

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Curso de Engenharia Hídrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Estimativa de vazões para o Canal São Gonçalo, do sistema lagunar Patos-Mirim -RS, através do Método das Velocidades Indexadas

Luciana Shigihara Lima

Pelotas, 2016

Luciana Shigihara Lima

Estimativa de vazões para o Canal São Gonçalo, do sistema lagunar Patos-Mirim -RS, através do Método das Velocidades Indexadas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Hídrica, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Hídrica.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares - UFPel

Pelotas, 2016

Luciana Shigihara Lima

Estimativa de vazões para o Canal São Gonçalo, do sistema lagunar Patos-Mirim -RS, através do Método das Velocidades Indexadas

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado, como requisito parcial, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Hídrica, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 14/07/2016

Banca examinadora:

Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares (Orientador)
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria

Prof.Dr. Maurício Dai Prá
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dra. Rita de Cássia Fraga Damé
Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico a todas as pessoas que contribuíram para
minha formação.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação, aos amigos que me acompanharam nesta caminhada desde o início da minha trajetória e aos que fui conhecendo ao longo do tempo.

Aos que acreditaram em mim desde que entrei nesta aventura, à família Roth e aos Dalanhóis, a meus avós e avós emprestados.

Aos meus pais e meu irmão (especialmente em acaloradas discussões ambientais e “engenheirísticas”), que sempre estiveram presentes me dando apoio e motivando a seguir em frente. À toda minha família, primos, tios que sempre estiveram presentes, mesmo distantes.

À todos os colegas de laboratório, atuais e passados, pela amizade, parceria e companheirismo em todas as saídas de campo e histórias nestes últimos três anos, em especial meu grande amigo Guilherme Bartels. Agradecer ao técnico em hidrologia Reginaldo Bonczynski por sua dedicação e horas navegadas.

Aos meus colegas do curso, com os quais compartilhei muitas horas de estudo e momentos de descontração.

Ao meu professor e orientador, o Professor Gilberto Loguercio Collares por sua orientação, incentivo, amizade e confiança.

Aos professores do curso de Engenharia Hídrica: Viviane Terra, Maurício Dai Prá, Luis Eduardo Suzuki, Lessandro Coll Faria, Samuel Beskow, Clause Piana, Juliana Pertille, Siclério Ahlert, e todos os professores que participaram de minha formação.

Em especial à professora Idel Milani, responsável por me apresentar o curso através da Limnologia, e ter se tornado uma grande amiga e conselheira.

À amiga Beatriz Camaño que me apresentou, a alguns anos atrás, este caminho das águas.

Aos meus professores do intercâmbio, em especial a professora Gema Parra e à Ana Isabel del Arco, por sua confiança e aprendizados. Aos engenheiros Eduardo Navarrete e Rafael Carlos Martín por sua orientação. Às minhas famílias espanholas, à família De Miguel e à família de Jaén.

*“That is the way to learn the most, that when you
are doing something with such enjoyment that you
don’t notice that the time passes.”*

Einstein, 1915.

Resumo

LIMA, L.S. **Estimativa de vazões para o Canal São Gonçalo, do sistema lagunar Patos-Mirim -RS, através do Método das Velocidades Indexadas.**2016, 63p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Hídrica) - Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

A estimativa da vazão nos cursos d'água é uma tarefa bastante dispendiosa e necessária. Uma metodologia amplamente utilizada para esta estimativa, devido à facilidade e baixo custo é a geração e uso da curva-chave, que baseia-se em medições de vazão relacionadas com as respectivas cotas numa dada seção de um rio. Contudo, em algumas situações, esta relação não se apresenta adequada, ao considerar a existência de remanso e fluxos bidirecionais com as quais pode haver, para um mesmo nível, diferentes vazões e em distintas direções, inviabilizando uma relação direta de cota com vazão. O Método das Velocidades Indexadas baseia-se não apenas na observação do nível do curso d'água como também, nas velocidades observadas no eixo da seção. Esse método é descritivo e aplicável em circunstâncias onde as direções de fluxo do curso d'água não ocorrem sempre numa mesma direção, apontando para uma maior discretização das características do fluxo. São geradas duas equações: uma para estimar a velocidade do escoamento e outra para a estimativa da área. Através da equação da continuidade é possível estimar a real vazão da seção de controle. A vazão sobre o Canal São Gonçalo é bastante influenciada pelo vento e pela pluviosidade na bacia no qual está inserido, apresentando para diferentes condições, níveis e vazões que não seguem uma linearidade. Por este motivo, a aplicação do método das Velocidades Indexadas apresentou-se adequado para estimativa da vazão sobre o canal. Para tal, foi necessária a instalação de um medidor de velocidades e nível, com tecnologia acústica, que realizasse leituras contínuas de nível e velocidade em diferentes sentidos. Com a realização de campanhas de medição de vazão, na seção de controle, empregando metodologias tradicionais, foi possível aplicar com êxito essa estratégia.

Palavras-Chave: velocidades indexadas, métodos acústicos, ADCP, SL500, descarga líquida.

Abstract

LIMA, L.S. Flow Estimation for São Gonçalo Channel, on Patos-Mirimlagunar system, with application of Index-Velocity Method.2016, 63p.Coursework (Undergraduate Course in Water Resources Engineering), Center of Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2016.

Even though flow estimation in water bodies may be costly, it is necessary. A methodology broadly used for this estimation, which is based on simplicity and low costs, is the creation and use of rating curves. The rating curves are based on flow measurements and their respective levels in a cross-section. However, this relation might not be adequate when considering backwater and bidirectional fluxes. This might result in different flow directions for the same level, which makes it impossible to directly relate level and flow. The Index-Velocity Method is based on the level and velocities observed on the section axis. This method is applied in circumstances where the flow is not always in the same direction, pointing out for higher discretization of flow characteristics. Two equations are generated: one for velocity estimation, and the other for area estimation. Through the continuity equation it is possible to estimate the flow on the cross-section. The São Gonçalo Channel's flow is highly influenced by the wind and pluviosity on the watershed where it's concerned, presenting for different conditions, levels and flows that do not show linearity. Therefore, the application of Index-Velocity Method is adequate for the flow estimation in the analyzed cross-section. In order to continually measure the flow levels and velocities, it was necessary to install a velocity and level measurer, equipped with acoustic technology. This strategy was successfully implemented through traditional flow measurement campaigns on the cross-section.

Key-words: Index-Velocity, acoustic methodologies, ADCP, SL500, discharge.

Lista de Figuras

Figura 1: Ilustração de uma medição com equipamento Acústico (ADCP) medindo vazão usando a técnica do barco em movimento.	19
Figura 2: Propagação do pulso acústico na água. - Colisão dos pulsos sonoros com as partículas.	22
Figura 3: Alteração da frequência dos pulsos acústicos frente à variação da velocidade relativa entre a fonte e a partícula.	23
Figura 4: Ângulo formado a partir da medição das componentes de velocidades da água segundo a direção do pulso acústico.	24
Figura 5: Vista superior da Barragem – Eclusa do canal São Gonçalo (imagem obtida do Google Earth – 15/05/2006).	30
Figura 6: Localização da barragem-eclusa e a seção de controle do canal São Gonçalo.	31
Figura 7: Vista superior da seção de controle, onde são feitas as medições e a localização da estação de monitoramento contínuo de velocidades. Imagem obtida através do Google Earth (data da imagem: 15/01/2016).	32
Figura 8: Esquema representativo da seção vista em planta da seção transversal. .	33
Figura 9: Esquema representativo do corte transversal da seção de monitoramento sobre o Canal São Gonçalo.	35
Figura 10: Vista dos transdutores e sonda.	36
Figura 11: Medidor acústico M9 (ADCP) em operação, instalado sobre prancha. Observa-se além do M9, o GPS e o rádio transmissor.	37
Figura 12: Perfis de velocidades obtidos pelo ADCP M9. Legenda: (a) Velocidade Absoluta; (b) Velocidade na direção Leste; (c) Velocidade na direção Norte; (d) Velocidade para cima; (e) Velocidade para baixo.	39
Figura 13: Display do teste estacionário realizado com o software RiverSurveyour Live sobre a seção de medição no Canal São Gonçalo.	45
Figura 14: Representação de um relatório de medição (07/06/2016) gerado a partir do Software RiverSurveyour Live.	50

Figura 15: Gráficos Área x Cota e Velocidade Média x Velocidade Indexada.	51
Figura 16: Gráfico de tendenciosidade das vazões obtidas a partir do Método das Velocidades Indexadas.	53
Figura 17: Gráfico da curva-chave tradicional para a seção de estudo.....	53
Figura 18: Gráfico de tendenciosidade das vazões obtidas a partir da curva-chave.	55

Lista de abreviaturas e símbolos

ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
ADVM	<i>Acoustic Doppler Velocity Meter</i>
<i>Blanking</i>	Região da seção de medição que o equipamento acústico não consegue medir
<i>Bottom-Traking</i>	Método usado para medir a velocidade do barco.
<i>Ensemble</i>	Média de um conjunto de <i>pings</i> para obter o perfil de velocidades da água e/ou a velocidade do barco.
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
<i>Pings</i>	Pulsos acústicos de uma frequência conhecida.
<i>Pitch</i>	Inclinação do aparelho no sentido longitudinal do barco.
<i>Roll</i>	Inclinação do aparelho no sentido transversal do barco.
<i>SideLobe</i>	Dispersão do sinal fora do feixe principal
Transdutores	Emissores de ondas sonoras do equipamento acústico
USGS	<i>United States Geological Service</i>

Sumário

1 Introdução.....	12
1.1 Objetivo	14
1.2 Hipótese	14
2 Revisão de literatura	15
2.1 Ambientes Estuarinos.....	15
2.2 Contextualização hidráulica	16
2.3 Metodologias de estimativa dos parâmetros hidráulicos em ambientes naturais	17
2.3.1 Equipamentos acústicos dinâmicos.....	18
2.3.1.1 Sistemas de referência para os equipamentos acústicos móveis.....	20
2.4 Efeito Doppler.....	21
3 Material e Métodos	29
3.1 Caracterização da região	29
3.1.1 Barragem-Eclusa do Canal São Gonçalo	29
3.1.2 Seção de Medição	31
3.2 Descrição dos equipamentos.....	32
3.2.1 Medidor acústico <i>Side Looker 500</i>	32
3.2.2 Medidor Acústico M9	36
3.3 Teste do Fundo Móvel.....	41
3.4 Aplicação do Método	42
3.5 Validação das equações	42
3.6 Aplicação da curva-chave tradicional	44
4 Resultados e Discussão	45
4.1 Estimativa de Efeito de Fundo Móvel	45
4.2 Realização das medições	46
4.3 Aplicação do Método das Velocidades Indexadas	51
4.4 Validação da Equação.....	51
5 Conclusão	57
6 Recomendações	58
Referências	59
Apêndice	63

1 Introdução

A hidráulica fluvial é um dos ramos mais complexos a ser estudado e classificado, devido à alta diversidade de características e os diversos comportamentos que cada curso d'água apresenta na natureza. Conhecer o seu funcionamento é de grande importância, tanto para a gestão dos recursos como para o desenvolvimento do ecossistema. Dentro deste contexto, as regiões litorâneas possuem grande diversidade de comportamento além de apresentarem condições únicas para cada situação, podendo ser altamente variáveis e suscetíveis às condições externas, tais como as marés, os ventos e a precipitação.

No que se refere à caracterização hidráulica, os rios e canais caracterizam-se sempre como de escoamento de superfície livre. Nestas situações se observa o contato da superfície da água com a pressão atmosférica, podendo ocorrer variações do nível da água no tempo e no espaço. No caso dos escoamentos sob regime forçado (em condições de pressão diferente à atmosférica) a resposta é obtida através da mudança de pressão nas paredes dos encanamentos. O regime de escoamento pode ser classificado a partir do que se toma como referência, podendo ser o tempo, o espaço ou números adimensionais.

Estimar as características dos escoamentos requer séries de medições nas mais diversas condições, podendo ser utilizadas diferentes técnicas e instrumentos, cabendo ao hidrometrista decidir qual a forma ideal conforme cada situação. Alguns parâmetros como a velocidade do escoamento, nível, condições transversais e longitudinais de fundo, entre outros, são significativos para caracterizar os cursos d'água e a partir destas informações, ser possível determinar os usos, gerar modelos hidráulicos e hidrológicos de previsão do seu comportamento frente a eventos extremos. Com base nestas informações, consideram-se condições e situações para dragagem (em caso de portos e rios navegáveis), dispersão de poluentes, coleta de água para uso, pesca, irrigação, e assim, proporcionar uma melhor gestão para o uso harmônico dos recursos.

Devido à obtenção de dados de vazão ser dispendiosa, realiza-se costumeiramente a relação entre o nível e a vazão, onde se faz necessária a instalação de réguas limimétricas ou outros sensores que medem o nível e os

registram ao longo do tempo. Com base nesses dados, gera-se uma equação representativa do comportamento sobre o curso d'água. O gráfico gerado é conhecido como curva-chave, que se trata de um método que relaciona a vazão com o nível para uma específica seção de controle. Em alguns casos não é possível obter-se esta relação, já que fatores externos ou características do próprio escoamento, impõem para um mesmo nível distintas vazões, ou ainda dentro da própria seção, ser possível observar fluxo inverso com mesmos níveis. Deste modo, é necessário buscar outras metodologias ou estratégias com base em outras relações, podendo assim, estimar de forma rápida e precisa os valores de vazão do curso d'água, de acordo com seu comportamento dinâmico.

Um método alternativo à aplicação da curva-chave, é o método das velocidades indexadas, que consiste em criar uma relação entre a velocidade média de toda a seção e velocidades por sub-área, ao passo que a curva-chave tradicional apenas requer o controle de nível (régua limimétrica ou sensores de nível), observado ao longo do tempo, com medidas correspondentes de vazão. No método das velocidades indexadas são necessários dados discretizados de velocidade, na qual se emprega equipamentos especiais que se utilizam de tecnologia acústica por efeito Doppler, capazes de capturar dados de velocidades em pequenos intervalos de tempo e, como na curva-chave tradicional, gera-se uma equação para caracterizar o escoamento.

A estimativa da vazão ao longo do tempo e do espaço fornecem informações que possibilitam a melhor gestão dos recursos relacionados ao curso de água em estudo, permitindo o conhecimento do real volume disponível, para os diversos fins: uso doméstico/industrial, irrigação para culturas agrícolas, potencial hidroenergético, abastecimento, uso recreativo, transporte e diluição de poluentes. Para isso, é interessante conhecer as características hidráulicas e assim, definir seu comportamento e, acompanhar ao longo do tempo o escoamento e condições do entorno.

