}{\sqrt{4 + (a/F)^2}} \right] \quad (18)$$

Nesta equação verifica-se que o ângulo depende da relação  $a/F$ . Na solução em [5] utilizou-se um  $\alpha_0 = 32,5^\circ$ . Para  $\alpha_0 = 32,5^\circ$  o deslocamento para atingir o seguimento é de  $a \in [-0,3F; 0,6F]$  o que corresponde a variação de  $[0^\circ, 50^\circ]$ .

Este desenho generaliza o caso de uma lente de Fresnel convencional em que neste caso  $\alpha_0 = 0$ .

### 5.3. Diretividade da lente a 30 GHz para seguimento entre 0 e 50°

A Figura 38 mostra o diagrama de radiação desta lente em função do ângulo do zénite. A diretividade obtida para  $\alpha = 32^\circ$  é de 30,5dBi, maior do que os 28,9dB obtidos na simulação em [5]. Contudo é necessário ter em conta que o *tapering* utilizado é diferente do que em [5] assim como a fonte que no caso deste artigo era um *patch* com polarização circular. A diretividade máxima é de 30,9dBi para o ângulo  $\alpha = 25^\circ$ . Em termos de perda do seguimento, o resultado obtido foi de -2,8dB de  $\alpha = 24^\circ$  até  $\alpha = 49^\circ$ . O nível de lobos secundários é sempre inferior a -8,6dB, um pouco pior do que os valores obtidos em [5].

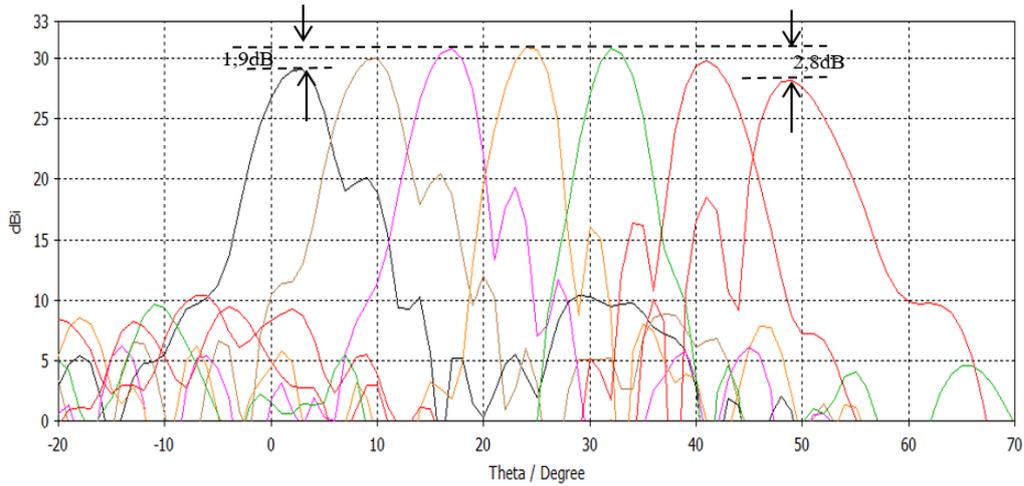
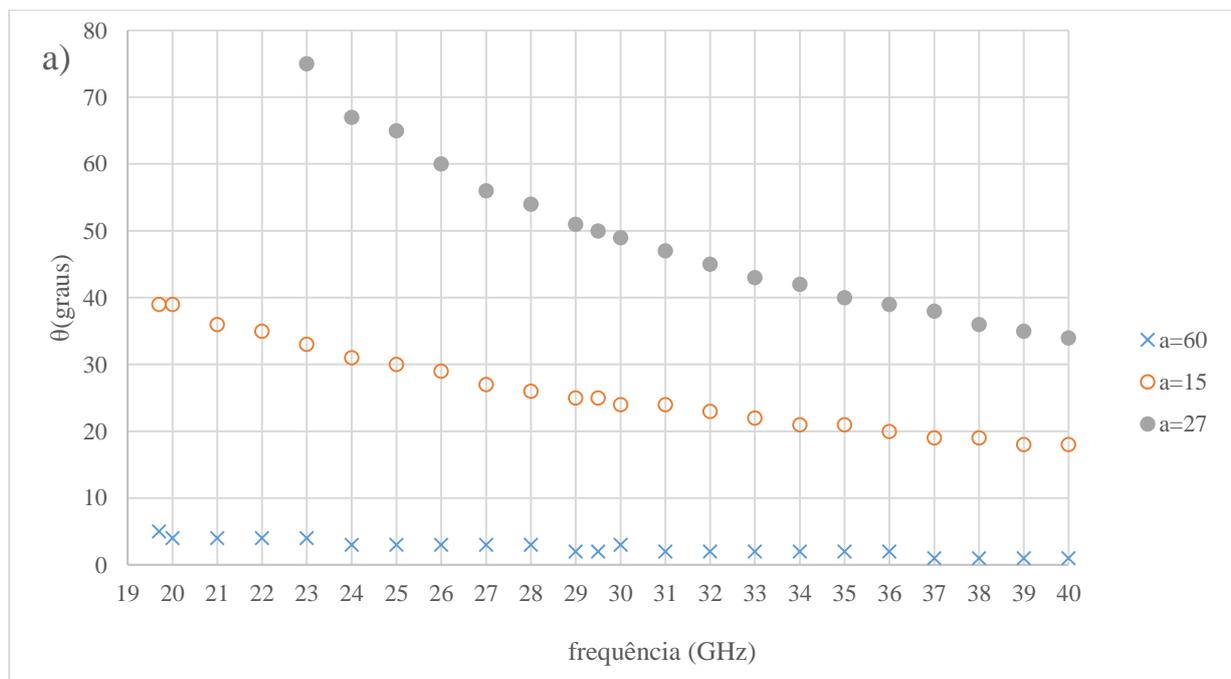


Figura 38 – Gráfico da diretividade da lente dielétrica simulada em função do ângulo no zênite, para  $a \in [-27mm; 60mm]$ .

