Leonardo Sehn Alves

Desenvolvimento de Medidor de Condutividade Elétrica da Água para fins de Monitoramento Ambiental

Trabalho de diplomação em Engenharia Física apresentado à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) como exigência para obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Física.
Orientador: Rafael Peretti Pezzi.

Porto Alegre
2016

Dedico este trabalho, esta força
Esta intenção
A quem percebe
A ciência como questionadora
A tecnologia enquanto materialização de uma intenção
A vivência como aproximação
A quem tentou, a quem tenta
A quem tentará
Há quem tente
A ressonância está aqui
Em todo lugar

Dedico à construção de um mundo de relações mais ecológicas, harmoniosas e amorosas, e a todes seres que já estão nesta construção coletiva, além daqueles que podem se juntar a este processo através das muitas tentativas e iniciativas que vêm se manifestando e que se manifestarão. A ressonância está aqui,
em todo lugar.

AGRADECIMENTOS

Manifesto minha gratidão pela oportunidade de aprender com tantas pessoas de conhecimentos e sabedorias diversos e complementares que me auxiliam em minha jornada, e em especial ao longo deste trabalho.

Agradeço a minhe companheire, à minha família, a minhes amigues, a minhes colegas, a minhes professores, e a todes.

Agradeço especialmente à minha companheira Marina pela ajuda completa ao longo de todo o trabalho.

Agradeço aos amigos e colegas Jan Luc e Paulo também pela ajuda com o uso das ferramentas de fabricação disponíveis no CTA e *softwares* que dão suporte a elas, elementos fundamentais neste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Rafael Pezzi, não somente pela orientação engajada, mas também pela visão e disposição em inspirar.

Agradeço também especialmente ao Mauro Finn do Setor de Eletrônica do Instituto de Física pela dedicação inabalável e disposição em ajudar, combinados a um conhecimento vasto e profundo.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....4
2. ESTADO DA ARTE.....7
3. OBJETIVOS.....21
4. METODOLOGIA.....24
5. DESENVOLVIMENTO.....26
6. CALIBRAÇÃO DO CONDUTIVÍMETRO.....44
7. RESULTADOS.....52
8. ANÁLISES E PERSPECTIVAS.....53
9. CONCLUSÕES.....55
REFERÊNCIAS E FONTES BIBLIOGRÁFICAS.....56
APÊNDICE A.....58

1. INTRODUÇÃO

A água é recurso indispensável para todos os seres vivos na forma de vida como a conhecemos. Constituindo em média 60 % da massa do corpo humano, foi fator fundamental para a formação das primeiras estruturas comunitárias, além de ser essencial até hoje na produção de alimentos bem como em praticamente todos os processos produtivos. A importância dessa substância química, constituída de moléculas com dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio, para a criação das condições propensas a existência da vida é enorme. Esta importância se deve em especial a fatores de caráter físico-químicos relacionados a sua estrutura: é constituída de moléculas com dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio, sendo essas moléculas de natureza quadripolar elétrica (com dois polos positivos e dois negativos), com momento de dipolo elétrico intenso e, ao mesmo tempo, apresentando um volume molecular pequeno.

Esse quadripolo elétrico da molécula de H_2O é formado pela diferença de eletronegatividade entre oxigênio e hidrogênio e pela ligação covalente entre eles, que resulta em uma hibridização sp^3 dos orbitais do átomo de oxigênio. Esses fatores, combinados, proporcionam uma maior densidade de probabilidade da função de onda dos elétrons da ligação covalente entre hidrogênio e oxigênio em regiões mais próximas ao átomo de oxigênio, causando uma carga líquida negativa para este átomo de oxigênio, enquanto uma carga líquida positiva se pronuncia nos átomos de hidrogênio. Os orbitais sp^3 não ligantes do oxigênio, dispostos na extremidade oposta aos átomos de hidrogênio contribuem ainda mais para uma carga líquida negativa no átomo de oxigênio. Portanto, os dois átomos de hidrogênio correspondem aos dois polos positivos da molécula de água, enquanto na extremidade oposta da molécula, os orbitais sp^3 não ligantes do oxigênio se encontram os dois polos negativos desse quadripolo elétrico de disposição geométrica tetraédrica.

Como os polos negativos estão posicionados na extremidade oposta aos polos positivos dessa molécula, é possível aproximá-la por um dipolo elétrico. De fato, o momento de dipolo elétrico resultante é elevado e tem como consequência diversas anomalias no comportamento observado da água – anomalias fundamentais para criação das condições de vida em nosso planeta. Dentre elas, é possível citar a elevada constante dielétrica da água, importante na dissolução de uma série de substâncias iônicas e polares, ou então as ligações de hidrogênio – muito fortes dentro do ramo das ligações intermoleculares – que redundam em outras propriedades fundamentais à vida, como alto calor específico, elevados calores latentes de fusão e de ebulição, elevada tensão superficial.

As ligações de hidrogênio se estabelecem através do caráter quadripolar elétrico da água, o que provoca a ligação entre as regiões negativamente carregadas de uma molécula de água

(os dois orbitais não ligantes sp^3 do oxigênio) e as regiões positivamente carregadas de outras moléculas de água (os átomos de hidrogênio), estabelecendo até quatro ligações de hidrogênio por molécula. Em duas ligações, a molécula atua como doadora de elétrons e, nas outras duas, como receptora. A força das ligações de hidrogênio em conjunto com essa simetria de duas ligações como aceitadora e duas como receptora por molécula e a disposição geométrica das mesmas resulta em um espaçamento característico e pronunciado entre as moléculas de água quando é constituída a estrutura cristalina de uma de suas formas no estado sólido. Essa característica provoca anomalias do comportamento da água quando comparada a outras substâncias, como por exemplo uma densidade menor para a água no estado sólido do que para a mesma no estado líquido.

O crescimento da população humana e das atividades industriais tem causado impactos negativos na quantidade e qualidade da água disponível para populações humanas e ecossistemas. Sendo a água tão intimamente relacionada com a vida, é de essencial importância a preservação de sua qualidade na Terra. Sendo nós os responsáveis pelos impactos na sua qualidade, temos o dever de monitorar a qualidade das águas ao longo do seus ciclos geológicos a fim de tomar decisões informadas em políticas públicas e decisões individuais a fim de preservar a qualidade de vida das populações e o funcionamento dos ecossistemas naturais.

Tal monitoramento é complexo, pois existem diversos parâmetros que podem ser analisados quando pretendemos inferir a qualidade da água. Desde a medição da condutividade elétrica até a medida de turbidez ou de oxigênio dissolvido, diversos parâmetros se somam para que possamos estimar a qualidade da água[1,2,3,4]. E corpos d'água diferentes tais como oceanos, estuários, águas profundas, rios e lagos terão características diferentes e mesmo corpos d'água de um mesmo tipo, como dois rios diferentes, por exemplo, apresentarão condições normais diferentes dependendo da geologia do solo que percorrem. A salinidade de oceanos será muito superior a de lagos ou rios, naturalmente, bem como a água de um rio sobre um solo de granito apresentará menor condutividade elétrica do que a de um rio sobre um solo de argila, e mesmo um mesmo corpo poderá apresentar menor condutividade elétrica em uma época chuvosa do ano em comparação com outra mais secas. Todas essas condições devem ser consideradas na avaliação dos parâmetros medidos para fazer o monitoramento da qualidade da água.

Este trabalho de diplomação tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de medição[5] automatizado de condutividade elétrica da água a ser aplicado no monitoramento de qualidade d'água. São analisadas suas virtudes e restrições como sistema de medida através de um estudo de caso.

O presente trabalho está estruturado da seguinte maneira. Num primeiro momento é feita a descrição do estado da arte das medidas utilizadas para inferir a qualidade da água em

diferentes contextos, dando maior atenção às medidas de condutividade elétrica. A seguir são apresentados os objetivos detalhados, os métodos utilizados, o desenvolvimento do medidor e os resultados obtidos. O trabalho é finalizado com uma análise dos resultados frente aos objetivos propostos e perspectivas para o futuro do projeto.

2. ESTADO DA ARTE

A qualidade da água pode ser estimada a partir da medição de diversos parâmetros, separadamente ou combinados. Parâmetros diretamente ligados à biologia ou à química normalmente devem ser medidos em laboratório, enquanto que uma maior parcela dos parâmetros físicos ou físico-químicos podem ser medidos no campo, mas tipicamente são medidos com maior facilidade e precisão em laboratório. Na tabela 1 estão listadas e definidas diferentes medidas de parâmetros comumente relacionados com a qualidade da água. Nas seções subsequentes alguns desses parâmetros diretamente relacionados com o presente projeto são descritos com maior aprofundamento.

Tabela 1 – Parâmetros que podem ser relacionados à qualidade da água e suas definições.

Parâmetro:	Definição:
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	Quantidade de oxigênio utilizada para oxidar a matéria orgânica presente na água através da decomposição microbiana aeróbica.
Coliformes Termotolerantes	Concentração de bactérias presentes no intestino de animais de sangue quente, indicadoras da presença de outras bactérias e vírus patogênicos.
Dureza	Concentração de cátions bivalentes na água, normalmente relacionada com a presença de carbonato de cálcio.
Metais	Concentração de metais na água.
Nitrogênio	Concentração de nitrogênio na água, pode ser encontrado na forma de amônia (NH_3 ou NH_4^+), de nitrito (NO_2), de nitrato (NO_3) ou então na forma orgânica.
Fósforo	Concentração de fósforo na água, normalmente na forma de PO_4^{3-}.
Sólidos Totais	Soma das concentrações de sólidos dissolvidos totais e de sólidos em suspensão.
Oxigênio Dissolvido	É a quantidade de oxigênio não composto dissolvido em um volume de água.
Potencial Hidrogeniônico (pH)	Medida em escala logarítmica relacionada à concentração de íons H^+ e indiretamente à de

	íons OH^- presentes na solução.
Turbidez	Grandeza que indica o grau de atenuação da luz ao atravessar a água, está associada à presença de partículas em suspensão na água.
Temperatura	Ver seção 2.11
Condutividade Elétrica	Ver seção 2.12

Um fenômeno crítico, que muitas vezes ocorre a partir do mau uso de recursos hídricos ou de atividades industriais e agrícolas, é a eutrofização. Este fenômeno ocorre quando há um aumento na concentração de nutrientes presentes na águas, promovendo a proliferação excessiva de algas, que consequentemente causa um aumento na população de outros seres vivos da cadeia alimentar. Em certas condições, esse processo é catastrófico, provocando a diminuição na concentração de oxigênio dissolvido, que por sua vez implica no colapso dos ecossistemas localizados no corpo hídrico e uma consequente redução na qualidade da água se pronuncia.

2.1 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

É a quantidade de oxigênio utilizada para oxidar a matéria orgânica presente na água através da decomposição microbiana aeróbica. Essa medição é realizada em laboratório, pois requer longo tempo e ambiente a temperatura constante para ser realizada. No Brasil, normalmente é executada a medida DBO 5, 20. Esta notação significa uma medida de DBO realizada com uma amostra isolada por 5 dias com ambiente mantido a 20 °C controladamente[3]. Após este período é medida a concentração de oxigênio na amostra e subtraída da concentração presente em uma amostra retirada ao mesmo tempo, mas antes que tenha sofrido o processo de decomposição.

Sendo a quantidade medida uma diferença de duas concentrações, então a unidade medida de DBO é uma unidade de concentração: mg/L. Altas quantidades de DBO podem provocar a eutrofização do ambiente, provocando um aumento da reprodução de algas resultando em um consumo de oxigênio insustentável, o que redunda na morte de diversos seres vivos. Quantidades muito elevadas de DBO podem inclusive provocar a decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente, sendo os produtos mais comuns dessa degradação o gás carbônico, o metano, a amônia, os ácidos graxos, as mercaptanas, os fenóis e os aminoácidos.

2.2 Coliformes Termotolerantes

Coliformes fecais como a *Esterococci* e a *Escherichia coli* são bactérias presentes no intestino de animais de sangue quente e como tais são indicadores da potencial presença de bactérias e vírus patogênicos quando em grandes quantidades. Sua presença tipicamente tem origem em esgoto não tratado ou dejetos da pecuária. Os seres patogênicos em si são presentes em menor quantidade, logo mais difíceis de detectar. Já as medidas dos coliformes termotolerantes são laboratoriais e simples: para medir bactérias indicadoras, amostras em contêineres esterilizados devem ser retiradas e forçadas através de um filtro. São incubadas por um determinado tempo em temperatura controlada para que seja realizada a contagem de quantidade de colônias que se proliferaram por unidade de volume. O resultado é tipicamente apresentado em número de colônias por 100 mL de água[2].

2.3 Dureza

É a concentração de cátions bivalentes precipitados na água, podendo ser dureza temporária (ou carbonato, pela presença de carbonatos e bicarbonatos) ou dureza permanente (ou não carbonato, pela presença de sulfatos e cloretos). É medida em mg/L de $CaCO_3$, ou Carbonato de Cálcio, e é obtida a partir de titulação úmida, processo realizado em laboratório. Não possui efeito deletério para a saúde em água potável se não estiver em quantidades muito elevadas, apenas um gosto desagradável e efeito laxativo. Altos valores de dureza resulta em dificuldade de formação de espuma, consumindo maior quantidade de sabão, podendo também causar incrustações em tubulações de água quente, caldeiras e aquecedores.

2.4 Metais

Metais também costumam estar presentes na água. Alguns podem ser essenciais para o consumo humano, como por exemplo o cobre, enquanto outros podem ser tóxicos, dependendo do tipo e da quantidade. Metais dissolvidos tendem a ser mais tóxicos do que metais particulados. Quando associados a compostos orgânicos e inorgânicos, metais reduzem sua toxicidade. As medidas são realizadas em laboratório e podem ser feitas de diversas maneiras, sendo inclusive recentemente realizado um método de determinação utilizando tecnologia do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS)[6].

2.5 Nitrogênio

Nitrogênio pode ser encontrado na água tanto na forma de amônia (NH_3 ou NH_4^+), quanto na forma de nitrito (NO_2) ou nitrato (NO_3). A forma mais estável é o nitrato, sendo então o teste mais comum. A amônia é a forma mais instável e, portanto, sua concentração é mais difícil de ser medida. A conversão de amônia para nitrato passa pelo nitrito, sendo a conversão de nitrito em nitrato rápida tendo o passo da conversão de amônia em nitrito como a etapa limitante da reação. Portanto, o nitrito está presente normalmente em baixa quantidade por não ser estável.

A amônia pode estar presente tanto na sua forma ionizada NH_4^+, não tóxica, quanto na sua forma não ionizada NH_3, tóxica. A quantidade total de amônia é dada pela soma das quantidades de ambas as formas e é um dos poluentes mais críticos para o ambiente aquático devido a sua natureza tóxica e sua onipresença em águas superficiais. O Nitrato normalmente é encontrado em concentrações muito baixas em águas superficiais e é essencial para autótrofos fotossintéticos, sendo identificado como nutriente limitante. Não se caracteriza como problema ambiental grave, mesmo em quantidades acima do normal, mas em alguns casos quando se torna muito excessivo pode ser causador de eutrofização do meio e de queda da qualidade da água.

O Nitrito é extremamente tóxico em meio aquático, mas normalmente é encontrado em quantidades ínfimas. Em alguns casos de estações de tratamento de esgoto que usam do processo de nitrificação para converter amônia em nitrato, se alguma etapa do processo sofre um impedimento, poderá haver um aumento na quantidade de nitrito que é enviado às águas receptoras desses dejetos. A medição da espécie predominante (entre nitrato, nitrito e amônia) também pode prover a informação de quão recente ou antiga é a poluição. O nitrogênio orgânico, como nas formas de ureia, ácidos nucleicos, peptídeos, proteínas, é outra forma de nitrogênio na água a também ser considerada, e pode ser encontrado desde em concentrações muito baixas até em alguns mg/L.

2.6 Fósforo

Comumente encontrado na forma de fosfato, ou PO_4^{3-}, o fósforo é nutriente essencial para o crescimento das plantas e a abundância de fosfato pode causar eutrofização do meio, sendo medido em unidades de mg/L, em concentrações acima de 0,05 mg/L é considerado eutrófico[2]. O fosfato associado a tecidos animais e de plantas é chamado de fosfato orgânico e o fosfato que não está associado a matéria orgânica é chamado de fosfato inorgânico, sendo este o principal responsável nos processos de eutrofização. A medição da quantidade total de fosfato é normalmente a mais indicada para se ter uma informação mais completa da quantidade de fósforo na água.

Podem ser citadas como grandes fontes de fósforo na água os esgotos domésticos, detergentes, abatedouros e despejos industriais (em especial da área de fertilizantes e alimentícia).

2.7 Sólidos Totais

Os sólidos totais abrangem os sólidos dissolvidos (TDS, Total Dissolved Solids, em inglês) e os sólidos em suspensão, portanto envolvem condutividade elétrica e turbidez, sendo a quantidade total residual a medida ao secar uma amostra de água. A quantidade de sólidos dissolvidos pode ser medida a partir da filtragem da amostra de água e então de sua secagem e pesagem dos resíduos, ou então pode ser inferida de maneira empírica a partir da condutividade elétrica. A quantidade de sólidos em suspensão pode ser obtida a partir da subtração da massa medida de sólidos dissolvidos da de sólidos totais, ou então inferida a partir de medidas de turbidez.

2.8 Oxigênio Dissolvido

É a quantidade de oxigênio não-composto dissolvido na água, portanto é uma medida de concentração, tendo como unidade mg/L, também podendo ser expresso em ppm (partes por milhão). É influenciado por diversos fatores naturais como a altitude ou a temperatura, que ao aumentar causa uma diminuição na solubilidade do oxigênio na água, e isso deve ser considerado em uma medida de oxigênio dissolvido, dado que um corpo d'água pode variar sua temperatura ao longo do ano, do dia e até mesmo no intervalo de uma hora. Quanto maior for a velocidade e o volume de um fluxo de água em um corpo d'água, maior será quantidade de oxigênio dissolvido, pois maior será a superfície de água em contato com a atmosfera ao longo do tempo, portanto quedas de água também aumentam o oxigênio dissolvido. Sólidos dissolvidos ou suspensos diminuem os níveis de dissolução de oxigênio na água.

