
DESENVOLVIMENTO DE UM TOMÓGRAFO ULTRASSÔNICO PARA SIMULAÇÃO DO MONITORAMENTO DINÂMICO DE INJEÇÃO DE CO₂ EM RESERVATÓRIOS DE HIDROCARBONETOS

Eduardo T. F. Santos*
eduardot@ifba.edu.br

Amauri Oliveira†
amauri@ufba.br

*Grupo de Pesquisa em Sinais e Sistemas, Instituto Federal da Bahia
Rua Emídio dos Santos, S/N, Barbalho
CEP : 40301-15, Salvador, BA, BRASIL, +55-71-2102-9456

†Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia
Rua Aristides Novis, 02, , Escola Politécnica, Federação
CEP : 40210-630, Salvador, BA, BRASIL, +55-71-3237-2367

ABSTRACT

Development of an Ultrasound Tomograph for Simulation of Dynamic Monitoring of CO₂ Injection into Hydrocarbons Reservoir

The main goal of this paper is to present the development of an ultrasonic tomograph that simulates the dynamic monitoring of CO₂ injection into a hydrocarbon reservoir. It is proposed the use of ultrasonic tomography to detect sound velocity changes caused by a phantom inside a small-scale medium, in order to simulate the dynamic monitoring on field, since CO₂ injection also causes sound velocity changes in the hydrocarbon reservoir. The real acquisition system simulated by this tomograph is comprised by acoustic sources evenly spaced along an approximately vertical well in parallel to another well, both drilled in the oilfield, where the acoustic receivers are evenly spaced. The acoustic signal propagates from each source and crosses the medium between wells to reach the receivers in another well. From traveltimes recorded at receivers, one can estimate the sound propagation velocity of the medium between sources and receivers. The subsurface image is then estimated by use of seismic tomography methods. That image is a graphical rep-

resentation of the sound velocity field and yields the identification of CO₂ plume contour injected into hydrocarbons reservoirs. Thus, one can automate the CO₂ injection monitoring in order to preserve the field operation safety against undesirable and potentially lethal CO₂ leaks.

KEYWORDS: tomography, digital signal processing; carbon capture and sequestration, reservoir monitoring, dynamic imaging, permanent acquisition systems, computational methods.

RESUMO

O principal objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento de um tomógrafo ultrassônico que simula o monitoramento dinâmico da injeção de CO₂ em um reservatório de hidrocarbonetos. É proposto o uso de tomografia ultrassônica para detectar mudanças na velocidade do som causadas por um corpo de prova dentro de um meio com escala reduzida, visando simular o monitoramento dinâmico em campo, uma vez que a injeção de CO₂ também causa mudanças na velocidade do som no reservatório de hidrocarbonetos. O sistema de aquisição real simulado por este tomógrafo é composto por fontes acústicas espaçadas uniformemente ao longo de um poço aproximadamente vertical em paralelo a outro poço, perfurados em um campo de exploração de hidrocarbonetos,

Artigo submetido em 23/12/2010 (Id.: 1237)
Revisado em 17/03/2011, 26/06/2011, 11/09/2011
Aceito sob recomendação do Editor Associado Prof. Flávio Henrique Vasconcelos

onde os receptores são dispostos uniformemente. O sinal acústico se propaga a partir de cada fonte e percorre o meio entre os poços até atingir os receptores no outro poço. A partir dos tempos de trânsito do sinal registrado nos receptores, pode-se estimar a velocidade de propagação do meio entre fontes e receptores. A imagem do subsolo é então estimada utilizando-se algoritmos de tomografia sísmica. Esta imagem é uma representação gráfica do campo de velocidades e permite identificar os contornos da pluma do CO₂ injetado em reservatórios de hidrocarbonetos. Assim, pode-se automatizar o monitoramento contínuo da injeção de CO₂ de modo a preservar a segurança da operação de campo contra vazamentos de CO₂ indesejados e potencialmente letais.

PALAVRAS-CHAVE: tomografia, processamento digital de sinais, captura e sequestro de carbono, monitoramento de reservatórios, imageamento dinâmico, sistemas permanentes de aquisição, métodos computacionais.

1 INTRODUÇÃO

A comunidade científica internacional tem dedicado grande atenção ao aquecimento global, em decorrência de impactos acumulativos sobre o planeta Terra. Grandes investimentos em P&D têm sido realizados visando minimizar os efeitos adversos das atividades humanas, dentre os quais destaca-se a emissão de CO₂ para a atmosfera.

O monitoramento dinâmico da injeção e sequestro de CO₂ tem recebido grande atenção pela comunidade científica internacional, uma vez que o aquecimento global é um dos temas mais discutidos na agenda internacional, o que tem pressionado os governos a adotarem novas políticas energéticas que levem à redução do impacto ambiental, impulsionando um crescente investimento por parte dos governos e da indústria internacional do petróleo em tecnologias menos agressivas ao meio ambiente (Harris et al., 2007).

Assim, este trabalho contempla de modo singular e bastante especial tanto o segmento ambiental (sequestro de CO₂) com o de exploração (injeção de CO₂ para recuperação de petróleo), o que é extremamente relevante para um contexto global de crescente demanda de energia, mas que ao mesmo tempo requer novas tecnologias para a redução do impacto ambiental pela redução da emissão de CO₂ para a atmosfera.

Pesquisadores têm proposto diferentes soluções para minimizar a emissão de CO₂ para a atmosfera. Dentre estas, podem ser citadas a utilização de fontes alternativas de energia e a redução ou filtragem de gases residuais. Entretanto, indústrias e usinas termoeletricas continuam a produzir significativa emissão de CO₂ para a atmosfera, em um cenário com impacto ambiental adverso projetado para as próximas décadas (Harris et al., 2007). Estas emissões poderiam ser

reduzidas caso o CO₂ fosse injetado em reservatórios naturais ao invés de emitido para a atmosfera (sequestro de CO₂). Além disso, a injeção de CO₂ pode ser utilizada para aumentar o fator de recuperação de hidrocarbonetos (Lazaratos and Marion, 1997).

Neste contexto, este artigo visa apresentar o desenvolvimento de um sistema eletrônico de tomografia sísmica para simular, em escala reduzida, o monitoramento dinâmico da injeção de CO₂ em reservatórios de hidrocarbonetos, evitando desta forma que vazamentos indesejáveis de CO₂ possam ter consequências letais e minimizando os impactos ambientais de atividades poluentes.

Assim, as aplicações da tecnologia proposta podem ser divididas em duas categorias:

- Indústria de exploração e produção de petróleo: redução dos riscos de eventual vazamento de CO₂ para a atmosfera durante a injeção de CO₂ para recuperação avançada de hidrocarbonetos (Lazaratos and Marion, 1997), (Lumley, 2001);
- CCS: captura e sequestro de CO₂ de indústrias e usinas termoeletricas para a injeção em reservatórios naturais tais como aquíferos salinos, reservatórios de petróleo ou jazidas de carvão economicamente inviáveis para exploração, minimizando assim a emissão de CO₂ para a atmosfera.

As Figuras 1 e 2, adaptadas de (Harris et al., 2007), ilustram o campo de velocidades de um reservatório e o contraste causado no campo de velocidades pela injeção de CO₂, respectivamente. A Figura 1 mostra um modelo sintético do subsolo na forma de campo de velocidades para um reservatório natural hipotético utilizado para sequestro de CO₂. Entretanto, esta região apresenta uma falha geológica, o que pode ser identificado visualmente como uma descontinuidade entre as camadas do modelo. Esta falha é um caminho de escape para o CO₂ injetado, levando à formação de uma pluma em direção à superfície, uma situação indesejável e potencialmente danosa (Figura 2).

A injeção e o sequestro de CO₂ têm em comum o fato de que, em ambos, o CO₂ armazenado causa um contraste negativo na velocidade de propagação do som que pode ser monitorado por tomografia sísmica (Lazaratos and Marion, 1997). O monitoramento utilizando inversão de dados sísmicos, que permite estimar o campo de velocidades de propagação do som em um meio, possibilita identificar a formação da pluma de CO₂ como um contraste negativo do campo de velocidades inicial, conforme pode ser visto na Figura 2. Isto tem grande relevância sob o ponto de vista de avaliação da segurança da operação (Lumley, 2001).