### 5.4. Resposta na frequência da lente

O que se observa ao variar a frequência é que a direção do feixe varia à medida que se altera a frequência, de acordo com a Figura 39. Vários efeitos influenciam a diretividade da lente, por um lado a lente tem menor área efetiva para frequências mais baixas, por outro lado à medida que o feixe inclina menos a área efetiva da lente aumenta. A somar a este efeito deve-se tem em conta a limitação em termos de resposta de frequências da utilização de um *phase wrapping* entre 0 e 360°. Assim esta solução permite conjugar o seguimento mecânico com seguimento na frequência.



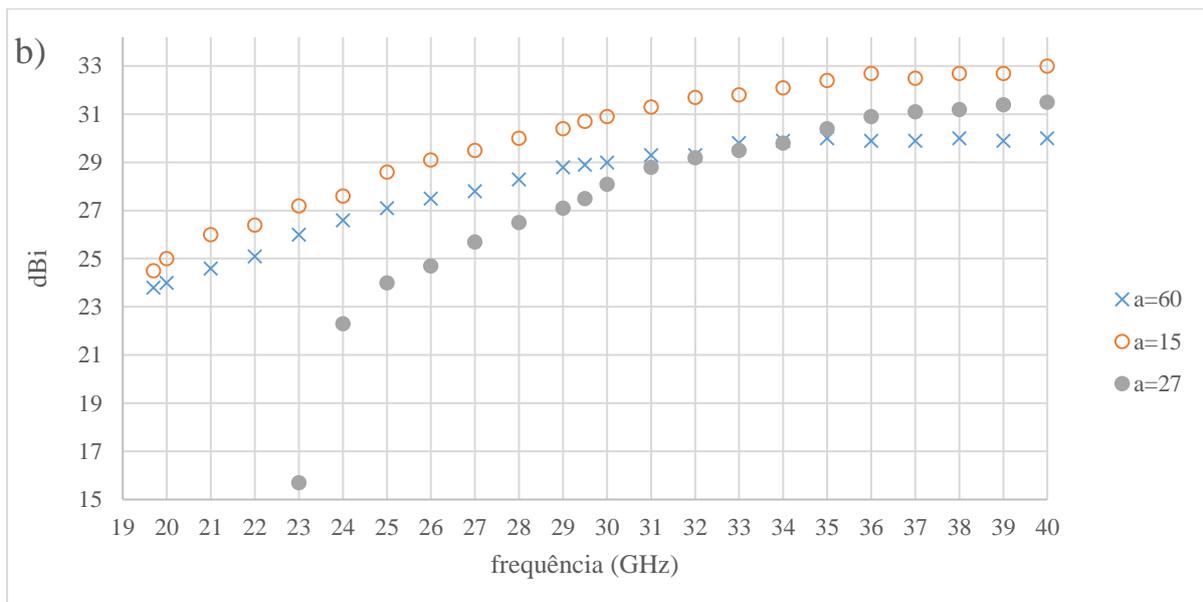


Figura 39 – Desvio na frequência: a) do ângulo da direção de saída do lobo principal; b) diretividade máxima do lobo principal para três posições da lente  $a = \{-27, 15, 60\}$  mm.

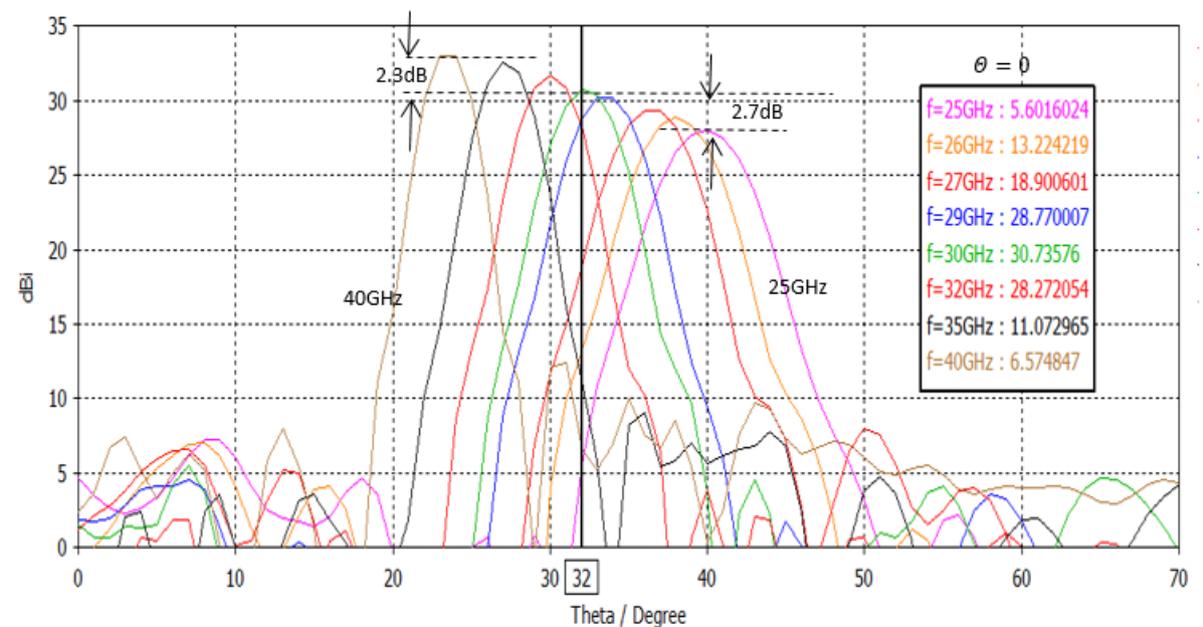


Figura 40 – Desvio na frequência do ângulo da direção de saída do lobo principal da lente com  $a=0$  mm.

Do ponto de vista da aplicação proposta em [5] pretende-se que o feixe aponte sempre na mesma direção na banda de funcionamento. Assim o desvio do feixe com a frequência vai limitar a largura de banda do sistema como se mostra na Tabela 3. Não obstante, para o seguimento entre 0 e 50° a largura de banda do sistema cabe dentro da banda Ka de transmissão (29,5 GHz a 30 GHz).