A atividade humana também pode afetar os níveis de oxigênio na água. Por exemplo, quando uma vegetação ciliar é removida, dois efeitos se combinam, o aumento de temperatura e da liberação de sólidos em suspensão provindos do solo, o que resulta em uma diminuição do oxigênio dissolvido. Diversos tipos de dejetos, desde doméstico até industriais liberam uma série de compostos na água que tendem a reduzir a concentração de oxigênio dissolvido. O despejo de nutrientes na água tende a aumentar de maneira insustentável a população de algas, que ao morrerem são decompostas por bactérias, processo que consome ainda mais oxigênio dissolvido.

Plantas aquáticas são seres que produzem oxigênio através da fotossíntese e portanto aumentam o oxigênio dissolvido durante o dia, quando esse processo é possível, mas durante a noite

esses níveis caem devido ao consumo de oxigênio pelas próprias plantas e outros seres aquáticos. Se os níveis de oxigênio produzidos pelas plantas for muito abundante, atingindo um nível eutrófico, a queda do nível de oxigênio a noite pode causar a morte de diversos seres, incluindo peixes. A água é considerada limpa e saudável acima de 5 mg/L de oxigênio dissolvido. Abaixo de 3 mg/L pode ser prejudicial a diversas formas de vida. Quando abaixo de 2 mg/L causa a morte da maioria das espécies de peixe e é considerada hipóxica. Abaixo de 0,5 mg/L é considerada anóxica[2]. Níveis de eutrofização são atingidos acima de 10 mg/L, situação conhecida também como supersaturação[3]. Estas condições estão destacadas na tabela 2.

Tabela 2 – Condição da água associada à concentração de oxigênio dissolvido presente

Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Condição da Água
0 – 0,5	Anóxica
0,5 – 2	Hipóxica
2 – 3	Prejudicial a diversos seres vivos
5 – 10	Saudável
10 ou mais	Eutrófica

Existem diversos métodos de medição de oxigênio dissolvido, sendo possível realizar a maioria deles no campo, mas apenas uma parte pode ser realizada de maneira automatizada, a partir da medição de parâmetros físicos. Como medidas a serem realizadas em laboratório ou pelo menos que não podem ser automatizadas, podem ser citadas as medidas colorimétricas e as medidas de titulação, como o método de Winkler e suas variações.

No segmento das medidas que são mais facilmente automatizáveis podemos citar as eletroquímicas e as ópticas. As eletroquímicas utilizam eletrodos embebidos em solução eletrolítica onde o oxigênio difunde através de uma membrana e é atraído para um dos eletrodos, produzindo uma corrente proporcional à pressão parcial de oxigênio. Esse método de medida eletrolítico ainda pode ser subdividido em três categorias: as polarográficas, as polarográficas pulsadas e as galvânicas. A primeira e a segunda se diferenciam pela maneira como a tensão será aplicada além da inclusão de um terceiro eletrodo de referência no método pulsado, o método galvânico se diferencia pela polarização dos eletrodos ser autoinduzida em solução eletrolítica.

Por fim, um dos métodos mais convenientes para medidas automatizadas em campo para oxigênio dissolvido é o método óptico, pois requer manutenção menos frequente em relação aos métodos eletroquímicos. A medida óptica se dá a partir da incidência de radiação visível, tipicamente emitida por um *led* azul, sobre uma superfície ou tinta fotoluminescente dentro de uma câmara com parede semi-permeável por onde difunde o oxigênio dissolvido. A superfície irá luminescer e a intensidade que for absorvida (ou tempo de vida da luminescência) será proporcional

à concentração de oxigênio. O sinal será captado por um fotossensor e comparado com o sinal emitido ou comparado com um sinal de referência de outra fonte luminosa como o de um *led* vermelho, por exemplo.

2.9 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH é uma medida relacionada às concentrações de íons OH^- ou de íons H^+ presente na solução. Quanto maior for a concentração de H^+ menor será o pH e quanto maior for a concentração de OH^- maior será o pH, sendo 7 o valor neutro. O pH pode ser definido como:

$$pH = -\log_{10}[H^+]$$

A escala logarítmica indica que a variação de uma unidade do pH representa uma variação 10 vezes maior no balanço das concentrações de OH^- e H^+. Valores abaixo de 7 indicam maior presença de H+ com relação a OH- e indicam uma água ácida ou de alta acidez, valores acima de 7 indicam solução básica ou de alta alcalinidade. Águas consideradas saudáveis para a vida aquática apresentam um valor entre 6 e 9 de pH[7]. Na natureza, é influenciado pelo solo sobre o qual está o corpo de água. Por ação humana, pode ser alterado devido ao despejo de esgoto doméstico e dejetos industriais.

O pH, em flutuações não muito afastadas do valor neutro, não oferece muito risco a saúde humana, mas interfere nas etapas de tratamento da água. Valores baixos favorecem corrosões e valores altos podem provocar incrustrações. Alterações mais severas com relação ao pH neutro podem causar sério risco à vida aquática. Para valores de pH mais baixos, uma menor concentração de amônia é necessária para ser tóxica aos peixes. Para valores de pH mais altos a presença de metais na água é maior, pois eles se tornam mais solúveis.

O pH pode ser medido por indicadores, verificando-se a cor que o indicador apresenta quando exposto à amostra, e essa medida é qualitativa. Para medidas quantitativas utilizam-se pHmetros que podem ser utilizados tanto em laboratório quanto no campo, de maneira manual ou automatizada, dependendo do modelo. O medidor consiste de um eletrodo de referência e um eletrodo de vidro em contato com a amostra ligados a um potenciômetro e é basicamente um voltímetro que mede a diferença de potencial entre os eletrodos e converte a medida para um valor de pH.

2.10 Turbidez

Turbidez é a grandeza que indica o grau de atenuação da luz ao atravessar a água e está

associada à presença de partículas em suspensão na água, que, por si só, não representa um risco à saúde. A origem natural dessas partículas vai desde a argila sobre a qual o corpo de água se localiza até plânctons. Sua origem por influência humana pode ser atribuída a atividades de mineração ou resíduos industriais e domésticos, que podem afetar significativamente a turbidez. Então a turbidez não necessariamente indica um risco para a saúde, mas os sólidos em suspensão podem carregar micro-organismos patogênicos ou mesmo causar um desequilíbrio do ecossistema prejudicando a fotossíntese das plantas aquáticas, diminuindo a quantidade de oxigênio e até aumentando a temperatura através de uma maior absorção da radiação solar.

Medidas de turbidez podem ser feitas em laboratório ou no campo, manualmente ou de maneira automatizada. Existem diferentes padrões e normas de medida. Um dos principais métodos de medida de turbidez é por nefelometria, indicando a intensidade de luz espalhada a 90° da direção do feixe incidente. Este método pode ter sua precisão aumentada medindo-se a intensidade de luz espalhada em outros ângulos, fazendo-se considerações geométricas entre elas e tomando-se a razão adequada entre as intensidades. Portanto, é possível fazer essa medida em campo de maneira praticamente contínua, sendo um bom sensor para medidas automatizadas. Outro método de medida é por atenuação, ou seja, com medida realizada ao ângulo de 180º com relação à fonte de luz incidente, podendo ser usado em combinação com a nefelometria (espalhamento a 90º) para aumentar a precisão na medida.

2.11 Temperatura

Fator determinante no ciclo de vida de vários seres aquáticos, influenciando seu metabolismo e sua reprodução, a temperatura tem influência sobre a energia livre de Gibbs, que interfere na ocorrência de reações bioquímicas nesses organismos, podendo causar a desnaturação de proteínas, dentre outros efeitos. A temperatura também tem influência sobre a solubilidade de gases, seu aumento provoca a diminuição da solubilidade do oxigênio dissolvido e impacta na viscosidade da água, bem como em sua tensão superficial e outros fatores. Enquanto para muitos casos é utilizada apenas para determinar a temperatura das águas, em outros é utilizada como parâmetro de ajuste e calibração.

A temperatura varia ao longo do dia e também ao longo das estações do ano. O efeito da radiação solar direta pode ser amenizado pela presença de mata ciliar no corpo d'água. Mesmo existindo tais variações frequentes de temperatura, o despejo de água muito quente, como o provindo de atividade industrial, em corpos d'água pode ter um impacto deletério no ambiente.

A medida da temperatura é simples e existem diversos sensores de temperatura a partir

de elementos resistivos disponíveis, que podem ser utilizados em medidores automatizados no campo. O maior desafio é montar a estrutura para isolar esse sensor do impacto ou influência pontual de fatores externos que possam deteriorar o sensor ou prejudicar a medida sem afetá-la com esse isolamento.

2.12 Condutividade Elétrica

Por ser o parâmetro a ser aprofundado no presente projeto., essa seção será subdividida em uma subseção para o parâmetro em si e suas características e outra para medidores de condutividade elétrica.

2.12.1 Condutividade Elétrica como Indicador de Qualidade da Água

Parâmetro a ser medido no presente trabalho, a condutividade elétrica, representada por σ, é a medida da facilidade com a qual a água permite a passagem de corrente elétrica, sendo medida em S/m (siemens por metro), é o inverso da resistividade elétrica, medida em Ω m (ohms metro). A medição da condutividade de um líquido é uma maneira indireta e simples de inferir a presença de íons provenientes de substâncias polares, geralmente sais inorgânicos, dissolvidos na água, como cloretos, sulfetos, carbonatos, fosfatos. A presença dessas substâncias aumenta a condutividade da água, pois os mesmos são eletrólitos, ou seja, se dissolvem em íons na água e contribuem para a condução de eletricidade. Por outro lado a presença de substâncias apolares, que não se ionizam, como álcool, óleo e açúcar acarreta na diminuição da condutividade elétrica.

Normalmente, as medidas realizadas em laboratório são de condutância específica, que é a condutividade medida à temperatura de 25 °C. Esta é a maneira padrão de medir condutividade, pois facilita a comparação de diversos valores, sendo medida em µS/cm. Quando a condutividade não for medida em 25 °C, ela pode ser corrigida para obter o valor de condutância específica. Para que seja realizada esta correção, deve-se conhecer a temperatura e composição da água. A condutividade e a temperatura apresentam uma relação aproximadamente linear, em um intervalo de temperaturas próximas à temperatura ambiente e em condições normais de pressão, com coeficiente de proporcionalidade dependente da composição iônica da água[8]: Para soluções de KCl o valor deste coeficiente é de 1,88 e para soluções de NaCl é de 2,14. A condutância específica não deve ser confundida com a condutância, que, bem como a resistência, é uma medida que depende da geometria do condutor (área e comprimento).

A partir da medida de condutividade elétrica podemos estimar a salinidade da água,

definida como a quantidade total de sais dissolvidos na água. Os sais se dissolvem dando origem a íons de carga oposta e portanto contribuem para a condutividade elétrica da solução. Uma maneira de se medir a salinidade de uma amostra é por evaporação total da água da amostra e então medição da massa dos resíduos salinos restantes, porém esse não é um procedimento passível de realização automatizada em campo.

Uma maneira usual e mais prática para a medida da salinidade é realizada através da condutividade. É chamada de salinidade prática e definida como razão entre a massa total de sal dissolvido e a massa total da substância que serve como solvente, sendo então um valor adimensional expresso em psu: unidades práticas de salinidade. Este valor é obtido pela multiplicação do valor da condutividade por um coeficiente empírico atribuído à relação entre a condutividade e a salinidade. Esse coeficiente é obtido a partir de comparações com a salinidade do mar, que tem valor 35 psu, sendo os principais íons presentes o cloreto, o sódio, o magnésio, o cálcio, o sulfato, o potássio, o bicarbonato e o brometo[9]. Essa medida é feita amplamente, sendo a mais utilizada para armazenar valores de salinidade em bancos de dados. Também podem ser utilizadas soluções de cloreto de potássio.

Outra informação importante que pode ser estimada a partir da medida da condutividade elétrica é a quantidade de sólidos dissolvidos totais, que representa a quantidade de partículas dissolvidas com até 2 micrômetros de tamanho, podendo ser próxima à salinidade, pois engloba todos eletrólitos dissolvidos que compõem a salinidade[10]. Isso é verdade em especial para águas que não estejam sujeitas à poluição; águas com maior poluição envolvem compostos orgânicos dissolvidos que também contribuem para a salinidade, como hidrocarbonetos e ureia. A quantidade de sólidos totais dissolvidos em água doce não deve superar 2000 mg/L, apresentando valores bem abaixo desse para a maioria das fontes[11]. Um excesso de sólidos dissolvidos pode ser prejudicial para a sobrevivência de seres aquáticos como o salmão que, quando exposto a valores de sólidos dissolvidos entre 2200 e 3600 mg/L, tem suas chances de sobrevivência e procriação (sobrevivência de ovas) reduzidas[11].

Os íons provenientes de sais e demais substâncias polares dissolvidas são essenciais para a vida aquática, pois, através da osmose, regulam a entrada e saída de água das células e constroem blocos moleculares fundamentais à vida. Em excesso podem reduzir a quantidade de oxigênio dissolvido na água além de causar um fluxo exacerbado de água da célula para o meio externo, fazendo a mesma encolher. O contrário se observa quando há uma baixa quantidade de sólidos dissolvidos, em especial se tomamos o caso extremo da água destilada, causando um fluxo de água do meio externo para a célula que pode ser insustentável para a mesma.

A medição da concentração de sólidos dissolvidos totais a partir de evaporação e

gravimetria (ou pesagem) pode ser muito útil quando a composição dos solutos da água é desconhecida, mas para casos de composição conhecida e em especial para monitoramento automatizado e contínuo o mais adequado são medidas a partir da condutividade. Multiplica-se o valor da condutividade por um fator empírico determinado a partir da composição conhecida da água. A maioria das medidas de condutividade aceita um fator empírico[12] ao redor de 0,65 g cm/mS L, mas para águas com valor de condutividade acima de 5000 μS/cm esse fator deve ser reconsiderado para valores[13] entre 0,735 e 0,8 g cm/mS L e para casos de água pura de baixa condutividade os valores[14] devem estar entre 0,47 e 0,5 g cm/mS L. Idealmente um fator empírico deve ser determinado para cada corpo de água ou amostra em questão a partir da sua composição. Alguns padrões de examinação da água consideram fatores entre 0,55 e 0,7 g cm/mS L, mas para águas com sabida concentração pronunciada de íons de enxofre e cálcio a constante[11] deve ser próxima de 0,8 g cm/mS L.

A condutividade elétrica, em especial a condutância específica, é um dos parâmetros de rápida determinação mais comuns e úteis na medida de qualidade da água. Assim como para outros parâmetros, o corpo d'água mantém um valor aproximadamente constante de condutividade. Assim, flutuações podem indicar perturbação do sistema, seja por causas naturais, como inundações e secas, seja por interferência humana, como, por exemplo, através do despejo de efluentes, inclusive de poluição.

O efeito da temperatura deve ser sempre considerado em uma medida de condutividade uma vez que existe relação aproximadamente linear entre as duas grandezas. Suas flutuações diurnas e sazonais denotam o efeito da variação de temperatura. A estratificação de um corpo d'água, ou seja, a variação da condutividade, bem como de salinidade e oxigênio dissolvido em diferentes níveis de um corpo d'água devido a sua mudança de temperatura de acordo com a profundidade é outra evidência do efeito da temperatura num corpo d'água. A evaporação causada pelo aumento de temperatura e seca durante uma determinada estação podem aumentar a condutividade elétrica da água, pois concentra os sais e demais portadores dissolvidos na água.

O volume total do fluxo de água em um corpo d'água também terá um efeito importante sobre esse corpo e depende basicamente da natureza da água que flui para o mesmo. Se for de água doce implica na redução da condutividade do corpo d'água, se for uma água mineral, rica em sais, terá como efeito aumentar a condutividade do mesmo. Naturalmente, em ambos os casos, quanto maior for o fluxo d'água maior será o impacto na condutividade. Uma correlação de medidas de dois parâmetros, como poderia ser feito com a quantidade oxigênio dissolvido, condutividade elétrica e temperatura neste caso, pode ajudar a investigar a causa de uma flutuação desses parâmetros em um monitoramento remoto da situação de um corpo d'água.

A quantidade de chuva também pode afetar a condutividade: a água da chuva é, tipicamente, um pouco mais condutiva do que a água destilada devido à dissolução de partículas suspensas no ar e gases que tendem a aumentar a condutividade. A chuva também, quando em grandes quantidades, tende a diluir o número de portadores de carga na água, reduzindo a condutividade. Em caso de inundação, esse efeito vai depender do solo ao redor, se o mesmo for rico em nutrientes e sais, pode causar um aumento na condutividade. Para a água do mar, o efeito tende a ser de redução da condutividade em inundações, pois deposita parte de seus sais na costa. O efeito da maré é particularmente importante para estuários, que sofrem mudanças intensas de salinidade e condutividade de acordo com a mesma.

A diferença de condutividade elétrica e de salinidade é pronunciada entre água doce e água salgada, podendo sê-la mesmo entre dois corpos de água doce de uma região, mas que possuam nascentes diferentes e com fluxos de água de natureza diferente. Portanto, não há um padrão para o que seriam valores de condutividade e salinidade para uma água saudável ou mesmo para um determinado tipo de água, em especial para fontes de água doce, que têm uma forte dependência com a geologia do local. Ao invés disso, de maneira geral foram estabelecidos valores padrão para a quantidade de sólidos dissolvidos totais para determinar se a água é saudável ou não[14,15]. Mesmo com essa falta de padrões, alguns valores base podem ser estabelecidos para a condutividade elétrica de acordo com a natureza da mesma, como pode ser observado na tabela 3[11,15].