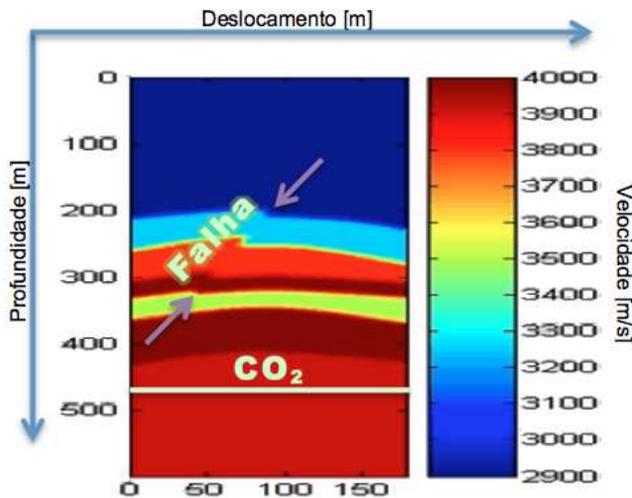


Figura 1: Modelo do campo de velocidades em m/s de um reservatório geológico natural atravessado por uma falha (descontinuidade indicada pelas setas). Esta falha poderia levar a um possível escape indesejável de CO₂ injetado no subsolo para a atmosfera, o que justifica o monitoramento contínuo da região utilizando tomografia sísmica.

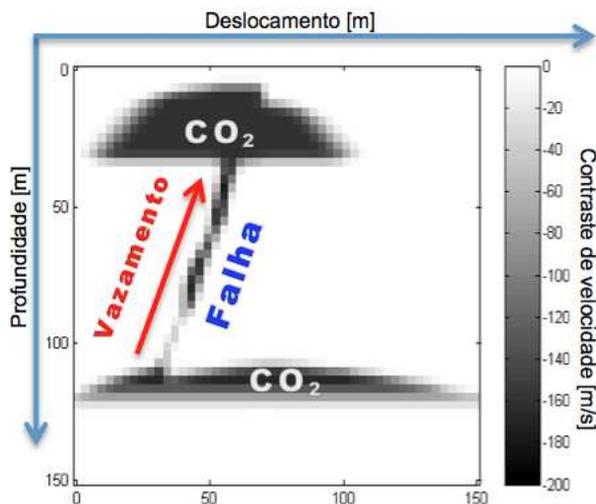


Figura 2: Contraste negativo de velocidade em m/s no meio em relação ao campo de velocidades original, causado pelo vazamento para a superfície do CO₂ injetado, o qual reduz a velocidade de propagação do som.

Assim, esta pesquisa busca o desenvolvimento de uma metodologia de monitoramento permanente em campos instrumentados, o que permitirá obter imagens atualizadas do CO₂ armazenado no subsolo. A pesquisa também objetiva reduzir o tempo de processamento dos dados sísmicos bem como a utilização de aquisições parciais (Bouska, 1997) ao longo do tempo, visando a redução de tempo e custos decorrentes.

No paradigma proposto, os dados adquiridos serão processados de modo a se obter imagens do subsolo de forma incremental, integrando as características temporais (Ajo-Franklin et al., 2005) da aquisição e da evolução do reservatório.

2 FONTES E RECEPTORES ACÚSTICOS

Para obter imagens do subsolo, faz-se necessário realizar a aquisição de dados, que neste trabalho são acústicos. Fontes acústicas piezoelétricas podem ser utilizadas como transmissores de pulsos acústicos que, após atravessarem o meio em estudo, atingem receptores acústicos. A velocidade de propagação da região do meio atravessada pode ser calculada diretamente a partir da divisão entre a distância fonte/receptor e o tempo de trânsito entre estes.

A trajetória percorrida pode ser modelada pela utilização de acústica geométrica, ou seja, pela utilização da teoria do raio, que é uma aproximação de alta frequência da propagação do som, de forma similar ao que é feito para a ótica geométrica. Assim, o caminho entre a fonte e o receptor é representado por uma curva denominada como raio. O cálculo da trajetória destas curvas entre fontes e receptores é obtido pela resolução iterativa de equações diferenciais, sendo denominado traçado de raios (Andersen and Kak, 1982).

A aquisição de dados acústicos também requer o condicionamento adequado dos sinais. A utilização de técnicas de detecção sensível à fase para melhorar a relação sinal/ruído é um dos tópicos a serem investigados em trabalhos futuros. Para isto, pode-se utilizar um Amplificador Lock-in Digital, que realiza as operações de seu equivalente analógico utilizando processamento digital de sinais (Wang, 1990).

Neste trabalho é discutido o desenvolvimento de um tomógrafo acústico ultrassônico com fontes e receptores ultrassônicos para a obtenção de uma imagem de um meio. Os experimentos realizados em pequena escala motivaram o uso de frequências mais altas do que as utilizadas em campo, uma vez que a resolução espacial obtida depende do comprimento de onda utilizado.

O diagrama de blocos do tomógrafo ultrassônico é mostrado na Figura 3, detalhado a seguir. O meio em estudo, representado pelo quadrado azul, consiste em uma cuba de vidro

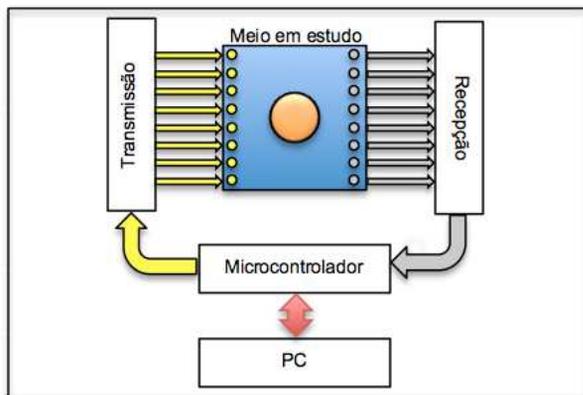


Figura 3: Diagrama de blocos do tomógrafo ultrassônico desenvolvido.

com um corpo de prova laranja ao centro. Neste meio se propagam as ondas ultrassônicas oriundas dos transdutores piezoelétricos transmissores à esquerda (círculos amarelos) em direção aos transdutores piezoelétricos receptores à direita (círculos cinzas). São medidos os tempos de trânsito entre todas as combinações dos 8 transmissores e 8 receptores, totalizando 64 tempos de trânsito.

O bloco de transmissão gera o sinal elétrico que será convertido em ondas ultrassônicas pelos transdutores transmissores, enquanto o bloco de recepção é utilizado para filtrar os sinais registrados pelos transdutores receptores e compará-los com um limiar para detectar a chegada do pulso ultrassônico após atravessar o meio em estudo. O microcontrolador dispara cada uma das fontes através do bloco de transmissão e mede o tempo entre o disparo do pulso de ultrassom e a detecção do pulso pelo bloco de recepção.

O microcontrolador recebe comandos de um computador através de um protocolo de comunicação simples, que comanda o disparo entre uma fonte específica e um receptor específico, retornando o tempo de trânsito para o computador.

O computador é responsável pelo cálculo do campo de velocidades utilizando inversão tomográfica, exibindo uma imagem que representa o meio em estudo, possibilitando assim detectar perturbações que alterem a velocidade de propagação do som no meio.

O corpo de prova laranja aumenta o tempo efetivo de propagação as ondas sonoras que o atingem, logo, atua como um contraste negativo na velocidade efetiva de propagação do som no meio em estudo. Este corpo de prova simula o contraste negativo de velocidade causado pelo CO₂ no meio que o armazena. Assim, as técnicas desenvolvidas para obter

o campo de velocidades do meio e a detecção de contrastes negativos de velocidade ao longo do tempo possibilitam sua aplicação para se obter uma imagem da região ocupada pelo agente causador da perturbação em campo, ou seja, o CO₂.

Os resultados dos experimentos com o tomógrafo ultrassônico permitirão realizar testes controlados de obtenção de imagens que serão úteis para o desenvolvimento de um sistema permanente de monitoramento de injeção de CO₂, em escala real utilizando frequências abaixo de 1 kHz, o que irá requerer um experimento em campo devido ao maior comprimento de onda envolvido. As imagens obtidas permitirão rastrear os contornos da pluma de CO₂ armazenado e se o mesmo está indo em direção à superfície, auxiliando a avaliação de segurança da operação de injeção de CO₂.

