

# Estudo da Aplicação da Simetria de *Penrose* no Plano de Terra das Antenas de Microfita

Humberto Dionísio de Andrade, Bruno Rodrigues Fialho, Emerson Nunes dos Santos, Francisco Magno Monteiro Sobrinho, Isaac Barros Tavares Da Silva, Leonardo Oliveira de Sousa, Nickson Saymon de Oliveira.

**Resumo**— Este artigo apresenta uma investigação do efeito da aplicação da simetria de Penrose nas antenas de microfita avaliando a influência nos parâmetros de radiação a partir de mudanças dos valores dimensionais desse tipo de estrutura. Este modelo quase periódico será aplicado no plano de terra da antena para uma frequência de operação de 2,45GHz. Será analisado a variação do raio da simetria quase periódica de Penrose no plano de terra da antena. Os resultados medidos e simulados validam a influência desse arranjo nos parâmetros de radiação da antena, aumentando o ganho e a largura de banda.

**Palavras-Chave**— Antenas, Microfita, Penrose, Quase Periódico.

**Abstract**— This article presents an investigation of the effect of applying Penrose symmetry on microstrip antennas, evaluating the influence on the radiation parameters from changes in the dimensional values of this type of structure. This quasi-periodic model will be applied to the antenna ground plane for an operating frequency of 2.45GHz. The variation of the radius of the quasi-periodic Penrose symmetry in the ground plane of the antenna will be analyzed. The measured and simulated results validate the influence of this arrangement on the antenna radiation parameters, increasing gain and bandwidth.

**Keywords**— Antennas, Microstrip, Penrose, Almost Periodic.

## I. INTRODUÇÃO

Devido à crescente área da comunicação, os avanços tecnológicos são impulsionados para o desenvolvimento de novos equipamentos de transmissão de sinais, em particular as antenas de microfita, que possuem diversas aplicações, tais como: aplicações médicas, filtros, telefonia celular, GPS, equipamentos de redes sem fio, entre outros. Desta forma, o projeto das antenas de microfita tem em vista melhorar suas características de largura de banda, coeficiente de reflexão entre outros parâmetros [1].

As principais desvantagens encontradas nas antenas de microfita são: baixa eficiência, baixa potência, baixa diretividade e larguras de banda estreita [2, 3]. Para contornar esses problemas, novos estudos são impulsionados, na qual

pode-se destacar a implementação das técnicas de inserção de *Eletromagnetic Band Gap* (EBG).

Vários estudos sobre a tecnologia EBG foram publicados no ano de 1987, mostrando suas melhorias nos parâmetros de radiação de dispositivos móveis, podendo operar até a faixa óptica e serem constituídas de materiais dielétricos ou metálicos [2, 4, 5].

As estruturas de EBG apresentam propriedades aplicáveis na região de micro-ondas, na qual permitem um aumento na largura de banda dos dispositivos sem aumentar as dimensões da antena, como também a melhoria da eficiência de radiação [6]. Diante disso ocorreu estudos através da aplicação de geometria inspiradas em configuração do tipo (*Photonic Band-Gap*) PBG e EBG aplicados em antenas de microfita [7].

Estruturas periódicas e quase periódicas são utilizadas para aplicações baseadas em interferências eletromagnética, porém essa segunda ainda não foi amplamente reconhecida, mesmo podendo adicionar flexibilidade e riquezas significativas.

Modelos quase periódicos possuem ordem de longo alcance, isto significa que podem ser utilizados para descrever as propriedades de interferência ópticas e podem ser controladas modificando a geometria da estrutura [8].

O controle da emissão de ondas eletromagnéticas em estruturas quase periódicas é possível através da reflexão de Bragg, na qual essa estrutura mostra vários picos de reflexão que podem induzir uma distribuição de onda eletromagnética significativa, melhorando dessa forma alguns parâmetros de radiação das antenas de microfitas [9]. Diante dessa investigação sobre a aplicação do modelo quase periódico em antenas de microfitas, este artigo propõe a investigação da influência da simetria de Penrose nos parâmetros de radiação das antenas de microfitas, aplicada no plano de terra como uma alternativa de melhoria do seu desempenho.