Tabela 3 - Valores de Condutividade Elétrica para diferentes Tipos de Água

	Condutividade Elétrica (µS/cm)
Água Deionizada	0,055 - 1
Água Destilada	0,5 - 3
Neve Derretida	2 - 42
Água da Torneira	50 - 800
Água Potável[A]	30 - 1500
Fontes de Água Doce	100 - 2000
Água Industrial	10000
Água do Mar	55000

É importante notar que a água deionizada, que se diferencia da água destilada pela forma como é efetuado o processo de dessalinização, não apresenta condutividade nula, pois uma concentração sempre presente de íons H^+ e OH^- promoverá a condução de eletricidade. Nesse caso

A Valores obtidos para os Estados Unidos da América. Não foram encontradas informações análogas para o Brasil.

será de 10^{-7} mol/L para ambos os íons redundando em uma condutividade de 0,055 µS/cm a 25 ºC, ou uma resistividade de 18,2 MΩ/cm, para água deionizada que não sofreu contato com a atmosfera[16]. Após entrar em contato com a atmosfera, o efeito do contato com o gás carbônico da atmosfera reduz o pH para aproximadamente 5,56, causando um aumento na condutividade para aproximadamente 1 µS/cm para essa mesma temperatura (ou resistividade de 1 MΩ/cm). As variações nesses valores dependem do tempo de exposição da água à atmosfera[11,15].

As fontes de água doce são as que apresentam um espectro mais amplo de valores para a condutividade elétrica, pois dependem fortemente da geologia do local onde está o corpo d'água. Um solo de granito resultará em uma baixa condutividade, pois seus sedimentos não se dissolvem facilmente como eletrólitos, enquanto que um solo argiloso promoverá uma alta condutividade, pois o mesmo é rico em sais minerais que se dissolvem facilmente em íons. Estuários são aqueles que sofrem uma maior variabilidade de condutividade dentre os corpos d'água.

A água do mar sofre mudanças em sua condutividade de acordo com a proximidade dos polos. Em especial, será menor na parte superficial em regiões muitos chuvosas onde os portadores ficam mais diluídos, o que ocorre principalmente em áreas equatoriais. Já a salinidade de um corpo d'água, que também só pode ser estimada, não varia muito para oceanos, sendo sua composição iônica praticamente constante ao redor do globo[17]. As variações nos valores de salinidade, mesmo que pequenas, contribuem para circulações oceânicas e ciclos climáticos globais[18]. Alguns valores de salinidade para corpos d'água de diferentes naturezas estão listados na tabela 4[19].

Tabela 4 - Valores de Salinidade para diferentes Tipos de Água

	Salinidade em partes por mil
Água Doce	< 0,5
Água salobra/ Estuários	0,5 - 17
Mar Negro	16
Espectro nos Oceanos	32 - 37
Média dos Oceanos	35

2.12.2 Condutivímetros e Medidores para inferir Qualidade da Água

Um medidor que permite inferir a qualidade da água consiste de um ou mais sensores de parâmetros básicos, que permitem reconhecer se a água está adequada para suportar um ecossistema saudável ou mesmo própria para o consumo humano. Existem diversos projetos de condutivímetros para a água e de medidores mais completos também, tanto no âmbito nacional quanto no âmbito internacional. Um exemplo são os medidores aplicados no projeto Infoamazônia, desenvolvidos pelo grupo homônimo. Outro exemplo é o medidor de qualidade da água, ou “Water

Quality Sensor” em inglês, usado na iniciativa DontFlush.Me. Ambos projetos estão documentados na comunidade de desenvolvimento e documentação de projetos de monitoramento de qualidade do ar, da água e da terra: o Public Lab[20,21]. Estes projetos apresentam valores confluentes com os do medidor do presente trabalho.

3. OBJETIVOS

Este projeto pretende aliar conhecimentos físicos, químicos, de automação e computacionais para desenvolver um sistema de medição de condutividade elétrica da água que, espera-se, seja o embrião de um sistema cidadão de monitoramento ambiental simples, barato, de estrutura acessível a um grande número de pessoas e facilmente replicável e adaptável. O módulo desenvolvido neste projeto é o sensor de condutividade da água, o condutivímetro, que reflete a presença de impurezas na água a partir do desvio da condutividade elétrica da água do padrão do local em questão, podendo inclusive expressar se a impureza presente em excesso é eletrolítica ou não. Com isso, além de promover o monitoramento ambiental, este projeto pode resultar em uma ferramenta para ensino de física e educação ambiental. O resultado do projeto estará disponível com documentação detalhada sob os termos da Licença de Hardware Aberto do CERN.

O condutivímetro é um dos sensores mais básicos e a condutividade elétrica da água é um dos parâmetros mais ricos em informação sobre a qualidade da água, porque sofre alteração sob diferentes influências externas como a chuva, o despejo de diferentes tipos de dejetos (e não apenas de um componente ou substância específicos, como muitos medidores), a variação de temperatura e até mesmo a maré (para os casos de estuários e água do mar). Essa versatilidade também implica na limitação desse tipo de medida. Por exemplo, duas substâncias dissolvidas na água que conduzam eletricidade podem sofrer um aumento de concentração e acarretar um aumento de condutividade na água, mas se a diferença de toxicidade entre ambas for pronunciada não será possível saber o quão prejudicada está a qualidade da água apenas através da medida de condutividade elétrica. Portanto, é recomendável ter uma ideia da composição química da geologia local e do corpo d'água sob monitoramento, mas isso não será suficiente se algum material estranho for repentinamente despejado na água.

Mesmos nestes casos, devido a sua sensibilidade para diferentes influências, o medidor é muito útil como um indicador de perturbações no ecossistema e como um sistema de alerta para que outras medidas recomendáveis para indicar a origem de uma possível perturbação sejam realizadas. Por ele poder prover informação indireta sobre a salinidade e os sólidos dissolvidos totais a aplicação desse sensor permite inferir a qualidade da água com as virtudes e limitações mencionadas. A partir dele podem se somar outros sensores que consolidem e atestem a qualidade da água de maneira mais ampla. Embora seu desenvolvimento aqui proposto seja para medidas de laboratório, esse módulo foca-se na medição de um parâmetro físico fundamental fácil de ser executada em campo, com medições que possam ser automatizáveis e sistemáticas. Isso não impede que os resultados das medições desse e de outros instrumentos se combinem com os de

instrumentos de bancadas, que executem medidas exclusivamente em laboratório.

O objetivo do presente projeto é o de desenvolver um sensor capaz de medir a condutividade desde os valores próximos aos da água destilada (0,5 - 3 µS/cm[A]), ou seja, da ordem de dezenas de µS/cm, até aqueles próximos aos da água do mar (aproximadamente 55 000 µS/cm[B]) ou com alta concentração de impurezas de caráter iônico, ou seja, da ordem de dezenas de milhares µS/cm. Para verificar sua adequação foram realizadas medidas de amostras de água com condutividades elétricas ao longo desse intervalo. O sensor funciona a partir de uma sonda com dois eletrodos colocada na água e que aplica uma tensão alternada e mede a passagem de corrente entre os eletrodos. É importante ter um controle preciso da geometria da sonda, pois isso influenciará condutância e será importante para a medida de condutividade.

Com o desenvolvimento do sensor concluído e testes e calibrações executados, a próxima etapa planejada para o projeto é a de comparações entre as medidas de sólidos dissolvidos totais com o condutivímetro e com um medidor de sólidos dissolvidos totais de laboratório para atestar a qualidade do sensor para realizar esse tipo de medida. Essas medidas dependiam da disponibilização de amostras com um laboratório parceiro na UFRGS, o que só poderia ser feito quando o mesmo recebesse amostras. Não houve disponibilidade de amostras nas etapas finais de desenvolvimento do protótipo, quando seria possível realizar essas medidas.

Outro objetivo proposto foi da realização de medidas com o sensor em uma situação real no Arroio do Salso na zona sul de Porto Alegre para medir possíveis variações de condutividade elétrica ao longo do dia na água do arroio. Essas medidas não foram possíveis pela falta de maturidade do projeto como um medidor emancipado de monitoramento ambiental, sendo possível utilizá-lo para medidas de bancada apenas. Também não foi possível adaptar as condições do local para levar o medidor até o ponto em questão. A tabela 5 lista os objetivos e metas propostos e seu estágio de conclusão.

Tabela 5 – Conclusão dos objetivos e metas propostas.

		Concluído
Objetivo 1	Desenvolvimento do Condutivímetro para a água	SIM
Meta 1	Desenvolvimento ou adaptação e/ou definição de circuito elétrico para o sensor	SIM
Meta 2	Teste dos módulos independentes do circuito elétrico e do conjunto	SIM
Meta 3	Programação da leitura e da exposição da medição do sensor	SIM
Meta 4	Teste da visualização dos resultados em computador e em tela independente	NÃO

A Ver tabela 3
B Ver Tabela 3

Meta 5	Desenvolvimento do arquivo digital para o circuito elétrico para o sensor	SIM
Meta 6	Fresagem da placa para o circuito elétrico	SIM
Meta 7	Calibração e teste do sensor na placa definitiva	SIM
Meta 8	Elaboração da documentação do desenvolvimento do condutivímetro, a ser realizada em sincronia com todos os processos, metas e objetivos.	SIM
Objetivo 2	Teste do Condutivímetro como medidor de Sólidos Dissolvidos Totais	NÃO
Meta 1	Medidas de soluções de composição conhecida com o condutivímetro	NÃO
Meta 2	Medidas de soluções de concentração desconhecida com o condutivímetro	NÃO
Meta 3	Medidas de soluções de concentração desconhecida com um medidor de sólidos dissolvidos totais de laboratório	NÃO
Objetivo 3	Medidas com a água do Arroio do Salso	NÃO
Meta 1	Medidas de condutividade	NÃO

4. METODOLOGIA

O desenvolvimento deste projeto fez uso da infraestrutura do Centro de Tecnologia Acadêmica (CTA), laboratório vinculado ao curso de Engenharia Física e voltado ao desenvolvimento de soluções tecnológicas para problemas da comunidade acadêmica e da sociedade. Alguns equipamentos básicos necessários no desenvolvimento deste projeto são:

- Sonda de Aço inoxidável;
- Fio de cobre;
- Microcontrolador;
- Componentes eletrônicos diversos;
- Fresadora PCI;
- Sistema de isolamento eletrostático;

A primeira etapa consistiu na definição e caracterização do circuito elétrico em questão, com montagem e teste preliminar ao desenvolvimento da placa. Foram feitos testes de cada módulo que constitui o circuito elétrico do sensor em *protoboard* (placa de prototipagem). Com os resultados preliminares de acordo com o esperado, foram desenvolvidas versões mais estáveis do circuito elétrico do sensor com a fresadora de Placas de Circuito Impresso João-de-Barro.

De maneira geral, baseando-se na literatura existente, os circuitos elétricos de condutivímetro são compostos de: um módulo oscilador, um módulo conversor de corrente para tensão proporcional, um módulo retificador e um módulo de filtro. O módulo oscilador alimenta o eletrodo com tensão a uma frequência determinada, para que se possa medir a corrente entre os eletrodos sem provocar eletrólise nestas sondas. O primeiro teste consiste em medir a amplitude de tensão e a frequência e comparar com o previsto teoricamente, obtendo a incerteza associada.

O módulo de conversão de corrente para tensão foi testado para fontes de corrente bem controladas, analisando a proporcionalidade do sinal. O módulo retificador também pôde ser facilmente testado com o sinal de uma fonte de tensão alternada. O módulo integrador foi testado em conjunto com os outros módulos, observando a amplitude desse sinal DC e os ruídos presentes. Realizados os testes dos módulos individualmente, foi possível fazer a integração deles e o teste do funcionamento do conjunto.

Foram utilizadas ferramentas de desenho de arquivos digitais para confecção de placa para o circuito elétrico, e então o circuito foi fresado em placa dedicada. A placa dedicada foi construída em um formato de placa de extensão (ou *shield*, do inglês), ou seja, com encaixe planejado para o microcontrolador Arduino, plataforma de prototipagem utilizada para realizar medidas sistemáticas de condutividade.

Novos testes para o funcionamento da parte elétrica foram realizados, já com o sistema funcionando em conjunto com o Arduino e com fonte de alimentação negativa própria. Nesse ponto, foram percebidas limitações do sistema sem o funcionamento de uma fonte DC externa para a alimentação positiva e negativa. A fonte negativa fornecida via circuito integrado apresentava amplitude abaixo da apresentada pela fonte positiva fornecida diretamente pelo Arduino, o que afetava a amplitude e linearidade da onda triangular gerada e consequentemente a linearidade e módulo do sinal de saída do medidor. Portanto, foram introduzidos módulos para ajuste.

Estes módulos têm como função o ajuste do *offset* (desvio da referência da onda triangular com relação ao 0 V) e da linearidade do sinal. Testes básicos utilizando osciloscópio são suficientes para a verificação do funcionamento dos módulos. Com o circuito funcionando de acordo com o esperado, foi realizada a fresagem de uma nova versão, suprindo as necessidades de um sistema portátil.

Então, foram realizados testes e calibrações para o funcionamento definitivo do sensor em sua versão mais estável. Esses testes consistem de medições de condutividade de soluções aquosas de íons em água destilada ou deionizada com concentrações bem conhecidas e condutividades proporcionais também bem conhecidas. O sensor foi feito para ser ajustável para diferentes escalas de medição, minimizando a incerteza associada em diferentes faixas de medida.

Juntamente com o medidor de condutividade é importante ser acoplado um medidor de temperatura para uma calibração adequada. Nessa fase, foram utilizadas medidas com um termômetro comercial externo.

Os testes para medições de condutividade foram realizados tanto para água destilada quanto para amostras que simulam a salinidade de águas proveniente de rios e oceano, comparando-se os resultados aos valores tabelados ou esperados para cada um desses tipos de água, verificando-se a adequação dos valores obtidos. Foram feitas medidas com diferentes quantidades de sal dissolvido, com diferentes espécies de sais, comparando-se com valores tabelados ou calculados teoricamente.

Por fim, foi feita a programação com a plataforma de prototipagem Arduino, com a programação realizada com a linguagem C++ na IDE do Arduino (Development Environment, ou Ambiente de Desenvolvimento do Arduino). O programa executa uma rotina simples de alimentação do circuito, leitura e dos dados e filtragem dos sinais por ele gerados, bem como realiza a calibração da condutividade elétrica com a temperatura.

5. DESENVOLVIMENTO

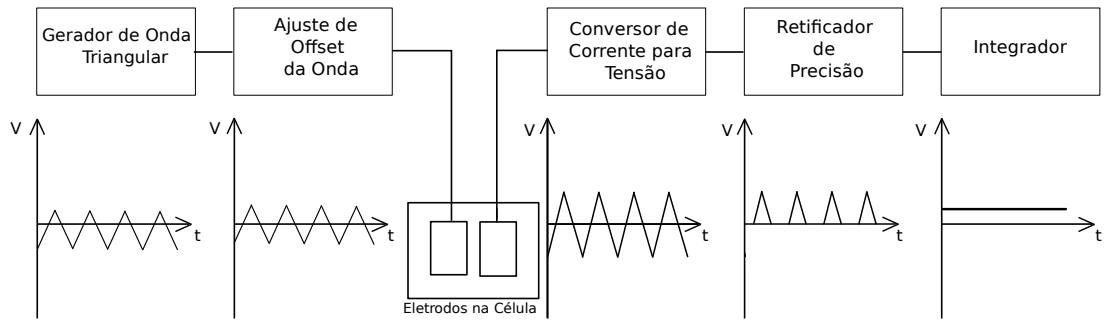
O processo de desenvolvimento do sensor de condutividade da água passou pela elaboração de quatro protótipos, descritos nesta seção na ordem em que foram desenvolvidos. Também são descritos os testes realizados para atestar o funcionamento e limitações destes protótipos, bem como as sondas utilizadas em conjunto com os mesmos e demais questões relacionadas ao desenvolvimento, tais como a programação do microcontrolador, o cronograma realizado e os custos estimados no desenvolvimento.

O medidor escolhido para o desenvolvimento consiste de um modelo de quatro módulos básicos que segue a descrição desenvolvida na seção de metodologia, descritos em maior detalhe ao longo dessa seção. O medidor consiste de duas sondas que são inseridas em meio aquoso, em uma célula de medição de tamanho constante. Uma das sondas emite uma onda triangular AC enquanto a outra recebe o sinal propagado através do meio aquoso, sendo nela induzida uma tensão AC cuja amplitude depende da condutividade do meio.

Este modelo de medidor foi escolhido por se basear em quatro módulos claros e com fundamentos físicos e eletrônicos bem delimitados, utilizados de maneira ampla para sistemas de medição de condutividade elétrica da água. A alternativa encontrada baseava-se em bibliotecas de *software* com um caminho intrincado até o fundamento do funcionamento do sensor.

O primeiro módulo é o gerador de onda triangular e vai acoplado à sonda emissora (Ver figura 1). À sonda receptora são acoplados três módulos. Destes três, o primeiro módulo é o que converte a corrente propagada ao longo do meio aquoso em uma tensão proporcional a essa corrente com um ganho determinado pelo resistor de retroalimentação. O módulo intermediário retifica essa onda triangular recebida e amplificada. E o último módulo integra esse sinal retificado, resultando em uma tensão com corrente direta de módulo proporcional à amplitude da onda triangular recebida na sonda receptora e amplificada no conversor de corrente para tensão.

Figura 1 – Diagrama ilustrativo da função de cada módulo no sistema.