3 TOMOGRAFIA SÍSMICA

A tomografia é uma técnica de reconstrução de imagem (mapeamento de propriedades físicas), a partir das somas dos valores das propriedades em determinadas direções (projeções). A reconstrução tomográfica é um tipo especial de problema inverso que permite estimar uma função a partir de integrais de linha da mesma. Uma aplicação importante desta técnica de inversão é a tomografia computadorizada, utilizada em Medicina (Andersen and Kak, 1982).

Em Geofísica, utiliza-se a tomografia sísmica (Figuras 4 e 5), que difere da utilizada em aplicações médicas porque não pode realizar uma volta completa em torno do objeto de estudo, utiliza ondas sísmicas, possui uma geometria dos raios entre fontes e receptores mais esparsa e complexa, dentre outros fatores que aumentam a ambiguidade do problema (Matarese, 1993).

A Figura 5 mostra uma geometria típica de aquisição de dados sísmicos para tomografia, com fontes acústicas distribuídas ao longo de um poço e receptores acústicos distribuídos ao longo de outro poço. Deste modo, as ondas acústicas se propagam entre os pares de fontes e receptores, possibilitando estimar a velocidade de propagação do meio entre eles. Utilizando-se tomografia sísmica, obtém-se uma imagem que representa o campo de velocidades entre estes dois poços, como pode ser visto na Figura 1. Este tipo de geometria é denominado interpoço e foi adotado ao longo deste trabalho (Schots, 1990).

A tomografia sísmica é utilizada na exploração de hidrocarbonetos através da estimação das propriedades da estrutura litológica do subsolo. A tomografia de tempo de trânsito, ou tomografia de raio, utiliza o tempo de trânsito entre as fontes e os receptores como vetor de dados observados \mathbf{d} na inversão. A forma de onda é desconsiderada (amplitude \times tempo). A matriz G utilizada na inversão da tomografia de tempos

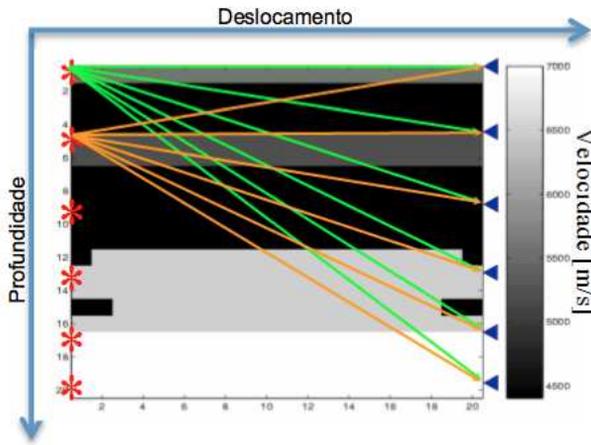


Figura 4: Aquisição de tempos de trânsito para tomografia sísmica, com transmissores (em vermelho) no poço vertical à esquerda e receptores (em azul) no poço vertical à direita.

de trânsito descreve a geometria dos raios em um problema tomográfico. Os parâmetros do modelo a serem estimados estão no vetor \mathbf{m} , e correspondem à vagarosidade (inverso da velocidade). O tempo de trânsito é a integral de linha da vagarosidade ao longo do raio (Matarese, 1993):

$$t = \int_r s(x, z) dl, \quad (1)$$

onde:

t é o tempo de trânsito;

r é o raio ao longo do qual é realizada a integração;

dl é o elemento de raio;

$s(x, z)$ é a vagarosidade do meio no ponto (x, z) , onde x é a coordenada horizontal e z é a coordenada vertical.

Como o caminho do raio depende da vagarosidade (Andersen and Kak, 1982), a equação do tempo de trânsito é não-linear. Para simplificar a resolução do problema, reduz-se o mesmo a um modelo linear.

O tempo de trânsito observado corresponde à medição do tempo no experimento físico real enquanto o tempo de trânsito calculado refere-se à estimativa de tempo obtida utilizando-se o modelo linearizado do fenômeno. Assim, a estimação dos parâmetros é obtida minimizando-se a diferença entre os tempos de trânsito observados (experimento real) e os tempos de trânsito calculados (modelo simulado).

Expandindo a Equação eq1 do tempo de trânsito em série de Taylor (Schots, 1990):

$$t = g[s(x, z)], \quad (2)$$

onde:

$$g[s(x, z)] = \int_r s(x, z) dl, \quad (3)$$

Expandindo a série de Taylor em torno de \mathbf{s}^0 (símbolos em negrito representam vetores):

$$\mathbf{t} = \mathbf{t}^0 + \frac{\partial g}{\partial \mathbf{s}} (\mathbf{s} - \mathbf{s}^0) + \dots, \quad (4)$$

Truncando a série na primeira derivada, obtém-se:

$$\mathbf{t} - \mathbf{t}^0 = \frac{\partial g}{\partial \mathbf{s}} (\mathbf{s} - \mathbf{s}^0), \quad (5)$$

ou seja,

$$\Delta \mathbf{t} = G \Delta \mathbf{s}, \quad (6)$$

onde:

O vetor $\Delta \mathbf{t}$ corresponde às diferenças entre os tempos de trânsito calculados e os tempos de trânsito observados para o modelo;

O vetor $\Delta \mathbf{s}$ corresponde às diferenças entre as vagarosidades do modelo inicial e as vagarosidades verdadeiras;

A matriz G contém os elementos g_{ij} que correspondem às distâncias que o j -ésimo raio percorre no i -ésimo bloco (Figura 4).

As equações que descrevem a tomografia de tempo de trânsito, aproximada por um modelo linear, podem então ser formuladas como:

$$\mathbf{d} = G\mathbf{m}, \quad (7)$$

ou, utilizando uma notação mais específica:

$$\mathbf{t} = G\mathbf{s}, \quad (8)$$

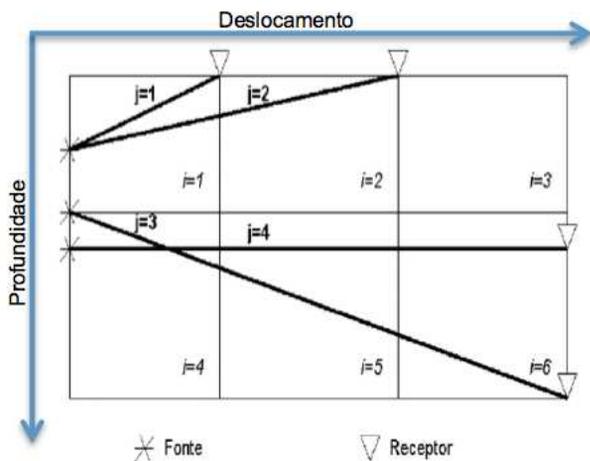


Figura 5: Diagrama representando a trajetória dos j -ésimos raios nos i -ésimos blocos em uma tomografia (VSP: fontes no poço e receptores na superfície).

sendo

$$s = \frac{1}{\nu}, \quad (9)$$

onde:

\mathbf{t} é o vetor de tempos de trânsito, que corresponde ao vetor de dados observados \mathbf{d} ;

G é a matriz núcleo ou tomográfica, a qual descreve a geometria dos raios em um problema tomográfico, a qual é conhecida para uma determinada geometria de aquisição, ou seja, para um determinado posicionamento fixo das fontes e receptores;

\mathbf{s} é o vetor de vagarosidade (inverso da velocidade), que representa os parâmetros do modelo a serem determinados.

O caminho do raio da fonte ao receptor é dado pelos elementos da matriz G :

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1N} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{M1} & g_{M2} & \cdots & g_{MN} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

onde:

M é o número total de raios = número de fontes \times número de receptores;

N é o número de blocos no qual a área em estudo foi discretizada.

Portanto cada linha de G corresponde ao caminho de um raio. A matriz G é esparsa, pois cada raio intercepta apenas uma pequena parte do modelo. Algoritmos específicos para a resolução de sistemas lineares esparsos podem deste modo ter uma eficiência computacional superior aos algoritmos convencionais. A inversão tomográfica permite estimar o vetor \mathbf{s} (distribuição de vagarosidades) a partir do vetor \mathbf{t} de tempos de percurso registrados nos receptores, da matriz G e de um modelo inicial \mathbf{s}_0 .