Tabela 3 – Variação da diretividade em dBi relativamente máximo obtido para 30 GHz em função da frequência e do ângulo de saída do feixe. A zona a verde indica a zona que cumpre com o critério de 3 dB.

frequência[GHz]	$\theta=3$	$\theta=10$	$\theta=17$	$\theta=24$	$\theta=32$	$\theta=41$	$\theta=48$	$\theta=49$	$\theta=51$
19,7	7,6	11,5	27,1						
20	7,2	11,1	25						
21	6,5								
22	6,1								
23	5,1								
24	4,3								
25	3,8	4							
26	3,4	3,1	4,7						
27	3,1	2,5	3,1						
28	2,6	1,6	1,7	3,7	6,3	9,5	11	14,1	16,83
29	2,1	1,2	0,7	1,4	2,1	3,1	4,2	5,3	6,4
29,5	2	1,1	0,4	0,6	0,9	1,7	2,9	3,5	4
30	1,9	0,9	0,2	0	0,2	1,1	2,4	2,8	3,5
31	2,1	1,1	0,4	-0,4	0,2	2,1	4,1	3,8	4,1
32	2	1,5	1,2	0,6	2,6	5,7	7,8	7,1	7,3
33	1,8	2	2,7	3,5	8,1				
34	1,8	2,6	5,1						
35	2	3,7							
36	2,3	5,6							
37	2,6	7,8							
38	3,1	10,3							
39	3,5	13,8							
40	3,9	16,7							

## 5.5. Conclusão

Mostra-se que a solução dielétrica para uma lente de seguimento apresenta resultados promissores quando comparado com a lente [5] .

A maior largura de banda das células utilizadas permite observar que ao contrário do que acontece para uma lente de Fresnel sem *offset* a direção do feixe depende da frequência de forma significativa. Este efeito parece ser inevitável neste tipo de lentes, tornado mais claro dado a largura de banda elevada do sistema.

## Capítulo 6. Conclusões

### 6.1. Conclusões

No desenvolvimento de células unitária foi mostrado ser possível, desenvolver células com transformador  $\lambda/4$ , que adaptam a célula ao ar utilizando um só material. A vantagem do uso de um só material é a de possibilitar o desenvolvimento de lente exclusivamente a partir de uma impressora 3D.

No desenvolvimento de lentes a 60GHz, foram atingidas as especificações para uma ligação *backhaul*, com uma lente compatível com a impressora 3D, sendo assim uma solução de baixo custo e uma largura de banda elevada. Neste capítulo, também se mostrou que  $\phi_{\text{constante}}$  é o principal parâmetro que permite otimizar o desempenho da lente.

Na comparação das lentes com células metálicas verificou-se que, embora a resposta de amplitude das células metálicas seja melhor do que as células dielétricas, o nível de reflexão deste tipo de lente é superior as lentes dielétricas.

No desenvolvimento das lentes dielétricas com seguimento, mostrou-se mais uma vez que está tecnologia é viável por conseguir alcançar resultados semelhantes e por vezes melhores a nível da largura de banda e nível de lobo secundário, quando comparado com lentes de seguimento com placas metálicas.

Em termos das questões de investigação apontadas nos objetivos concluímos que:

- A célula com melhor desempenho é a célula com altura com buraco, porque apresenta melhor resposta de amplitude, devido a sua menor impedância característica.
- A melhor geometria da lente dielétrica é a da lente planar com células quadradas porque é a lente mais compatível com a impressão a 3D. A diferença da diretividade da lente planar com células quadradas não é significava quando comparada com a lente planar com anéis que contêm buracos, que é a lente com maior diretividade simulada neste trabalho.
- Nestas lentes verificamos que os critérios de seleção das células não afetam significativamente o desempenho se consideramos a variação da fase inicial.

Contudo concluímos que as lentes dielétricas compatíveis com a impressão a 3D são uma tecnologia que não só consegue obter bons resultados, mas que além disso, são competitivas, de baixo custo, elevada largura de banda, alto ganho, baixa reflexão e de fácil construção.

## **6.2. Trabalho Futuro**

Partindo dos resultados obtido nas simulações, o passo seguinte será imprimir as lentes planares com geometria quadrada recorrendo a impressora 3D. Após a construção serão feitas medições laboratorial com o objetivo de comparar os resultados experimentais com os resultados obtidos através das simulações. Havendo sempre a possibilidade de efetuar otimizações que venham a aumentar o desempenho da lente.

Após a avaliação dos resultados experimentais, serão submetidos artigos com os resultados obtidos e também com as contribuições originais feitas ao longo deste trabalho.

Em seguida procurarei soluções que possibilitem reduzir a altura total de uma antena com uma abertura planar dielétrica.