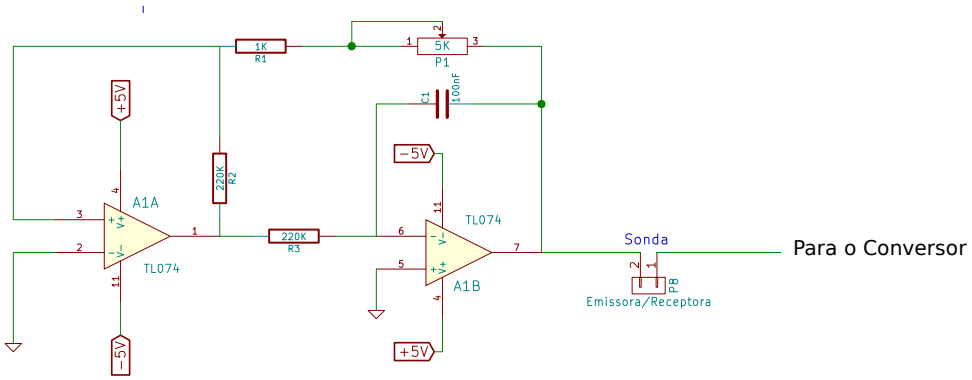


Autor: Leonardo Sehn Alves

5.1 Módulo Gerador de Onda Triangular

Este é o módulo que gera a onda a ser enviada pela sonda emissora e que induzirá uma tensão na sonda receptora. É o responsável por produzir o estímulo a ser incidido sobre a amostra para avaliar a resposta da mesma. O módulo consiste de um comparador Schmitt em conjunto com um amplificador operacional no modo integrador. O comparador Schmitt gera a onda quadrada a partir de um capacitor que carrega e descarrega e de um amplificador operacional no modo de comparação, que gera um sinal na forma alto e baixo (“HIGH” e “LOW”), ou máximo e mínimo, gerando o padrão da onda quadrada. O amplificador no modo integrador realiza a integração dessa onda quadrada, formando um padrão de onda triangular através de um circuito RC em conjunto com um amplificador operacional.

Figura 2 – Esquemático elétrico do circuito gerador de onda triangular



Autor: Leonardo Sehn Alves

A partir da integração e ganho gerados pelo circuito amplificador integrador sobre a onda quadrada gerada, os valores esperados para a frequência e amplitude da onda triangular gerada, são os seguintes:

Equação 1

$$f = \frac{1}{4 R_3 C_1}\left(\frac{R_2}{R_1 + P_1}\right)$$

Equação 2

$$V_T = V_Q \frac{R_1 + P_1}{R_2}$$

Onde V_Q é a amplitude da onda quadrada gerada, que é igual ao valor da tensão de alimentação positiva. Portanto, para os seguintes valores para os componentes elétricos no circuito mostrado na figura 2:

- R_1 = 1 kΩ
- R_2 = 46 kΩ

- R_3 = 220 kΩ
- P_1 = 5 kΩ
- C_1 = 100 nF
- V_Q = 12 V

São previstos os seguintes valores de frequência e amplitude:

$$f = 87{,}12\,Hz\,;\,V_T = 1{,}565\,V$$

Para o potenciômetro ajustado para 5 kΩ. E para o potenciômetro ajustado para 0 Ω, são previstos os seguintes valores:

$$f = 522{,}73\,Hz\,;\,V_T = 0{,}261\,V$$

5.2 Módulo Conversor de Corrente para Tensão

Este módulo é o responsável por converter a corrente propagada através da amostra em uma tensão proporcional a essa corrente, e ao mesmo tempo amplificar essa tensão para que apresente uma amplitude adequada para o sistema de medidas utilizado. A corrente propagada através do meio é a resposta buscada para o estímulo enviado na sonda emissora, portanto esse módulo tem o papel de conversão dessa resposta em um sinal de mais fácil tratamento para que seja posteriormente transformado em um sinal de fácil medição. O módulo vai acoplado diretamente à sonda receptora, conforme ilustrado nas figuras 2 e 3, que recebe o sinal propagado através do meio aquoso, e converte a corrente para tensão. Esse circuito é composto de um amplificador operacional com uma resistência de *feedback* e a entrada não inversora conectada à fonte de corrente a ser convertida. A essa configuração é dado o nome de amplificador de transimpedância.

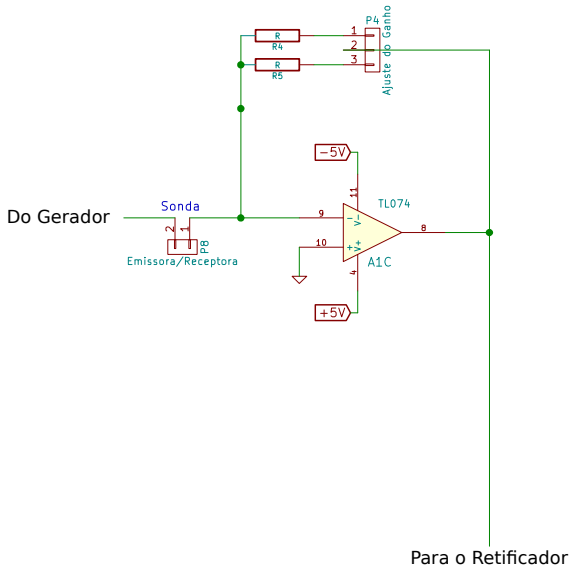
A tensão de saída nesse caso será dada pela seguinte equação:

Equação 3

$$V = i_{entrada} \cdot R_{feedback}$$

Portanto, a amplificação nesse módulo é dada pelo resistor de *feedback* associado, e nesse caso, é possível conectar diferentes resistores para obter diferentes ganhos para sinais de amplitude diversos. Essa conexão é ajustável através da chave mostrada na figura 3, onde os resistores R_4 e R_5 oferecem diferentes ganhos a serem escolhidos de acordo com o meio a ser medido.

Figura 3 – Esquemático elétrico do circuito conversor de corrente para tensão.



Autor: Leonardo Sehn Alves

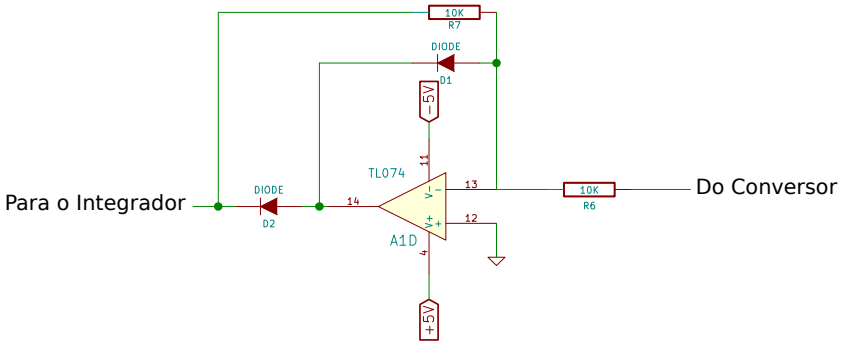
Nesse ponto, é válido lembrar que a corrente de entrada não pode ser muito elevada para não saturar a entrada do amplificador operacional em questão, o que é facilmente evitado projetando a amplitude da onda triangular gerada no módulo anterior de acordo com essa restrição. Para tanto, é importante conhecer a corrente de saturação do amplificador operacional utilizado na faixa de alimentação em que está operando e fazer uma estimativa com o meio de menor resistência que se pretende medir (como a água do mar, por exemplo), considerando as dimensões da célula de medida. Tomando a razão da amplitude da onda triangular gerada pela menor resistência esperada, se obtém o maior valor para a corrente de entrada, que é recomendável que esteja abaixo do valor de saturação do amplificador operacional.

5.3 Módulo Retificador

Este módulo realiza a retificação da onda triangular transmitida através do meio e amplificada pelo conversor do módulo anterior, portanto apresenta uma função intermediária na conversão da resposta do meio para um sinal resultante de fácil medição. Essa retificação é realizada de maneira otimizada pela configuração conhecida como retificador de precisão, que é formada por um amplificador operacional em conjunto com dois diodos e dois resistores. A otimização é referente à tensão de corte baixa, ou seja, uma pequena parcela da parte positiva da onda é rejeitada e a sua amplitude é transmitida de maneira fiel, com perda quase desprezível. Cabe esclarecer que a parte positiva referida acima corresponde a da onda de saída, pois o circuito realiza um ganho negativo dado pela razão dos resistores, portanto uma pequena parte da metade negativa

da onda de entrada será rejeitada, que corresponde a uma pequena rejeição na parte positiva da onda de saída.

Figura 4 – Esquemático elétrico do retificador de precisão

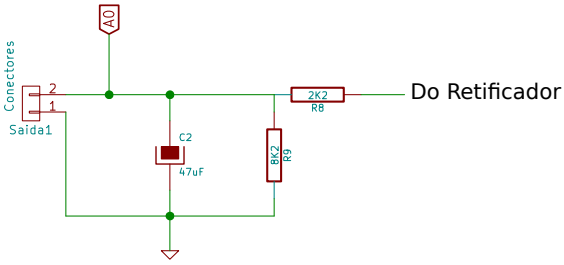


Autor: Leonardo Sehn Alves

5.4 Módulo Integrador

O módulo final, conectado à saída do retificador, é o módulo de integração, que pode ser encarado como um módulo conversor da amplitude do sinal AC (*alternate current*, do inglês corrente alternada) para um módulo de tensão DC (*direct current*, do inglês corrente direta) proporcional. Ele converte a onda triangular retificada para uma tensão DC de amplitude proporcional à amplitude da onda triangular retificada, fazendo a integração do sinal de acordo com a constante RC do sistema. Portanto, ele é o responsável de converter o sinal tratado nos módulos anteriores, proporcionais à resposta do meio ao estímulo enviado, em um sinal DC de fácil medição. A saída do módulo será a saída do medidor como um todo, a qual é uma tensão proporcional à condutividade do meio a ser medido. A medida fica então viabilizada através dos métodos descritos anteriormente, via calibração ou via consideração da resposta do circuito em cada segmento.

Figura 5 – Esquemático elétrico do circuito integrador.



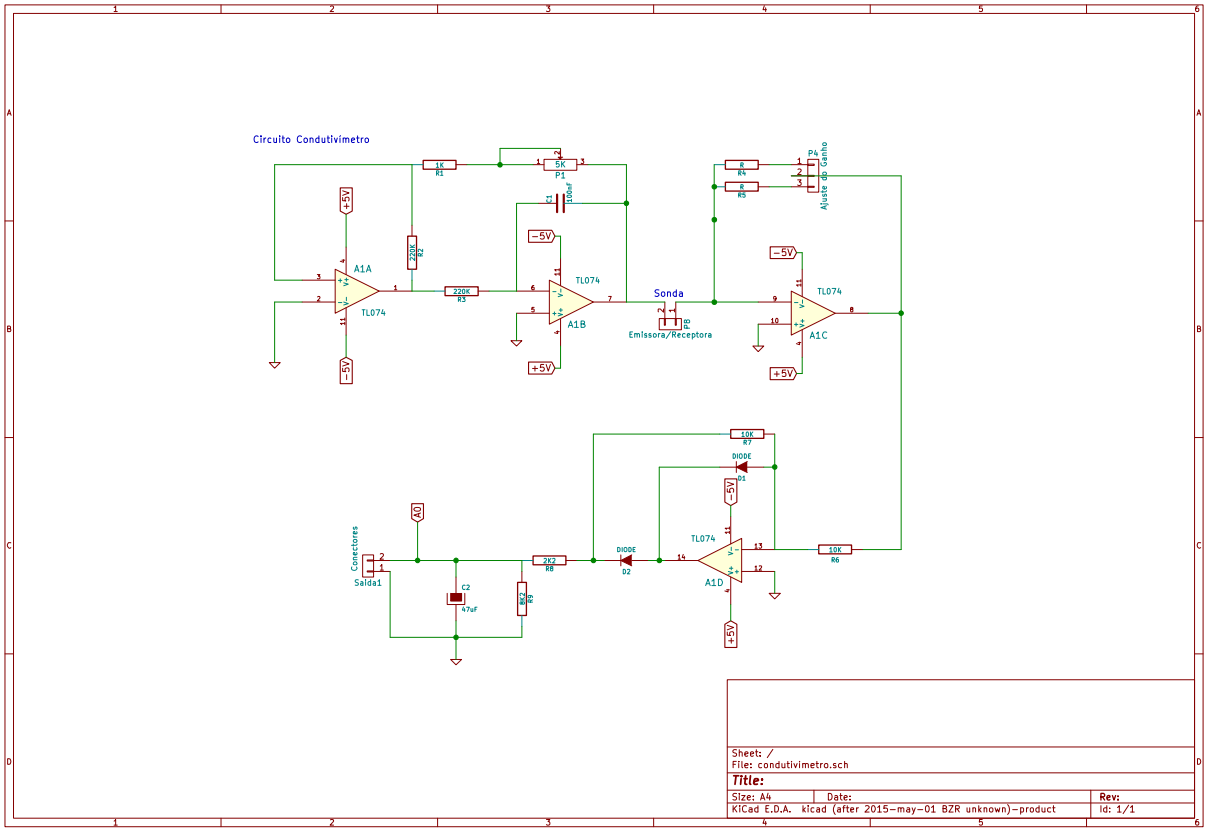
Autor: Leonardo Sehn Alves

5.5 Circuito Resultante

Agregando todos esses módulos se tem o circuito completo que constitui o protótipo,

que está exibido na figura 6.

Figura 6 – Esquemático elétrico do circuito completo do primeiro protótipo do condutivímetro.



Autor: Leonardo Sehn Alves

5.6 Sondas

As sondas foram construídas com as placas emissora e receptora de aço inox, um material condutor de baixo custo. Fios de cobre são utilizados para conectar as placas ao circuito e uma base retangular de acrílico é utilizada entre as placas para mantê-las a uma distância constante. Manter a geometria dos eletrodos fixa é importante para a estabilidade da medida. A geometria influencia na condutância, parâmetro intermediário do qual a medida de condutividade depende.

Para realização da solda de aço inox no fio de cobre, o estanho foi banhado em ácido fosfórico. Outro cuidado tomado para uma boa funcionalidade do sistema de sondas foi o recobrimento com um cabo blindado da placa receptora, pois a mesma está conectada a uma entrada de alta impedância, sendo muito suscetível a ruídos. Essa blindagem é feita com uma malha condutora que envolve o fio da placa receptora além de um outro fio enrolado ao seu redor e aterrado. Este cuidado é tomado para que a susceptibilidade a ruídos do eletrodo receptor diminua.

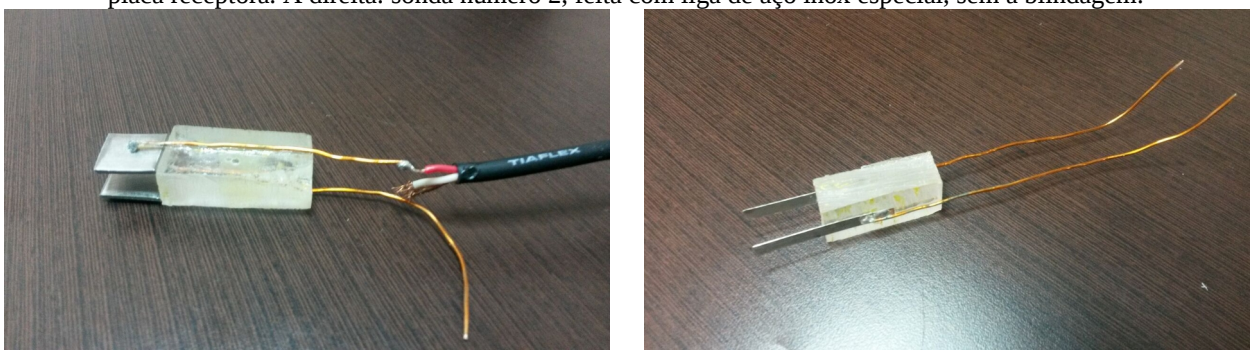
Foram construídas duas sondas, uma com placas de aço inox comum e dimensões de :

- larguras: 1,34 cm e 1,38 cm. Média: 1,36 cm;

- comprimentos: 1,34 e 1,385 cm. Média: 1,365;

- distância: 0,945 cm.

Figura 7 – À esquerda: sonda número 1, feita com placas de aço inox comum e contando com blindagem na saída da placa receptora. À direita: sonda número 2, feita com liga de aço inox especial, sem a blindagem.



Autor: Leonardo Sehn Alves

Medidas com paquímetro, que apresenta imprecisão intrínseca de 0,05 mm. Considerando que a constante de célula é dada pela seguinte expressão:

$$Constante\,de\,Célula = d / A$$

Onde *d* é a distância entre os eletrodos e *A* é a área destas placas. O valor da constante para esta sonda em específico será de:

$$Constante\,de\,Célula = 0{,}510\,cm^{-1}$$

E, para a outra sonda, com uma liga especial de aço inox, com as seguintes dimensões:

- largura: 1,82 cm e 1,80 cm. Média: 1,81 cm;

- comprimento: 0,535 cm e 0,52 cm. Média: 0,5275 cm;

- distância: 1,08 cm.

A constante será de:

$$Constante\,de\,Célula = 1{,}131\,cm^{-1}$$

Esses valores, multiplicados pela condutância, resultarão no valor de condutividade efetivamente obtido. Para a calibração do sensor, é importante apenas que esse valor se mantenha constante. É válido ressaltar que a sonda número 1 apresenta o eletrodo receptor com a blindagem descrita anteriormente enquanto que a sonda número 2 não apresenta a blindagem.

5.7 Protótipo 1

Inicialmente, foi elaborado um protótipo montado em *protoboard* para avaliar a efetividade do circuito eletrônico completo e de seus módulos individuais. O circuito é dividido em quatro módulos: o gerador de onda triangular, o conversor de corrente para tensão, o retificador e o integrador, descritos nas subseções anteriores.

5.7.1 Resultados obtidos para a onda triangular

Com a montagem do circuito com os componentes propostos na subseção anterior, os seguintes resultados foram atingidos:

$$f = 148\,Hz\,;\,V_T = 1{,}5\,V$$

Para o potenciômetro em 5kΩ. E para o mesmo em 0 Ω, foram obtidos os seguintes resultados:

$$f = 666{,}67\,Hz\,;\,V_T = 0{,}3\,V$$

Modificando a alimentação para + 4 V e – 4 V, e configuração para diferentes valores de resistência para o segundo resistor e para o potenciômetro, obtém-se a tabela 6.

Tabela 6 - Previsões teóricas e resultados.

	Previsão Teórica			Resultado Medido		
	Potenciômetro = 10 kΩ	Potenciômetro = 5 kΩ	Potenciômetro = 0 Ω	Potenciômetro = 10 kΩ	Potenciômetro = 5 kΩ	Potenciômetro = 0 Ω
R_2 = 220 kΩ	-	0,109 V	0,018 V	-	0,120 V	0,025 V
R_2 = 440 kΩ	94 mV	-	8,51 mV	80 mV	-	15 mV
R_2 = 470 kΩ	100 mV	-	9,09 mV	80 mV	-	15 mV

Os valores de resistência e capacitância medidos com multímetro são os seguintes:

- R_1 = 0,990 kΩ
- R_2 = 222,8 kΩ
- R_3 = 223,1 kΩ
- P_1 = 4,66 kΩ
- C_1 = 113,5 nF

As medidas obtidas foram satisfatórias para atingir o resultado esperado, mas para uma alimentação de 4 V positivos e negativos e o potenciômetro ajustado para 0 Ω, o sinal resultante foi bastante ruidoso.