Utilizando um modelo linear do subsolo, a reconstrução tomográfica pode então ser obtida através da resolução de um sistema linear de equações. Os métodos de resolução de sistemas lineares baseados em inversão de matrizes têm como vantagens o fato de que qualquer arranjo fonte/receptor pode ser tratado facilmente e não ser necessário adotar uma forma simples de trajetória dos raios. A principal desvantagem é que estes métodos são lentos e em alguns casos podem se tornar inviáveis na solução de problemas com grande número de parâmetros. Métodos baseados na Transformada de Fourier e métodos de retropropagação filtrada (Devaney, 1982) são rápidos embora inflexíveis em relação à geometria e ao caminho do raio assumido. Algoritmos iterativos de resolução de sistemas lineares (conjugado gradiente, ART, SIRT, etc.) são soluções de compromisso que tentam conciliar o melhor dos dois tipos de abordagem para reconstrução tomográfica.

Como o modelo real da tomografia de tempo de trânsito é não-linear porque a matriz G depende do vetor \mathbf{m} , pode-se utilizar a inversão tomográfica não-linear (Matarese, 1993) ou linearizar a inversão, considerando que o sistema é linear na vizinhança de um determinado modelo (Schots, 1990). Neste trabalho é adotada a inversão linear, com uma matriz G obtida a partir do traçado de raios retos entre fontes e receptores.

Para estimar as propriedades do meio em estudo, o sistema linear correspondente é resolvido utilizando-se um algoritmo de resolução de sistemas lineares como, por exemplo, o conjugado gradiente com regularização (Mafra De Sá, 1996) ou então o método dos mínimos quadrados amortecidos:

$$\hat{\mathbf{m}} = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T \mathbf{d}, \quad (11)$$

onde:

\hat{m} é o modelo estimado, ou seja, o campo de velocidades com seus elementos reordenados na forma de um vetor;

G é a matriz núcleo ou tomográfica. A transposta da matriz foi representada pela letra "T" e a inversa da matriz foi representada por -1 ;

I é a matriz identidade com as mesmas dimensões que $G^T G$;

λ é um fator de regularização (escalar real), o qual minimiza a energia da solução, podendo evitar assim soluções espúrias devido à insuficiência de dados ou ao condicionamento da matriz G . O valor de λ pondera entre a minimização do erro nos tempos de trânsito e a minimização da energia da solução (Mafrá De Sá, 1996)

d é o vetor de tempos de trânsito medidos em campo, também denominado como vetor de dados observados;

4 PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Aquisições tomográficas em campo costumam usualmente entre 1 e 2 milhões de dólares, sendo que este valor depende das especificações do serviço prestado, demandando considerável esforço e tempo para serem realizadas (Harris et al., 2007). O custo da operação varia de acordo com a geometria de aquisição, as dimensões da área em estudo, os equipamentos utilizados, a preparação e interrupção dos poços para a aquisição, dentre outros diversos fatores. Acrescente-se a isto o fato de serem necessárias sucessivas aquisições tomográficas em intervalos de 6 meses a 1 ano para monitorar o CO_2 injetado para armazenamento geológico, visualizando assim as alterações no campo de velocidades causadas pelo CO_2 . A subtração entre dois campos de velocidades obtidos para uma mesma região, em diferentes aquisições tomográficas ao longo do tempo, mostra um contraste negativo da velocidade de propagação do som na região onde o CO_2 está armazenado.

Devido aos custos da operação em campo, à escala de tempo envolvida e aos diversos fatores que influenciam a aquisição em campo, optou-se por simular a operação de modo a possibilitar a pesquisa e desenvolvimento de técnicas para o monitoramento de contrastes no campo de velocidades utilizando-se tomografia. Assim, para assegurar a viabilidade, a repetibilidade e o total controle sobre o meio em estudo, foi desenvolvido um tomógrafo acústico ultrassônico para realizar os experimentos de obtenção de imagens. A abordagem de simulação física em pequena escala adotada representa uma solução de compromisso entre simulações computacionais e experimentos em campo, unindo o melhor dos dois mundos.

A medição de tempo de trânsito em campo pode ser realizada utilizando-se extensos cabos, comunicação sem fio e/ou sinais de referência de tempo de satélites para GPS. Na aqui-

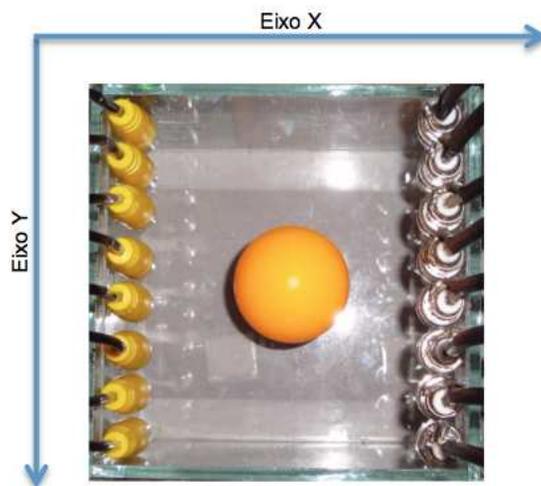


Figura 6: Detalhe do tomógrafo acústico ultrassônico. Fontes à esquerda (em amarelo). Receptores à direita (metálicos). Corpo de prova no centro da cuba de vidro, em laranja (esfera de plástico oca).

sição tomográfica, os poços geralmente não estão mais distantes do que 1 km, sendo a distância entre eles usualmente na ordem de centenas de metros. As profundidades envolvidas podem variar bastante mas geralmente não excedem 1 km para monitoramento da injeção de CO_2 . O número de fontes e receptores em campo pode chegar a 200 cada. Cada fonte é excitada individualmente e os sismogramas para todos os receptores são registrados para posterior obtenção dos tempos de trânsito. Uma única fonte também pode ser utilizada alternativamente, sendo deslocada em profundidade a cada disparo, simulando assim diversas fontes em diferentes posições sendo disparadas uma após a outra.

A plataforma experimental desenvolvida consiste em um tomógrafo acústico (Figura 6) com 8 fontes e 8 receptores ultrassônicos e em um sistema computacional implementado em PC para controlar o tomógrafo e processar os tempos de trânsito medidos visando a obtenção de uma imagem que representa o campo de velocidades da região em estudo.

O tomógrafo acústico desenvolvido possibilitou a medição de 64 tempos de trânsito, ou seja, entre todas as combinações possíveis de pares fonte/receptor (Figura 7). Isto possibilita a obtenção de imagens com resolução 8×8 da região em estudo, podendo ser ampliada futuramente pelo aumento do número de transdutores ultrassônicos.

O projeto dos circuitos foi baseado nas informações contidas na folha de dados do transdutor ultrassônico utilizado (Figuras 8 e 9). Este transdutor consiste em um cilindro en-

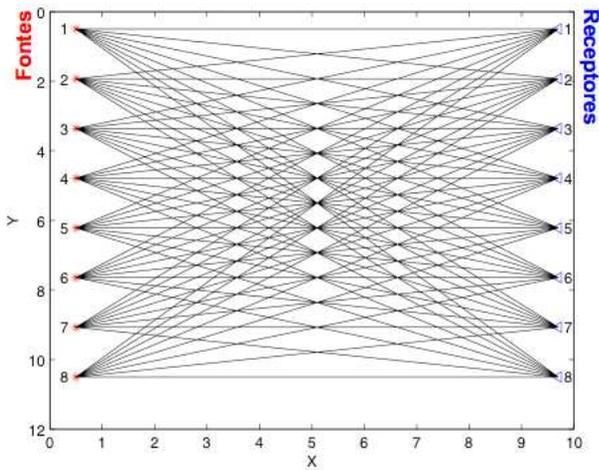


Figura 7: Geometria de aquisição utilizada no tomógrafo acústico (dimensões em cm). Fontes representadas à esquerda (em vermelho). Receptores representados à direita (em azul). Raios entre fontes e receptores representados por 64 linhas pretas .

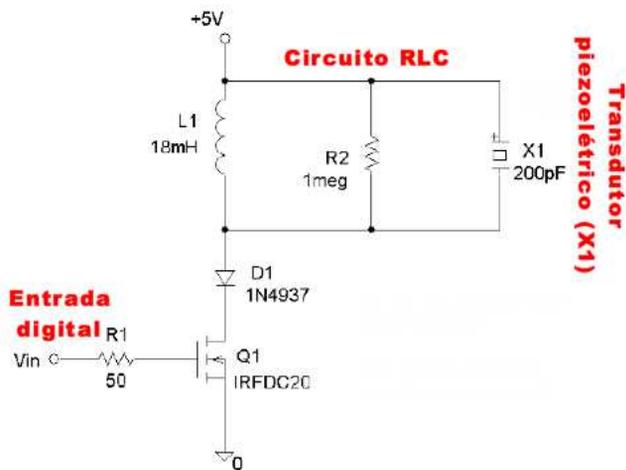


Figura 8: Circuito do transmissor ultrassônico, também denominado como fonte. A entrada digital é utilizada para disparar um circuito RLC que compreende o transdutor piezoelétrico X1. Fonte: folha de dados da Measurement Specialties (item 1005919-1).