## II. ESTRUTURA DE PENROSE

Na literatura o modelo de Penrose foi inserido sobre ressonador ótico na qual foi verificado um efeito na distribuição do campo elétrico, produzindo múltiplos modos de transmissão e obtendo um aumento da largura de banda [10, 11]. Desta forma, este trabalho estuda a influência da simetria quase periódica de Penrose na análise nos parâmetros de radiação da antena de microfita. A simetria de Penrose aplicada no plano de terra da antena de microfita deste trabalho, consiste em uma geometria cilíndrica com pretensão de variar o raio  $r$  obedecendo uma distância de centro a centro de sete vezes o raio como ilustra a Figura 1.

Humberto Dionísio, DET, UFERSA, Mossoró-RN, e-mail: humbertodionisio@ufersa.edu.br; Bruno Rodrigues, PPGEE, UFERSA, Mossoró-RN, e-mail: brunfialho@gmail.com; Emerson Nunes, CCEN, UFERSA, Mossoró-RN, e-mail: emerson.nunes.ds@gmail.com; Francisco Magno, PPGEE, UFRN, Mossoró-RN, e-mail: magnomonteiro7@gmail.com; Isaac Barros, DET, UFERSA, Mossoró-RN, e-mail: isaac.barros@ufersa.edu.br; Leonardo Oliveira, CCEN, UFERSA, Mossoró-RN, e-mail: leooliveirasousa98@gmail.com; Nickson Saymon, PPGEE, UFERSA, Mossoró-RN, e-mail: nicksonsaymon@gmail.com; Este trabalho foi parcialmente financiado por Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (135924/2022-7).

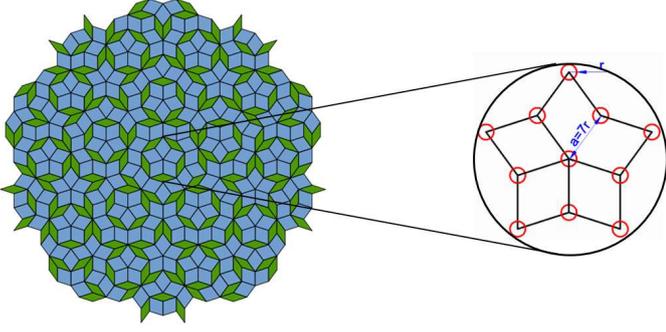


Fig. 1. Modelo quase periódico de Penrose.

Essa distância de centro a centro foi escolhida, para os cilindros não sobrepor um ao outro quando variar o raio. A altura do cilindro possui a mesma altura da camada de cobre impressa na placa de FR4.

### III. PROJETO DA ANTENA PADRÃO E DA APLICAÇÃO DA SIMETRIA QUASE PERIÓDICA DE PENROSE

Inicialmente a antena de microfita com *patch* retangular proposta, foi projetada pelo método da Cavidade e pelo método da Linha de Transmissão [3]. As dimensões do *patch* são determinadas pelas Equações de (1) a (6).

$$W = \frac{c}{f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{ref} + 0,3) \left( \frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0,258) \left( \frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (3)$$

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{ref}}} - 2\Delta L \quad (4)$$

onde,  $W$  é a largura do *patch*,  $f$  é a frequência de projeto,  $c$  é a velocidade da onda eletromagnética no espaço livre,  $\epsilon_r$  a permissividade do material dielétrico,  $\epsilon_{ref}$  a permissividade efetiva do material que é alterada devido ao efeito de franjeamento,  $h$  espessura do substrato,  $\Delta L$  a variação do comprimento do *patch* que é ocasionada devido ao efeito do franjeamento e  $L$  o comprimento do *patch*. Foi realizado o casamento entre a linha de microfita e o *patch* da antena aplicando a Equação (5) considerando a impedância de entrada  $Z_0$  em  $50 \Omega$  e calculando a largura da linha de microfita  $W_i$ , e o comprimento da linha  $L_i$  aplicando a Equação (6).

$$Z = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ref}} \left[ \frac{W_{in}}{h} + 1,393 + 0,677 \ln \left( \frac{W_{in}}{h} + 1,44 \right) \right]} \quad (5)$$

$$L_{in} = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (6)$$

Todas as dimensões da antena foram projetadas considerando o substrato de fibra de vidro (FR4) com permissividade relativa de 4,4, altura do substrato de 1,52 mm e frequência de projeto de 2,45 GHz. Na Figura 2, é mostrado todos os parâmetros dimensionais da antena. Para melhorar o casamento de

impedância foi aplicado no *patch* a técnica de *inset feed* o qual possui comprimento  $L_i$  e largura  $W_i$ .