Os dados precisos são cruciais para a melhoria e progresso dos estudos hidrológicos. Além disso, estes dados permitem a gestão eficiente dos cursos de água, incluindo as decisões relativas às atribuições dos recursos hídricos, calibração de modelos, e à concepção de projetos relacionados com a água advinda do curso em estudo (FENTON E KELLER, 2001). A estimativa de dados de vazão para o

Canal São Gonçalo será de grande importância como ferramenta de apoio para a melhor compreensão deste sistema e auxiliar na tomada de decisões para os gestores públicos. Com o estabelecimento da hidrovia Uruguai-Brasil, a implantação de uma estação de tratamento de água para a cidade de Pelotas às margens do São Gonçalo e a retomada do uso do porto de Pelotas, haverá aumento na movimentação e de atividades sobre o canal. O conhecimento de dados de vazão será imprescindível na condução e manejos desses recursos.

1.1 Objetivo

Estimativa da vazão do Canal São Gonçalo, na região do porto de Pelotas, a partir do Método das Velocidades Indexadas, utilizando tecnologia acústica por efeito Doppler.

1.2 Hipótese

O Método das Velocidades Indexadas é mais apropriado para a estimativa da vazão no Canal São Gonçalo do que a curva-chave tradicional.

2 Revisão de literatura

2.1 Ambientes Estuarinos

Estuários são ambientes altamente dinâmicos e apresentam mudanças constantes causadas por forçantes naturais, como as marés e o encontro de vários rios com o oceano. Trata-se de um ecossistema de transição entre o oceano e o continente (MIRANDA et al., 2002). São regiões de complexo entendimento, devido às suas características específicas e sua alta vulnerabilidade à ação antrópica, apresentando grande importância socioeconômica e ambiental.

As condições para acessar o interior do continente, a viabilidade para a construção de obras portuárias e estaleiros, e a alta capacidade de renovação das águas devido à sua condição hidrodinâmica, foi o que possibilitou o desenvolvimento das cidades nestas regiões, além de apresentarem características biológicas mais produtivas, tanto em terra como na água (WOODROFFE, 2003). Algumas das civilizações mais antigas surgiram nestas regiões por possuírem características muito propícias ao desenvolvimento (GARRISON, 2010). Contudo, estas condições favoráveis são incompatíveis à manutenção de um ecossistema estuarino saudável, dentro do ponto de vista ambiental. Neste sentido, o Canal São Gonçalo pertence a uma região com estas características de estuário e como possui alto potencial de navegação e outras atividades de interesse econômico e ambiental, vê-se importante a identificação e acompanhamento de alguns parâmetros que o caracterizem e o classifiquem.

O comportamento de um curso d'água natural é bastante complexo, principalmente em regiões de interface entre o continente e oceano. Nestes ambientes ocorrem alterações significativas de vários parâmetros tais como a densidade, a temperatura, o vento e a pressão (PEREIRA, 2010), que irão influenciar sobre o escoamento. A caracterização da distribuição da salinidade no estuário tem repercussões sobre a circulação de correntes, sobre a qualidade das águas e sobre o transporte de sedimentos (ALFREDINI, 2009), visto que ocorre

diferente movimentação de massas, devido à energia das marés, a densidade da água e das partículas.

Devido às condições específicas e à hidrodinâmica particular que apresentam os ambientes estuarinos, o estudo para o entendimento destas condições se vê de essencial importância. Modelos que buscam representar o comportamento destes ambientes são bastante indicados para o planejamento de atividades portuárias, de dragagem de canais e obras de engenharia (RIZI, 2002). Com a finalidade de melhor gerenciar esses ambientes, que são altamente dinâmicos, faz-se necessário o uso de metodologias que melhor descrevam os processos que neles ocorrem (TUCCI, 2009). Em consequência disto, vem se tornando cada vez mais importante o acompanhamento das características hídricas ao longo do tempo através da implementação de redes de monitoramento.

2.2 Contextualização hidráulica

Dentro do contexto hidráulico, um rio é um canal, contudo seu comportamento é muito mais dinâmico e variável do que o observado em canais bem estruturados e aquilo que está delineado em canais experimentais construídos pelo homem (FELICES, 1998). Em um rio, praticamente não existe regime permanente, pois a vazão varia continuamente, por vezes lentamente, outras rapidamente. A somar-se a estas dificuldades, as características apresentadas sobre cursos naturais são muito variáveis tanto longitudinalmente como transversalmente, dificultando seu estudo e caracterização.

Um dos parâmetros hidráulicos que mais se veem afetados pelos efeitos que ocorrem em regiões estuarinas é a velocidade da corrente, apresentando grande variabilidade tanto em módulo como na direção. É um parâmetro determinante que rege sobre a dinâmica da circulação de vários outros parâmetros como os fluxos de água, sal, calor, nutrientes e outros componentes presentes neste tipo de ambiente e é essencial quando procuramos quantificá-los com precisão (KJERVE e PROEHL, 1979).

A velocidade da corrente associada à área a qual ocupa no espaço é chamada de vazão e sua determinação auxilia bastante no momento de classificar um determinado escoamento. Conforme Santos et al. (2001) a medição de vazão é todo aquele processo empírico que procura descrever o escoamento relacionando o volume com o tempo. Os principais métodos para a medição de vazão são: a medição e integração de distribuição de velocidades, métodos acústicos, método volumétrico, método químico, o uso de geometrias regulares (vertedores e calhas Parshall) e a medição com flutuadores.

2.3 Metodologias de estimativa dos parâmetros hidráulicos em ambientes naturais

Para estimar a velocidade da água podem ser utilizadas diversas metodologias como apresentadas em Rantz (1982) e Santos et al. (2001), algumas mais simples, como por exemplo a metodologia em que se utilizam flutuadores para a estimativa da velocidade do curso sobre a superfície. Outros métodos tradicionais mais sofisticados utilizam equipamentos mecânicos, como o molinete hidrométrico, que mede a velocidade a partir do número de rotações de sua hélice; ou acústicos, que estimam a velocidade a partir da movimentação das partículas dentro do curso d'água ou o atrito que ocasiona a movimentação de sensores que medem a corrente, este último mais utilizado na oceanografia, chamados correntômetros.

O método convencional de estimativa da vazão e comumente utilizado é o método de integração da distribuição de velocidades, obtidas a partir de medidores mecânicos conhecidos como molinetes hidrométricos (SANTOS et al., 2001). Entretanto, recentemente, os medidores acústicos vêm sendo aplicados com frequência, sendo estes utilizados neste trabalho.

O método que emprega o molinete hidrométrico baseia-se em realizar medidas pontuais de velocidade ao longo de uma seção do canal, longitudinalmente etambém, transversalmente. A velocidade é medida a partir de uma equação característica para cada tipo de hélice acoplada ao equipamento, elas giram conforme o fluxo, enviando pulsos que serão registrados em um contador, que

mostrará a quantidade de giros que terá dado a hélice em uma determinada quantidade de tempo. Para a determinação da área, marca-se a distância entre cada vertical e a sua respectiva profundidade (ANA, 2014). Adota-se uma metodologia de estimativa de área (meia-seção ou seção média), e a partir do somatório destas áreas e das velocidades obtidas pelo equipamento, estima-se a vazão. O que diferencia do método do ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), é que este se faz de maneira muito mais simples e rápida, passa-se a ter mais medidas de velocidade, como se fosse realizada com o molinete em todas as possíveis profundidades e realizada em infinitas verticais (GAMARO, 2012).

2.3.1. Equipamentos acústicos dinâmicos

Os medidores acústicos dinâmicos baseiam-se no mesmo princípio que os molinetes hidrométricos, a partir da integração de áreas e velocidades, mas diferente dos molinetes, utilizam o fenômeno do Efeito Doppler para a estimativa das velocidades, obtidas a partir do eco emitido pelas partículas em suspensão na água e que seguem o movimento da água (SANTOS et al., 2001). Esta tecnologia apresenta condições de medidas precisas e vantajosas, já que são capazes de realizar medições mais rápidas e discretizadas de cada seção de controle (GAMARO, 2012). A figura 1 apresenta uma ilustração de como é realizada a medição de maneira embarcada com esta tecnologia. O equipamento dispara feixes em direção ao leito do curso d'água, que irão medir a velocidade do fluxo em cada ponto abaixo dele. Para definir sua localização no espaço e fazer correções nas medidas, pode usar de três ferramentas: *Bottom-Traking*, GPS VTG e GGA (SONTEK, 2016).

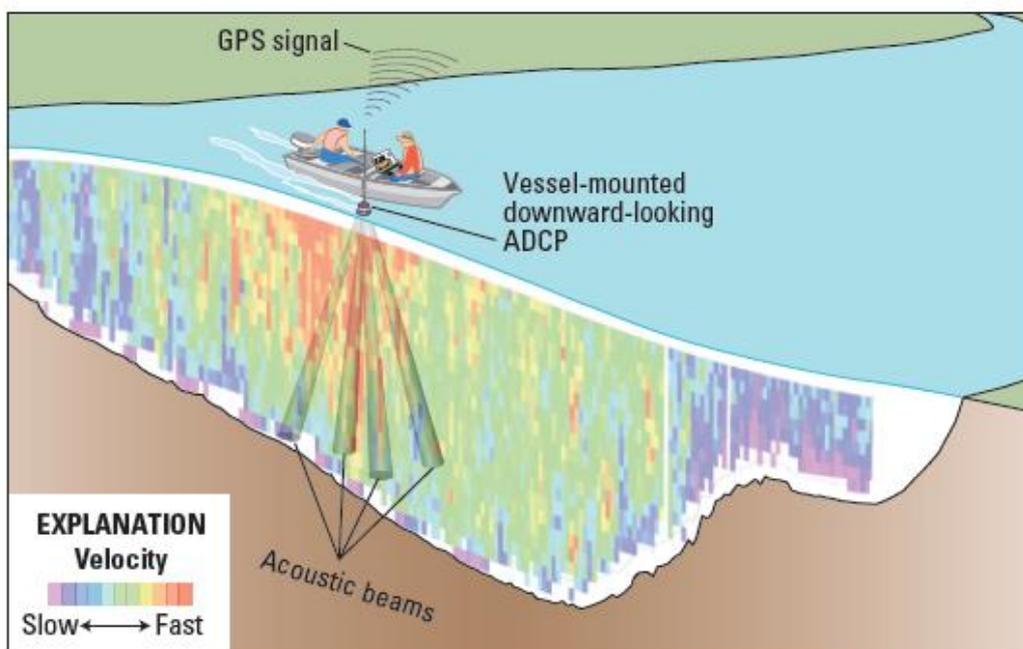


Figura 1: Ilustração de uma medição com equipamento Acústico (ADCP) medindo vazão usando a técnica do barco em movimento. Fonte: GOTVALD E OBERG, 2008.

A velocidade da água medida pelo ADCP quando medido em movimento é denominada velocidade relativa. Como o equipamento também está em movimento, a velocidade de movimentação da embarcação também irá interferir na velocidade registrada. Logo, se o barco se movimenta mais rápido, a velocidade relativa da água também irá aumentar. Tendo conhecimento da real velocidade do barco e seu deslocamento, é possível remover essa diferença do valor final (GAMARO, 2012).

Estes equipamentos têm origem nos equipamentos oceanográficos, que já vinham utilizando estas tecnologias para medições de correntes, principalmente pela dificuldade que é a estimativa para grandes profundidades e massas de água (SANTOS et al., 2001).

No software do equipamento, a velocidade estimada para cada célula da seção vai sendo representada por cores para melhor visualização, cores frias apresentam as velocidades mais baixas enquanto que as velocidades mais altas são representadas pelas cores quentes na medição. Para fins de comparação entre diferentes medições numa mesma seção, o software também permite estabelecer os limites de velocidades na legenda.

2.3.1.1 Sistemas de referência para os equipamentos acústicos móveis

Segundo Mueller e Wagner (2009) o sistema de referenciamento *Bottom-Traking* baseia-se na mudança do feixe acústico para definir a localização do barco, podendo ser usado em cursos onde não há leito móvel. Assumindo tal afirmativa, o efeito Doppler medido está diretamente relacionado com a velocidade do barco. A estimativa da profundidade do leito também é obtida a partir destes pulsos de rastreamento de fundo. Entretanto, a corrente sempre transporta sedimentos e outros materiais movimentados por suspensão, saltação e arraste. Este transporte de materiais possibilita a medição (ao menos parcialmente) da velocidade de transporte de materiais, em adição à velocidade do barco. Quando isso acontece e o instrumento mede em modo estacionário, será possível estimar o movimento de fundo. Os cuidados ao utilizar o *Bottom-Traking* para a estimativa da velocidade do barco estão em cuidar os erros rotacionais causados por erros de compasso (a bússola interna deve estar bem calibrada).

O sistema GGA dispõe ao equipamento a informação exata da localização do barco através do Sistema de Posicionamento Global (GPS). O dado de posicionamento inclui a hora, latitude, longitude e informações acerca da constelação de satélites usada na estimativa da localização (MUELLER e WAGNER, 2009). A velocidade no programa (RiverSuveyour Live) é estimada a partir de dois pontos consecutivos divididos pela distância sobre o tempo. Para ampliar a acurácia requerida com o uso do ADCP, uma correção diferencial deve ser aplicada quando usados os dados GGA.

O VTG apresenta apenas a velocidade relativa em relação ao fundo, que inclui dados de direção e velocidade, mas não a posição (MUELLER e WAGNER, 2009). A velocidade pelo VTG é determinada pela medição da mudança do Doppler ao alterar as fases dos satélites. A grande vantagem do VTG é que este sistema é minimamente impactado pelos multifeixes e mudanças de satélites em uma pequena medição em um curto espaço de tempo. O cuidado para este sistema está nas situações com baixas velocidades e perda de cobertura de satélites.

Engelman et al. (2015) sugerem que todos os sistemas são confiáveis, porém devem ser escolhidos com cuidado, para o melhor método de correção do posicionamento, em função das características das seções fluviométricas.