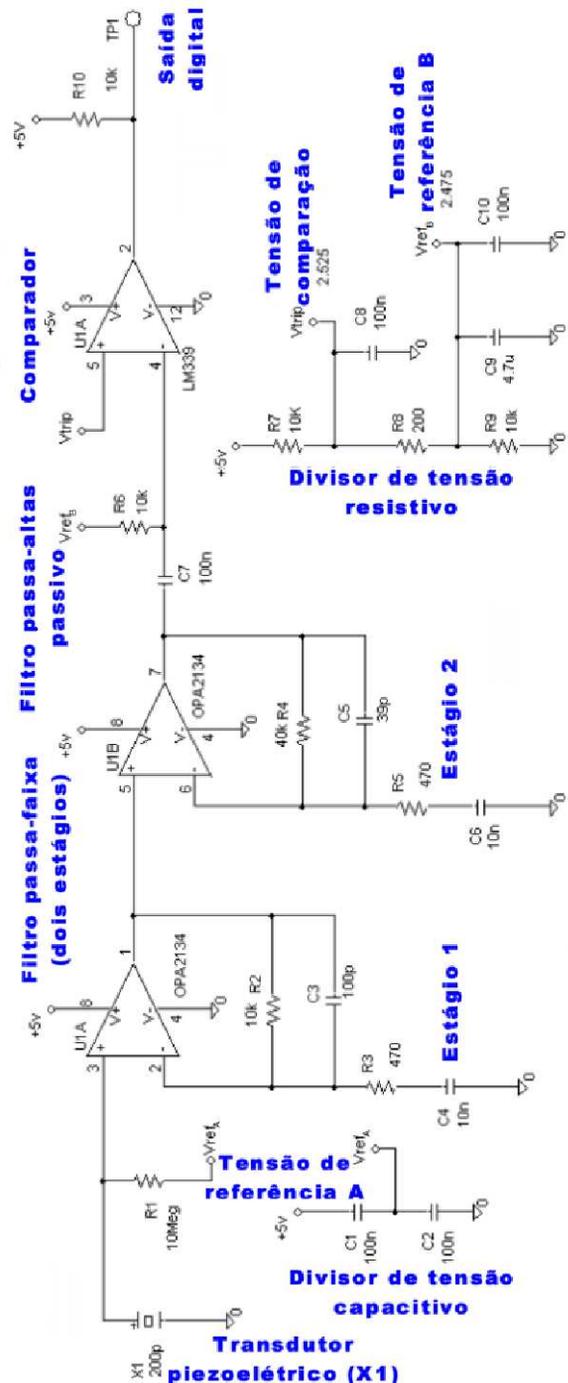


Figura 9: Circuito do receptor ultrassônico. Fonte: folha de dados da Measurement Specialties (item 1005919-1).

volto em piezofilme (PVDF), emitindo o sinal ultrassônico em todas as direções no plano horizontal ao sensor. O componente é fabricado pela empresa *Measurement Specialties* (#1005919-1) e é utilizado tanto na fonte como no receptor (Figura 10).

O tomógrafo ultrassônico desenvolvido possui 8 fontes e 8 receptores porém o circuito final não requer a replicação completa dos circuitos. O comparador de tensão utilizado no receptor é quádruplo, requerendo apenas uma duplicação deste circuito em particular. As tensões de referência (V_{ref_A} e V_{ref_B}) e disparo (V_{trip}) não requerem replicação dos circuitos respectivos. Foi utilizado um valor menor do resistor $R1$ ($=1\text{ M}\Omega$), ao invés do valor adotado ($10\text{ M}\Omega$) para o circuito receptor na folha de dados do fabricante do transdutor (Figura 9), o que auxiliou na redução de ruídos.

Um pulso ultrassônico típico registrado pelo receptor é mostrado na Figura 11, conforme experimento realizado com o tomógrafo ultrassônico desenvolvido. Observa-se um pulso eletromagnético (P.E.M.) no início do sinal, causado pela fonte e que é descartado automaticamente pelo código desenvolvido para o microcontrolador para registrar os tempos de trânsito a partir do fenômeno acústico (Figura 11). O tempo de trânsito entre a fonte e o receptor é que possibilitará a medição da velocidade do meio em uma determinada direção. A utilização de diversas fontes e receptores é que possibilita a obtenção de imagens representando o campo de velocidades do meio em estudo.

O circuito do transmissor (fonte) é mostrado na Figura 8. Esta fonte consiste em um oscilador RLC, onde o transdutor é modelado como capacitância, com frequência de ressonância próxima a 80 kHz, ativado por um sinal digital de +5V que é acionado pelo microcontrolador no tomógrafo. Embora o sinal digital de disparo do circuito transmissor seja de +5V, o pulso gerado pelo circuito RLC excitando o transdutor ultrassônico é da ordem de centenas de Volts, conforme mostra o sinal medido no transdutor do tomógrafo ultrassônico desenvolvido (Figura 12).

O circuito do receptor é mostrado na Figura 9. Este receptor consiste em um filtro analógico com amplificação, cuja saída passa por um comparador de nível de sinal para detectar pulsos ultrassônicos que cheguem ao transdutor do receptor. A saída deste comparador vai de +5V para 0V quando um pulso ultrassônico é detectado, sendo conectadas ao microcontrolador no tomógrafo para informar que um pulso chegou ao receptor. O circuito receptor possui um filtro analógico passa-faixa de dois estágios com os dois amplificadores operacionais contidos no circuito integrado OPA2134. O primeiro estágio tem como frequências de corte 33,9 kHz e 159,2 kHz, enquanto o segundo estágio tem como frequências de corte 33,9 kHz e 102,0 kHz. O filtro passa-faixas de dois está-

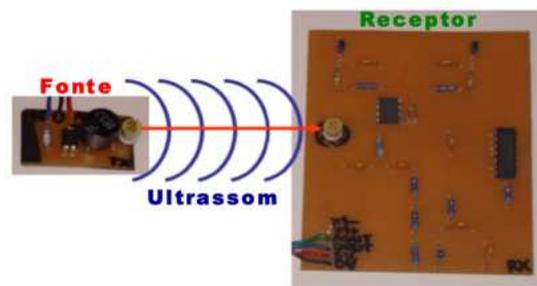


Figura 10: Protótipo para teste de emissão e detecção de pulso de ultrassom utilizando um único par fonte/receptor. Os transdutores piezoelétricos estão localizados nos extremos da seta vermelha..

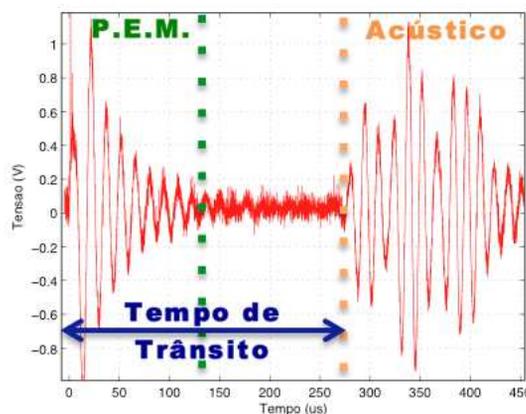


Figura 11: Resposta típica no domínio do tempo obtida por um par fonte/receptor do tomógrafo ultrassônico desenvolvido.