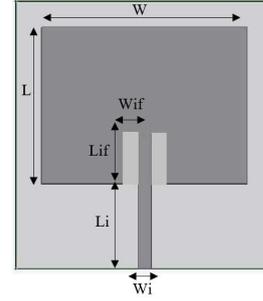


Fig. 2. Antena padrão.

Na Tabela I são apresentadas as dimensões da antena proposta.

TABELA I. DIMENSÕES DA ANTENA

$L = 28,09 \text{ mm}$	$L_i = 6,29 \text{ mm}$	$L_{if} = 8,85 \text{ mm}$
$W = 36,51 \text{ mm}$	$W_i = 2,24 \text{ mm}$	$W_{if} = 0,42 \text{ mm}$

Foram escolhidas as variações de raio de 0,3 mm, 0,6 mm e 0,9 mm como ilustra a Figura 3.

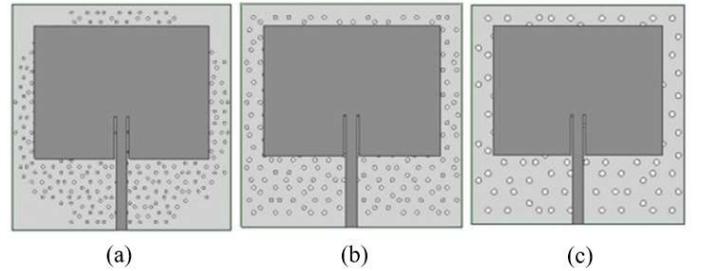


Fig. 3. (a) Simetria de Penrose com 0,3 mm (b) com 0,6 mm e (c) com 0,9 mm de raio.

As simulações destas antenas, visam obter dados comparativos de: Coeficiente de reflexão ( $S_{1,1}$ ), largura de banda e densidade de correntes de superfície sobre o *patch*. Os resultados das simulações serão descritos na próxima seção e após a análise dos resultados, será construída a antena que apresentar os melhores resultados.

### IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS SIMULADOS

Para a antena padrão e as configurações propostas do modelo quase periódico de Penrose descritas na seção anterior, foram realizadas simulações visando obter dados do Coeficiente de reflexão em função da frequência, bem como valores da largura de banda, diagrama de radiação e a densidade de corrente na superfície que se distribui ao longo do *patch* em cada configuração, investigando a influência da variação da simetria de Penrose no plano de terra das antenas de microfita.

A Figura 4 mostra os valores do  $S_{1,1}$  em função da frequência de operação para a antena padrão e para as configurações propostas. Percebe-se o deslocamento na frequência de operação das antenas quando se utiliza o modelo quase periódico, pois a retirada de material condutor para construir este modelo quase periódico altera as dimensões da antena, ocorrendo desta forma o deslocamento da frequência de operação. A antena padrão

possui o coeficiente de reflexão de -18 dB. Já as antenas com a simetria de Penrose apresentam -19,17 dB, -19,78 dB e -21,60 dB respectivamente para 0,3 mm, 0,6 mm e 0,9 mm para variação do raio da estrutura.