## Referências

- [1] High altitude platform multichannel SAR for wide-area and staring imaging. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* 2014. Vol. 29, no. 5p. 12–17. DOI 10.1109/maes.2014.130047.
- [2] IBRAHIM, Ahmed and ALFA, Attahiru S. Using Lagrangian Relaxation for Radio Resource Allocation in High Altitude Platforms. *IEEE Transactions on Wireless Communications IEEE Trans. Wireless Commun.* 2015. Vol. 14, no. 10p. 5823–5835. DOI 10.1109/twc.2015.2443095
- [3] Gagnon, N., Petosa, A. and McNamara, D.A., 2010, Thin Microwave Quasi-Transparent Phase-Shifting Surface (PSS). *IEEE Trans. Antennas Propagat.*. 2010. Vol. 58, no. 4, p. 1193-1201. DOI 10.1109/tap.2010.2041150. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE)
- [4] Gagnon, Nicolas and Petosa, Aldo, 2013, Using Rotatable Planar Phase Shifting Surfaces to Steer a High-Gain Beam. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*. 2013. Vol. 61, no. 6, p. 3086-3092. DOI 10.1109/tap.2013.2253298. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE)
- [5] Lima, Eduardo B., Matos, Sergio A., Costa, Jorge R., Fernandes, Carlos A. and Fonseca, Nelson J. G., 2015, Circular Polarization Wide-Angle Beam Steering at Ka-Band by In-Plane Translation of a Plate Lens Antenna. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*. 2015. Vol. 63, no. 12, p. 5443-5455. DOI 10.1109/tap.2015.2484419. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE)
- [6] CHALOUN, Tobias, KAYNAK, Mehmet, MENZEL, Wolfgang, LUO, Qi, PURTOVA, Tatyana, GAO, Steven, ZIEGLER, Volker, SCHUMACHER, Hermann, TABARANI, Filipe and STAREC, Rado. Wide-angle scanning active transmit/receive reflectarray. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2014. Vol. 8, no. 11p. 811–818. DOI 10.1049/iet-map.2013.0704.
- [7] CAO, Zizheng, MA, Qian, SMOLDERS, Adrianus Bernardus, JIAO, Yuqing, WALE, Michael J., OH, Chin Wan, WU, Hequan and KOONEN, Antonius Marcellus Jozef. Advanced Integration Techniques on Broadband Millimeter-Wave Beam Steering for 5G Wireless Networks and Beyond. *IEEE Journal of Quantum Electronics IEEE J. Quantum Electron.* 2016. Vol. 52, no. 1p. 1–20. DOI 10.1109/jqe.2015.2509256.

- [8] MA, Qian, LEENAERTS, Domine M. W. and BALTUS, Peter G. M. Silicon-Based True-Time-Delay Phased-Array Front-Ends at Ka-Band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* 2015. Vol. 63, no. 9p. 2942–2952. DOI 10.1109/tmtt.2015.2458326.
- [9] Z. Cao et al., “An integrated step-wise optical tunable true-time-delay system for the microwave beam steering towards in-home devices,” presented at the OptoElectron. Commun. Conf. Austral. Conf. Opt. Fibre Technol., Melbourne, VIC, Australia, Jul. 2014, pp. 864–866.
- [10] T. Koonen and Z. Cao, “Optically controlled 2D radio beam steering system,” in Proc. Int. Topical Meeting Microw. Photon. (MWP) 9th Asia-Pacific Microw. Photon. Conf. (APMP), Oct. 2014, pp. 389–391.
- [11] Han, Guodong, Du, Biao, Wu, Wei and Yang, Bing, 2015, A Novel Hybrid Phased Array Antenna for Satellite Communication on-the-Move in Ku-band. *IEEE Trans. Antennas Propagat..* 2015. Vol. 63, no. 4, p. 1375-1383. DOI 10.1109/tap.2015.2389951. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- [12] MIRKAMALI, Ali, SIAKA, Francis, LAURIN, Jean-Jacques and DEBAN, Ramin. Fast and low-cost beam steering using an agile mechanical feed system for exciting circular arrays. *IET Microwaves, Antennas & Propagation.* 2016. Vol. 10, no. 4p. 378–384. DOI 10.1049/iet-map.2015.0429.
- [13] BAYER, Hendrik, KRAUSS, Alexander, STEPHAN, Ralf and HEIN, Matthias A. A dual-band multimode monopulse tracking antenna for land-mobile satellite communications in Ka-band. 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). 2012. DOI 10.1109/eucap.2012.6205925
- [14] B. Zhou, Y. Yang, H. Li, and T. J. Cui, “Beam-steering Vivaldi antenna based on partial Luneberg lens constructed with composite materials,” *J. Appl. Phys.*, vol. 110, p. 084908, Oct. 2011.
- [15] Z. L. Mei, J. Bai, and T. J. Cui, “Gradient index metamaterials realized by drilling hole arrays,” *J. Appl. Phys.*, vol. 43, p. 055404, Jan. 2010.
- [16] S. Zhang, “Design and fabrication of 3D-printed planar Fresnel zone plate lens,” *Electronic Letters*, vol. 52, No. 10, pp. 833-835, May 2016.

- [17] @ultimaker. Ultimaker 2 3D Printer | Ultimaker. *Ultimaker.com* [online]. [Accessed 26 September 2016]. Available from: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-2-plus#volume>
- [18] Yi, Huan, Qu, Shi-Wei, Ng, Kung-Bo, Chan, Chi Hou and Bai, Xue, 2016, 3-D Printed Millimeter-Wave and Terahertz Lenses with Fixed and Frequency Scanned Beam. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*. 2016. Vol. 64, no. 2, p. 442-449. DOI 10.1109/tap.2015.2505703. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE)
- [19] Fernandes, Carlos A., Costa, Jorge R., Lima, Eduardo B. and Silveirinha, Mario G., 2015, Review of 20 Years of Research on Microwave and Millimeter-wave Lenses at "Instituto de Telecomunicações". *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2015. Vol. 57, no. 1, p. 249-268. DOI 10.1109/map.2015.2397156. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- [20] Pacheco-Peña, V., Orazbayev, B., Beaskoetxea, U., Beruete, M. and Navarro-Cía, M., 2014, Zoned near-zero refractive index fishnet lens antenna: Steering millimeter waves. *J. Appl. Phys.*. 2014. Vol. 115, no. 12, p. 124902. DOI 10.1063/1.4869436. AIP Publishing
- [21] Sophocles, J. Orfanidis, 2016, *Electromagnetic Waves and Antennas* [online]. 1. Piscataway : Rutgers University. [Accessed 18 July 2016]. Available from: <http://eceweb1.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>
- [22] D. M. Pozar, S. D. Targonski, and H. D. Syrigos, "Design of millimeter wave microstrip reflectarrays," *IEEE Trans. Antenna Propag.*, Vol. 45, No. 2, pp. 287–296, Feb. 1997.
- [23] Computer Simulation Technology, 2016. cst [online]. [Accessed August 2016]. Available from: <https://www.cst.com/products/cstmws>
- [24] Meng, Fan-Yi, Liu, Rui-Zhi, Zhang, Kuang, Erni, Daniel, Wu, Qun, Sun, Li and Li, Joshua Le-Wei, 2013, AUTOMATIC DESIGN OF BROADBAND GRADIENT INDEX METAMATERIAL LENS FOR GAIN ENHANCEMENT OF CIRCULARLY POLARIZED ANTENNAS. *Progress In Electromagnetics Research*. 2013. Vol. 141, p. 17-32. DOI 10.2528/pier13051104. EMW Publishing
- [25] Moeini-Fard, Mojtaba and Khalaj-Amirhosseini, Mohammad, 2011, Inhomogeneous Perforated Reflect-Array Antennas. *Wireless Engineering and Technology*. 2011. Vol. 02, no. 02, p. 80-86. DOI 10.4236/wet.2011.22011. Scientific Research Publishing, Inc,