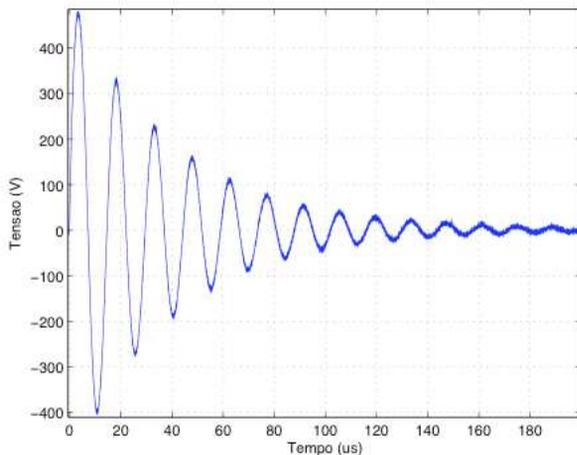


Figura 12: Sinal de excitação aplicado ao transdutor piezoelétrico do transmissor (circuito RLC). Este sinal elétrico será transformado em um pulso de ultrassom pelo transdutor piezoelétrico.

gios resultante tem ganho de 61 dB e largura de banda de 67 kHz, minimizando assim a influência de frequências espúrias e maximizando a resposta para a frequência de ressonância do transdutor piezoelétrico de 80 kHz.

O sistema de acionamento e aquisição emite um pulso de +5V durante 300 μ s para acionar a fonte e posteriormente medir o tempo até que o pulso ultrassônico chegue ao receptor. Este sistema utiliza um microcontrolador 89C52 para acionamento das fontes e assegurar a exatidão na medição do tempo de trânsito entre o acionamento da fonte e a detecção no receptor. Duas portas do microcontrolador estão conectadas aos circuitos das 8 fontes e dos 8 receptores respectivamente. Foi utilizado um contador de 16 bits e a resolução temporal é de 1,5 microssegundos, o que atende aos requisitos do sistema, pois o som percorre apenas 0,5 mm em 1,5 microssegundos, enquanto o som leva de 250 μ s a 400 μ s para percorrer a distância entre os pares fonte/receptor. Os atrasos introduzidos pelos filtros ativos e pelo limiar de detecção do comparador analógico são essencialmente desprezíveis, sendo isto relevante para a realização de medições de tempos de trânsito no tomógrafo ultrassônico. A interface serial com o PC possibilita o controle do tomógrafo e a aquisição e processamento dos dados obtidos.

O procedimento experimental para testar o tomógrafo acústico consistiu na validação de sua capacidade para detectar contrastes negativos da velocidade efetiva de propagação do som no meio. Isto decorre do fato que um sistema para monitoramento de injeção de CO₂ deve ser capaz de obter imagens do contraste negativo causado no meio pelo CO₂. Vale

ressaltar que as medidas realizadas foram calibradas e que os resultados são facilmente aferíveis pela medição da velocidade do som no ar sem obstáculos, uma vez que a distância entre fonte e receptor, a temperatura e a umidade são conhecidas. Os experimentos foram realizados sob uma temperatura de 30°C e umidade relativa do ar de 80%.

O experimento realizado pode ser dividido em duas etapas. Na primeira etapa, foram registrados os tempos de trânsito para um meio inicial sem perturbações. Na segunda etapa, foram registrados os tempos de trânsito para um meio perturbado por um corpo de prova, o qual introduziu um contraste negativo no campo de velocidades do meio, simulando assim o efeito do CO₂ no campo de velocidades. As fontes foram disparadas sequencialmente, registrando-se os tempos de trânsito em todos os receptores para cada disparo solicitado pelo computador ao microcontrolador.

O meio foi analisado em 2D, sendo as fontes e receptores coplanares. Os tempos de trânsito foram transmitidos do microcontrolador para o computador utilizando-se um adaptador para comunicação serial/USB. O computador calcula o campo de velocidades obtido a partir dos tempos de trânsito.

O tomógrafo desenvolvido possui 8 fontes e 8 receptores, logo a matriz de tempos de trânsito apresenta 64 medições, ou seja, todas as combinações possíveis de pares fonte/receptor. O número de tempos de trânsito obtidos interfere no número máximo de parâmetros que podem ser estimados no campo de velocidades. Como a inversão tomográfica utilizou um sistema linear de equações, cada tempo de trânsito corresponde a uma equação e cada parâmetro do campo de velocidades discretizado corresponde a uma incógnita. Assim, discretizou-se o campo de velocidades do meio em uma matriz com 64 células (Figura 13), pois existem 64 tempos de trânsitos disponíveis, permitindo assim resolver o sistema linear de equações com um grau suficiente de determinação.

Inicialmente, realizou-se uma aquisição com o tomógrafo acústico dos 64 tempos de trânsito (todas as combinações de 8 fontes \times 8 receptores) sem nenhum corpo de prova entre fontes e receptores (Figura 14), ou seja, estimou-se a velocidade de propagação do som como referência. Obteve-se uma matriz de tempos de trânsito aproximadamente simétrica, o que seria de se esperar dada a simetria do posicionamento de fontes e receptores. A imagem do meio homogêneo foi reconstruída com sucesso (Figuras 15 e 16).

Posteriormente, introduziu-se um corpo de prova que consiste de uma esfera plástica oca no meio da região analisada pelo tomógrafo para simular o contraste negativo de velocidade causado pela injeção de CO₂. Este efeito pode ser notado pela análise da matriz de tempos de trânsito entre fontes e receptores (Figura 17), que perde sua simetria pela altera-

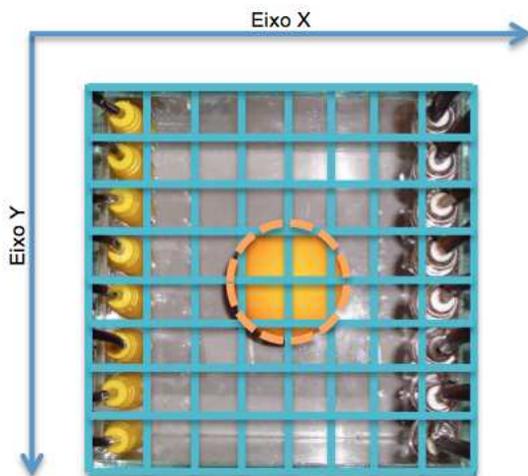


Figura 13: Discretização do campo de velocidades do meio em uma matriz 8×8 . O círculo tracejado laranja indica a posição real do corpo de prova.

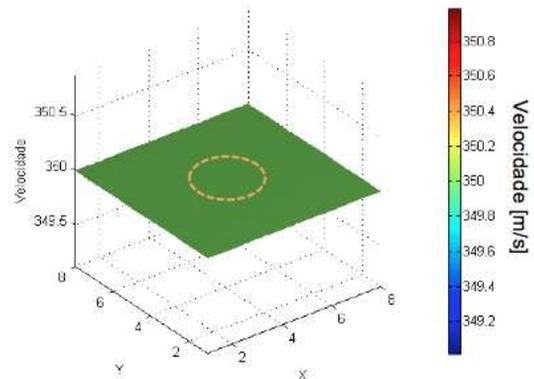


Figura 15: Representação gráfica 3D do campo de velocidades do som (matriz 8×8) no meio sem corpo de prova. A posição futura do corpo de prova é representada com um círculo tracejado laranja.

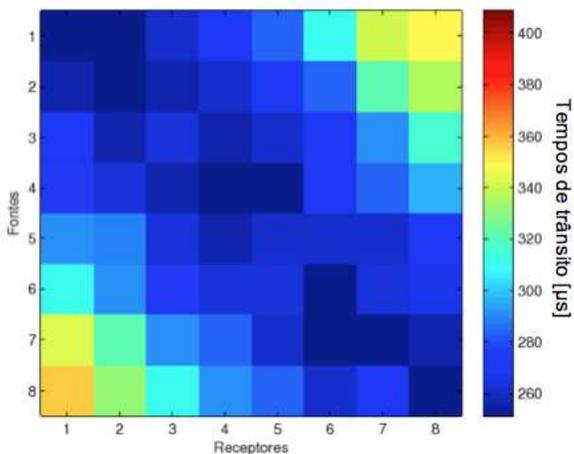


Figura 14: Matriz de tempos de trânsito entre as 8 fontes e 8 receptores para o tomógrafo sem corpo de prova. Cada elemento colorido da matriz representa um tempo de trânsito entre uma fonte e um receptor.