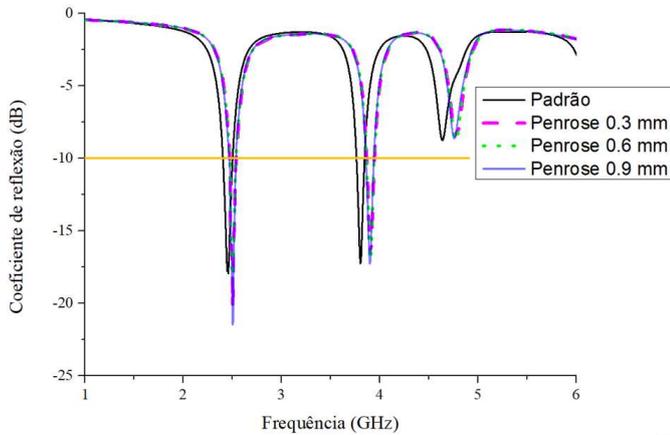


Fig. 4. Comparativo do coeficiente de reflexão para cada tipo de estrutura.

A Tabela II descreve de modo comparativo os principais resultados obtidos por intermédio da Figura 4. Na qual, para a configuração de 0,9 mm, obteve o menor coeficiente de reflexão em comparação com as outras antenas e a largura de banda maior que a antenna padrão.

TABELA II. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DETERMINÍSTICOS LOCAIS.

Antenas	$f_c$ (GHz)	$S_{1,1}$ (dB)	BW (%)
Padrão	2,45	-18,00	3,67
Penrose 0,3 mm	2,49	-19,17	4,02
Penrose 0,6 mm	2,49	-19,78	4,02
Penrose 0,9 mm	2,49	-21,60	4,02

A Figura 5 mostra o diagrama de radiação 2D e 3D da antenna padrão e a Figura 6 apresenta o diagrama de radiação 2D e 3D para todas as configurações propostas, pois como não tiveram mudanças significativas no diagrama de radiação, é apresentada apenas em uma figura a representação do resultado de todas as configurações.

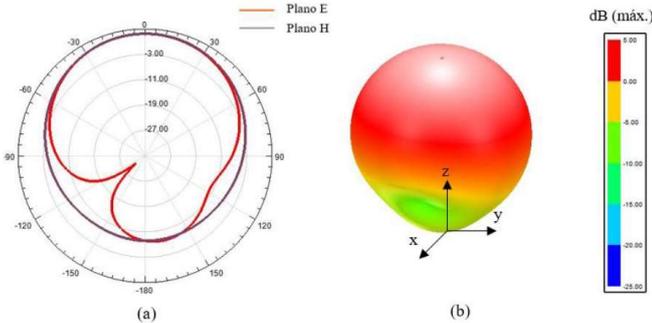


Fig. 5. Diagrama de radiação da antenna padrão (a) 2D e (b) 3D.

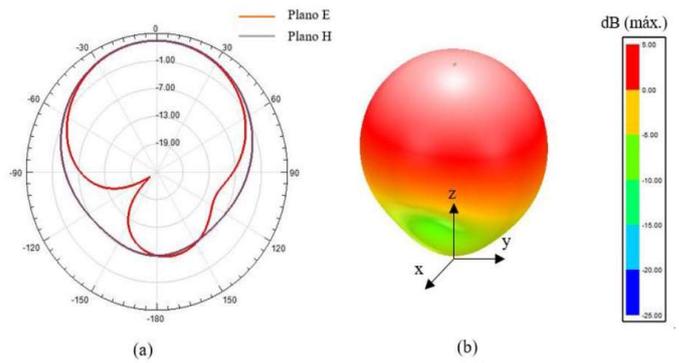


Fig. 6. Diagrama de radiação de todas as configurações da simetria de Penrose (a) 2D e (b) 3D.

Analisando os diagramas de radiação exibido nas Figuras 5 e 6 é observado que não houve variações significativas entre as antenas com o modelo de Penrose e todas apresentam características *broadside*. A Figura 7 mostra o comportamento da densidade de corrente sobre o *patch*, para as variações do raio da simetria de Penrose em comparação com a antenna padrão. Nela a densidade de corrente concentra-se mais na linha e nas extremidades da antenna, devido ao efeito de franjamento ser intenso nessa região. Com a inserção do modelo a densidade de corrente se torna mais linear sobre o *patch* o que justifica o aumento do coeficiente de reflexão, pois não ocorre muitas perdas de energia devido ao efeito joule no *patch* da antenna.