5.7.2 Resultados obtidos para o conversor

Para o conversor de corrente para tensão, foram realizados testes utilizando uma fonte de corrente para simular a corrente na sonda receptora, com as seguintes resistências e o seguinte valor de corrente aplicado pela fonte:

- R_4 = 10 Ω

- R_5 = 22 Ω

- i = 12 mA

Para os quais são esperados seguintes resultados:

- $V_{out,1}$ = 120 mV

- $V_{out,2}$ = 240 mV

Com as correspondentes medidas obtidas, de maneira aproximada:

- $V_{out,1}$ = 120 mV

- $V_{out,2}$ = 240 mV

Ou seja, o sistema respondeu de acordo com o esperado. Vale ressaltar que o amplificador apresentou saturação para correntes de aproximadamente 12 mA – 12,5 mA para o regime de alimentação de 4 e 5 V, valores esperados para a operação do sistema, e que o máximo de tensão de saída para 4 V observado foi de 300 mV e para 5 V foi de aproximadamente 1,3 V. Esses valores são importantes, pois o sistema não consegue fornecer tensões acima desses valores para os correspondentes regimes de alimentação e há perda da linearidade da amplificação e portanto uma distorção na medida de condutividade elétrica.

5.7.3 Resultados obtidos para o retificador

Para a realização do teste do módulo retificador, foi suprimido o módulo conversor de corrente para tensão conectando-se a saída do módulo gerador de onda triangular ao módulo retificador e observando-se o padrão triangular retificado obtido. Para as configurações montadas anteriormente, no módulo gerador de onda triangular, e, portanto, mesmos parâmetros para a onda gerada, e os seguintes resistores e diodos:

- R_6 = R_7 = 10 kΩ

- D_1 = D_2 = modelo 1N4007

É esperada uma rejeição desprezível, quase nula, com amplitude da onda triangular obtida praticamente igual a da onda gerada. Portanto, para os seguintes valores de resistência para o resistor R_2, com as respectivas amplitudes de onda triangular gerada, os resultados obtidos são mostrados na tabela 7.

Tabela 7 – Resultados obtidos da amplitude do sinal da onda triangular e da onda retificada.

R_2	$V_{Triangular}$			$V_{Retificada}$		
	Potenciômetro = 10 kΩ	Potenciômetro = 5 kΩ	Potenciômetro = 0 Ω	Potenciômetro = 10 kΩ	Potenciômetro = 5 kΩ	Potenciômetro = 0 Ω

220 kΩ	-	0,120 V	0,025 V	-	0,080 V	0,020 V
440 kΩ	80 mV	-	15 mV	70 mV	-	8 mV
470 kΩ	80 mV	-	15 mV	60 mV	-	10 mV

Os valores de resistência efetivamente utilizados nessa configuração e medidos com um multímetro foram de:

- R_6 = 9,96 kΩ
- R_7 = 10,01 kΩ

A retificação foi próxima a ideal em um primeiro momento, mas nas medidas posteriores houve uma rejeição da tensão positiva apreciável, de aproximadamente um terço da amplitude para a maioria dos casos. Este fato foi atribuído à instabilidade da *protoboard*, defeito a ser resolvido no protótipo subsequente, a ser montado em placa de circuito impresso.

5.7.4 Resultados obtidos para o integrador

O resultado esperado do módulo integrador é um sinal DC de amplitude proporcional à da onda triangular retificada que chega à sua entrada. Foi realizado um teste nos mesmos moldes da configuração de teste do módulo retificador no qual o gerador de onda é diretamente conectado ao retificador e este ao filtro, sem passar por meio aquoso. Os resultados obtidos para as diferentes configurações são os seguintes, mostrados na tabela 8.

Tabela 8 - Resultados obtidos para as diferentes configurações.

R_2	$V_{Retificada}$			$V_{Saída}$		
	Potenciômetro = 10 kΩ	Potenciômetro = 5 kΩ	Potenciômetro = 0 Ω	Potenciômetro = 10 kΩ	Potenciômetro = 5 kΩ	Potenciômetro = 0 Ω
220 kΩ	-	80 mV	20 mV	-	60 mV	10 mV
440 kΩ	70 mV	-	8 mV	50 mV	-	5 mV
470 kΩ	60 mV	-	10 mV	50 mV	-	5 mV

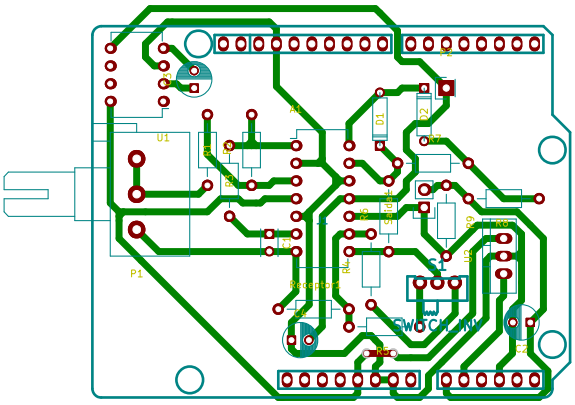
Ou seja, uma amplitude que variou de 50 a 83,33 % da amplitude do sinal da onda triangular para os diferentes casos.

5.8 Protótipo 2

Após o teste em *protoboard*, foi elaborado um protótipo em placa de circuito impresso, feito com a fresadora João-de-Barro. O intuito desse protótipo é desenvolver um modelo mais

estável e mais facilmente replicável. Os diagramas de furação e esquemáticos elétricos estão expostos abaixo.

Figura 8 – Imagem do arquivo digital com a placa do protótipo, contendo suas trilhas e a disposição geométrica dos objetos.



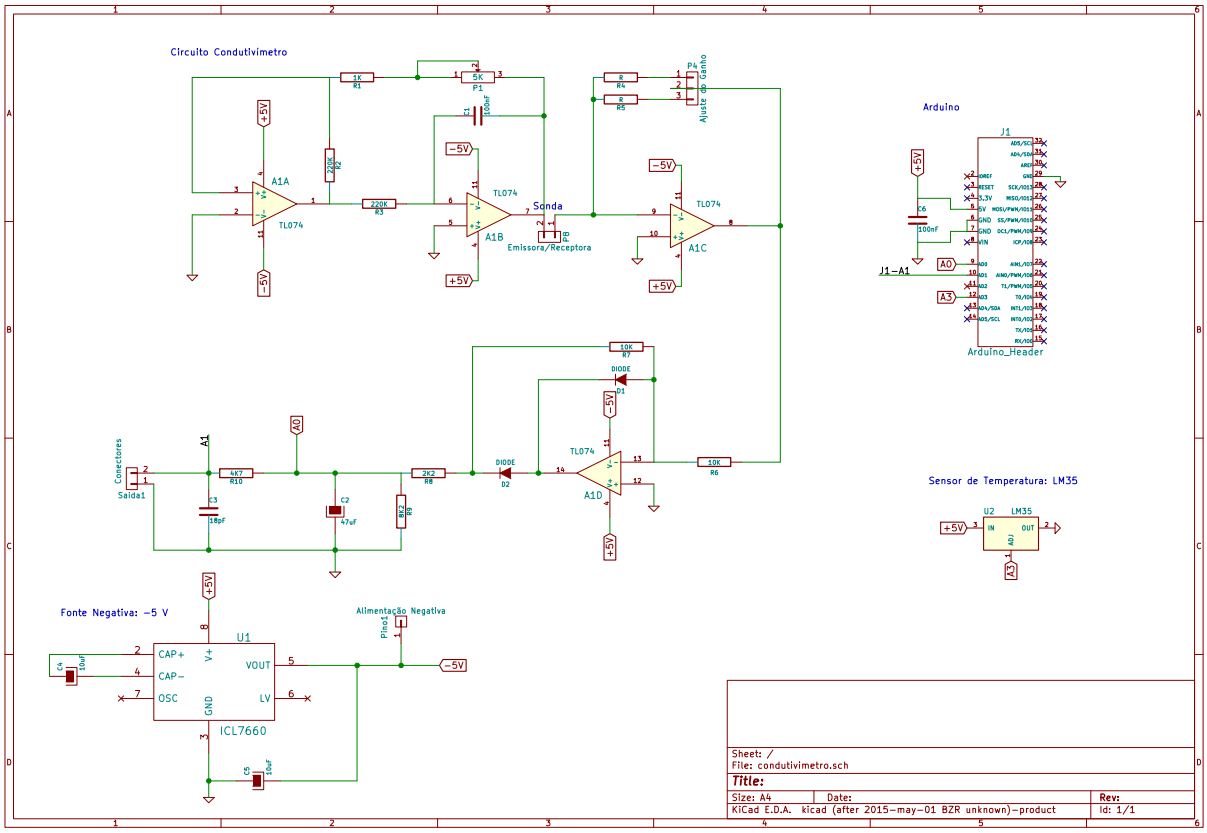
Autor: Leonardo Sehn Alves

A este protótipo foram incluídos dois módulos: o de medição de temperatura e o da fonte de alimentação negativa. O primeiro para possibilitar a calibração e ajuste para condutância específica, e o segundo para permitir que o medidor seja independente de fontes externas complexas. O protótipo apresentou comportamento falho, pois a introdução da fonte de alimentação negativa através de circuito integrado não resultou na estabilidade e na amplitude desejadas. A tensão de alimentação positiva conferida pelo Arduino foi de 4,96 V enquanto que a tensão negativa fornecida pelo sistema foi de -4,40 V. Isso gerou assimetria e tensões de *offset* nas ondas geradas pelo sistema, o que compromete a medida de condutividade. Para mitigar esses comportamentos defeituosos, foram introduzidos dois módulos de ajuste para o terceiro protótipo.

5.8.1 Fonte de tensão negativa

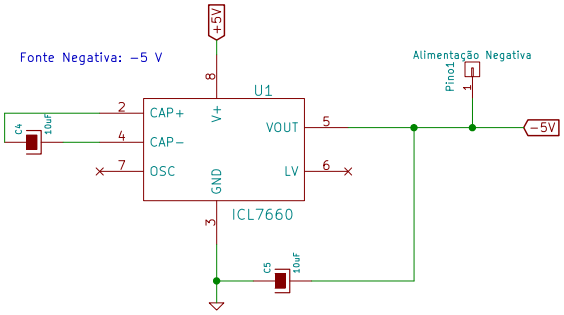
Este módulo foi adicionado ao circuito no segundo protótipo, pois é necessária uma fonte de alimentação negativa fornecida pelo próprio circuito para que o medidor seja adequado para a realização de monitoramento ambiental. O circuito utilizado para o microcontrolador fornece apenas alimentação positiva, o que impede a emissão de uma onda que oscila entre tensões negativas e positivas, fator eletroquímico necessário para enviar um sinal puramente AC que não sature a sonda receptora. A fonte negativa é constituída de um circuito integrado (IC7660) conversor de tensão associado a capacitores. O resultado é uma tensão negativa, que é o inverso da tensão de saída na porta de + 5 V do Arduino.

Figura 9 – Esquemático elétrico do circuito completo do segundo protótipo do condutivímetro.



Autor: Leonardo Sehn Alves

Figura 10 – Esquemático elétrico do módulo da fonte negativa.



Autor: Leonardo Sehn Alves

5.8.2 Módulo medidor de temperatura

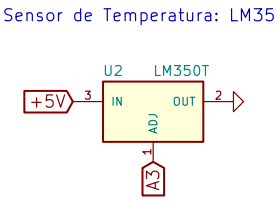
Como a temperatura é um fator importante na calibração do sensor de condutividade foi inserido um módulo medidor de temperatura. Foi utilizado um simples sensor pré-calibrado de temperatura, o LM35, que apresenta resistência dependente da temperatura. Associando o sensor a

uma porta analógica do microcontrolador, é possível fazer uma leitura sistemática de temperatura e garantir uma adequada calibração para o medidor de condutividade.

Em função da flutuação observada na medida da temperatura fez-se necessária a inclusão de um filtro, idealmente um filtro RC. Entretanto, optou-se realizar filtragem por software. Este filtro foi implementado através do cálculo da média de diversas medidas tomadas ao longo de dois segundos. Com essa implementação, o sinal de leitura do sensor permaneceu estável.

Apesar do sensor LM35 ser calibrado na fábrica, foram realizadas medidas para sua calibração através da comparação com o sensor de um condutivímetro comercial. A relação entre elas foi aproximadamente linear. Entretanto a ponteira desenvolvida neste trabalho resultou em uma leitura de aproximadamente 1,5 ^{0}C acima das medidas com a ponteira do medidor comercial. Isto indica que é também necessário um ajuste de calibração de temperatura, que também pode ser implementada no software.

Figura 11 – Esquemático elétrico do módulo medidor de temperatura.



Autor: Leonardo Sehn Alves

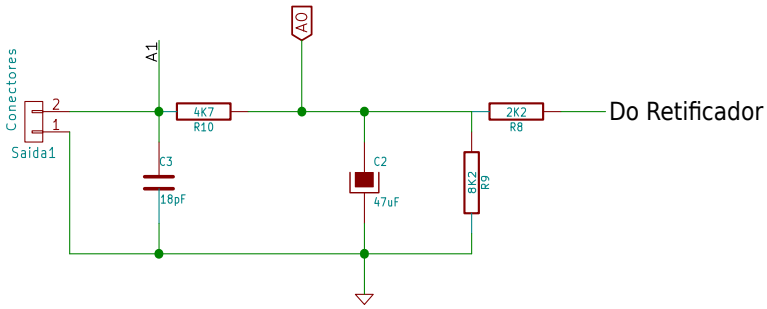
5.8.3 Filtro RC

Devido a problemas de ruído no sinal de saída, foi incluído um filtro na saída do medidor, a fim de facilitar a medida desse sinal. O circuito RC simples conta com os seguintes componentes:

- R_{10} = 4,7 kΩ
- C_3 = 18 pF

E apresenta desempenho razoável, minimizando o ruído no sinal de saída, embora não o elimine totalmente e continue correspondendo a um percentual significativo da amplitude do sinal. Foram inseridas conexões antes e depois do filtro RC para entradas analógicas do microcontrolador para fins de comparação entre as duas medidas pelo Arduino, sendo então possível verificar sistematicamente a eficácia do filtro em diferentes ambientes e estruturas.

Figura 12 – Esquemático elétrico do filtro RC conectado à saída do módulo integrador para minimizar o ruído na saída.

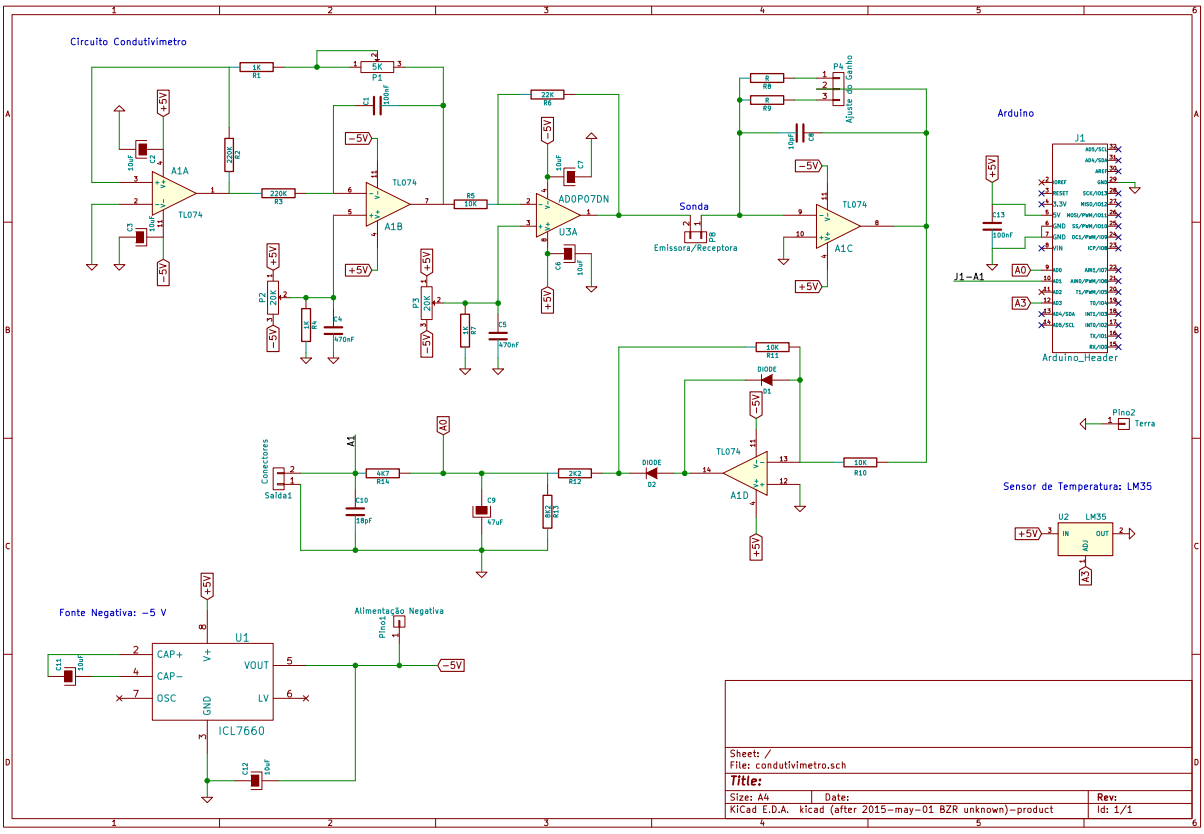


Autor: Leonardo Sehn Alves

5.9 Protótipo 3

O terceiro protótipo corresponde a uma evolução do protótipo anterior com a inserção de dois circuitos de ajuste para suprir as limitações apresentadas pelo circuito. Um dos circuitos de ajuste foi incluído na própria placa e o outro foi montado em *protoboard*. Trata-se de uma montagem intermediária enquanto o novo circuito, contemplando os ajustes, é transferido para uma placa nova. Foram realizadas medidas com esse terceiro protótipo.