- [26] Wu, Qiong-Sen and Zhu, Lei, 2016, Wideband Impedance Transformers With Good Frequency Selectivity Based on Multisection Quarter-Wave Lines and Short-Circuited Stubs. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2016. Vol. 26, no. 5, p. 337-339. DOI 10.1109/Imwc.2016.2548986. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE)
- [27] ECO. THE EUROPEAN TABLE OF FREQUENCY ALLOCATIONS AND APPLICATIONS IN THE FREQUENCY RANGE 8.3 kHz to 3000 GHz (ECA TABLE). erodocdb [online]. [Accessed August 2016]. Available from: <http://www.erodocdb.dk/docs/doc98/official/pdf/ercrep025.pdf>
- [28] BORISKIN, A.v., SAULEAU, R. and NOSICH, A.i. Performance of Hemielliptic Dielectric Lens Antennas With Optimal Edge Illumination. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57, no. 7p. 2193–2198. DOI 10.1109/tap.2009.2021979
- [29] S.A. Matos, E.B. Lima, J.R. Costa, C. A. Fernandes, N. Fonseca, Design of a 40 dBi Planar Bifocal Lens for Mechanical Beam Steering At Ka-Band, European Conf. on Antennas & Propagation - EUCAP, Davos, Switzerland, April, 2016,
- [30] COSTA, Jorge R., FERNANDES, Carlos A., GODI, Gaël, SAULEAU, Ronan, COQ, Laurent Le and LEGAY, Hervé. Compact Ka-Band Lens Antennas for LEO Satellites. IEEE Trans. Antennas Propagat. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2008. Vol. 56, no. 5p. 1251–1258. DOI 10.1109/tap.2008.922690

## Anexo

### *Programa usado para desenho das lentes*

Neste anexo segue o programa que desenha os 5 tipos de lentes estudados neste trabalho. O programa está na linguagem VBA e poderá ser executado como uma macro no CST MICROWAVE STUDIOS®.

Para se poder executar o programas temos que fornecer um ficheiro de input:

-Com 3 colunas no caso da lente dielétrica:

1ª coluna: Altura ou lado do buraco

2ª coluna: resposta em amplitude  $|S_{21}|$

3ª coluna: valor referente ao atraso de fase.

-Com 4 colunas no caso da lente com células metálicas:

1ª coluna: lado dos metais extremos

2ª coluna: lado dos metais extremos

3ª coluna: valor referente ao atraso de fase.

4ª coluna: resposta em amplitude  $|S_{21}|$

```
' gerador_lente
Public ComponentName As String      'nome do componente
Public filename As String           'nome do ficheiro de input

' celula
Public w As Double                  'largura da célula
Public h As Double                  'altura da célula
Public Mat_Diele As String          'material da célula

'Lens
Public F As Double                  'distância focal
Public Dx As Double                 'comprimento da lente eixo x
Public Dy As Double                 'comprimento da lente eixo y
Public freq As Double               'frequência nominal
Public k0 As Double                 'número de onda para a frequência
cesntral
```

```

Public fase0 As Double          'fase inicial
Public alfa0 As Double         'ângulo de seguimento
Public lambda As Double        'comprimento de onda para a
frequência central
Public initFase As Double      'correção da fase inicial em graus
Public Const Lentes = Array("Zoned lens com anéis cilíndricos
concêntricos","Zoned lens com células quadradas","Lente planar com célula
quadrada com buraco","Lente planar com anéis cilíndricos com buraco",
"lentes com placas metálicas")

Public tipo_a As Boolean
Public tipo_b As Boolean
Public tipo_c As Boolean
Public tipo_d As Boolean
Public tipo_e As Boolean

Public index As Integer
Public die_name As String
Public rows As Integer
Public columns As Integer
Public die_name1 As String
Public D As Double

'Resposta Celula
Public RespostaCelula() As Double 'dados das celulas do ficheiro de input

Dim phase As Double
Sub Main ()

    gerarDialogo()

    'Lens
    lambda = (3*10^8/freq)*10^3
    k0 = 2*PI/lambda
    alfa0 = alfa0*PI/180
    fase0 = k0*F+initFase*PI/180

    rows = Round(Dx/w,1)

```

```

columns = Round(Dy/w,1)

UploadDataInFile()
genLens()

End Sub

Function gerarDialogo()
    tipo_a=False
    tipo_b=False
    tipo_c=False
    tipo_d=False
    tipo_e=False
    Begin Dialog UserDialog 380,182,"Desenho da lente",.DialogFunc '
%GRID:10,7,1,1
        GroupBox 0,0,200,126,"Parametros da lente",.ParamLente
            TextBox 100,63,50,14,.Comprimento_X
            TextBox 100,84,50,14,.fase_inicial_de_fase
            Text 20,21,30,14,"F",.Text1
            Text 20,42,90,14,"Dy",.Text2
            Text 20,63,30,14,"Dx",.Text3
            Text 10,84,80,14,"Fase inicial",.Text4
            TextBox 100,21,50,14,.Distância_focal
            TextBox 100,42,50,14,.Comprimento_Y
            GroupBox 200,0,180,91,"Parametro da celula",.GroupBox2
                TextBox 270,42,40,14,.altura
                TextBox 270,63,100,14,.nome_do_material
                Text 210,21,90,14,"w",.Text5
                Text 210,42,20,14,"h",.Text6
                Text 210,63,50,14,"Material",.Text7
                TextBox 270,21,40,14,.lado
            GroupBox 200,91,180,35,"Parâmetro da onda",.GroupBox3
                Text 210,105,90,14,"Frequência",.Text8
                TextBox 280,105,40,14,.Frequência
                Text 160,21,30,14,"mm",.Text9
                Text 160,42,30,14,"mm",.Text10
                Text 160,63,30,14,"mm",.Text11
                Text 160,84,40,14,"graus",.Text12
                Text 320,21,30,14,"mm",.Text13
                Text 320,42,30,14,"mm",.Text14