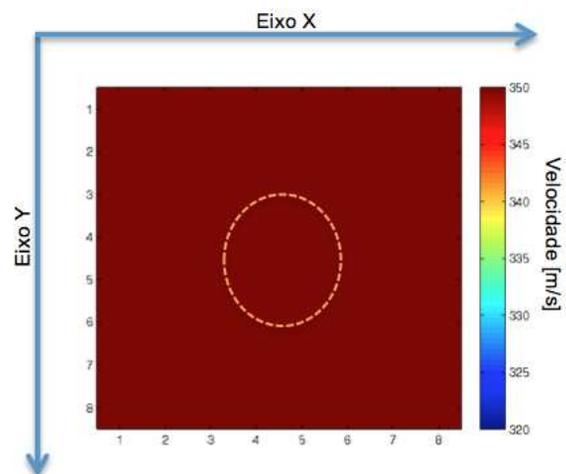


Figura 16: Representação gráfica 2D do campo de velocidades do som (matriz 8×8) no meio sem corpo de prova. A posição futura do corpo de prova é representada com um círculo tracejado laranja.

ção nos tempos de trânsito. A imagem do corpo de prova foi reconstruída com sucesso (Figuras 18 e 19), mostrando o contraste negativo causado pelo corpo de prova posicionado no centro da imagem.

As Figuras 14 e 17 são matrizes de tempos de trânsito antes e depois da inserção do corpo de prova, contendo respectivamente os tempos de trânsito entre todas as combinações de pares fonte/receptor, ou seja, elas representam o domínio temporal. Cada elemento da matriz 8×8 representa um tempo de trânsito entre uma determinada fonte e um determinado receptor, utilizando uma escala de cores.

As Figuras 15 e 18 são imagens planas (2D) de campos de velocidades representados em 3D, antes e depois da inserção do corpo de prova, respectivamente. É importante observar que o gráfico representa apenas duas dimensões espaciais (x,y) e o terceiro eixo representa velocidade $v(x,y)$ em m/s. Ou seja, são representações 3D obtidas a partir de imagens 2D, onde o eixo Z representa a velocidade estimada. As Figuras 15 e 18 foram representadas adicionalmente em 2D pelas Figuras 16 e 19, respectivamente.

Além do corpo de prova circular, experimentos adicionais foram realizados com um corpo elíptico e com um corpo assimétrico. A Figura 20 mostra os tempos de trânsito relativos ao experimento com um corpo elíptico, enquanto as Figuras 21 e 22 mostram os resultados da inversão tomográfica representados em 3D e 2D, respectivamente. Como a resolução do campo de velocidades é de 8×8 blocos, a imagem discretizada de uma elipse é representada por blocos quadrados alinhados em uma forma aproximadamente retangular, exceto pelo fenômeno de *aliasing* espacial nas extremidades. A localização e orientação do corpo de prova são corretamente identificadas.

A Figura 23 mostra os tempos de trânsito referentes ao experimento com um corpo assimétrico, o qual consiste em um corpo elíptico acrescido de uma assimetria retangular em sua borda. As Figuras 24 e 25 mostram os resultados da inversão tomográfica representados em 3D e 2D, respectivamente. Vale ressaltar que apesar das pequenas dimensões da assimetria retangular, a mesma foi corretamente identificada nos resultados da inversão tomográfica.

Assim, o objetivo de detectar contrastes no campo de velocidades foi atingido para diferentes corpos de prova, o que tem grande relevância para a simulação da detecção do contraste negativo de velocidade causado pela injeção de CO_2 no subsolo. Os experimentos realizados mostram resultados que suportam a continuidade da pesquisa e desenvolvimento de uma nova versão do tomógrafo com alta resolução em trabalhos futuros.

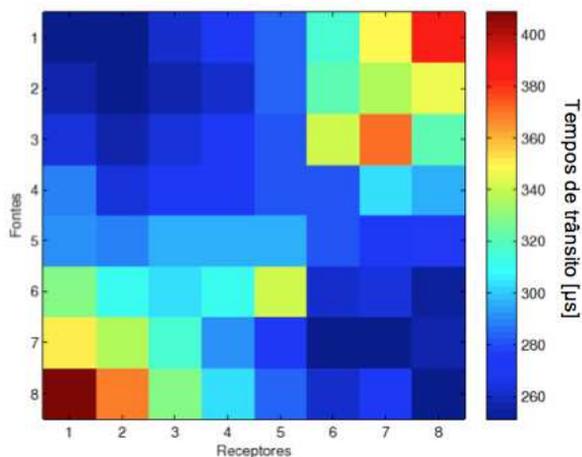


Figura 17: Matriz de tempos de trânsito entre as 8 fontes e 8 receptores para o tomógrafo com corpo de prova circular. Cada elemento colorido da matriz representa um tempo de trânsito entre uma fonte e um receptor.

A tomografia sísmica 2D realizada em campo requer diversas fontes dispostas ao longo de um poço aproximadamente vertical e diversos receptores em outro poço aproximadamente vertical. O meio entre estes dois poços é atravessado por ondas acústicas provenientes de cada fonte e que são registradas pelos receptores. As frequências utilizadas são relativamente baixas (<1 kHz) como uma solução de compromisso entre a resposta em frequência do meio geológico e a resolução desejada, a qual depende do comprimento de onda. Os sismogramas registrados nos receptores são posteriormente processados para a obtenção dos tempos de trânsito. O campo de velocidades é então calculado utilizando-se inversão tomográfica. Este processo precisa ser repetido periodicamente para monitorar a pluma de CO_2 , que caracteriza-se como um contraste negativo de velocidade ao longo do tempo em relação ao campo de velocidades obtido com a aquisição tomográfica inicial. Assim, o protótipo ultrassônico desenvolvido permitiu simular o monitoramento do campo de velocidades, detectando contrastes negativos de velocidade causados pelo corpo de prova em relação ao campo de velocidades inicial, atingindo assim o objetivo proposto de monitorar alterações no campo de velocidades do meio.

5 CONCLUSÕES

Neste artigo, foi apresentado o desenvolvimento de um sistema de aquisição de sinais acústicos para simular o monitoramento dinâmico do subsolo utilizando tomografia sísmica. Um tomógrafo acústico ultrassônico foi desenvolvido visando medir a velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos em um meio. A obtenção da imagem de uma es-

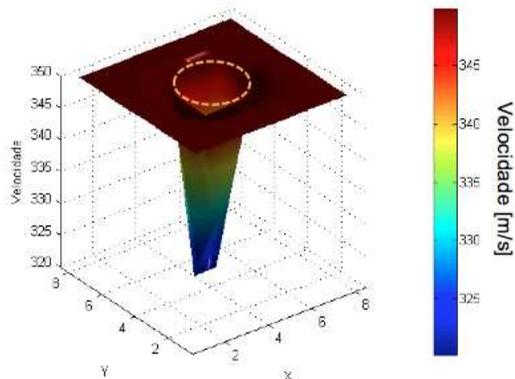


Figura 18: Representação gráfica 3D do campo de velocidades do som (matriz 8×8) no meio com corpo de prova circular. A posição real do corpo de prova é representada com uma linha tracejada laranja.

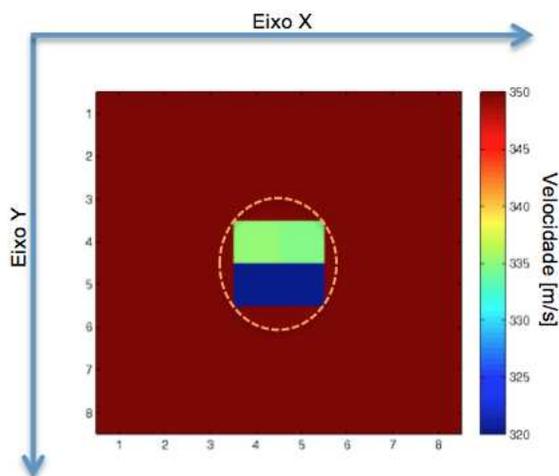


Figura 19: Representação gráfica 2D do campo de velocidades do som no meio (matriz 8×8) com corpo de prova circular posicionado no centro do tomógrafo. A posição real do corpo de prova é representada com uma linha tracejada laranja.

fera que gerou um contraste negativo na velocidade efetiva do meio foi realizada com sucesso, o que significa que a plataforma experimental desenvolvida detecta a presença de contrastes negativos de velocidade, o que permite a simulação do efeito causado pelo CO₂ na velocidade de propagação do som em um meio. Este sistema possibilitará o teste de modelos físicos representando a injeção de CO₂ em um reservatório de hidrocarbonetos.