Os medidores acústicos estáticos são aqueles que realizam as medidas de velocidade a partir de um único ponto, ficam instalados na seção de medição e realizam a coleta de dados continuamente. Estes equipamentos foram os primeiros a usar a tecnologia Doppler, para estimar a velocidade e direção das correntes em alto mar. Hoje, vêm substituindo os linígrafos e são muito úteis em locais sob efeito de remanso e condições com problemas na geração da curva-chave, além de já fornecer os dados de vazão, uma vez que a relação da velocidade média da área medida e a velocidade média da seção já foram estabelecidas (GAMARO, 2012).

2.4 Efeito Doppler

Os equipamentos acústicos utilizam-se do fenômeno acústico conhecido como Efeito Doppler. É um fenômeno físico que consiste na mudança da frequência de uma onda qualquer, resultante do movimento relativo entre a fonte que emite a onda e o corpo que recebe e/ou reflete o sinal da onda. A mudança na frequência é diretamente proporcional à velocidade do corpo refletido e, sendo assim possível realizar a sua estimativa (PRUSKI et al., 2006). O princípio de funcionamento do equipamento utiliza deste fenômeno, que consiste em medir a velocidade da água através do som, que são ondas de pressão que viajam através de gases, líquidos e sólidos. O equipamento emite um sinal de frequência conhecida e o recebe de volta refletido pelas partículas em suspensão e, a partir deste sinal, o equipamento estimará qual será a velocidade da água (figura 2). Percebe-se então que, em escoamentos com ausência de partículas em suspensão (muito raro em escoamentos fluviais) não é possível sua medição (SANTOS et al., 2001). A alteração da frequência da fonte para o observador é proporcional à velocidade na qual a distância aumenta ou diminui entre o observador e a fonte. Esta mudança de frequência, que é transmitida pelo transdutor (equipamento) e refletida de volta pelas

partículas em suspensão na água, será proporcional à velocidade que a distância entre o transdutor e as partículas aumenta ou diminui.

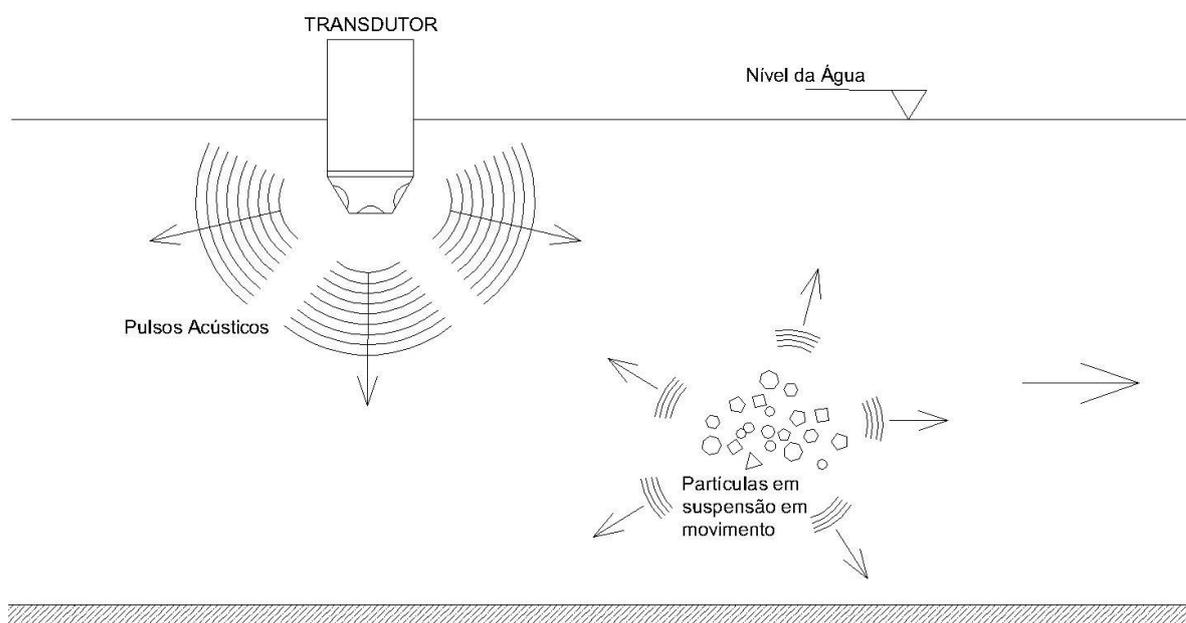


Figura 2: Propagação do pulso acústico na água. - Colisão dos pulsos sonoros com as partículas.

A equação que representa a diferença de frequência entre o transdutor e a partícula é a seguinte:

$$F_d = 2f \times \left(\frac{V}{C}\right) \quad (1)$$

Onde:

F_d – diferença de frequência (Hz)

f – Frequência transmitida de uma fonte (transdutor) (Hz)

V – Velocidade relativa entre a fonte e o objeto (m/s)

C – Velocidade do Som (m/s)

As partículas que estão em suspensão na água (sedimentos e plâncton), em média estão à mesma velocidade da massa de água que está sendo medida. Quando estas se movem em direção ao equipamento, a frequência do som que teoricamente seria recebida por elas teria a frequência alterada (figura 3), proporcionalmente à velocidade relativa entre o equipamento e a partícula. Como o sinal emitido (A) pelo transdutor é refletido (B) pela partícula em diversas orientações, nem todo o sinal retorna para ser lido pelo transdutor, visto que este

mede apenas a velocidade radial, somente um componente da velocidade é medido por vez por cada transdutor.

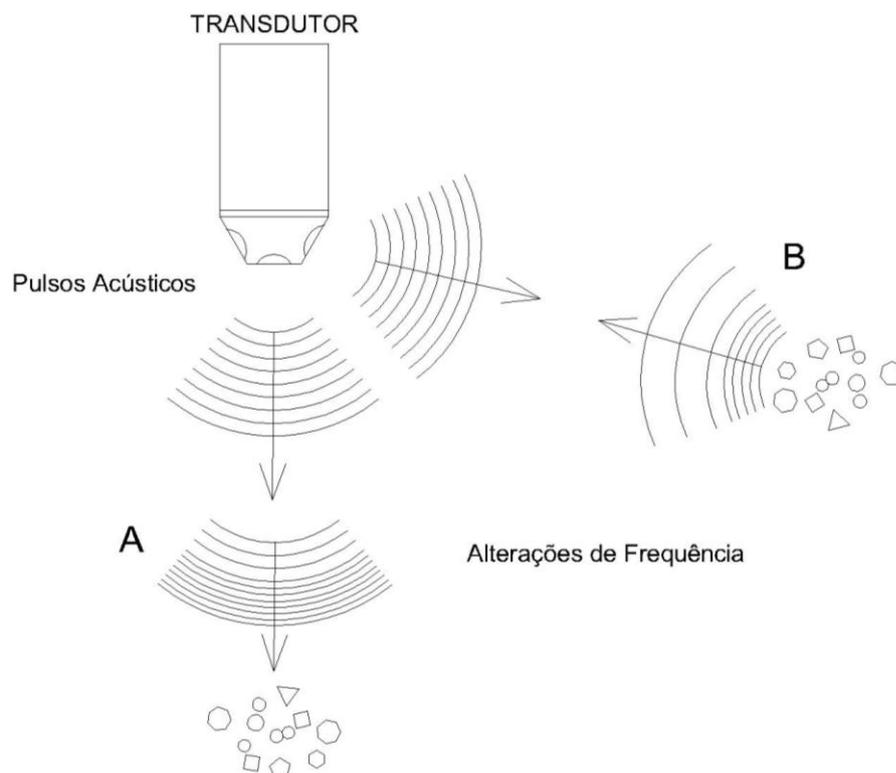


Figura 3: Alteração da frequência dos pulsos acústicos frente à variação da velocidade relativa entre a fonte e a partícula.

A fórmula que irá representar o escoamento então será definida por:

$$F_d = 2f \times \left(\frac{V}{C}\right) \times \cos \theta \quad (2)$$

Onde o ângulo θ representa a direção do pulso acústico sobre a velocidade da água, explicado pela figura 4.

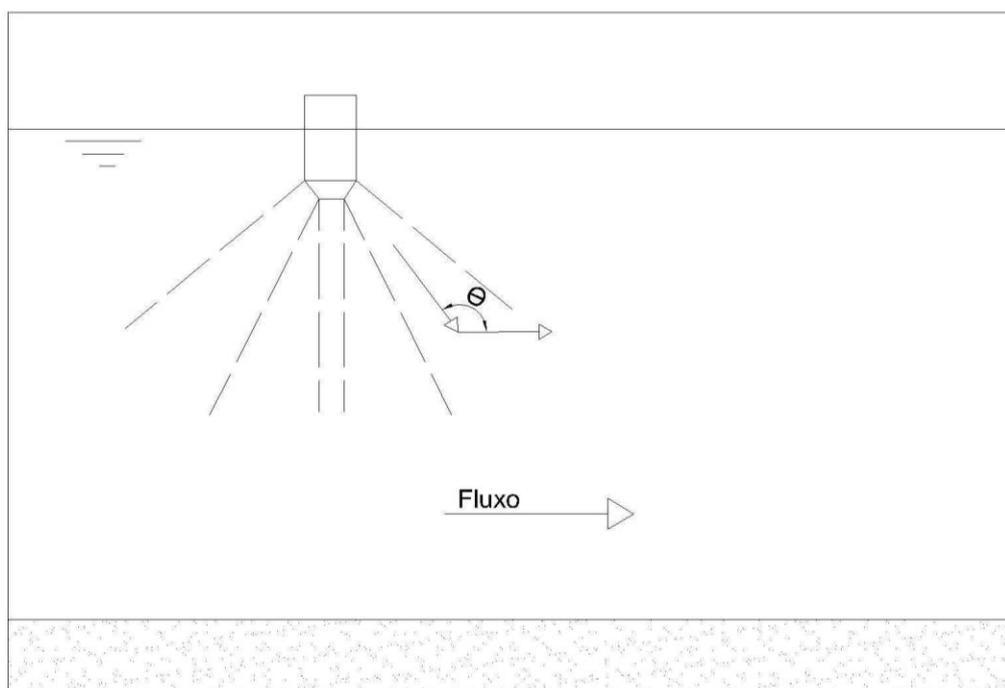


Figura 4: Ângulo formado a partir da medição das componentes de velocidades da água segundo a direção do pulso acústico.

Logo, para calcular a velocidade do escoamento nas três dimensões (x , y e z) será necessário a emissão de três feixes acústicos apontados para três direções distintas e assim, cada pulso atinge um ponto diferente do escoamento em uma determinada camada horizontal. Contudo, a velocidade não é perfeitamente homogênea (igual em todos os pontos) e para medir esta diferença, em alguns equipamentos acústicos existe um quarto feixe acústico, utilizado para calcular o “erro da velocidade”, sendo esta a medida da velocidade vertical por cada dupla de feixes (GAMARO, 2012).

A velocidade vertical acima descrita não é propriamente a velocidade de corrente na vertical do perfil, e sim, a decomposição dos vetores de velocidades. Este valor define se o volume de água entre os feixes é homogêneo (GAMARO, 2012). Em outras palavras, significa que a velocidade da água não se altera tanto em relação à magnitude ou à direção se a diferença entre estes componentes for igual ou bem próxima de zero. Esta estimativa permite avaliar a qualidade dos dados, independente da origem dos erros (do equipamento, processamento ou não homogeneidade das camadas do perfil).

Quando montado em uma embarcação, o equipamento fica com os transdutores emitindo para baixo, pulsos em frequências específicas, a uma

profundidade predeterminada, muito próxima da superfície da água, formando um ângulo com a vertical. Os transdutores apontam para as quatro direções, esta conformação auxilia na redução dos erros da estimativa da velocidade horizontal ocasionados pelo balanço da embarcação (*Pitch*: longitudinal e *Roll*: transversal) (SONTEK, 2016).

Como o efeito Doppler ocorre na seção do eixo do transdutor, se faz necessário calcular trigonometricamente os componentes da direção que se utilizará, seja pelo sistema cartesiano, ou no caso dos equipamentos com bússola interna, no sentido Norte/Sul e Leste/Oeste (SONTEK, 2016).

Os perfis de velocidade são construídos dividindo a seção em segmentos de alturas iguais, chamados de células, e para cada uma destas células é definido as velocidades médias e suas direções. A largura de cada célula é definida a partir da velocidade do barco e da velocidade de processamento do equipamento. Pode-se perceber então, que equipamentos acústicos são capazes de realizar medições muito mais detalhadas se comparadas às medidas de molinetes hidrométricos (GAMARO, 2012). Além do mais, a medição é realizada em movimento, aumentando bastante o número de verticais; não há a necessidade de ancoragem da embarcação como também a materialização da seção, como nas medidas com o molinete, em que se faz necessária a instalação de cabo, ou utilização de GPS externo ou triangulação - os equipamentos acústicos modernos já vêm com GPS acoplado e bússola, para correção de direção.

Outra facilidade é de que o equipamento enquanto emite sinais acústicos para a medição da velocidade, realiza também a batimetria ao ir medindo o fundo, facilitando em questões de cálculo e, logo terminada a medição na seção a vazão já está computada pelo programa do equipamento.

O Método das Velocidades Indexadas é utilizado para computar a vazão (descarga), baseando-se na corrente de velocidades e na área da seção transversal. Este método é utilizado em condições que ocorrem efeitos de remanso (variável), influência de marés, entre outras interferências que impossibilitam a geração de uma curva-chave tradicional. Este método é especialmente indicado em situações em que, para um mesmo nível, podem ocorrer diferentes vazões.

Para aplicação deste método é necessária a decomposição das velocidades nas distintas direções. A velocidade indexada representa a velocidade no sentido preponderante do canal (no eixo paralelo ao alinhamento longitudinal do canal).

Para os fluxos instáveis, o Método das Velocidades Indexadas apresenta melhores resultados e relações do fluxo em comparação ao método da curva-chave (MUSTE, 2015), pois a partir da caracterização mais detalhada, é possível representar a seção de forma mais próxima da realidade. Principalmente pelo fato de que com o método da curva-chave, pode-se tornar ambígua a curva gerada, com valores diferentes para cada situação, inviabilizando a utilização deste método (KENNEDY, 1984).

O que diferencia este método para o método tradicional da curva-chave é que este método separa a velocidade e a área em dois gráficos: um que relaciona a cota com a área da seção, e outra que associa as velocidades indexadas e velocidade média.