```

```

        GroupBox 0,126,380,56,"Tipo de lente",.GroupBox4
        Text 330,105,40,14,"GHz",.Text15
        DropDownList 10,140,300,21,Lentes(),.LentesDLB
        Text 20,105,90,14,"alfa0",.Text16
        TextBox 100,105,50,14,.alfa0
        Text 160,105,40,14,"graus",.Text17
        OKButton 180,168,50,14
        CancelButton 240,168,50,14

    End Dialog
    Dim dlg As UserDialog
    If (Dialog(dlg)=0) Then ' user pressed cancel
        Exit All
    End If
End Function

Private Function DialogFunc(DlgItem$, Action%, SuppValue?) As Boolean
    Select Case Action%
    Case 1 ' Dialog box iniciado
        DlgText("Comprimento_X", "80")
        DlgText("Comprimento_Y", "80")
        DlgText("fase_inicial_de_fase", "280")
        DlgText("Distância_focal", "40")
        DlgText("altura", "7.76")
        DlgText("nome_do_material", "PLA")
        DlgText("lado", "2.5")
        DlgText("Frequência", "60")
        DlgText("alfa0", "0")
    Case 2 ' Valor mudado ou botão precionado
        Select Case DlgItem$
            Case "OK"
                Dx=Evaluate(DlgText("Comprimento_X"))
                Dy=Evaluate(DlgText("Comprimento_Y"))

                initFase=Evaluate(DlgText("fase_inicial_de_fase"))
                h=Evaluate(DlgText("altura"))
                Mat_Diele=DlgText("nome_do_material")
                w=Evaluate(DlgText("lado"))
                freq=Evaluate(DlgText("Frequência"))*10^9
                F=Evaluate(DlgText("Distância_focal"))

```

```

        alfa0=Evaluate(DlgText("alfa0"))
        Select Case DlgText("LentesDLB")
            Case "Zoned lens com anéis cilíndricos
concêntricos"
                tipo_a=True
            Case "Zoned lens com células quadradas"
                tipo_b=True
            Case "Lente planar com célula quadrada com
buraco"
                tipo_c=True
            Case "Lente planar com anéis cilíndricos com
buraco"
                tipo_d=True
            Case "lentes com placas metálicas"
                tipo_e=True
            End Select
        End Select
    End Select
End Function

```

'Lê o ficheiro do input e coloca os dados na matriz RespostaCelula()

```

Function UploadDataInFile()
    Dim projectdir As String          'diretório do projeto
    Dim extension As String           'extenssão do ficheiro do
input

    Dim i As Integer                  'iterador
    Dim numberOfLines As Integer      'número de linhas do ficheiro
    Dim lines As String                'uma linha do ficheiro
    Dim numberOfElements As Integer   'numero de elementos do ficheiro
    Dim spl() As String                'vetor de elementos

    projectdir = GetProjectPath("Root")
    extension = ".txt"
    filename = GetFilePath("", extension, projectdir, "Import
Parameters", 0)

    numberOfLines = countLines(filename)

```

```

numberOfElements = countElements(filename)

If(filename<>"") Then
    ReDim RespostaCelula(numberOfLines-1,numberOfElements-1)
    Open filename For Input As #1
        i = 0
        While Not EOF(1)
            Line Input #1,lines
            For j = 0 To numberOfElements-1
                spl =Split(lines, vbTab)
                RespostaCelula(i,j) = CDBl(spl(j))
            Next j
            i = i+1
        Wend
    Close #1
Else
    Exit All
End If
End Function

'Retorna o número de linhas de um ficheiro
Function countLines(filename As String) As Integer
    Dim count As Integer
    count = 0
    Open filename For Input As #1
        While Not EOF(1)
            Line Input #1,cst_inline
            count = count + 1
        Wend
    Close #1
    countLines = count
End Function

'Retorna o número de colunas de um ficheiro estruturado
Function countElements(filename As String) As Integer
    Dim count As Integer
    Dim strg() As String
    count = 0

```

```

    Open filename For Input As #1
        Line Input #1,cst_inline
        strg = Split(cst_inline, vbTab)
        count = UBound(strg)+1
    Close #1
    countElements = count
End Function

Function genLens()
    Dim plit() As String
    plit= Split(filename, ".")
    plit = Split(plit(0), "\")
    Dim n As Integer
    n = UBound(plit)
    ComponentName = plit(n)+"_"+CStr(initFase)+ "_w="+CStr(w)
    Component.New ComponentName
    If tipo_a Then
        GenLentesCilindricosConcentricos()
    ElseIf tipo_b Then
        GenLentesQuadradaAlturaVariada()
    ElseIf tipo_c Then
        GenLentesQuadraAlturaFixa()
    ElseIf tipo_d Then
        GenLentesCilindricosAlturaFixa()
    Else
        GenLentesComMetalizações()
    End If
End Function

Function GenLentesCilindricosConcentricos()
    If Dx > Dy Then
        D=Dx
    Else
        D=Dy
    End If
    die_name= "die"
    die_name1= "die1"
    For r = w To D/Sqr(2)+w STEP w
        phase = Wave_phase(r-w,0)