Trabalhos futuros incluem o desenvolvimento de um sistema para obtenção de imagens em tempo real, detecção sensível à fase, pares de fontes e receptores que operem em baixas frequências (< 1 kHz) para aquisições em campo e algoritmos para obtenção de imagens visando monitoramento dinâmico da injeção de CO₂.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à UFBA, ao IFBA e à *Stanford University* pelo suporte provido ao longo desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Ajo-Franklin, J. B., U., A., J. and Harris, J. M. (2005). Temporal integration of seismic traveltime tomography, *75th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, Vol. 1, pp. 2468–2471.
- Andersen, A. H. and Kak, A. C. (1982). Digital ray tracing in two-dimensional refractive fields, *Journal of Acoustical Society of America* (72): 1592–1606.
- Bouska, J. G. (1997). Sparse 3-d, what's in a name, *Canadian Society of Exploration Geophysicists Recorder*.
- Devaney, A. J. (1982). A filtered backpropagation algorithm for diffraction tomography, *Ultrasonic Imaging* 4: 336–350.
- Harris, J. M., Quan, Y., Wynn, D., Ajo-Franklin, J., Wu, C., Urban, J., Akintunde, O. M. and Xu, C. (2007). Sub-surface monitoring of geological CO₂ storage, *Technical Report (online)*.
- Lazaratos, S. and Marion, B. (1997). Crosswell seismic imaging of reservoir changes caused by CO₂ injection, *The Leading Edge* (16): 1300–1306.
- Lumley, D. (2001). Time-lapse seismic reservoir monitoring, *Geophysics* (66): 50–53.
- Mafra De Sá, T. J. (1996). *Inversão e seleção de imagens na tomografia de transmissão utilizando regularização de ordem arbitrária, decomposição em valores singulares, conjugado gradiente e entropia*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia.

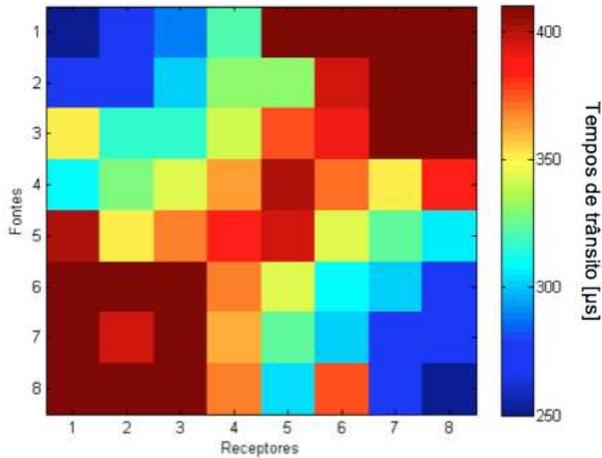


Figura 20: Matriz de tempos de trânsito entre as 8 fontes e 8 receptores para o tomógrafo com corpo de prova elíptico. Cada elemento colorido da matriz representa um tempo de trânsito entre uma fonte e um receptor.

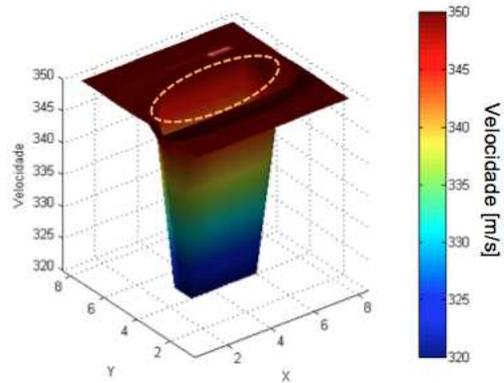


Figura 21: Representação gráfica 3D do campo de velocidades do som (matriz 8×8) no meio com corpo de prova elíptico. A posição real do corpo de prova é representada com uma linha tracejada laranja.

Matarese, J. R. (1993). *Nonlinear Traveltime Tomography*, Tese de Doutorado, Massachusetts Institute of Technology.

Schots, H. A. (1990). *Tomografia Poço a Poço e Poço a Superfície Utilizando Ondas Diretas*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia.

Wang, X. (1990). Sensitive digital lock-in amplifier using a personal computer, *Review of Scientific Instruments* **61**(70): 1999–2001.

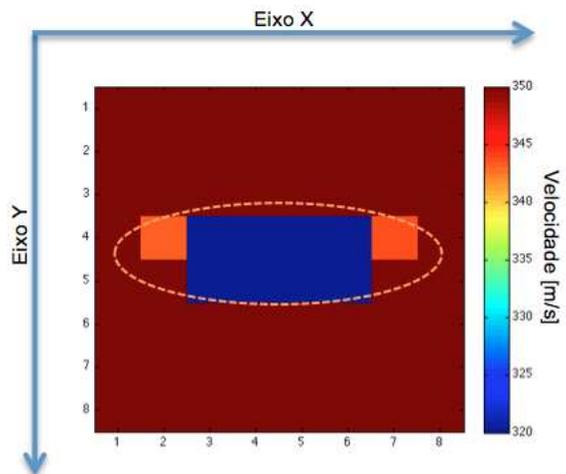


Figura 22: Representação gráfica 2D do campo de velocidades do som no meio (matriz 8×8) com corpo de prova elíptico posicionado no centro do tomógrafo. A posição real do corpo de prova é representada com uma linha tracejada laranja.

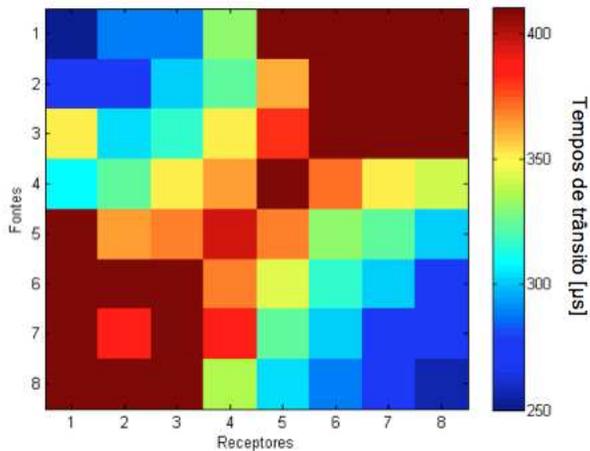


Figura 23: Matriz de tempos de trânsito entre as 8 fontes e 8 receptores para o tomógrafo com corpo de prova assimétrico. Cada elemento colorido da matriz representa um tempo de trânsito entre uma fonte e um receptor.

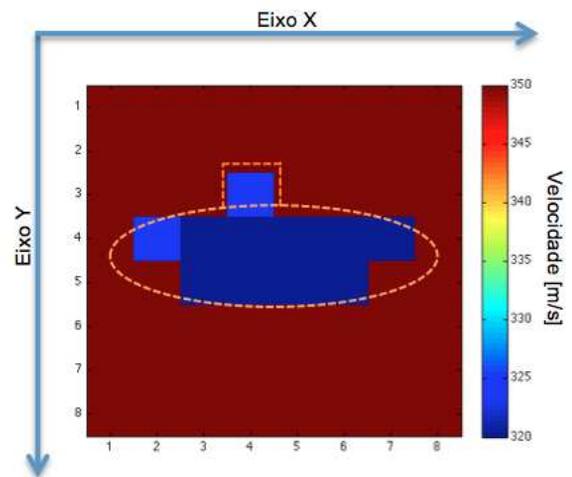


Figura 25: Representação gráfica 2D do campo de velocidades do som no meio (matriz 8×8) com corpo de prova assimétrico posicionado no centro do tomógrafo. A posição real do corpo de prova é representada com uma linha tracejada laranja.

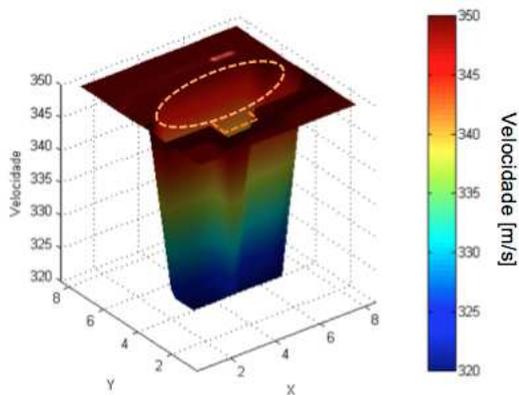


Figura 24: Representação gráfica 3D do campo de velocidades do som (matriz 8×8) no meio com corpo de prova assimétrico. A posição real do corpo de prova é representada com uma linha tracejada laranja.