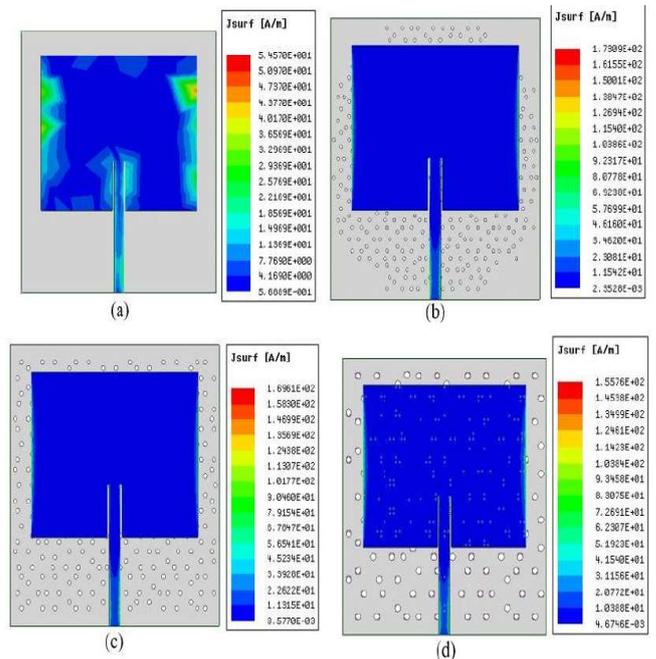


Fig. 7. Densidade de corrente sobre o *patch* da antenna padrão (a) e com modelo Penrose com raio igual a 0,3 mm (b), 0,6 mm (c) e 0,9 mm (d).

Com bases nos resultados apresentados, a antenna com raio de 0,9 mm foi escolhida para ser fabricada devido às suas características de radiação, principalmente pela largura de banda e coeficiente de reflexão na qual reforça sua escolha.

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Figura 8 mostra o dispositivo projetado e a realização das medições dos parâmetros estudados. Essa etapa foi realizada através do Analisador de Rede Vetorial (VNA) Rohde & Schwarz ZNB4 com faixa de frequência de 1 GHz à 6 GHz.

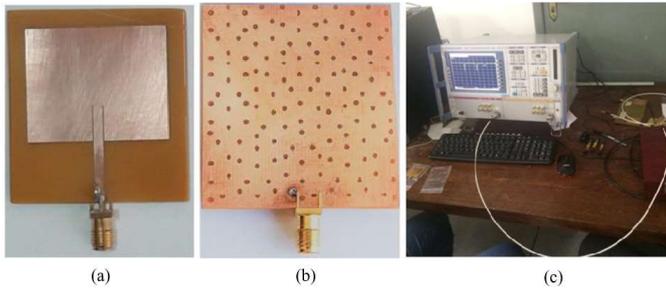


Fig. 8. Antena construída com a simetria de Penrose para 0,9 mm. Vista frontal (a) vista posterior (b) e VNA utilizado para realizar a medição (c).

A Figura 9 descreve o coeficiente de reflexão em função da frequência da antena simulada e medida. A faixa de frequência medida no primeiro modo começa de 2,45 GHz a 2,55 GHz com -20,31 dB, enquanto a frequência simulada começa a partir de 2,45 GHz até 2,55 GHz com -21,60 dB. Observa-se que há uma concordância entre os resultados simulados e medidos.

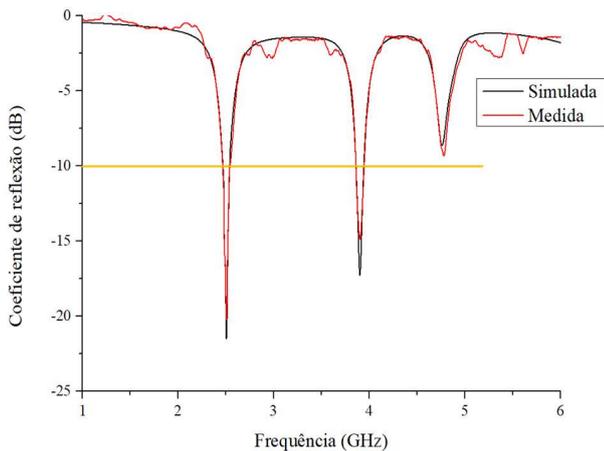


Fig. 9. Resultado do coeficiente de reflexão medido e simulado da antena com simetria de 0,9 mm.