Figura 13 – Esquemático do circuito completo do terceiro protótipo do condutivímetro.

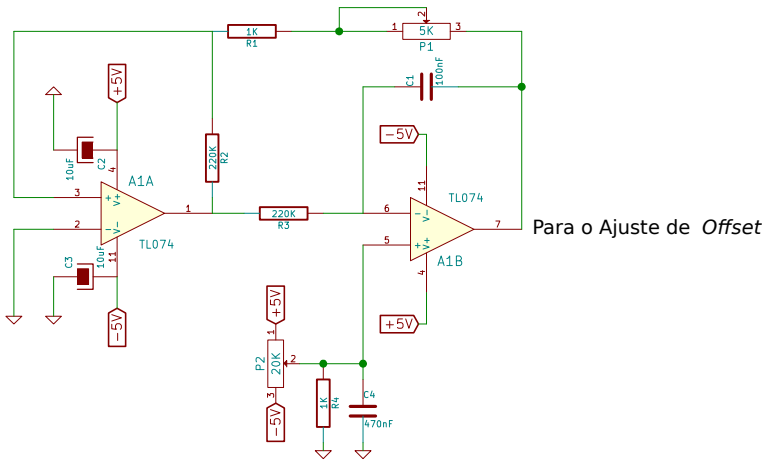


Autor: Leonardo Sehn Alves

5.9.1 Módulo de Ajuste de Linearidade

Devido à falta de simetria na onda triangular gerada pelo sistema, foi incluído um módulo para ajuste da linearidade da onda. Para um funcionamento adequado do medidor, foi incluído à entrada não inversora do amplificador operacional integrador um divisor de tensão com um potenciômetro multivoltas para regular a tensão nessa entrada. Essa tensão funciona como uma correção à simetria da onda triangular, pois a diferença das duas entradas é amplificada. Um ajuste preciso e estável é necessário, portanto é incluído um potenciômetro multivoltas com ajuste via chave de fenda.

Figura 14 – Esquemático elétrico do módulo gerador de onda triangular com circuito para ajuste da linearidade da onda triangular incluído na entrada não inversora do segundo amplificador operacional.

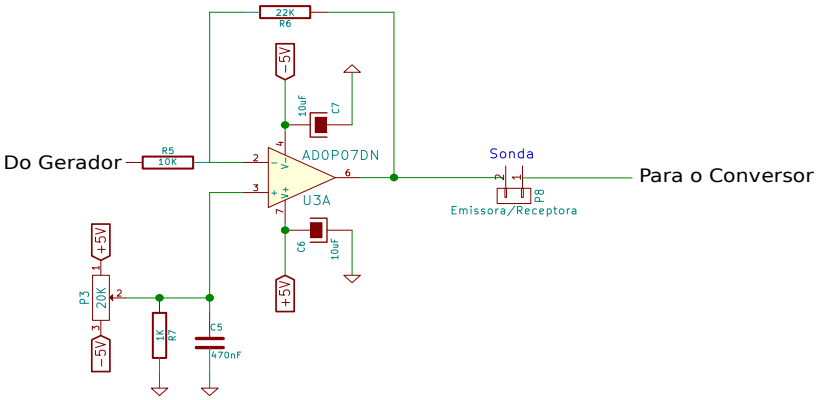


Autor: Leonardo Sehn Alves

5.9.2 Módulo de Ajuste de *Offset*

Este módulo foi incluído, pois a onda triangular, além de assimétrica apresentava tensão de *offset*, o que fazia a onda deixar de ser um sinal puramente AC e consequentemente deteriorava a medida. O módulo consiste de um amplificador não inversor com um divisor de tensão na entrada inversora, que segue o mesmo princípio do de ajuste de linearidade, mas nesse caso a diferença entre o sinal da entrada inversora e da não inversora a ser amplificado imprimirá uma correção na tensão de *offset*, recuperando um sinal puramente AC. O ajuste também é feito com um potenciômetro multivoltas. O ganho do amplificador pode ser ajustado pela razão entre as resistências dos resistores 5 e 6.

Figura 15 – Esquemático elétrico do módulo de correção de *offset*.

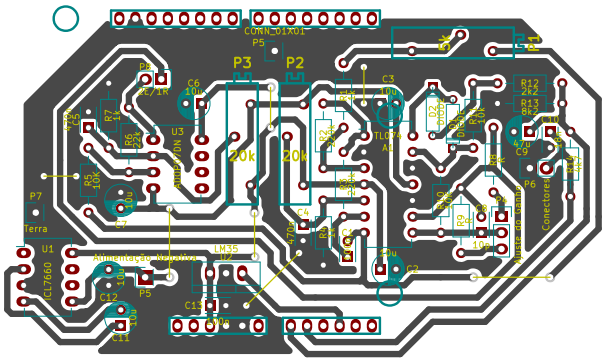


Autor: Leonardo Sehn Alves

5.10 Protótipo 4

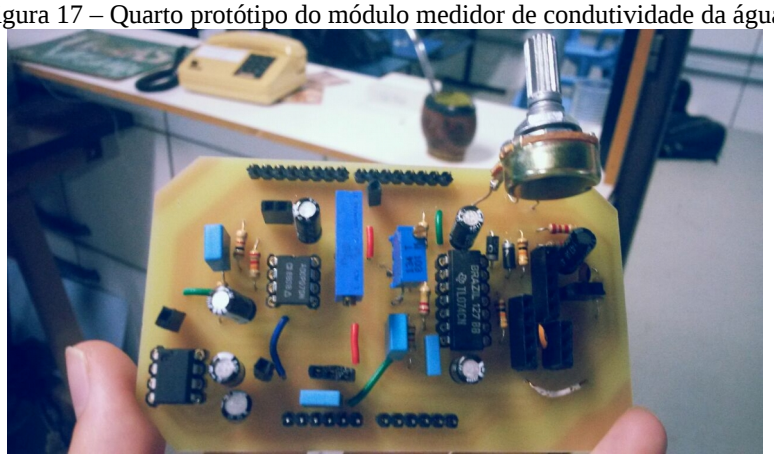
O quarto protótipo desenvolvido neste trabalho corresponde à versão estável que inclui as modificações introduzidas nos protótipos descritos anteriormente, consolidadas em uma versão em placa de circuito impresso. Uma das medidas consideradas no desenho dessa placa, foi uma maior área de aterramento na mesma, para uma menor susceptibilidade a ruídos.

Figura 16 – Arquivo digital da placa de circuito impresso do quarto protótipo.



Autor: Leonardo Sehn Alves

Figura 17 – Quarto protótipo do módulo medidor de condutividade da água.



Autor: Leonardo Sehn Alves

5.11 Programação

A programação implementada no microcontrolador visa a sistematização das medidas e a calibração da condutividade elétrica com a temperatura medida pelo sensor de temperatura. O programa utilizado pode ser encontrado no Apêndice A.

5.12 Cronograma

	Julho 2015	Agosto 2015	Setembro 2015	Outubro 2015	Novembro 2015	Dezembro 2015	Janeiro 2016	Fevereiro 2016
Desenvolvimento do Circuito	X	X	X					
Teste dos Módulos				X	X	X	X	
Arquivo Digital							X	X
Fresagem							X	X
Calibração, Testes e Medidas							X	X
Programação								X
Teste dos Modos do Programa								X
Documentação	X	X	X	X	X	X	X	X

5.13 Custos

Abaixo, na tabela 9, são listados os preços dos componentes usados no desenvolvimento do último protótipo, de acordo com informações obtidas em lojas do ramo de eletrônica ou de materiais e em lojas virtuais na internet, para realizar a estimativa do custo total dos insumos necessários para a confecção do medidor.

Tabela 9 – Preços dos componentes utilizados no último protótipo

	Quantidade	Valor Unitário (R$)	Valor Total (R$)
Microcontrolador Arduino	1	49,00	49,00
Placa de Cobre	1	30,00	30,00
Amplificador Operacional TL074	1	2,50	2,50
Circuito Integrado ICL7660	1	4,00	4,00
Amplificador Operacional AD0P07DN	1	1,00	1,00
Capacitores Eletrolíticos	7	0,50	3,50
Potenciômetros Multivoltas	2	2,00	4,00
Potenciômetros	1	1,00	1,00
Resistores	14	0,02	0,28
Capacitores	6	0,05	0,30
Chapa de Aço Inox	1	5,00	5,00
Fio de Cobre	1	1,00	1,00
Pedaço de Acrílico	1	5,00	5,00
LM 35	1	6,00	6,00
TOTAL			112,58

6. CALIBRAÇÃO DO CONDUTIVÍMETRO

Para calibrar o condutivímetro desenvolvido neste trabalho foram utilizadas amostras padrão de condutividade elétrica conhecida e também um condutivímetro comercial. Abaixo são apresentados os resultados referentes à avaliação do condutivímetro comercial com o uso das amostras padrão e as medidas para calibração do equipamento desenvolvimento neste trabalho.

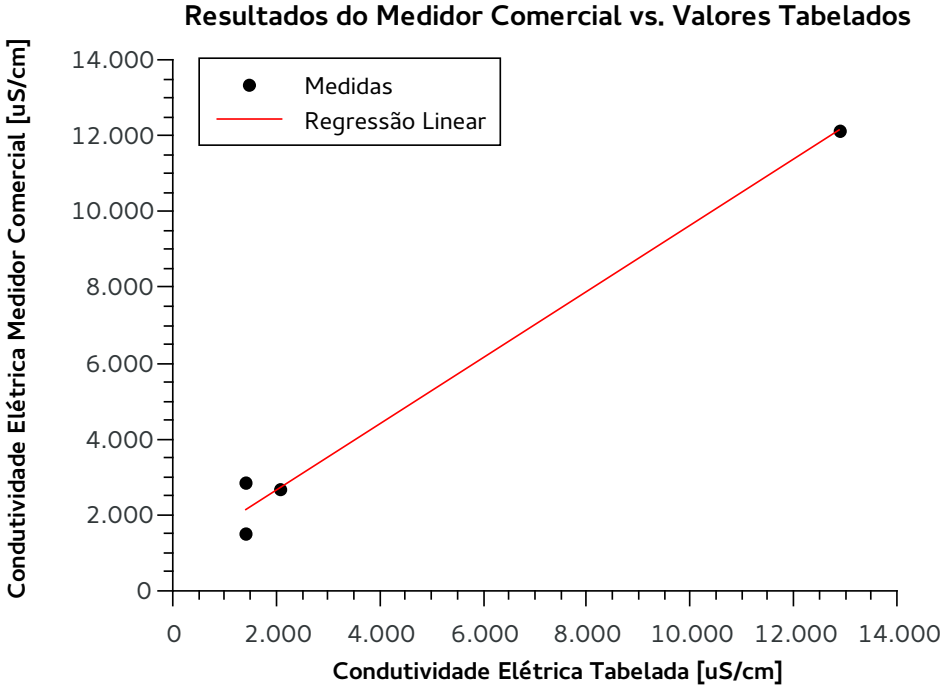
6.1 Avaliação do condutivímetro comercial e amostras padrão

Para esta avaliação foram usadas as seguintes amostras:

- Solução de 0,745 g cloreto de potássio (KCl) em 100 mL de água deionizada. Portanto, a concentração da amostra é de 7,45 g/L e o valor tabelado de condutividade é de 12,88 mS/cm;

- Solução de 0,0745 g cloreto de potássio (KCl) em 100 mL de água deionizada. Portanto, a concentração da amostra é de 0,745 g/L e o valor tabelado de condutividade é de 1,498 mS/cm;
- Nova solução de 0,0745 g cloreto de potássio (KCl) em 100 mL de água deionizada;
- Solução de 0,1 g cloreto de cálcio ($CaCl_2$) em 100 mL de água deionizada. Portanto, a concentração da amostra é de 1 g/L e o valor tabelado de condutividade é de 2,67 mS/cm;

Figura 18 – Relação entre as medidas feitas com o condutivímetro comercial e os valores tabelados esperados.



Autor: Leonardo Sehn Alves

A partir do diagrama na Figura 18 é possível observar uma relação linear entre os valores medidos e os padrões, mas desvios com relação aos valores esperados foram observados. Isto pode ter acontecido em decorrência de imprecisões na concentração das soluções padrão, tanto por conta do béquer utilizado quanto devido a imprecisões na massa de soluto dissolvido. Mas esses resultados também podem significar que o sensor está descalibrado.

6.2 Medidas de Amostras Padrão

Nesta seção são expostos os resultados obtidos com o medidor na sua versão mais estável com diferentes sondas utilizadas. Foram realizadas medidas de 10 amostras diferentes:

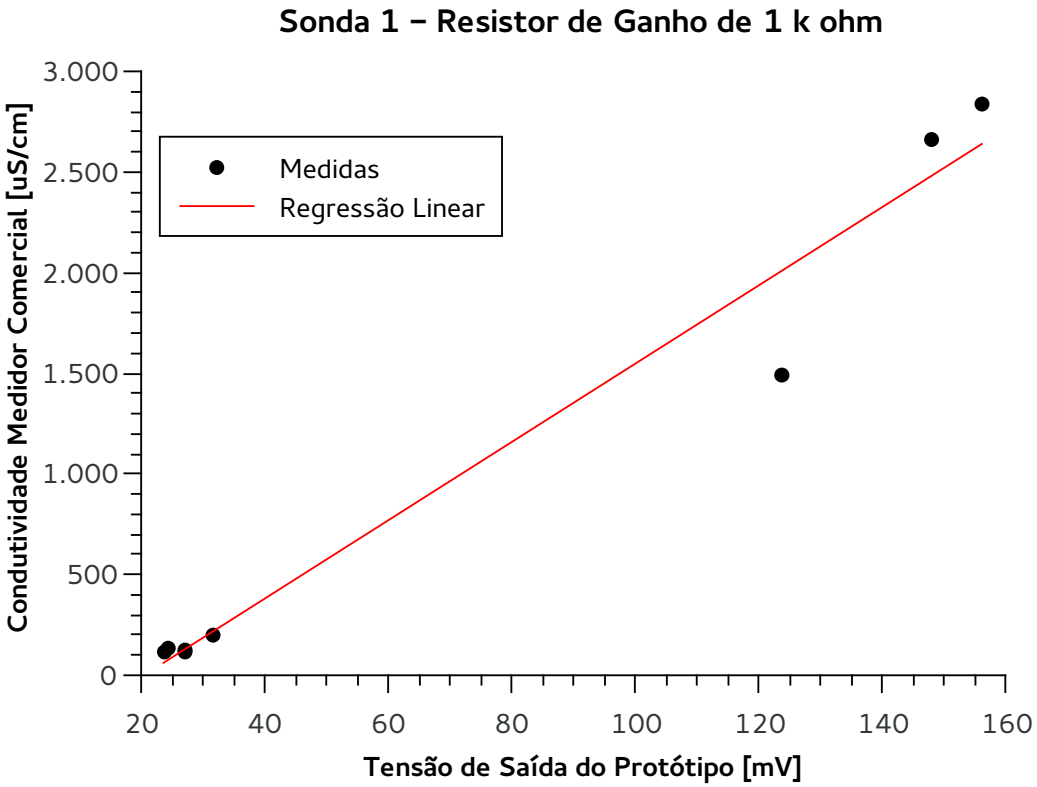
- Amostra 1: água da torneira do CTA retirada no dia 7 de Fevereiro de 2016;
- Amostra 2: solução de 0,745 g cloreto de potássio (KCl) em 100 mL de água deionizada. Portanto, a concentração da amostra é de 7,45 g/L e o valor tabelado de condutividade é de 12,88 mS/cm;
- Amostra 3: solução de 0,0745 g cloreto de potássio (KCl) em 100 mL de água deionizada. Portanto, a concentração da amostra é de 0,745 g/L e o valor tabelado de condutividade é de 1,498 mS/cm;
- Amostra 4: nova solução de 0,0745 g cloreto de potássio (KCl) em 100 mL de água deionizada;
- Amostra 5: solução de 0,1 g cloreto de cálcio ($CaCl_2$) em 100 mL de água deionizada. Portanto, a concentração da amostra é de 1 g/L e o valor tabelado de condutividade é de 2,67 mS/cm;
- Amostra 6: nova amostra de água da torneira do CTA retirada no dia 7 de Fevereiro de 2016;
- Amostra 7: água do bebedouro do prédio M1 do Campus do Vale retirada no dia 7 de Fevereiro de 2016;
- Amostra 8: água da torneira de um banheiro do Instituto de Física da UFRGS retirada no dia 7 de Fevereiro de 2016;
- Amostra 9: nova amostra de água da torneira de banheiro do Instituto de Física (IF) da UFRGS retirada no dia 8 de Fevereiro de 2016;
- Amostra 10: água deionizada retirada no Instituto de Química (IQ) da UFRGS medida no dia 8 de Fevereiro de 2016.

Os resultados obtidos foram comparados com valores tabelados, quando cabível, e sempre aferidos com relação à medida com um medidor comercial de condutividade. Este medidor foi emprestado pelo laboratório de Métodos do Instituto de Biociências da UFRGS. Cada amostra foi analisada com diferentes resistores de ganho, para verificar a linearidade da resposta do sensor para diferentes valores de ganho. Os valores de resistores de ganho utilizados foram:

- R_1 = 10 Ω;
- R_2 = 110 Ω;
- R_3 = 270 Ω;
- R_4 = 470 Ω;
- R_5 = 1 kΩ;
- R_6 = 2,2 kΩ;
- R_7 = 4,7 kΩ;
- R_8 = 10 kΩ;
- R_9 = 27 kΩ.