```

```

        index = ChooseCell(phase)
        If r = w Then
            Cilindro(die_name,
Mat_Diele,0,0,0,w,RespostaCelula(index-1,0))
        Else
            Cilindro(die_name1,
Mat_Diele,0,0,r-
w,r,RespostaCelula(index-1,0))
            Add(die_name,die_name1)
        End If
    Next r
    Cube("cube",Mat_Diele, -Dx/2, Dx/2, -Dy/2, Dy/2, 0, h)
    Intersect(die_name,"cube")
End Function

```

```
Function GenLentesQuadradaAlturaVariada()
```

```

    Dim m As Integer
    Dim linhas As Integer

    die_name= "die"
    die_name1= "diel"
    linhas = rows/2
    If alfa0 <> 0 Then
        linhas=rows
    End If

    m = 1
    For i = 1 To linhas
        For j = m To columns/2
            phase = Wave_phase(Xf(i,rows),Yf(j,columns))
            index = ChooseCell(phase)
            If i = 1 And j = 1 Then
                Cube(die_name,
Mat_Diele,Xf(i,rows-
w/2),Xf(i,rows+w/2),Yf(j,columns)-
w/2,Yf(j,columns)+w/2,0,RespostaCelula(index-1,0))
            Else
                Cube(die_name1,
Mat_Diele,Xf(i,rows-
w/2),Xf(i,rows+w/2),Yf(j,columns)-
w/2,Yf(j,columns)+w/2,0,RespostaCelula(index-1,0))
                Add(die_name,die_name1)
            End If
        Next j
    Next i
End Function

```

```

        End If
    Next j
    If alfa0 = 0 Then
        m=m+1
    End If
Next i
If alfa0 = 0 Then
    Espelhar(1,1,0)
    Espelhar(1,0,0)
End If
Espelhar(0,1,0)
End Function

```

```

Function GenLentesQuadraAlturaFixa()
    Dim linhas As Integer
    Dim index As Integer
    Dim ar_name As String
    Dim ar_name1 As String
    Dim m As Integer
    Dim j As Integer

    If alfa = 0 Then
        linhas = rows
    Else
        linhas = rows/2
    End If

    die_name= "die"
    ar_name= "ar"
    die_name1= "die1"
    ar_name1= "ar1"

    m=1
    For i = 1 To linhas
        For j = m To columns/2
            phase = Wave_phase(Xf(i,rows),Yf(j,columns))
            index = ChooseCell(phase)
            If i = 1 And j = 1 Then

```

```
CellTipoC(Xf(i, rows), Yf(j, columns), h, die_name, ar_name, RespostaCelula(index-1, 0))
```

```
Else
```

```
CellTipoC(Xf(i, rows), Yf(j, columns), h, die_name1, ar_name1, RespostaCelula(index-1, 0))
```

```
Add(die_name, die_name1)
```

```
End If
```

```
Next j
```

```
If alfa0 = 0 Then
```

```
m=m+1
```

```
End If
```

```
Next i
```

```
If alfa0 = 0 Then
```

```
Espelhar(1, 1, 0)
```

```
Espelhar(1, 0, 0)
```

```
End If
```

```
Espelhar(0, 1, 0)
```

```
End Function
```

```
Function GenLentesCilindricosAlturaFixa()
```

```
die_name= "hole"
```

```
Cube("dielectric", Mat_Diele, -Dx/2, Dx/2, -Dy/2, Dy/2, 0, h)
```

```
If Dx >= Dy Then
```

```
D = Dx
```

```
Else
```

```
D = Dy
```

```
End If
```

```
Dim g As Double
```

```
g = 0
```

```
For r = w/Sqr(PI) To D/Sqr(2) STEP w
```

```
phase=Wave_phase(r-w, 0)
```

```
index = ChooseCell(phase)
```

```
g=RespostaCelula(index-1, 0)
```

```
If g <> 0 Then
```

```
If r = 2.5/Sqr(PI) Then
```

```
FirstCellTipoD(r, g, die_name)
```

```

        Else
            CellTipoD(r-w,g,die_name)
        End If
    End If
Next r
End Function
Function GenLentesComMetalizações()
    Dim m As Integer
    Dim a1 As Double
    Dim a2 As Double

    rows = Round(Dx/w,1)
    columns = Round(Dy/w,1)
    die_name= "pec"
    die_name1= "pec1"
    a1=0
    a2=0

    m = 1

    For i = 1 To rows/2
        For j = m To columns/2
            phase = Wave_phase(Xf(i,rows),Yf(j,columns))
            index = ChooseCell(phase)
            a1 = RespostaCelula(index-1,0)
            a2 = RespostaCelula(index-1,1)
            If i = 1 And j = 1 Then

CellTipoE(Xf(i,rows),Yf(j,columns),h,die_name,a1,a2)
                Else
                    CellTipoE(Xf(i,rows),Yf(j,columns),h,die_name1,a1,a2)
                    If a1 <> 0 Then
                        Add(die_name,die_name1)
                    End If
                End If
            Next j
            If alfa0 = 0 Then
                m=m+1
            End If
        End If
    End Function

```

```

        End If
    Next i

    If alfa0 = 0 Then
        Espelhar(1,1,0)
        Espelhar(1,0,0)
    End If
    Espelhar(0,1,0)

    Cube("dieletrico",Mat_Diele,-Dx/2,Dx/2,-Dy/2,Dy/2,0,h)

End Function

Function CellTipoE(Xcenter As Double, Ycenter As Double, Z2 As
Double,nome_die As String, a1 As Double, a2 As Double)
    Dim nome_ar2 As String
    nome_ar2 = "pec3"

    If a1 <> 0 Then
        Cube(nome_die, "PEC", Xcenter - a1/2, Xcenter + a1/2, Ycenter
- a1/2, Ycenter + a1/2,0,0)
        Cube(nome_ar2, "PEC", Xcenter - a1/2, Xcenter + a1/2, Ycenter
- a1/2, Ycenter + a1/2,Z2,Z2)
        Add(nome_die,nome_ar2)
        If a2 <> 0 Then
            Cube(nome_ar2, "PEC", Xcenter -a2/2, Xcenter + a2/2,
Ycenter - a2/2, Ycenter +a2/2,Z2/2,Z2/2)
            Add(nome_die,nome_ar2)
        End If
    End If

End Function

Function ChooseCell(phase As Double) As Integer
    Dim FProxima As Double
    Dim ID As Integer
    ID = 0
    FProxima = RespostaCelula(ID,2)

    For i = 1 To UBound(RespostaCelula,1)