Os valores de saída de cada uma das curvas, velocidade média (V) e a área da seção transversal (A) serão multiplicados entre si para estimar a vazão:

$$Q = V \times A \quad (3)$$

A velocidade Indexada é definida como a velocidade que foi decomposta em três dimensões e estimada para um determinado ponto, definida para cálculo a apresentada na direção preponderante (eixo X). A velocidade indexada e a velocidade média da seção apresentam uma relação empírica bem definida segundo Chow (1959), possibilitando a aplicação do método.

A curva de velocidades indexadas é derivada de medições diretas realizadas sobre a seção estudada, em diferentes situações e de maneira repetida, para melhor precisão sobre os valores. É gerada uma curva adicional que irá relacionar a cota com a área para, assim, relacionar diretamente as medidas de nível com a área molhada da seção. Ambas as curvas requerem diversas medições e consequente calibração entre os pares de dados (vazão direta x medidas de nível), adquiridas ao longo do tempo. As duas curvas são alimentadas simultaneamente, providas de velocidades médias e áreas da seção transversal.

O Canal São Gonçalo apresenta características peculiares conforme fatores externos agem sobre o escoamento. Como por exemplo, a ação do vento, principalmente o que tem a direção Nordeste ou Sudoeste (HARTMANN e SCHETTINI.,1991), que ocasionam a redução da velocidade do escoamento, e pelo motivo da existência da barragem-eclusa, ocorre o efeito de remanso, já que, neste tipo de vento, em que o curso de água tende a inverter, as comportas da Barragem-Eclusa são fechadas (para impedir a passagem de água salina para o lado da Lagoa Mirim), aumentando o nível do canal. Entretanto, a velocidade e o nível não se comportam do mesmo modo, dependem de vários fatores, e conforme as ações destes fatores sobre o escoamento, o fluxo irá agir de modo diferente.

É comum em escoamentos naturais o transporte de sedimentos, imprescindível para o uso da tecnologia Doppler, visto que o equipamento realiza medidas e estima a velocidade da água a partir da velocidade dos ecos refletidos pelas partículas em movimento na água. Estas partículas podem estar se movimentando de diferentes maneiras: em suspensão, saltação ou arraste; os movimentos irão depender do tamanho e propriedade da partícula, basicamente. As partículas em suspensão em geral são as partículas menores que irão se movimentar sobre todo o perfil do canal, as partículas que se movimentam em saltação, são as que ora vão em suspensão ora arrastando-se no fundo, são sedimentos geralmente de granulometria maior às que são transportadas em suspensão. E por último, as partículas mais pesadas e de maior tamanho, que vão sendo arrastadas sobre o fundo.

Quando há grande movimentação de sedimentos no fundo do curso d'água, é considerado que o escoamento apresenta fundo móvel. Esta característica irá afetar a estimativa da velocidade da água ao realizar medições com equipamentos acústicos. Por esse motivo deve ser considerada e estimada, principalmente quando o método de referência do trajeto durante a medição é o fundo da seção (*Sistema Bottom-Traking*).

A aplicação do Método das Velocidades Indexadas para computar dados contínuos de vazão vem se tornando usual, especialmente com a diminuição dos custos dos equipamentos acústicos Doppler (LEVESQUE e OBERG, 2012). Em 2011, nos Estados Unidos, existiam aproximadamente 470 estações fluviométricas que empregavam o referido método para a estimativa da vazão, todas operadas pela

United States Geological Service (USGS). No Brasil, são mínimas as aplicações desta tecnologia e metodologia. Gamaro (2013) aplicou o Método das Velocidades Indexadas de maneira didática sobre o Canal da Piracema, construído no Complexo Hidráulico de Itaipu. O Canal da Piracema é um canal que possibilita a passagem de peixes para montante da barragem, e serve também como canal para atividades de lazer e esportes para turistas. Nesta situação, devido à brusca variação do escoamento no Canal, controlado pela abertura e fechamento das comportas foi possível observar a adequabilidade da metodologia.

Após a escolha, instalação e configuração do equipamento, tanto a curva-chave como a curva de velocidades indexadas devem ser desenvolvidas tomando como base uma seção transversal fixa e realizando periódicas medições, que serão empregadas para a determinação, calibração e validação das equações que irão representar o escoamento (LEVESQUE e OBERG, 2012). Rantz (1982) apresenta estratégias de como desenvolver as séries de vazões a partir do Método das Velocidades Indexadas e lista quatro instrumentos imprescindíveis para a estimativa através do método, que deveriam ser: ou medidores padrões de corrente, ou medidores de deflexão (semelhante a um cata-vento); ou medidores acústicos de velocidade; ou medidores eletromagnéticos de velocidade. Os equipamentos acústicos de estimativa da velocidade foram instrumentos que possibilitaram a aplicação efetiva do Método das Velocidades Indexadas (LEVESQUE e OBERG, 2012).

3 Material e Métodos

3.1 Caracterização da região

O Canal São Gonçalo interliga a Laguna dos Patos com a Lagoa Mirim e possui 76 km de extensão (HARTMANN e HARKOT, 1990). Sua formação geológica é uma planície aluvial formada por um conjunto sedimentar em transição, com sequência geológica constituída por camadas pleistocênicas e holocênicas (OLIVEIRA, 2012). O escoamento normalmente se dá no sentido da Lagoa Mirim para a Laguna dos Patos, mas em períodos de estiagem ou de vento predominantemente Leste, o fluxo pode inverter.

O vento e a precipitação que ocorre sobre o canal e bacias hidrográficas adjacentes (Bacia da Lagoa Mirim e Bacia da Laguna dos Patos) são os principais responsáveis por perturbações no comportamento do canal, sendo os principais forçantes na hidrodinâmica do canal como também na circulação das águas e no processo de salinização.

O Canal São Gonçalo desemboca no extremo sul da Laguna dos Patos, região considerada como sendo um estuário de planície costeira. Devido à baixa amplitude de maré na região (0,47m em média por ano), esta não se torna o fator mais importante que age sobre a circulação, sendo o vento e a chuva os parâmetros de maior significância no comportamento do escoamento na região (HARTMANN e SCHETTINI, 1991). A desembocadura do canal situa-se em uma área que apresenta um comportamento hidrológico tipicamente estuarino em períodos de pouca pluviosidade.

3.1.1 Barragem-Eclusa do Canal São Gonçalo

Antes de existir a barragem-eclusa, quando ocorriam situações de baixa pluviosidade, a água salobra percorria o Canal São Gonçalo em direção à Lagoa

Mirim, impedindo o uso de suas águas para abastecimento público e irrigação. A partir de sua construção em 1977, a água salgada é impedida de avançar sobre a maior parte do Canal e em toda área da Lagoa Mirim, isto permite com que os principais usos (irrigação e abastecimento) da Lagoa Mirim não fiquem comprometidos. Contudo, houve alteração de um comportamento natural, comprometendo assim a dinâmica que antes existia, gerando impactos sobre o ecossistema (CAF, 2015).

A barragem-eclusa está instalada a três quilômetros de distância da cidade de Pelotas, construída de uma superestrutura de concreto armado, a barragem possui 245m de comprimento sobre o leito do canal, 18 comportas basculantes assentes sobre viga soleira, com 12m de largura e pouco mais de 3m de altura. Sobre a margem esquerda, está a eclusa, com 120m de comprimento e aproximadamente 5m de profundidade (GOUVEA et al., 2010). A figura 5 apresenta a vista superior da barragem-eclusa, imagem na qual, pode ser vista a diferença de coloração da água devido a um evento de salinização da lagoa dos patos, situada a jusante da barragem (a parte superior da imagem).



Figura 5: Vista superior da Barragem – Eclusa do canal São Gonçalo (imagem obtida do GoogleEarth – 15/05/2006).

3.1.2 Seção de Medição

A seção transversal, onde foram realizadas as medições de vazão, situa-se em frente ao Campus Anglo da Universidade Federal de Pelotas. Aproximadamente 10,5km do exutório do canal para a Laguna dos Patos, sob as coordenadas 31,78° de latitude Sul e 52,32° de longitude Oeste (figura 6).

A escolha do local para definição da seção transversal se deu devido à proximidade com a universidade, acessibilidade e segurança ao equipamento fixado na margem, na figura 7 é possível observar a localização da seção de monitoramento bem como a localização do campus Anglo da Universidade Federal de Pelotas. A largura da seção transversal é de aproximadamente 230m.

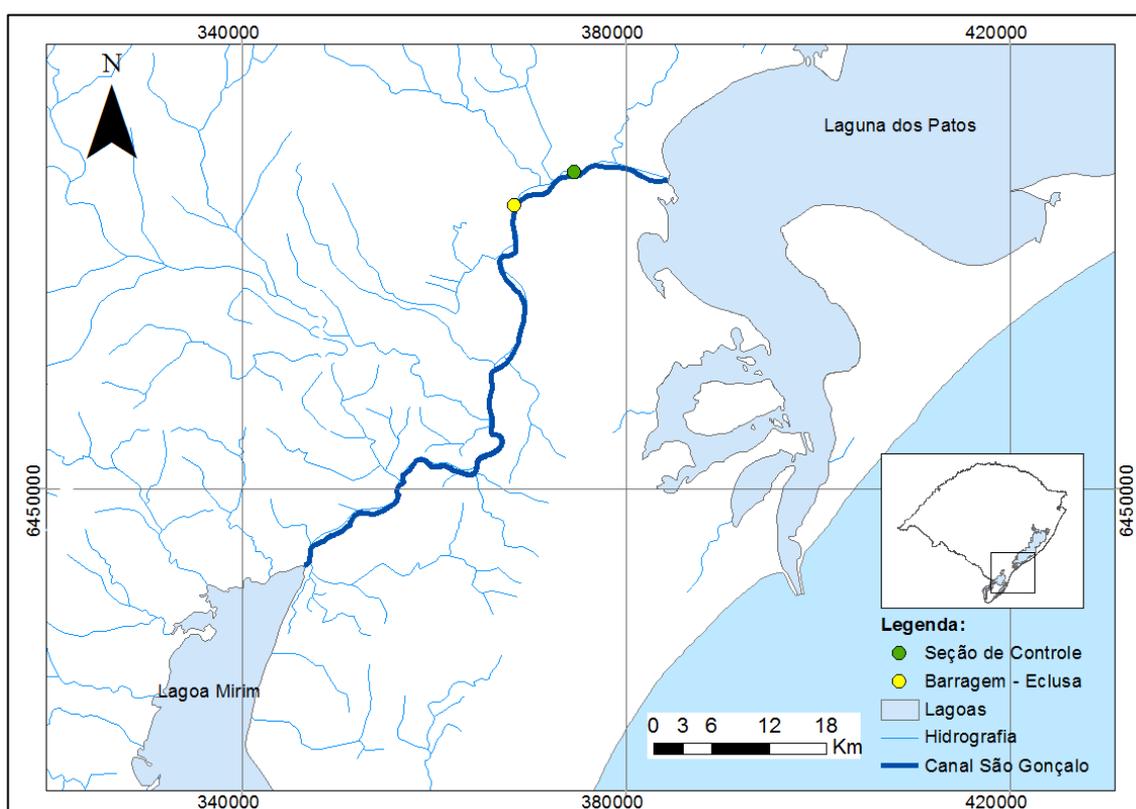


Figura 6: Localização da barragem-eclusa e a seção de controle do canal São Gonçalo.



Figura 7: Vista superior da seção de controle, onde são feitas as medições e a localização da estação de monitoramento contínuo de velocidades. Imagem obtida através do Google Earth (data da imagem: 15/01/2016).

3.2 Descrição dos equipamentos

3.2.1 Medidor acústico *SideLooker500*

Para a aplicação do método das velocidades indexadas é necessário conhecimento da medida da velocidade da água sobre o canal ao longo do tempo. Para isso, foi instalado um equipamento acústico estático (ADVM – *Acoustic Doppler Velocity Meter*) na margem esquerda da seção transversal. Este equipamento emite múltiplos feixes a partir de dois transdutores que distam 30° entre si de abertura dos feixes, como pode ser observado no esquema representativo da figura 8. Através do link: <http://www.sontek.com/productsdetail.php?SonTek--SL-Series-8> é possível obter informações sobre configurações e outros equipamentos estáticos para diferentes situações de escoamento.

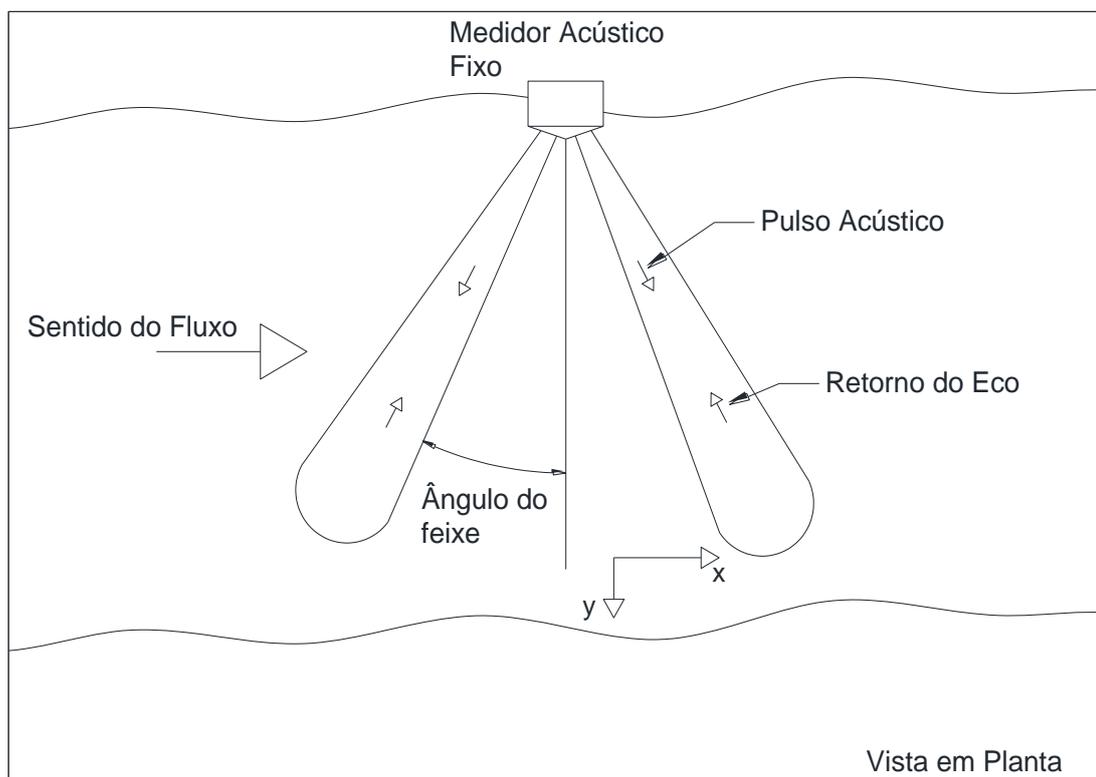


Figura 8: Esquema representativo da seção vista em planta da seção transversal.