Na tabela III é possível observar todo o comparativo dos resultados medidos e simulados. Tanto a antena medida e simulada abrange a frequência de projeto de 2,45 GHz.

TABELA III. PRINCIPAIS RESULTADOS DA ANÁLISE DAS ANTENAS MEDIDA E SIMULADA.

Antenas	$f_r$ (GHz)	Range de frequência (GHz)	$S_{1,1}$ (dB)	BW (%)
Simulada	2,49	2,45 – 2,55	-21,60	4,02
Medida	2,49	2,45 – 2,55	-20,31	4,02

Os resultados medidos e simulados apresentam coerência entre si, onde é possível observar a influência do modelo quase periódico de Penrose nos parâmetros de radiação das antenas de microfita.

VI. CONCLUSÃO

Ao inserir simetria de Penrose no plano de terra da antena de microfita desloca-se a frequência de operação da antena de acordo com a quantidade de material retirado. Destaca-se também que ocorrerão melhorias na largura de banda, no coeficiente de reflexão e na densidade de corrente de superfície ao utilizar o modelo quase periódico de Penrose em comparação com a antena padrão. Este estudo, mostra que é possível aplicar a simetria quase periódico de Penrose para melhorar o coeficiente de reflexão e a largura de banda da antena de microfita como também a densidade de corrente sobre o patch.

AGRADECIMENTOS

Esse estudo foi financiado em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq. Os autores agradecem também à CAPES, UFERSA, GEPEAT e a equipe do Laboratório de Telecomunicações e Micro-ondas da UFERSA.

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 54, No. 1, February 2012.
- [2] MONTEIRO SOBRINHO, Francisco Magno et al. Estudo da aplicação de estruturas quase periódicas em antenas de microfita baseada na simetria de penrose. 2018.
- [3] C. A. Balanis, [Antena Theory], Wiley-Interscience, New Jersey, 146-149 (2005).
- [4] G. Kostovski, P. R. Stoddart and A. Mitchell. The Optical Fiber Tip: An Inherently Light-Coupled Microscopic Platform for Micro and Nanotechnologies. Adv. Mater. 26, p. 3798 -3820, 2014.
- [5] L.C.M. OLIVEIRA, PBG structure applications in microwave planar devices – Lines and antennas – In substrate dielectric and semiconductors, Technology Development and Characterization, Campinas, SP, 2001.
- [6] J. L. da Silva, H. D. de Andrade, A. S. Maia, H. C. Fernandes, I. B. da Silva, A. S. Sombra, and J. P. Pereira. (2016). Performance of microstrip patch antenna due EBG/PBG arrangements insertion. Microwave and Optical Technology Letters, 58(12), 2933-2937.
- [7] E. Yablonovitch e T. J. Gmitter: “Photonic band structure: the face-centered-cubic case”, Journal of the Optical Society of America A, p. 1792 Setembro de 1990.
- [8] J. L. da Silva, H. D. de Andrade, A. S. Maia, H. C. Fernandes, I. B. da Silva, A. S. Sombra, and J. P. Pereira. (2016). Performance of microstrip patch antenna due EBG/PBG arrangements insertion. Microwave and Optical Technology Letters, 58(12), 2933-2937.
- [9] Z. Valy Vardeny, A. Nahata and A. Agrawal. Optics of photonic quasicrystals. Nature photonics 7, p. 177-187, 2013.
- [10] A. Ronzani, N. Michele, L. Lianhe, A. Tredicucci, E. Linfield and M. S. Vitiello. Distributed feedback Terahertz QCLs with quasi-periodic Penrose Patterning. . 2013 IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. p. 2162-2035, 2013.
- [11] M. Bayindir, E. Cubukcu, I. Bulu and E. Ozbay. . Photonic bad gap effect and localization in two-dimensional Penrose lattice, 2, QELS 2001/TUESDAY AFTERNOON, 2001.