```

```

    If Abs(phase - RespostaCelula(i,2)) < Abs(phase - FProxima) Then
        ID = i
        FProxima = RespostaCelula(i,2)
    End If
Next i
    ChooseCell = ID+1
End Function

Function Xf(i As Integer, Nx As Integer)
    Xf = -w*Nx/2 + (i - 1)*w + w/2
End Function

Function Yf(j As Integer, Ny As Integer)
    Yf = w*Ny/2 - (j - 1)*w - w/2
End Function

Function Wave_phase(X As Double, Y As Double) As Double
    Const PI = 3.14159265358979
    phase = k0*Sqr(X*X+Y*Y+F*F) - fase0 - k0*Sin(alfa0)*X
    phase = phase*180/PI
    phase = FMod(phase,360)
    If phase < 0 Then
        phase = phase + 360
    End If
    Wave_phase = phase
End Function

Public Function FMod(a As Double, b As Double) As Double
    FMod = a - Fix(a / b) * b
End Function

Function CellTipoA(Xcenter As Double, Ycenter As Double, Z2 As
Double,nome_die As String, nome_ar As String,ir As Double)
    Cilindro(nome_die, Mat_Diele,Xcenter ,Ycenter,ir,ir+w,Z2)
End Function

Function CellTipoC(Xcenter As Double, Ycenter As Double, Z2 As
Double,nome_die As String, nome_ar As String,g As Double)

```

```

    Cube (nome_die,      Mat_Diele,Xcenter      -w/2,Xcenter+w/2,Ycenter-
w/2,Ycenter+w/2,0,Z2)
    If g <> 0 Then
        Cube ("hole",      "Vacuum",Xcenter      -g/2,Xcenter+g/2,Ycenter-
g/2,Ycenter+g/2,0,Z2)
        Subtract (nome_die, "hole")
    End If
End Function

```

```

Function FirstCellTipoD(r As Double,g As Double,nome_die As String)
    Cilindro (nome_die,"Vacuum",0,0,0,g/Sqr(PI),h)
    Subtract ("dieletric",nome_die)
End Function

```

```

Function CellTipoD(r As Double,g As Double,nome_die As String)
    Dim theta As Double
    theta = 2*w*w/(w*w+2*r*w)
    Dim n_vezes As Integer
    n_vezes = 2*PI/theta
    theta=2*PI/n_vezes
    Dim alfa As Double
    alfa = 2*g*g/(2*r*g+w*g)

    For angulo=theta To 2*PI+alfa STEP theta
        Cilindro (nome_die,"Vacuum",0,0,r+w/2-g/2,r+w/2+g/2,h)
        Extrud ("cut",0,0,(r+2*w)*Cos(angulo+theta/2-
alfa/2),(r+2*w)*Sin(angulo+theta/2-
alfa/2),(r+2*w)*Cos(angulo+theta/2+alfa/2),(r+2*w)*Sin(angulo+theta/2+a
lfa/2))
        Intersect (nome_die,"cut")
        Subtract ("dieletric",nome_die)
    Next angulo
End Function

```

```

Function Cilindro(nome As String,mat As String, Xcenter As Double, Ycenter
As Double, ir As Double, outR As Double, h As Double)
    With Cylinder
        .Reset
        .Name nome
    End With

```

```

        .Component ComponentName
        .Material mat
        .OuterRadius outR
        .InnerRadius ir
        .Axis "z"
        .Zrange 0, h
        .Xcenter Xcenter
        .Ycenter Ycenter
        .Segments "0"
        .Create
    End With
End Function

```

```

Function Cube(nome As String,Material As String, X1 As Double, X2 As
Double, Y1 As Double, Y2 As Double, Z1 As Double, Z2 As Double)
    With Brick
        .Reset
        .Name nome
        .Component ComponentName
        .Material Material
        .Xrange X1, X2
        .Yrange Y1, Y2
        .Zrange Z1, Z2
        .Create
    End With
End Function

```

```

Function Extrud(nome As String,pointX As Double,pointY As Double,
lineto1X As Double, lineto1Y As Double,lineto2X As Double,lineto2Y As
Double)
    With Extrude
        .Reset
        .Name nome
        .Component ComponentName
        .Material "Vacuum"
        .Mode "Pointlist"
        .Height h
        .Twist "0.0"
        .Taper "0.0"
    End With
End Function

```

```

        .Origin "0.0", "0.0", "0.0"
        .Uvector "1.0", "0.0", "0.0"
        .Vvector "0.0", "1.0", "0.0"
        .Point pointX, pointY
        .LineTo lineto1X, lineto1Y
        .LineTo lineto2X, lineto2Y
        .LineTo pointX, pointY
        .Create
        End With
End Function

Function Espelhar(X As Integer, Y As Integer, Z As Integer)
    With Transform
        .Reset
        .Name ComponentName
        .Origin "Free"
        .Center "0", "0", "0"
        .PlaneNormal X, Y, Z
        .MultipleObjects "True"
        .GroupObjects "True"
        .Repetitions "1"
        .MultipleSelection "False"
        .Destination ""
        .Material ""
        .Transform "Shape", "Mirror"
    End With
End Function

Function Add(solid1 As String, solid2 As String)
    With Solid
        .Version 9
        .Add ComponentName+": "+solid1, ComponentName+": "+solid2
        .Version 1
    End With
End Function

Function Intersect(solid1 As String, solid2 As String)
    With Solid
        .Version 9

```

```
        .Intersect ComponentName+": "+solid1, ComponentName+": "+solid2
        .Version 1
    End With
End Function

Function Subtract(solid1 As String, solid2 As String)
    With Solid
        .Version 9
        .Subtract ComponentName+": "+solid1, ComponentName+": "+solid2
        .Version 1
    End With
End Function
```