O equipamento realiza medidas constantes a cada 120 segundos, e a cada cinco minutos calcula um valor médio, que é registrado em um datalogger e simultaneamente enviado a um servidor, ficando disponível online em tempo real. Os dados medidos pelo equipamento são temperatura, pressão (transformada em nível acima do equipamento), velocidade em duas dimensões (x e y), SNR que significa o nível de ruído (sinais emitidos e não retornados), faixa de operação (não necessariamente o equipamento mede toda a seção, apenas de uma área representativa da mesma, chamada de *CellEnd*), nível (o nível de água acima do sensor medido pelo feixe vertical). A figura 9 mostra um esquema representativo do corte transversal da seção de monitoramento, que possui aproximadamente 230m de largura, e nela é possível observar que o equipamento não emite o sinal até a margem direita do canal, sendo extrapolado o excedente dos 120 metros (distância limite de emissão do sinal), e que o equipamento também apresenta uma representatividade maior da seção, já que o equipamento foi configurado no modo multi-células (SONTEK, 2008). Neste caso, há uma representatividade maior das velocidades que ocorrem em múltiplas células sobre a seção. As células possuem

distâncias de 10 metros, e cada uma delas possui um valor de velocidade média na direção predominante.

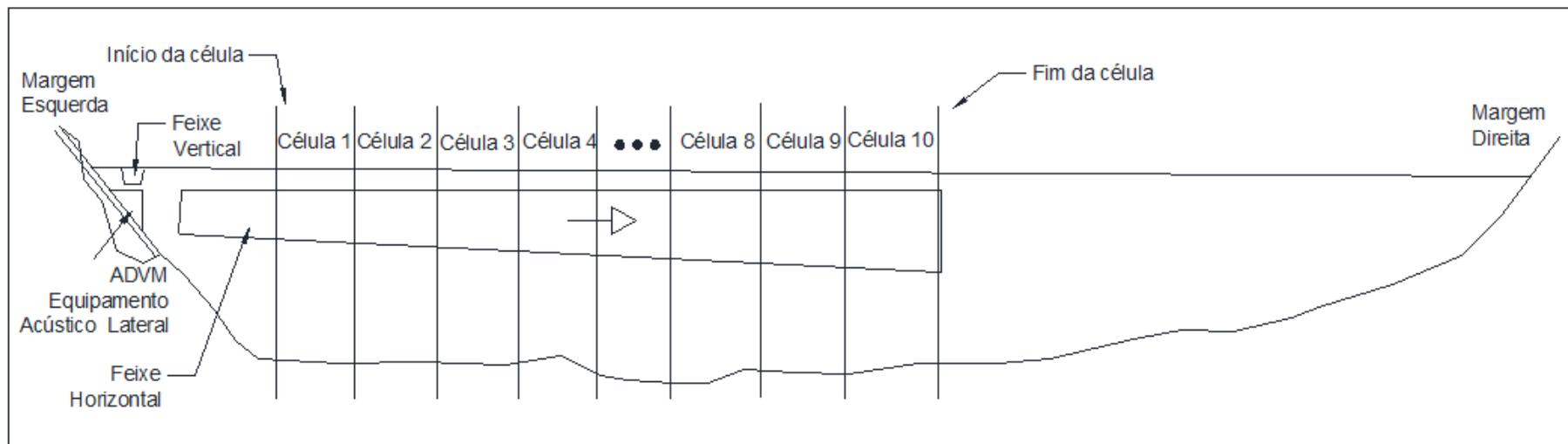


Figura 9: Esquema representativo do corte transversal da seção de monitoramento sobre o Canal São Gonçalo.

No final de outubro de 2015 foi instalado às margens do Canal São Gonçalo, o equipamento acústico SL500. Este equipamento deve ser instalado em margens laterais de seções, e possui sensor de pressão para estimativa do nível de água acima dele, três transdutores – um vertical e dois horizontais para estimativa da velocidade do escoamento, e é acoplado a um datalogger que funciona como comunicação entre o equipamento e o operador. O datalogger utilizado neste trabalho, além de registrar e armazenar os dados, envia os dados instantaneamente por telemetria. O APÊNDICE A apresenta um esquema da estrutura montada para que o equipamento estático ficasse fixado à margem.

3.2.2 Medidor Acústico M9

O equipamento acústico dinâmico utilizado neste trabalho foi o modelo M9, da marca SonTek, cujo arranjo de transdutores e sensores é apresentado na figura 10. É possível através do seguinte link, obter maiores informações sobre mais especificações dos equipamentos acústicos dinâmicos: <http://www.sontek.com/productsdetail.php?RiverSurveyor-S5-M9-14>; assim como suas limitações e os equipamentos mais adequados para cada caso.

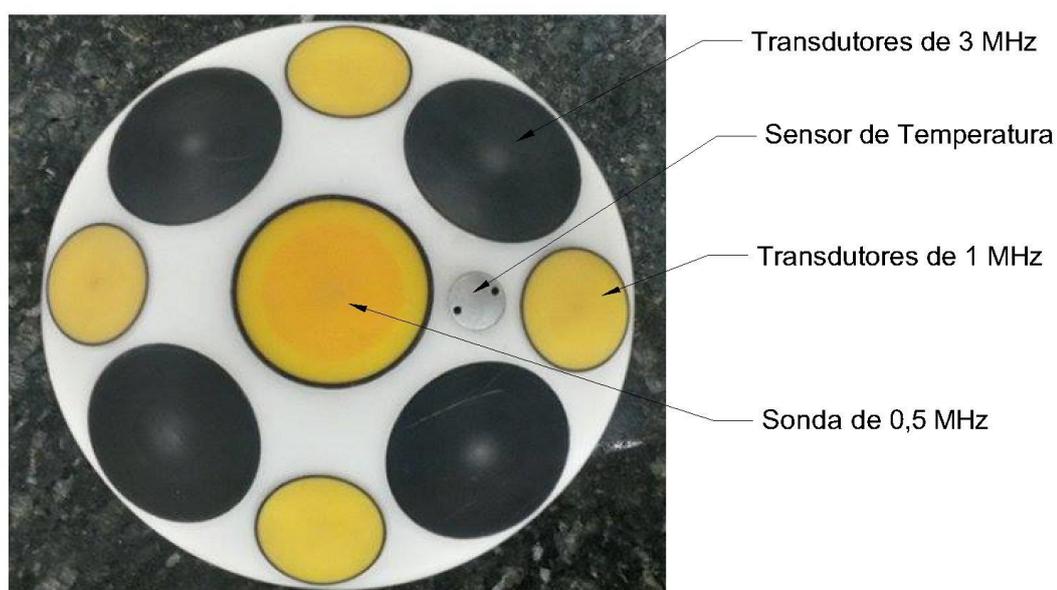


Figura 10: Vista dos transdutores e sonda.

Este equipamento é composto de quatro transdutores de 3MHz, quatro transdutores de 1MHz, uma sonda de 0,5MHz para medida da batimetria usada no cálculo da área e um sensor de temperatura para correção da velocidade do som na água. Com três transdutores o medidor acústico já seria capaz de realizar medidas de velocidade do escoamento, um quarto transdutor está conforme padrões pré-estabelecidos e com este quarto transdutor o equipamento é capaz de medir o erro de velocidade, como já descrito anteriormente. A figura 11 apresenta o medidor acústico em operação, o método de medição foi de forma embarcada com o equipamento sobre uma prancha, sendo carregado pelo operador na lateral da lancha.



Figura 11: Medidor acústico M9 (ADCP) em operação, instalado sobre prancha. Observa-se além do M9, o GPS e o rádio transmissor.

O medidor acústico móvel é capaz de discretizar a seção por múltiplas células, que variam de tamanho conforme a frequência utilizada e velocidade do barco. O M9 é capaz de alterar as frequências e tamanhos das células para melhor representar a seção, esta função é denominada *SmartPulse*, que altera a frequência dos pulsos automaticamente. Cada célula irá apresentar uma velocidade pontual para cada ponto da seção. A vertical composta por todas as células de uma linha na vertical é chamada de *ensemble*.

A velocidade medida pelo medidor acústico lateral difere da velocidade medida pelo medidor acústico móvel, visto que suas visadas são diferentes. O medidor fixo decompõe as velocidades em dois eixos (x e y), enquanto que o medidor móvel estima um valor médio por célula, mas também registra internamente as velocidades nos três eixos (x, y e z), ou direções devido à referência da bússola interna (*East, North, Up e Down*). A figura 12 mostra as velocidades para cada um dos eixos da medição do dia 8 de junho de 2016, cuja vazão média foi de $1372,07\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e velocidade absoluta média de $0,97\text{m s}^{-1}$.

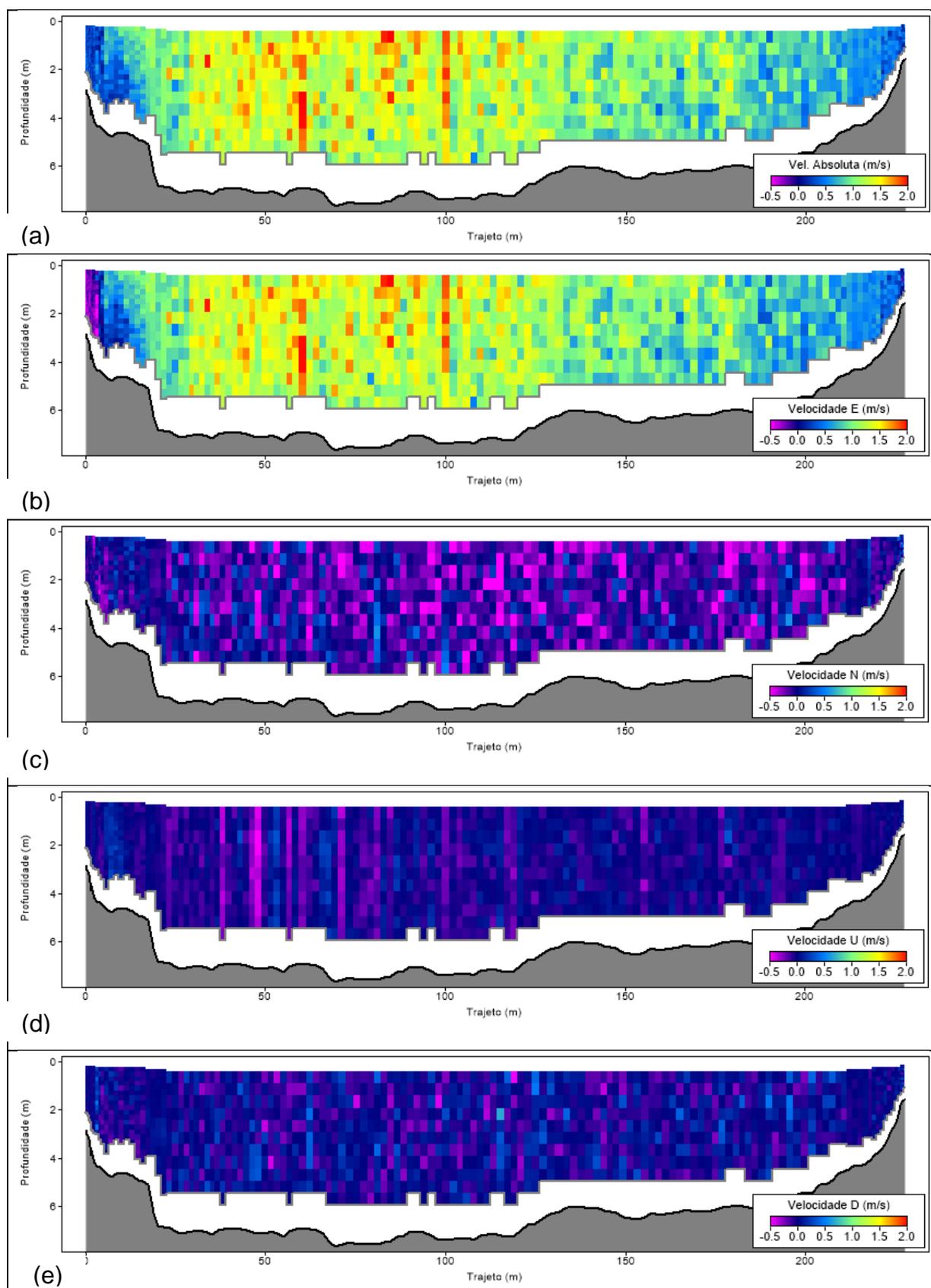


Figura 12: Perfis de velocidades obtidos pelo ADCP M9. Legenda: (a) Velocidade Absoluta; (b) Velocidade na direção Leste; (c) Velocidade na direção Norte; (d) Velocidade para cima; (e) Velocidade para baixo.

Como se pode verificar, o sentido predominante é de Oeste para Leste, ocorrendo baixa movimentação da água no perfil longitudinal do curso, como também para baixo e para cima, cabe salientar que a medição utilizada como exemplo é uma medida média, podendo haver maior variação das velocidades nos eixos em medições cuja vazão e velocidades sejam menores, considerando as características da seção de estudo, já que o canal sofre bastante influência do vento, predominantemente quando seu sentido é Leste e Nordeste.

O equipamento possui uma bússola interna que é o responsável por orientar e direcionar as medições. Visto que o equipamento é acoplado a uma prancha e pode mover-se em todas as direções durante a medição, a bússola irá fazer a correção e dará a orientação durante a medição. É importante realizar a calibração da bússola antes de todas as medições, o mais próximo do ponto a ser amostrado. É importante obter a informação da declinação magnética no ponto no dia da medição. Para isso, para todos os dias de medição foi verificada essa variação através da página virtual da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) para determinar a declinação magnética do local de estudo. Sem esta informação, os dados de vazão apresentarão erros, e poderão ser ou subdimensionado ou superdimensionado, não representando de forma satisfatória a real vazão do canal.