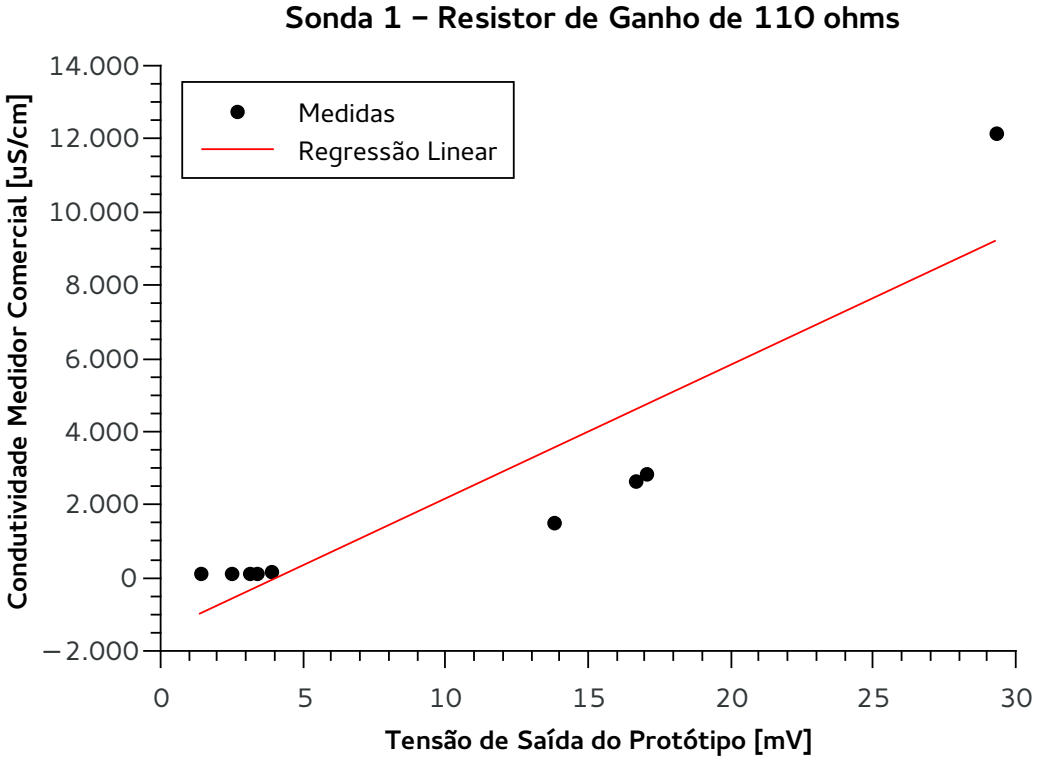
Os resultados também podem ser usados para buscar um possível valor de ganho que apresente melhor desempenho e para estabelecer fatores de calibração para diferentes ganhos. Abaixo é mostrada a resposta da tensão de saída do sensor com relação à condutividade para três resistores de ganho diferentes para cada sonda.

Figura 19 – Relação entre a Condutividade Elétrica medida pelo Condutivímetro Comercial e a Tensão de Saída do Protótipo para a Sonda 1 e com Resistência de Ganho de 1 kΩ.



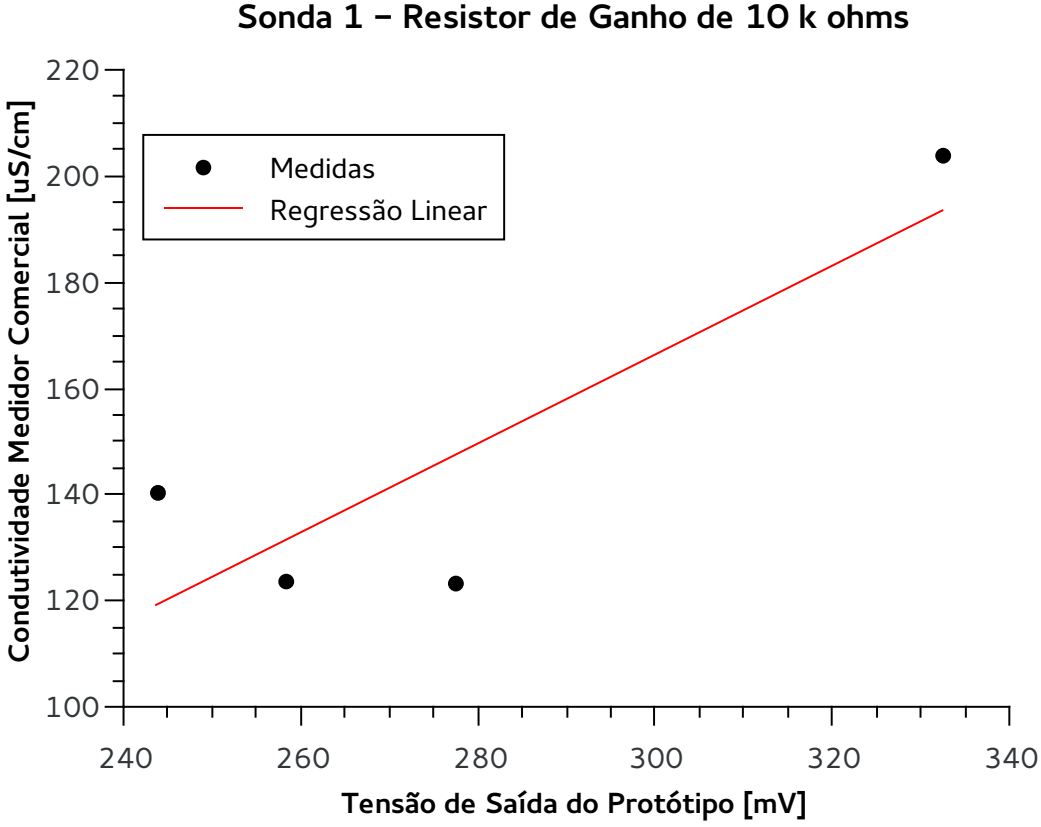
Autor: Leonardo Sehn Alves

Figura 20 – Relação entre a Condutividade Elétrica medida pelo Condutivímetro Comercial e a Tensão de Saída do Protótipo para a Sonda 1 e com Resistência de Ganho de 110 Ω.



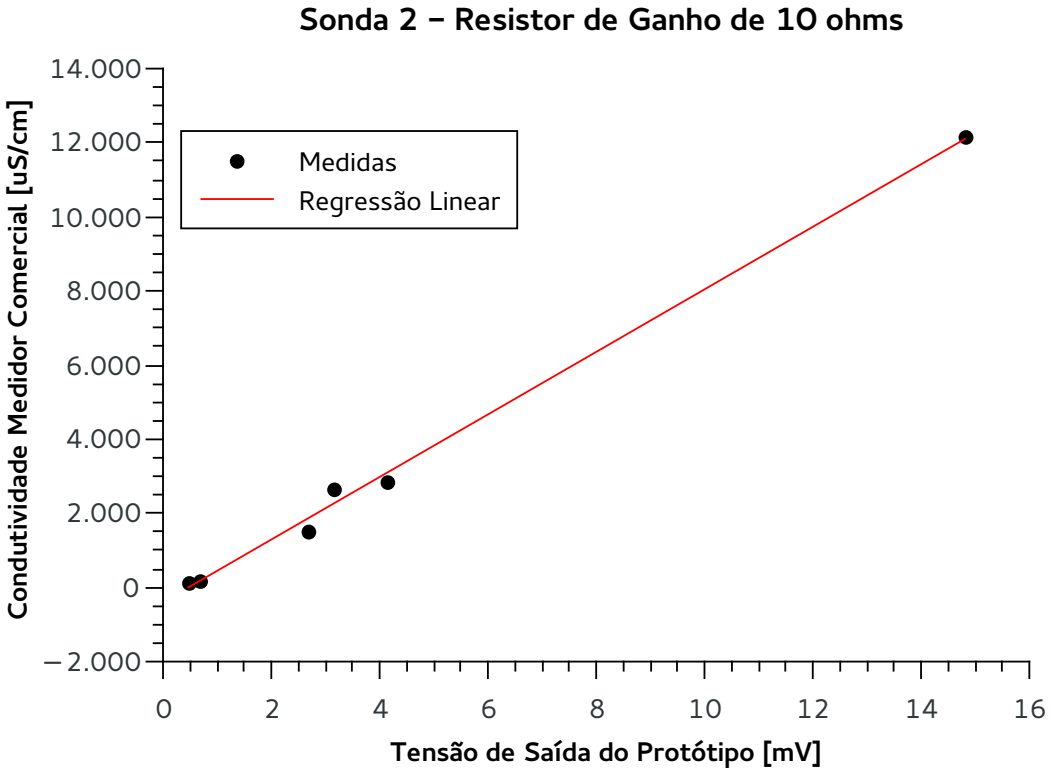
Autor: Leonardo Sehn Alves

Figura 21 – Relação entre a Condutividade Elétrica medida pelo Condutivímetro Comercial e a Tensão de Saída do Protótipo para a Sonda 1 e com Resistência de Ganho de 10 kΩ.



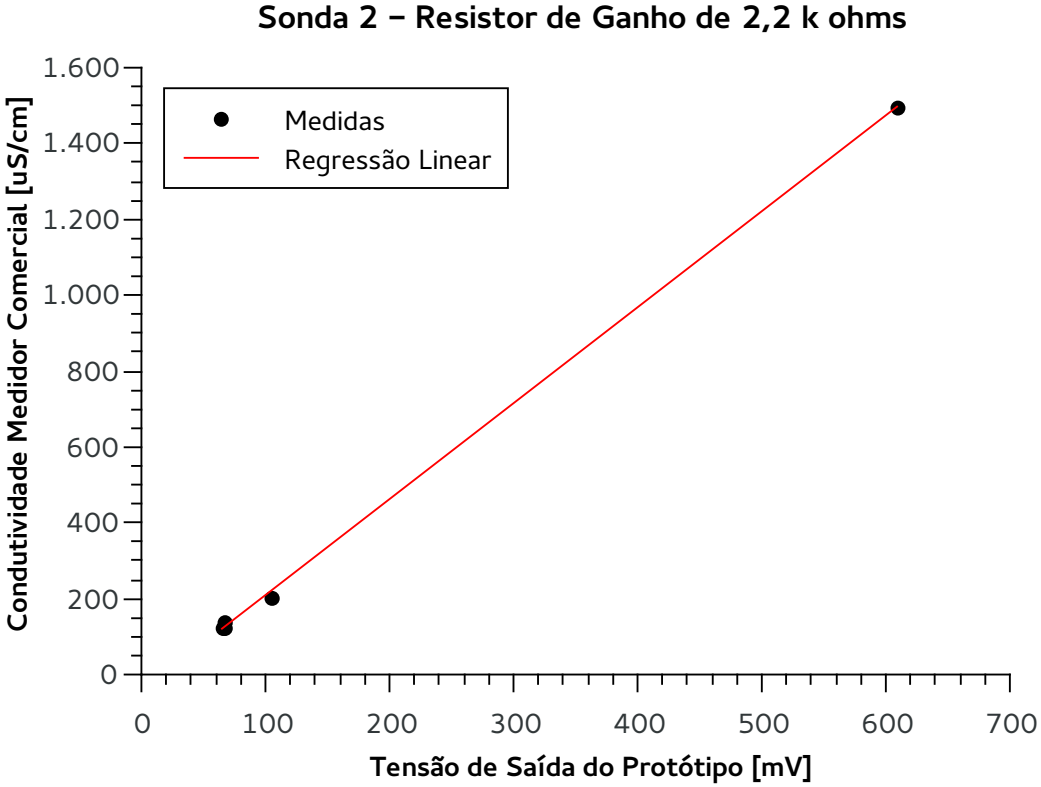
Autor: Leonardo Sehn Alves

Figura 22 – Relação entre a Condutividade Elétrica medida pelo Condutivímetro Comercial e a Tensão de Saída do Protótipo para a Sonda 2 e com Resistência de Ganho de 10 Ω.



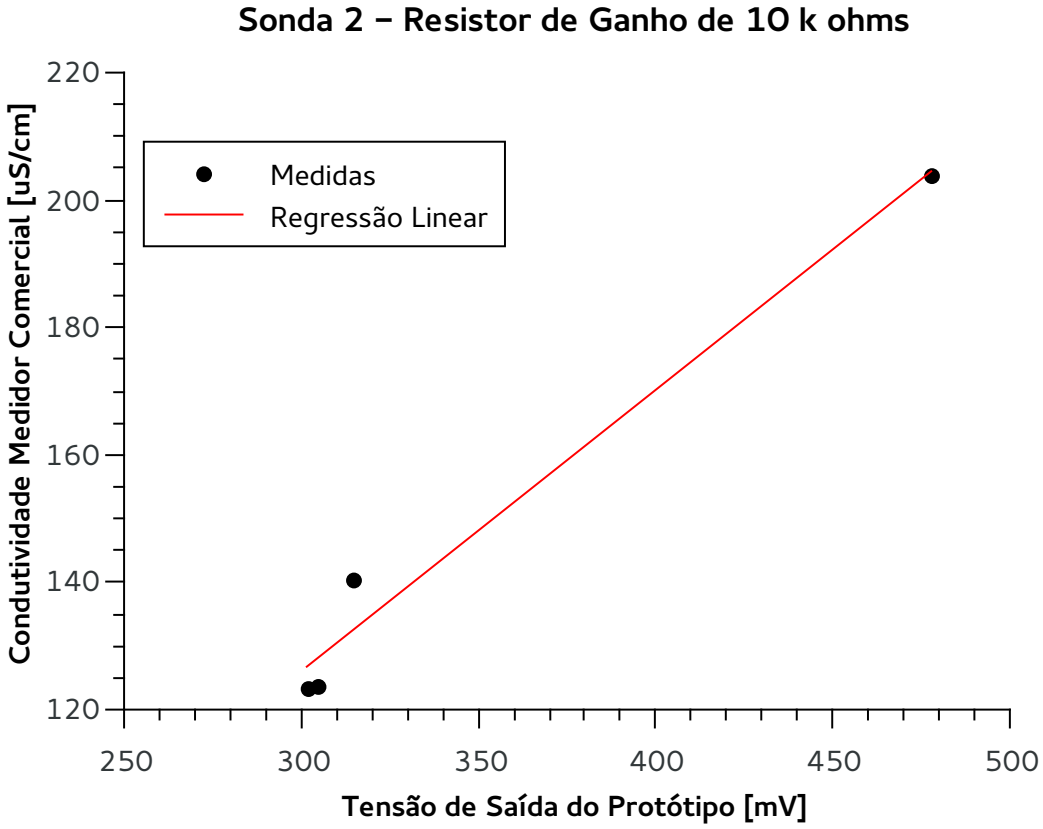
Autor: Leonardo Sehn Alves

Figura 23 – Relação entre a Condutividade Elétrica medida pelo Condutivímetro Comercial e a Tensão de Saída do Protótipo para a Sonda 2 e com Resistência de Ganho de 2,2 kΩ.



Autor: Leonardo Sehn Alves

Figura 24 – Relação entre a Condutividade Elétrica medida pelo Condutivímetro Comercial e a Tensão de Saída do Protótipo para a Sonda 2 e com Resistência de Ganho de 10 kΩ.



Autor: Leonardo Sehn Alves

É possível observar que para alguns valores de resistores de ganho a resposta apresenta comportamento bastante linear enquanto para outros a resposta diverge significativamente de um padrão linear. Abaixo estão tabelados, na tabela 10, os fatores R^2, que é um indicativo de linearidade de uma regressão linear (sendo 1 o valor ideal e 0 o mais distante desse comportamento), e os fatores de calibração para todos os resistores de ganho para ambas as sondas, bem como as amostras que foram medidas usando esses resistores. Os fatores de calibração mostrados correspondem ao fator de calibração em si, dado em $\mu S\ cm^{-1}\ mV^{-1}$, e mais um ajuste linear, dado simplesmente em $\mu S\ cm^{-1}$, que corresponde ao ponto de intersecção com o eixo das abscissas da regressão linear.

Tabela 10 – Fatores R^2, de calibração e ajuste linear das sondas 1 e 2.

	Amostras Medidas	Fator R^2	Fator de Calibração [$\mu S\ cm^{-1}\ mV^{-1}$]	Ajuste Linear [$\mu S\ cm^{-1}$]
Sonda 1				
10 Ω	2 a 5	0,163228977211166	6,652e+03	- 4,657e+03
110 Ω	2 a 10	0,814602601422384	3,652e+02	- 1,484e+03
270 Ω	2 a 7, 9 e 10	0,828009431686992	1,742e+02	- 1,672e+03

470 Ω	3 a 7, 9 e 10	0,9779223303014	4,137e+01	- 3,847e+02
1 kΩ	3 a 10	0,966038023028971	1,944e+01	- 3,975e+02
2,2 kΩ	4 a 7, 9 e 10	0,951835034759554	8,299e+00	- 3,700e+02
4,7 kΩ	4 a 10	0,972393626227161	3,994e+00	- 3,781e+02
10 kΩ	6,7, 9 e 10	0,725512593268877	8,376e-01	- 8,492e+01
27 kΩ	6 a 8	0,549072247174581	1,837e-02	+ 1,101e+02
Sonda 2				
10 Ω	2 a 5, 9 e 10	0,996285922970456	8,439e+02	- 3,955e+02
110 Ω	2 a 10	0,970744804490213	8,983e+01	- 5,061e+02
270 Ω	2 a 7, 9 e 10	0,987844306153451	3,684e+01	- 4,324e+02
470 Ω	3 a 7, 9 e 10	0,983099689226438	1,407e+01	- 9,268e+01
1 kΩ	3 a 10	0,984433677730748	7,057e+00	- 1,142e+02
2,2 kΩ	4, 6, 7, 9 e 10	0,999709387646344	2,528e+00	- 4,329e+01
4,7 kΩ	6 a 10	0,941919981941636	9,408e-01	- 7,599e+00
10 kΩ	6, 7, 9 e 10	0,935255353379185	4,413e-01	- 6,346e+00
27 kΩ	6 a 8	0,935540431696474	2,704e-02	+ 1,012e-04

A partir dos resultados mostrados, é possível observar que um comportamento linear ficou mais evidente ao longo de todos os valores de resistência de ganho para a segunda sonda, o que pode ser devido a diferentes fatores. É possível que a geometria, material ou espessura das placas da segunda sonda sejam mais apropriadas do que os da primeira, algo a ser estudado com mais profundidade. Também existe a possibilidade de o fio de blindagem, presente na primeira e não na segunda sonda, não ter contribuído para um sinal mais limpo e ao invés disso ter prejudicado o sinal de alguma forma.