O aparelho possui algumas limitações, ele não é capaz de medir em partes específicas da seção, às margens, e zonas próximas à superfície e ao leito. Para estimar a velocidade nas margens, antes de iniciar e finalizar a medição, o operador fica registrando um determinado número de *pings* (envio e retorno do sinal). Em relação à superfície, o equipamento não irá medir a camada acima de seus transdutores e logo abaixo deles, conhecida como *blanking*, sendo esta parte extrapolada. A camada muito próxima ao leito não é utilizada nas medições devido à existência de interferência no retorno do sinal, devido aos sedimentos de fundo e à própria reflexão do sinal, chamado de *side-lobe*.

3.3 Teste do Fundo Móvel

Em canais naturais podem ocorrer movimentações do material de fundo junto ao leito do rio, este processo é chamado de Efeito de Fundo Móvel (EFM). Este efeito pode ocasionar erros de posicionamento durante a medição, alterando a referência de posição da embarcação em relação ao leito, que teoricamente está estático, registrando velocidades errôneas, subdimensionando as velocidades e, conseqüentemente, atribuindo mais erros sobre a vazão (GAMARO, 2012).

Este erro ocorre quando os sedimentos em movimento próximo ao fundo são lidos como se fosse o leito (GAMARO, 2003), atribuindo erro à estimativa da velocidade do barco, que é calculada a partir desta leitura. A velocidade medida pelo ADCP é, na realidade, uma velocidade relativa (velocidade da água mais a velocidade do barco), por isso a necessidade de outras ferramentas de referência do equipamento durante a medição (sistemas de posicionamento – GPS VTG e GGA). O *Bottom-Tracking* não é recomendado para seções que apresentam fundo móvel, visto que o sistema de referência é o fundo da seção medido pelo feixe acústico.

Para definir se há ocorrência de fundo móvel na seção, o teste do fundo móvel deve ser realizado. O teste consiste em realizar uma medição com o barco parado em alguns pontos da seção. O tempo mínimo para o teste é de cinco minutos medindo no mesmo ponto a velocidade. No final da medição, compara-se o DMG (*Distance Made Good*), que é a distância em relação ao ponto de início da medição, com o trajeto, cujo valor é referente à distância total percorrida. Se estas forem muito diferentes, é possível que esteja ocorrendo fundo móvel.

Um cálculo simples é feito para saber se este valor é significativo e deve ser corrigido sobre a medição. Primeiro, calcula-se a velocidade do fundo móvel (equação 4) e, posteriormente, a partir da relação entre a velocidade do fundo móvel e a velocidade média da água (equação 5) é definida a ocorrência ou não de fundo móvel. Se o valor da velocidade do fundo móvel for maior que um por cento em relação à velocidade média da água durante o teste, a correção para fundo móvel sobre as medições deve ser feita.

$$\text{Velocidade fundo móvel} = \frac{\text{DMG}}{\text{tempo}} \quad (4)$$

$$\frac{\text{Vel.fundo móvel}}{\text{vel.média da água}} \quad (5)$$

3.4 Aplicação do Método

O Método das Velocidades Indexadas considera, de maneira separada os componentes da vazão: a área é obtida a partir da observação da cota e a velocidade é obtida a partir da relação direta da velocidade média da seção e a velocidade apenas do eixo X. Tanto a velocidade indexada (no eixo X) quanto a cota são registrados pelo equipamento acústico fixo (SL500), enquanto que os valores de velocidade média e de área são obtidos a partir de medições com o equipamento acústico móvel (M9).

Para obter os dois gráficos do método, foi elaborado uma curva que relaciona a cota com a área, e outra relacionando a velocidade média da medição e a velocidade no eixo X no momento da medição. Assim, a partir da equação da continuidade, estima-se a vazão do canal.

A qualidade da curva de velocidades indexadas é dependente do número de medições realizadas e da variabilidade de condições medidas, ou seja, quanto maior a variação das condições medidas (diferentes níveis e velocidades), as equações geradas serão mais fiéis à real condição do canal. Geralmente estas relações são representadas por regressões lineares simples.

3.5 Validação das equações

Para avaliar a eficiência do ajuste das equações geradas pela relação Cota x Área e Velocidade Média x Velocidade Indexada, foi realizada a análise pelo coeficiente de determinação (R^2), que é uma medida descritiva da qualidade do

ajuste obtido. Seria a quantidade de variabilidade nos dados que é explicado pelo modelo de regressão escolhido e é expresso pela equação 6:

$$R^2 = \frac{\sum(V_e - \bar{V}_e)^2}{\sum(V_o - \bar{V}_o)^2} \quad (6)$$

Onde:

R^2 - Coeficiente de Determinação

V_o – Variável Observada

V_e – Variável Estimada

\bar{V}_e – Valor Médio da série de dados estimados

\bar{V}_o – Valor Médio da série de dados observados

Utilizou-se, também, o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH e SUTCLIFFE, 1970) (Equação 7). Este coeficiente indica o ajuste dos dados simulados aos observados, podendo variar de $-\infty$ a 1, e quanto mais próximo de 1 se apresenta o coeficiente, melhor será o ajuste da equação ao conjunto de dados. Conforme Silva (2008), a equação está bem ajustada quando o CNS é superior a 0,75; entre 0,35 e 0,75 estará aceitável e quando se apresenta inferior a 0,36 será considerado inaceitável.

$$CNS = 1 - \frac{\sum(V_o - V_e)^2}{\sum(V_e - \bar{V})^2} \quad (7)$$

Onde:

CNS – Coeficiente de Nash-Sutcliffe

V_o – Variável Observada

V_e – Variável Estimada

\bar{V} – Valor Médio da série de dados utilizados

Para verificar a tendenciosidade média das estimativas realizou-se o teste de estimativa das tendências, expresso pela equação 8:

$$TM(\%) = \frac{\sum\left(\frac{V_e - V_o}{V_o}\right)}{N} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

TM – Tendenciosidade Média

Ve – Variável Estimada

Vo – Variável Observada

N – Número de observações

Quando o valor de TM apresenta-se positivo, há tendência de superestimativa, e quando negativo, subestimativa. Liew et al. (2003) consideram que valores inferiores a 10%, apresentam tendências não significativas sendo um ajuste muito bom, entre 10% e 15% o ajuste é bom, entre 15% e 25% se considera satisfatório, e maior que 25%, a equação produz estimativas inadequadas.

3.6 Aplicação da curva-chave tradicional

De maneira comparativa foi aplicado o método da curva-chave. A curva-chave é uma equação gerada utilizando a vazão e relacionando-a com a cota diretamente. A equação que representa a curva-chave tradicionalmente é definida pela equação 9:

$$Q = k \times (h - h_0)^a \quad (9)$$

Onde:

Q – Vazão em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

K e a – São constantes de ajuste

h – Cota em centímetros

h₀ – Cota (em centímetros) de vazão nula

4 Resultados e Discussão

4.1 Estimativa de Efeito de Fundo Móvel

O efeito de fundo móvel é extremamente importante, devido à que afeta diretamente na velocidade medida pelo ADCP. Para sua estimativa realiza-se antes do levantamento da seção, medições com o equipamento parado, o chamado teste estacionário, como pode verificar-se na figura 13. O teste fica registrado, e é possível sua verificação e correção imediata da velocidade através do software RiverSurveyor Live, tecnologia embarcada no equipamento.

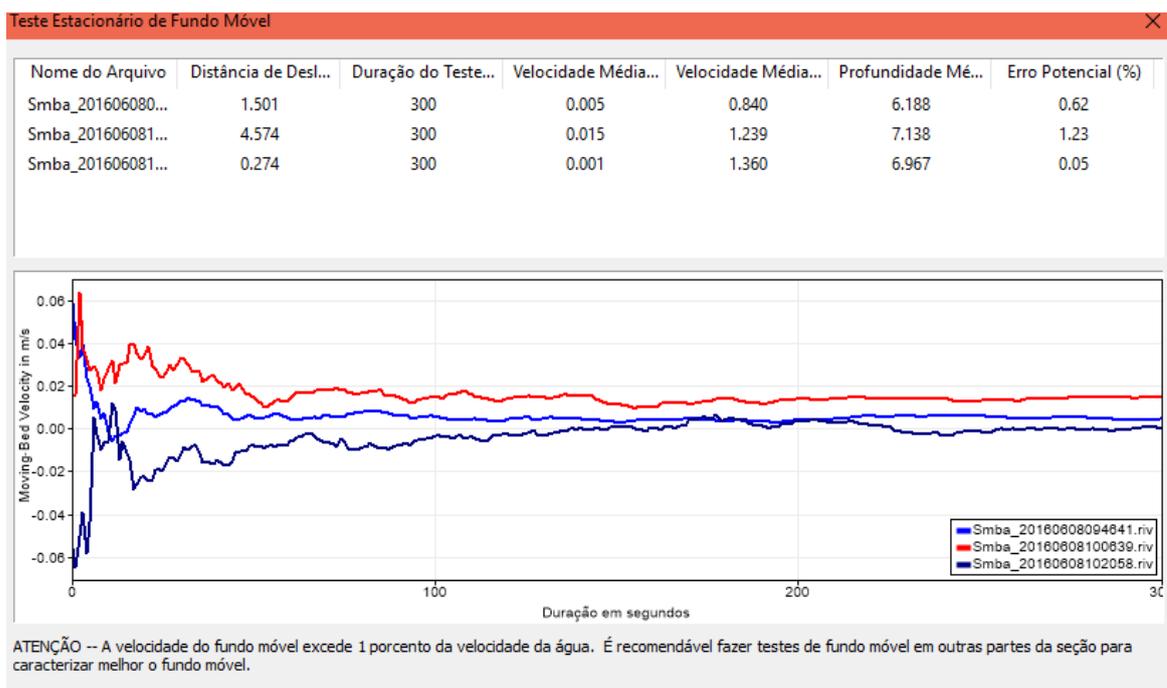


Figura 13: Display do teste estacionário realizado com o software RiverSurveyor Live sobre a seção de medição no Canal São Gonçalo.

Na figura acima, percebe-se que duas das medidas de estimativa de fundo móvel apresentaram velocidade média de fundo móvel inferior a 1%, enquanto que a segunda medida apresentou velocidade um pouco superior a um por cento. Nesta situação procura-se realizar testes estacionários em mais pontos da seção, a fim de confirmar a existência ou não do fundo móvel. O teste apresentado na figura 13 foi realizado em quatro pontos da seção. Entretanto, uma das medições foi excluída

considerando a perda de ancoragem da embarcação e conseqüente movimentação significativa do barco durante o teste.

O erro potencial referido na última coluna não se configura um problema, visto que é muito baixo e, possivelmente haja sido ocasionado pela movimentação da embarcação durante a medição e não devido à movimentação do fundo e, considerando isso, justifica-se a repetição das medições para o teste e em diferentes pontos da seção. A figura 13 mostra o gráfico da velocidade do fundo móvel sobre o tempo, na tabela descrita na parte superior da figura é possível observar o nome do arquivo gerado, a distância total do deslocamento durante o teste, velocidade média da água e do fundo, profundidade média e o erro potencial sobre a medição. Assim é possível inferir que na seção de estudo não há ocorrência de fundo móvel significativa, não havendo necessidade de correção da velocidade para fundo móvel.

4.2 Realização das medições

As medições com o uso do equipamento acústico M9 foram realizadas no período de 19 de novembro de 2015 a 8 de junho de 2016, num total de 19 medições. É importante destacar que quanto maior for o número de medições nas mais diferentes situações de escoamento, mais representativa será a curva gerada. Em virtude disto buscou-se realizar as medições que contemplassem diferentes situações de cotas, velocidades do vento e por conseqüência vazões.

A tabela 1 apresenta os dados referentes às 19 medições utilizadas para a aplicação do método das velocidades indexadas. Nela estão descritos as datas e horários de início, as durações médias, vazões, velocidades médias, áreas e cotas obtidas a partir do feixe vertical do equipamento estático. Além destas é possível observar a velocidade média e direção predominante do vento no dia da medição fornecida pelo Boletim Agroclimatológico da Embrapa Clima Temperado para a cidade de Pelotas. Os horários das medições estão ajustados ao horário normal, foi desconsiderado o horário de verão nas medições realizadas durante esse período. A duração se refere ao tempo gasto na medição. Cabe salientar que são valores

médios e, para cada medição descrita foram realizadas três ou mais repetições, para assim diminuir erros associados à velocidade.

Tabela 1– Medições utilizadas para a geração das curvas de velocidades indexadas.

Data	Horário	Duração (s)	Vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Velocidade Média (m s^{-1})	Área (m^2)	Cota (m)	Vel. médio do Vento (ms^{-1})	Direção do Vento
19/11/2015	13:53:30	196	1374,3	0,95	1446,5	1,29	2,0	SE
06/01/2016	08:34:04	237	1117,2	0,79	1422,1	1,17	0,9	NE
12/02/2016	08:21:07	260	586,5	0,45	1310,7	0,78	3,7	NE
12/02/2016	10:19:24	267	624,8	0,48	1312,8	0,79	3,7	NE
12/02/2016	13:24:36	256	562,7	0,42	1344,4	0,81	3,7	NE
10/03/2016	14:13:19	233	453,4	0,33	1380,7	0,98	1,6	SE
15/03/2016	09:34:15	241	277,2	0,21	1340,3	0,90	3,3	NE
22/03/2016	10:16:22	205	819,5	0,63	1307,1	0,70	3,5	SW
30/03/2016	09:17:34	220	852,7	0,62	1387,6	1,02	0,8	SW
04/04/2016	10:52:37	254	492,6	0,36	1373,6	0,98	2,8	NE
07/04/2016	17:48:47	229	706,2	0,52	1356,1	0,88	1,6	SW
20/04/2016	16:14:43	254	955,4	0,69	1383,9	1,02	0,9	SW
26/04/2016	09:56:22	191	1673,0	1,17	1430,2	1,26	5,8	SW
27/04/2016	09:49:05	212	1843,4	1,25	1474,1	1,48	5,7	SW
12/05/2016	10:08:58	220	1501,2	1,02	1467,4	1,35	1,4	SW
17/05/2016	09:26:23	186	1511,6	1,04	1449,1	1,30	5,0	SW
20/05/2016	10:05:39	208	1537,7	1,04	1486,3	1,40	0,9	SW
07/06/2016	10:24:35	195	1379,4	0,99	1387,6	0,99	3,5	W
08/06/2016	09:21:39	181	1372,1	0,98	1405,2	1,06	3,4	W

Legenda: SE – vento predominantemente Sudeste; NE – vento predominantemente Nordeste; SW – vento predominantemente Sudoeste; W – vento predominantemente Oeste.

Um resumo das medições é gerado automaticamente pelo software RiverSurveyour Live, apresentando análises estatísticas em relação aos valores de cada uma das medições que permitem gerar um resultado final. Na figura 14 pode-se observar um conjunto de medições realizadas no dia 07/06/2016, sendo atribuído um valor médio a partir destas. Nesse boletim são registrados características da seção e dados referentes à cada uma das repetições realizadas para estimar a média da medição. Dados como: a) data, a hora de início e a duração da medição, importantes para relacionar com os dados de velocidade na direção x e cota respectiva, obtidos pelo equipamento fixo (SL500); b) temperatura média da água e salinidade, importantes para definir a propagação do sinal acústico na água; c) características do trajeto, distância e percurso da embarcação durante a medição; d) velocidades médias da embarcação e da água, importantes para a estimativa da real velocidade da água; e) vazão total e em cada parte da seção, e a porcentagem medida da seção; f) características da calibração da bússola, importantes para o referenciamento da medição e; g) configurações do equipamento e da medição.

Relatório da Medição

Data Medido: terça-feira, 7 de junho de 2016

Detalhes do Local						Informações da Medição											
Informações do Sistema			Configurações do Sistema			Unidades											
Tipo do Sistema	RS-M9		Prof. dos Transdutores (m)	0.07		Dist.	m										
Número de Série	4602		Salinidade (ppt)	0.0		Velocidade	m/s										
Versão do Firmware	3.92		Declinação Mag. (graus)	-15.1		Área	m ²										
Versão do Software	3.9.50					Vaz.	m ³ /s										
						Temperatura	graus C										
Configurações da Medição						Resultados de Vazão											
Ref. para Trajeto	Bottom-Track		Método Margem Esq.	Margem Vertical		Largura (m)	232.073										
Ref. para Prof.	Feixe Vertical		Método Margem Dir.	Margem Gradual		Área (m ²)	1,387.634										
Sist. de Coord.	ENU		Tipo Extrapolação Superf.	Lei Exponencial		Vel. Abs. Média (m/s)	0.994										
			Tipo Extrapolação Fundo	Lei Exponencial		Vaz. Total (m ³ /s)	1,379.418										
			Cota Inicial (m)	0.00		Profundidade	7.539										
			Cota Final (m)	0.00		máxima medida											
						Velocidade máxima medida	2.182										
Resultados das Medições																	
Nº da trav.	Hora		Dist.				Vel. Méd.		Vaz.						%		
#	Hora	Duração	Temp.	Trajeto	DMG	Larg.	Área	Emb.	Água	Esq.	Dir.	Superf.	Meio	Fundo	Total	LCTotal	Medido
1	M 10:24:35	0:03:30	13.0	232.96	227.97	233.374	1,396.120	1.109	0.993	-0.23	-0.03	100.83	1,065.54	220.02	1,386.138	--	76.8
2	M 10:28:35	0:02:49	12.9	229.49	225.81	231.211	1,386.299	1.358	0.965	-0.16	0.02	98.05	1,022.90	217.03	1,337.846	--	76.4
3	M 10:31:26	0:03:33	12.9	231.49	226.04	231.443	1,383.695	1.087	1.023	-0.10	-0.01	102.83	1,079.41	232.93	1,415.052	--	76.3
4	M 10:35:03	0:03:08	12.9	230.90	226.87	232.266	1,384.421	1.228	0.996	-0.06	0.66	100.73	1,054.29	223.02	1,378.636	--	76.5
		Média	12.9	231.21	226.67	232.073	1,387.634	1.196	0.994	-0.14	0.16	100.61	1,055.53	223.25	1,379.418	0.000	76.5
		Desvio Padrão	0.0	1.24	0.85	0.847	4.991	0.108	0.020	0.06	0.29	1.70	20.84	5.97	27.585	0.000	0.2
		CV	0.0	0.005	0.004	0.004	0.004	0.090	0.021	-0.455	1.790	0.017	0.020	0.027	0.020	0.000	0.003
Tempo de Exposição: 0:13:00																	
Nº da trav.20160607102435.riv; Nº da trav.20160607102836.riv; Nº da trav.20160607103126.riv; Nº da trav.20160607103503.riv;																	
Coment.																	
Calibração da Bússola																	
Calibração com sucesso																	
Duração da calibração = 105 s																	
M9.00 = Influência magnética tolerável																	
Q9 = Campo magnético é uniforme																	
H9 = Rotação horizontal completa																	
V5 = Pitch/Roll Elevados																	
Recomendações:																	
Evite mudanças na configuração e orientação entre o sistema e as influências magnéticas detectadas durante a calibração da bússola.																	
A localização da travessia deve ter as mesmas propriedades magnéticas de onde a bússola foi calibrada.																	
Testar Sistema																	
Resultado: Sistema está operando normalmente																	
Parâmetros e configurações marcadas com um * não são constantes para todos os arquivos.																	
Relatório gerado com RiverSurveyor Live v3.9.50																	

Figura 14: Representação de um relatório de medição (07/06/2016) gerado a partir do Software RiverSurveyor Live.

4.3 Aplicação do Método das Velocidades Indexadas

Correlacionando os dados obtidos pelo SL500 e os dados das medições com o M9, foi possível criar uma relação entre eles, para assim poder gerar as duas equações de área e velocidade.

O gráfico de Área x Cota foi elaborado a partir dos dados de nível lidos pelo SL no momento da medição com os dados de área fornecidos pela medição com o M9. O gráfico Velocidade Média x Velocidade Indexada, apresenta a relação da velocidade em x medida pelo SL no momento da medição da velocidade com o M9, gerando os dois gráficos e equações apresentados na figura 15.

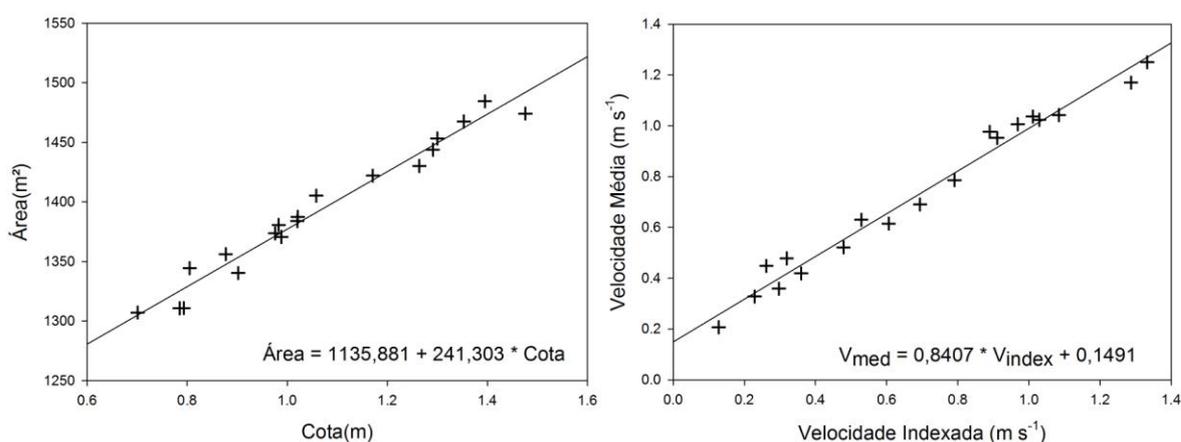


Figura 15: Gráficos Área x Cota e Velocidade Média x Velocidade Indexada.

4.4 Validação da Equação

A equação de velocidades indexadas é utilizada para relacionar os dados de velocidade medidos em campanhas de medição com os dados contínuos de velocidade obtidos pelo medidor estático. A partir dessa premissa, é possível gerar uma série de dados de vazão a partir dos dados de nível e velocidade no eixo x. Contudo, existe um erro associado à esta estimativa. Para isso são realizadas análises estatísticas a fim de verificar se são significativos ou não estes erros.

Pode-se observar a partir da tabela 2 que os testes estatísticos realizados apresentaram bons resultados. O coeficiente de determinação apresentou um valor de 0,967 para a relação cota-área e 0,979 para a relação de velocidades, e o coeficiente de Nash-Sutcliffe apresentou respectivamente 0,966 e 0,979, considerando o ajuste das equações muito bons para representação dos valores. Outra análise realizada foi a verificação dos erros e sua tendência média das estimativas, para verificar se há maior tendência em subestimar ou superestimar os valores. Como é possível verificar, as duas equações apresentaram valores de tendenciosidade muito pequenos, sendo considerada uma tendência bastante baixa, apresentando um ajuste muito bom segundo classificação de Liew et al. (2003).

Tabela 2: Análise estatística das equações geradas pelo Método das Velocidades Indexadas para representação do escoamento.

Equação	R²	NS	TM (%)
Área = 1135,881 + 241,303 * Cota	0,967	0,966	0,006
Vmed = 0,8407 * Vindex + 0,1491	0,979	0,979	1,15

NS – Coeficiente de Nash-Sutcliffe; R² - Coeficiente de Determinação; TM – Tendenciosidade Média.

Conforme estas análises, as duas equações estão bem ajustadas. A figura 16 apresenta os valores de vazão final em relação à tendenciosidade. Valores acima da linha diagonal apresentam valores superestimados, abaixo subestimados. Como pode ser visualizado, os valores apresentaram muito baixa tendenciosidade, confirmando os resultados apresentados na tabela anterior, visto que os valores estão relativamente uniformes em torno da linha.

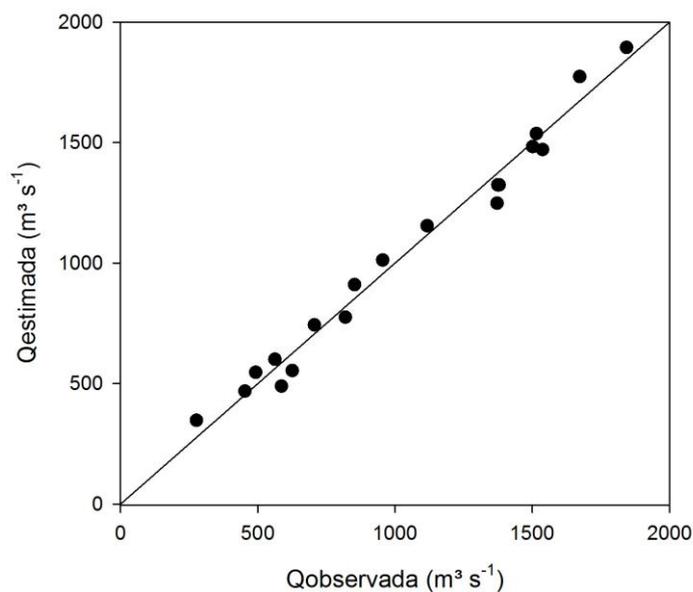


Figura 16: Gráfico de tendenciosidade das vazões obtidas a partir do Método das Velocidades Indexadas.

A curva-chave gerada utilizando os mesmos dados para a aplicação do método das velocidades indexadas pode ser observado na figura 17.

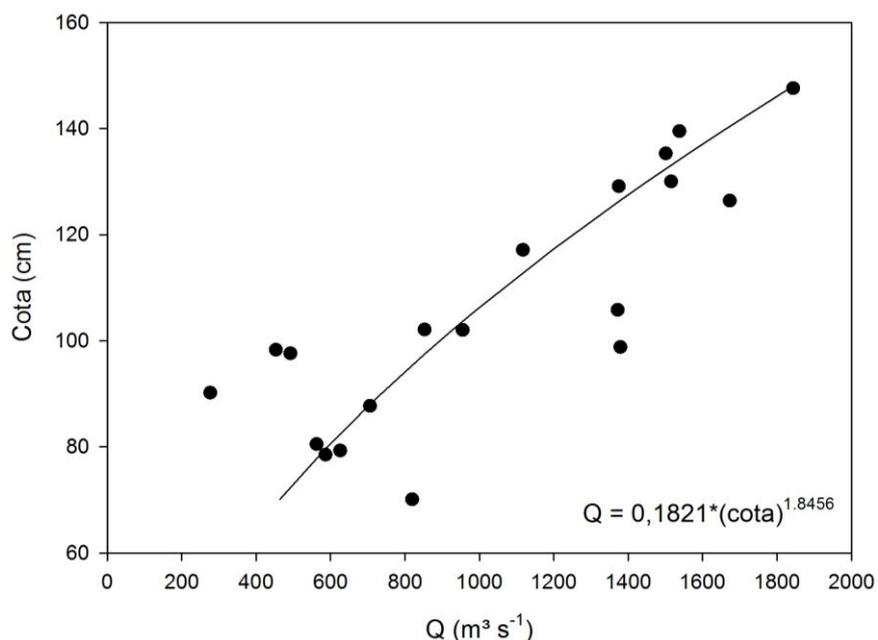


Figura 17: Gráfico da curva-chave tradicional para a seção de estudo.

Pode-se verificar que os valores de cota e vazão se apresentam dispersos em relação à curva, isso se deve à que o canal pode apresentar para cotas muito semelhantes valores de vazão diferentes. Os coeficientes de ajuste e de tendência

estão apresentados na tabela 3. Os coeficientes de Determinação e de Nash-Sutcliffe mostraram-se satisfatórios, e o índice de tendenciosidade apresentado foi de 11,92 %, considerado também satisfatório.

Tabela 3: Análise estatística das equações geradas pelo Método da Curva-Chave para representação do escoamento.

Equação	R²	NS	TM (%)
$Q=0,1821*(cota)^{1,8456}$	0,734	0,715	11,92

R² - Coeficiente de Determinação; NS - Coeficiente de Nash-Sutcliffe; TM - Índice de Tendenciosidade Média.

Apesar dos valores apresentados na tabela 3 terem sido positivos, é possível verificar através da figura 18, como os valores estimados de vazão estão mais dispersos que os obtidos a partir do método das velocidades indexadas. Isso se deve à influência que o canal sofre principalmente em relação ao vento. No dia 15/03/2016 foi realizada uma medição resultando em uma vazão de $277,2\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ apresentando uma cota de 0,90m, já no dia 22/03/2016 foi computada uma vazão de $819,5\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ com cota de 0,70m. Se calculados pela equação da curva-chave apresentariam vazões de $739,05\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $464,09\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, respectivamente. Deste modo, com a curva-chave não é possível estimar a vazão de maneira adequada. Isto se deve principalmente ao efeito do vento sobre o canal, no dia 15/03/2016 a velocidade média do vento foi de $3,3\text{m s}^{-1}$ com direção predominante Nordeste (NE), já no dia 22/03/2016 a velocidade média do vento foi muito parecida, no entanto, na direção Sudoeste (SW), ou seja, em sentido contrário, da Lagoa Mirim para a Laguna dos Patos.