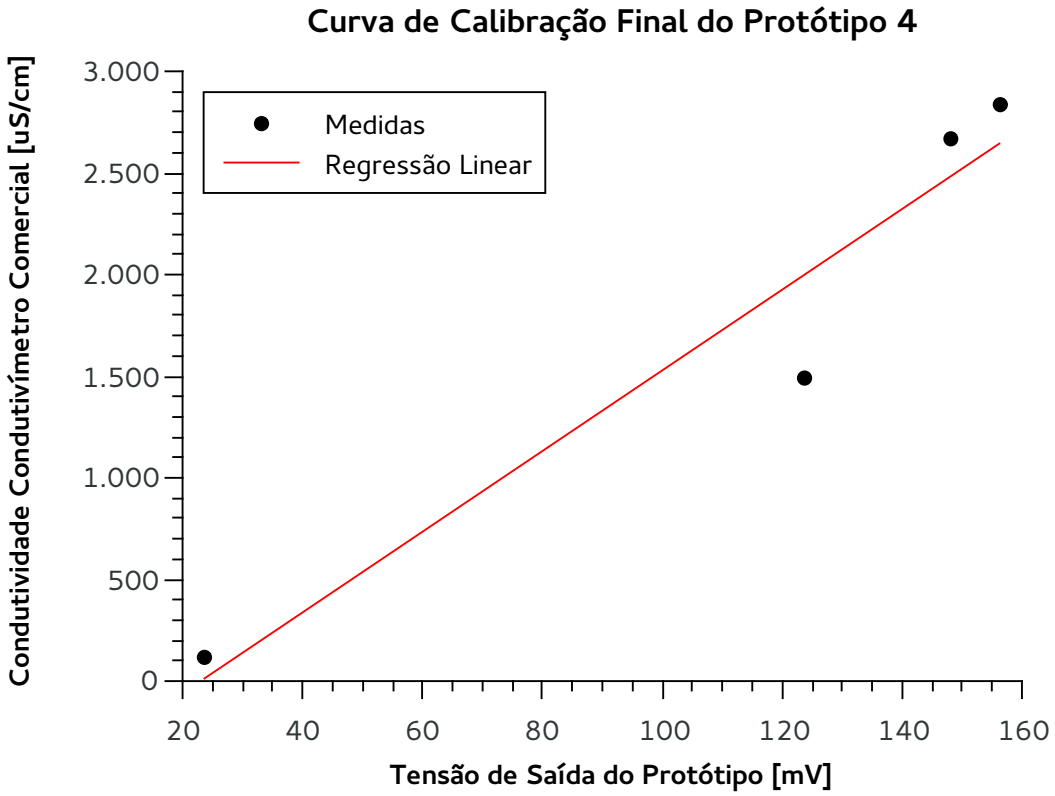
Outra questão notável é que existem alguns valores de resistência, especialmente na primeira sonda, que apresentaram comportamento mais linear do que outros, tipicamente os valores intermediários de resistência. Esse resultado pode ser causado por algum fator deletério às medidas para esses valores específicos, tais como medidas com sinais muito baixos, para os quais erros intrínsecos do sistema podem ser mais pronunciados, ou com sinais muito altos, para os quais a saturação pode começar a afetar a linearidade do sistema. Outras hipóteses devem ser averiguadas.

6.3 Calibração Final

Para a calibração do sensor foram utilizadas as amostras padrão (amostras 2 a 5) e uma amostra de condutividade menor como a da água do bebedouro para um bom ajuste linear ao longo

de todo o intervalo. Os valores de referência utilizados foram os medidos pelo condutivímetro comercial. Essa escolha foi tomada devido a imprecisões na preparação de amostras. A água deionizada não foi utilizada para a calibração para baixos valores de condutividade, pois a mesma apresentou valores de condutividade muito elevados em todas as coletas, impossibilitando seu uso para esse fim. Foi escolhida a configuração com a primeira sonda e o resistor de ganho de 1 kΩ para esta calibração.

Figura 25 – Curva de Calibração do Sensor



Autor: Leonardo Sehn Alves

7. RESULTADOS

O sensor desenvolvido e calibrado de acordo com os métodos acima foi utilizado para determinar a condutividade elétrica de diferentes amostras de água, conforme apresentado na tabela abaixo. Para fins de comparação, são apresentados, na tabela 11, também os valores obtidos com o condutivimetro comercial.

Tabela 11 – Comparação entre as condutividades medidas com o equipamento desenvolvido neste trablho e com o medidor comercial.

Amostra	Condutividade (protótipo) [uS/cm]	Condutividade (medidor comercial) [uS/cm]
6 – Água da torneira do CTA	79,947	123,4
8 – Água da torneira banheiro do IF	79,886	125,5
9 – Água da torneira banheiro do IF	27,983	140,5
10 – Água deionizada do IQ	167,062	204

É notável que, embora o comportamento linear com a condutividade se matenha para o sensor, a sua precisão ainda é precária. Este é um ponto de aprimoramento que se faz necessário para o projeto.

8. ANÁLISES E PERSPECTIVAS

Como medidor de bancada, o sistema apresentou como pontos virtuosos o baixo custo e a portabilidade, podendo funcionar tanto com a alimentação de uma fonte DC quanto com um microcontrolador Arduino. O comportamento da tensão de saída do medidor com relação à condutividade foi linear na maioria das configurações de montagem do sistema, que é o desempenho buscado para o sensor. Outra virtude do sistema, devido aos ajustes implementados, foi a total liberdade com relação ao sinal emitido pela sonda, sendo possível ajustar frequência, amplitude, simetria e *offset*.

Deve-se destacar a necessidade de aprimoramento do método de medição da temperatura, seja com calibração mais precisa ou pelo desenvolvimento de nova sonda a prova d'água.. Outra implementação conveniente seria a inclusão de uma tela para que o equipamento possa ser utilizado sem a necessidade de um computador para visualização dos dados.

Um dos pontos no desenvolvimento desse trabalho que deve ser aprimorado é o cuidado com a preparação de amostras. Esse processo se mostrou delicado e crítico para as medidas, como, por exemplo, para as amostras 4 e 5, em que a diferença na preparação das amostras resultou em uma diferença acentuada nos resultados. Consequentemente, esse processo afetou na calibração do sensor. Para um desenvolvimento posterior, cabe-se fazer mais medidas de valores de condutividade intermediários na calibração do medidor. Apesar disso, como o ponto de maior interesse em monitoramento ambiental são as flutuações na medida, o desempenho com comportamento estável e linear apresentado pelo sensor foi satisfatório.

Uma perspectiva para de continuidade deste trabalho refere-se à adaptação do equipamento para medidas de campo, através do desenvolvimento de uma estrutura mecânica e de um sistema transmissão de dados para que o medidor possa efetuar um monitoramento em tempo real e contínuo de corpos d'água. É importante desenvolver um sistema mecânico que proteja os sensores e demais componentes eletrônicos, mas que mantenha estável a medida de condutividade por longos períodos com a mínima necessidade de manutenção. Com algumas adaptações, como a inserção de um sistema de baterias, já será possível realizar medições em situação real, mostrando um caso de interesse e uma possível contribuição do instrumento desenvolvido.

Outra possibilidade é a aplicação das potencialidades do equipamento para incluir medidores de outros parâmetros, como de oxigênio dissolvido e turbidez, os quais são elementos que, atuando de forma complementar à condutividade, constituiriam um medidor de qualidade da água mais consistente, com o qual seria possível fazer correlação entre os parâmetros, aprimorando

a caracterização das origens dos distúrbios no ecossistema. Por exemplo, o despejo de algum esgoto ou efluente clandestino que produz uma variação pontual na condutividade elétrica medida pelo condutivímetro pode ser atestado por um medidor de oxigênio dissolvido no mesmo ponto através de uma redução abrupta na medida. Ou mesmo esse sensor complementar pode proporcionar uma informação a partir da qual seja mais factível estimar qual o poluente que está sendo despejado, por exemplo, verificando se a variação relativa entre a medida de condutividade e de oxigênio dissolvido é menor ou maior.

O Centro de Tecnologia Acadêmica apresenta como um de seus projetos de destaque a Estação Meteorológica Modular, que consiste de um sistema automatizado de medição e transmissão de parâmetros meteorológicos e ambientais, estando estruturada em módulos que podem ser selecionados de acordo com a finalidade desejada. Naturalmente, o presente projeto do Medidor de Qualidade da Água poderá ser integrado ao projeto das Estações Meteorológicas Modulares, podendo inclusive utilizar o sistema de transmissão e armazenamento de dados. Se medidores de outros parâmetros forem desenvolvidos, estes podem também atuar como submódulos de medição da qualidade da água a serem escolhidos de acordo com a aplicação.

9. CONCLUSÕES

Este trabalho se inspirou na importância da qualidade da água para atividades humanas e para ecossistemas naturais, descreveu alguns dos principais parâmetros para inferir sua qualidade e propôs o desenvolvimento de um sistema de medidas automatizadas em campo para monitoramento contínuo em grandes áreas. Assim, foi proposto como objeto deste trabalho de diplomação a construção de um módulo de medição de condutividade elétrica, a partir do qual é possível inferir informações de salinidade e de sólidos dissolvidos totais quando feitas as devidas considerações da geologia local e de possíveis impurezas.

Para atingir o objetivo proposto foram desenvolvidos quatro protótipos. O primeiro deles consistiu num protótipo construído em *protoboard* para verificar o funcionamento básico de cada módulo do sistema de medidas. A partir do segundo protótipo, o desenvolvimento passou a ser conduzido diretamente em placas de circuito impresso, uma vez que as *protoboards* dificilmente apresentam contatos com qualidade suficiente para lidar com sinais analógicos em circuitos de média e alta complexidade. A existência de um equipamento como a Fresadora PCI João-de-barro do Centro de Tecnologia Acadêmica viabilizou a agilidade no desenvolvimento destes protótipos. As limitações de desempenho do segundo e terceiros protótipos levaram a aprimoramentos essenciais ao circuito que resultaram na quarta versão do condutivímetro: mais flexível, estável e robusta.

Almeja-se que o projeto de Medidor de Condutividade Elétrica para fins de Monitoramento Ambiental corresponda a uma solução que se enquadre na interface entre ciência e tecnologia, estando alinhada com a formação em engenharia física, que tem um viés de desenvolvimento do conhecimento tanto científico quanto tecnológico com o intuito de promover a interface entre ambos. Além disso, o projeto pretende ter um impacto direto na sociedade, tanto na comunidade acadêmica como na promoção da ciência cidadã, e a partir disso promover a interface entre três domínios fundamentais na formação do Engenheiro Físico: a ciência, a tecnologia e a sociedade.

REFERÊNCIAS E FONTES BIBLIOGRÁFICAS

1. KEMKER, Christine. “Conductivity, Salinity and Total Dissolved Solids.” Fundamentals of Environmental Measurements. Fondriest Environmental, Inc. 3 março, 2014. Disponível em: <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/>. Acesso em: 25 ago. 2015.

2. MISSOURI DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES. Water Quality Parameters. Disponível em: <http://dnr.mo.gov/env/esp/waterquality-parameters.htm>. Acesso em: 25 ago. 2015.

3. Agência Nacional de Águas. Portal da Qualidade das Águas: Indicadores de Qualidade da Água – Índice de Qualidade das Águas (IQA). Disponível em: <http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>. Acesso em: 02 fev. 2016.

4. VAZ DO NASCIMENTO, Luciana; VON SPERLING, Marcos. Os Padrões Brasileiros de Qualidade das Águas e os Critérios para Proteção da Vida Aquática, Saúde Humana e Animal. Disponível em: <http://www.ceset.unicamp.br/~mariaacm/ST405/Agua.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2015.

5. DO LAGO, Claudimir L.; GUTZ, Ivano G. R.; DA ROCHA, Rogério T. A Low-Cost and High Performance Conductivity Meter. Journal of Chemical Education, São Paulo, vol. 74, n. 5, maio 2015.

6. FICARIS, M.; MOREIRA, S. Análise de Metais Pesados em Águas Subterrâneas empregando a Fluorescência de Raios-X por Reflexão Total com Radiação Síncrotron (SR-TXRF). XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Disponível em: <http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/23308/15401>. Acesso em: 02 de fev. 2016.

7. Agência Nacional de Águas. Portal da Qualidade das Águas: Indicadores de Qualidade da Água – Índice de Qualidade das Águas (IQA). Disponível em: <http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>. Fonte Original: Resolução CONAMA 357 de 17 de Março de 2005. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 02 de fev. 2016.

8. EUTECH INSTRUMENTS. Introduction to Conductivity. *In*: Technical Tips, 1997. Disponível em: <http://www.eutechinst.com/tips/contds/01.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2015.

9. SOMMER, K.; SPITZER, P. Session H: Ocean Salinity (Powerpoint). *In*: Plenary lectures: WMO-BIPM WS Geneva 30 março - 1 abril, 2004. Disponível em: <http://www.bipm.org/ws/BIPM/WMO-BIPM/Allowed/Plenary_lectures/04.04-Session_H-Intro-Sommer.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2015.

10. EPA. 5.8 Total Dissolved Solids. In Water: Monitoring and Assessment, 2012. Disponível em: <http://water.epa.gov/type/rsl/monitoring/vms58.cfm>. Acesso em: 25 ago. 2015.

11. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOC., AMERICAN WATER WORKS ASSOC. & WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (20th ed.). Baltimore, MD: American Public Health Association, 1999.

12. YSI INCORPORATED. Pro30 User Manual, 2011. Disponível em: <http://www.fondriest.com/ysi-pro30.htm>. Acesso em: 25 ago. 2015.

13. PONCE, V. M. Total dissolved solids (TDS) based on electrical conductivity (EC). *In*: Online Salinity Calculator, 2014. Disponível em: <http://ponce.sdsu.edu/onlinesalinity.php>. Acesso em: 25 ago. 2015.

14. SCANNELL, P. W.; JACOBS, L. L. Technical Report: No. 01-06 Effects of Total Dissolved Solids on Aquatic Organisms. *In*: Alaska Department of Fish and Game: Division of Habitat and Restoration, junho, 2001. Disponível em: <http://www.adfg.alaska.gov/static/home/library/pdfs/habitat/01_06.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2015.

15. SWRCB. Electrical Conductivity/Salinity Fact Sheet. *In*: The Clean Water Team Guidance Compendium for Watershed Monitoring and Assessment State Water Resources Control Board, 2002. Disponível em: <http://www.swrcb.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130en.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2015.

16. ELERT, G.; TETRUASHVILI, S. Resistivity of Water. *In*: The Physics Factbook, 2006. Disponível em: <http://hypertextbook.com/facts/2006/SamTetruashvili.shtml>. Acesso em: 25 ago. 2015.

17. MILLER, R. L.; BRADFORD, W. L.; Peters, N. E. Specific Conductance: Theoretical Considerations and Application to Analytical Quality Control. *In*: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 1988. Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/wsp/2311/report.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2015.

18. NETTING, R. Salinity. *In*: NASA Science: Earth, maio, 2013. Disponível em: <http://science.nasa.gov/earth-science/oceanography/physical-ocean/salinity> Acesso em: 25 ago. 2015.

19. KEMKER, Christine. “Conductivity, Salinity and Total Dissolved Solids.” *Fundamentals of Environmental Measurements*. Fondriest Environmental, Inc. 3 março, 2014. Disponível em: <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/>. Acesso em: 25 ago. 2015.

20. PUBLIC LAB. Rede Infoamazônia: Mãe D'água, 2015. Disponível em: <http://www.publiclab.org/wiki/mae-d-agua-rede-infoamazonia>. Acesso em: 25 ago. 2015.

21. PUBLIC LAB. Water Quality Sensor, 2012. Disponível em: <http://publiclab.org/wiki/water-quality-sensor>. Acesso em: 25 ago. 2015.

APÊNDICE A – Programa utilizado para as medidas

Programa para Arduino utilizado no condutivímetro desenvolvido neste trabalho.

```
// Medidor de Condutividade Eletrica da Agua

float t =0; // primeiro valor de temperatura utilizado para fazer a media das temperaturas

float temp=0; // valor de temperatura em graus celsius

byte sensor=A3; // estabelece a porta analogica 3 como sensor de temperatura

float val2=0; // valor de leitura da condutividade

float cond=0; // valor de tensao proporcional a condutividade

byte senscond=A1; // estabelece a porta analogica 1 como sensor de condutividade

float condcorr=0; // valor de tensao correspondente a condutancia especifica

//float condcorrcalibrada=0; //indicacao da inclusao do fator de calibracao caso se pretenda ter a medida diretamente em unidades de condutividade

void setup() {

Serial.begin(9600);

}

void loop() {

t = 0;

for (int i=0; i<100; i++) { //laco para medida das temperaturas

t += analogRead(sensor); //leitura da temperatura

delay(20); // tempo entre medidas de temperatura
```

```
}

t/=100; //calculo da media de temperaturas

temp = t*0.488758553; // faz conversao de tensao pra temperatura
de acordo com precisao do arduino e do LM35

Serial.write("Temperatura(C): ");

Serial.println(temp); // manda para o Serial a temperatura

val2 = analogRead(senscond); // atribui a uma variavel a leitura
no pino analogico 1

cond = val2*0.0048828125; // converte essa leitura para tensao
proporcional a condutividade

Serial.write("Condutividade: ");

Serial.println(cond); // manda para o Serial a tensao proporcional
a condutividade

condcorr = cond/(1+0.0191*(temp-25)); // correcao de condutividade
para condutancia especifica via calibracao com a temperatura

Serial.write("Condutancia Especifica: ");

Serial.println(condcorr); // manda para o Serial a tensao
correspondente a condutancia especifica

//condcorrcalibrada = fatordecalibracao*condrc; //converte de
tensao para condutividade

delay(1000); // reinicia a medida de temperatura a cada 1s
(1000ms)

}
```