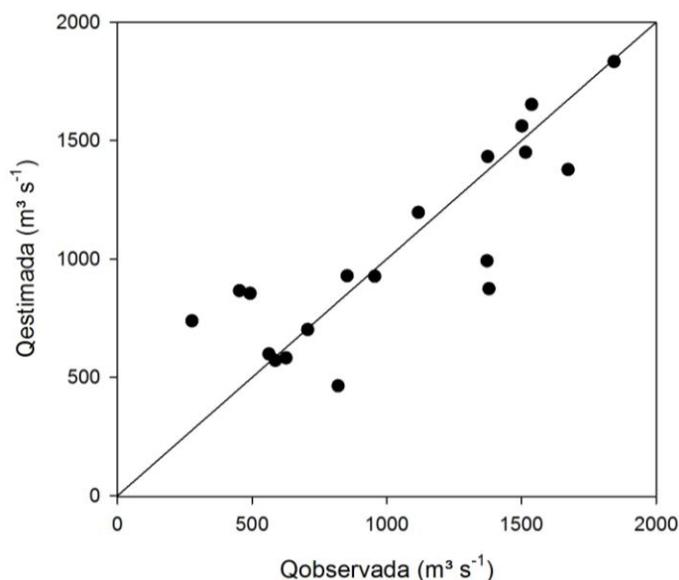


Figura 18: Gráfico de tendenciosidade das vazões obtidas a partir da curva-chave.

Em momentos em que ocorre predominância de vento no sentido da Laguna dos Patos em direção à Lagoa Mirim, há uma predominância de velocidades baixas no Canal, também em condições de baixa pluviosidade na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim, havendo a possibilidade de apresentar velocidades negativas (inversão do fluxo). Entretanto, não ocorre efetiva inversão de fluxo devido à construção da barragem-eclusa, quando o vento inverte ou ocorre pouca precipitação as comportas da Eclusa são fechadas, para evitar a entrada de água salgada na Lagoa Mirim. Por esse motivo ocorre um efeito de remanso, percebido pelo equipamento (diminuição da velocidade e aumento sensível do nível).

Contudo, durante o período de estudo não foi possível realizar medições em situações como a acima destacada. Este fenômeno apenas ocorreu em três dias desde a instalação do medidor estático: nos dias 25 e 26 de março; e no dia 5 de abril.

A velocidade média do vento registrada para os dias 25 e 26 de março foram de $3,3\text{ m s}^{-1}$ e $6,2\text{ m s}^{-1}$ respectivamente, ambas na direção Sudeste (SE). As velocidades máximas registradas pela mesma estação foram $14,5\text{ m s}^{-1}$ na direção Leste para o dia 25 e $25,9\text{ m s}^{-1}$ na direção Sudeste no dia 26. E para o dia 5 de abril, os ventos predominantes foram de sentido Nordeste (NE) com velocidade média de $1,5\text{ m s}^{-1}$ e máxima registrada de 8 m s^{-1} .

Portanto, cabe salientar que, mesmo que os testes apresentem resultados aparentemente razoáveis, conforme os padrões estabelecidos observa-se que o modelo da Curva-Chave não se apresenta aceitável para bem explicar o fluxo do canal com essas características. Com isso, é importante alertar que, ao interpretar resultados semelhantes, erros associados poderão influenciar na vazão final estimada.

É importante observar que em muitos estudos preliminares de obras hidráulicas em canais fluviais é requerida a elaboração de Curvas-Chave em seções específicas, para a interpretação do comportamento do escoamento. Até mesmo a regionalização de vazões é realizada ao considerar a inexistência de estudos prévios. Logo, em muitas situações, a aplicabilidade da metodologia tradicional de estimativa de séries de vazões, pode associar maiores erros de estimativa, devido à interpretações equivocadas e aplicações incorretas de estratégias que empregam a curva-chave.

5 Conclusão

A partir das equações obtidas para área e velocidade é possível gerar uma série de estimativas de vazões para o local estudado, com base nas velocidades e níveis medidos. A curva-chave tradicional, que se baseia apenas na leitura do nível para a estimativa da vazão, não é representativa para o canal São Gonçalo, não sendo assim aplicável nestas condições.

O método das Velocidades Indexadas representa de maneira discretizada o fluxo, observando a velocidade da água na definição do fluxo, e não apenas através do nível de água.

6 Recomendações

Assim como o método da curva-chave, as equações geradas pelo método das Velocidades Indexadas devem ser calibradas ao longo do tempo. E, diferente de canais construídos pelo ser humano, canais naturais, tais como o São Gonçalo, apresentam mudanças de geometria no decorrer do tempo, por mais que a seção de controle definida se mostre estável.

Indica-se medições em todas as possíveis condições de escoamento do curso d'água para melhor representação. Com isso, cabe alertar para a continuidade das medições na seção na busca de maior representatividade e melhor ajuste das equações geradas pelo método.

Com os estudos realizados no presente trabalho, assim como a coleta dos dados pelo equipamento estático, é possível a geração de uma série de vazões para o Canal São Gonçalo. Por esse motivo, a continuidade da coleta de dados será de grande valia para quaisquer estudos que necessitem desta informação.

Referências

AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Medição de descarga líquida em grandes rios: manual técnico** / Agência Nacional de Águas. -- 2. ed. -- Brasília: ANA, 2014.94p : il.

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. **Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental**. São Paulo: Edgard Blucher, 2009. 776p.

CAF. **Aplicación Metodología EASE-IIRSA**. Buenos Aires: CAF. 2015. Acesso em: <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/761>

CHOW, V. T. **Open channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959.

ENGELMAN, A.J.; MALDONADO, L.H.; GAMARO, P.E.M. Exatidão da vazão entre os sistemas de referência do perfilador acústico Doppler, In: **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Brasília, 2015.

FELICES, A.R. **Introducción a la Hidraulica Fluvial**. Peru: Universidad Nacional de Ingeniería, 1998. 270p.

FENTON J.D. e KELLER, R.J. **The calculation of streamflow from measurement of stage - Technical Report**. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology and Centre for Environmental Applied Hydrology, Department of Civil and Environmental Engineering: The University of Melbourne, Australia, 2001.

GAMARO, P.E.M. **Medidores Acústico Doppler de Vazão**. Assessoria de comunicação social, Itaipu Binacional, 2012. 164p.

GAMARO, P.E.M. Primeira análise dos métodos para correção ou medição de vazão em seções com fundo móvel. In: **XV Simpósio da ABRH**, Curitiba: 2003.

GAMARO, P.E.M.; GOMES, B.M.; MALDONADO, L.H. e RODRIGUES, M.F.C. Análise das Séries de Vazões Contínuas Obtidas em Tempo Real Através de Diferentes Técnicas com Aparelhos Acústicos Doppler Estáticos no Canal da Piracema da Itaipu Binacional: Canais quase Retangulares e Canais Trapezoidais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 18 n.1 –Jan/Mar 2013,33-42 33.

GARRISON, T. **Fundamentos de Oceanografia**. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

GOTVALD, A. J. e OBERG, K. A. Acoustic Doppler Current Profiler applications used in rivers and estuaries by the U.S. Geological Survey: **U.S. Geological Survey Fact Sheet**, 2008–3096, 2008, 4 p.

GOUVEA, T., ZARNOT, D. H. e ALBA, J. M. F. O histórico do processo de desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim. In: **Sustentabilidade Socioambiental da Bacia da Lagoa Mirim**, Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2010.p. 24-25.

HARTMANN, C. e SCHETTINI, C. Aspectos hidrológicos na desembocadura da Laguna dos Patos, RS, **Revista Brasileira de Geociências**, v. 21, n.4, p. 371-377, 1991.

HARTMANN, C.; HARKOT, P. F. C. Influência do canal São Gonçalo no aporte de sedimentos para o estuário da Laguna dos Patos-RS. **Revista Brasileira de Geociências**, Rio Grande, v. 20, 1990.

KENNEDY, E.J., 1984, Discharge ratings at gaging stations: **U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations**, book 3, chap. A10, 59 p.

KJERVE, B. e PROEHL, J.A. Velocity variability in a cross-section of a well-mixed estuary. **J. Mar. Res.**, 37:409-418, 1979.

LEVESQUE, V.A., e OBERG, K.A., Computing discharge using the index velocity method: **U.S. Geological Survey Techniques and Methods** 3–A23, 2012. 148 p

LIEW, M. W.; ARNOLD, J. G; GARBRECHT, J. D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: choosing between two models. **Transactions of the ASAE**. n.46, p. 1539-1551, 2003.

MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo:Edusp, 2002.414p.

MUELLER, D.S., WAGNER, C.R. **Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat**: US Geological Survey Techniques and Methods 3A-22, 72p, 2009.

MUSTE, M.; ZHENGYANG, C.; VIDMAR, P.; HULME, J. Considerations on discharge estimation using Index-Velocity Rating Curves. In: **E-proceedings of the 36th IAHR World Congress**, The Hague, Netherlands, 2015.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, I. V. River Flow Forecasting Throigh Conceptual Models. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, v.10, n. 3, p. 282-290, 1970.

OLIVEIRA, H. A. de. **Estudo do comportamento hidrodinâmico da Lagoa Mirim e dos processos de troca com a Lagoa dos Patos via Canal de São Gonçalo**. 2012. 98 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia física, química e geológica) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2012.

PEREIRA, F. F. **Modelo hidrodinâmico e de transporte bidimensional de grade não estruturada para lagos rasos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.; KOETZ, M. **Estudo da vazão em cursos d'água**. Viçosa: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa. 2006. 151 p.

RANTZ, S. E. Measurement and Computation of Streamflow: Volume 1, Measurement of Stage and Discharge. **U.S. Geological Survey Water Supply Paper** – n. 2175, 283p, 1982.

RIZZI, R. L. **Modelo Computacional Paralelo para a Hidrodinâmica e para o Transporte de Substâncias Bidimensional e Tridimensional**. 2002. Tese (Doutorado em Ciência da Computação), Instituto de Informática. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria aplicada**, Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, 2001.

SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. e COELHO, G. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 258-265, 2008.

SONTEK. **RiverSurveyor S5/M9 System Manual**. San Diego, EUA: Maio, 2016.

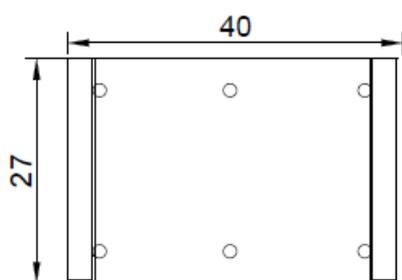
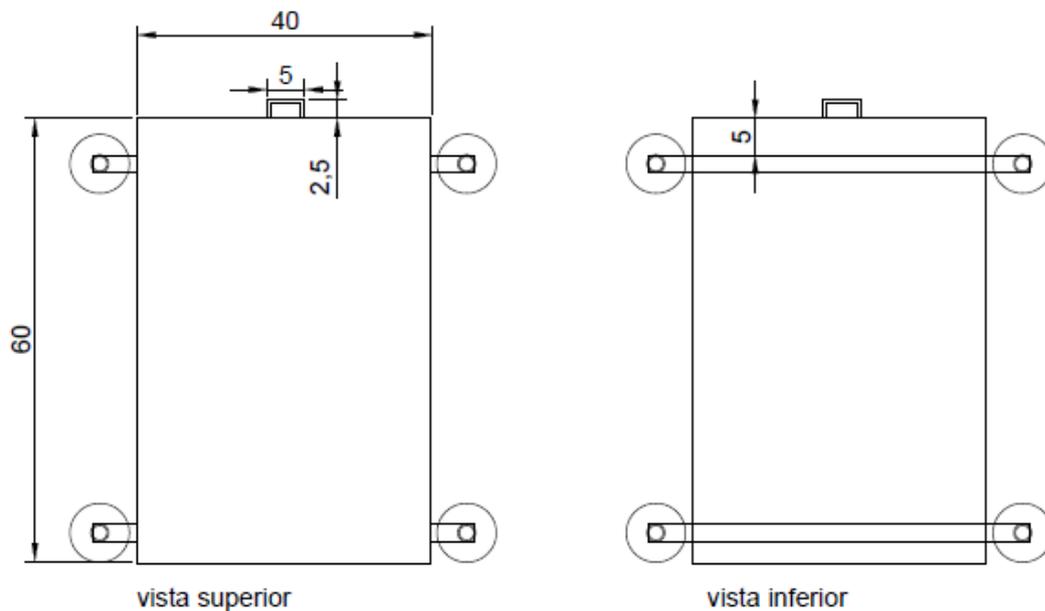
SONTEK. **ViewArgonaut User Guide**. San Diego, EUA: Abril, 2008.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Editora da Universidade (UFRGS), 2009, 952 p.

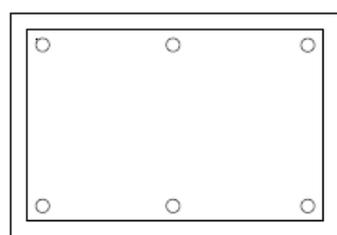
WOODROFFE, C.D. **Coasts: Form, Process and Evolution**. Inghilterra: Cambridge University Press, 2003, 640p.

Apêndice

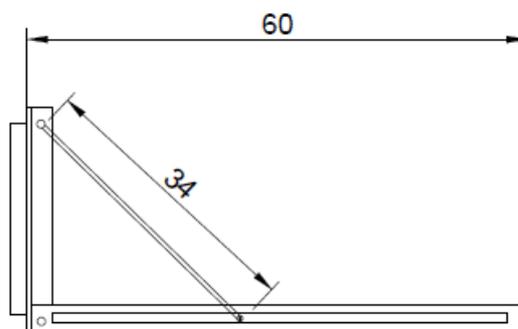
APÊNDICE A: Esquema da estrutura construída para a fixação do equipamento acústico estático SL500 às margens do Canal São Gonçalo.



atrás



frente



lado

Legenda: Carrinho que vai acoplado à um trilho instalado na margem do canal (unidades em centímetros).