

Amplificador de Instrumentação com Amplificador Operacional

Por **Haroldo Amaral** - 23/07/2015



Este post é a parte 3 de 4 da série [Amplificador Operacional](#)

[Amplificador Operacional](#)

- [Amplificador Operacional](#)
- [Teorema de Superposição em Amplificadores Operacionais](#)
- [Amplificador de Instrumentação com Amplificador Operacional](#)
- [Fonte de Alimentação Simples com Amplificador Operacional](#)

Caros leitores, continuaremos nossa pequena saga através dos amplificador operacionais. Recapitulando, no [primeiro artigo](#) desta série abordamos os princí

conceitos e características relacionados aos AmpOp's ideais, as principais diferenças entre os modelos idealizados e os modelos reais, além de analisarmos sua aplicação com comparador, amplificador inversor, não inversor e **seguidor de tensão (buffer)**. No **segundo artigo** analisamos sua aplicação como somador e subtrator (amplificador diferencial).

Nesta terceira etapa mixaremos os conceitos abordados, com foco especial sobre amplificador diferencial, para entendermos um pouco sobre os amplificadores de instrumentação, comumente relacionados na literatura através dos acrônimos *INA* ou *IN*.

O amplificador de instrumentação é provavelmente um dos modelos mais especiais dos AmpOp's, na verdade este componente é desenvolvido através de um arranjo com outros amplificadores operacionais, tradicionalmente envolvendo características bastante distintas quando comparado a um AmpOp de uso comum, como o clássico 741.

É importante alertarmos que nem todo amplificador presente em um instrumento de medição necessariamente é um amplificador de instrumentação. Isto dependerá muito das necessidades do projeto, em especial com as características do sinal que será amplificado e posteriormente processado.

Voltando ao Amplificador Diferencial

Podemos relacionar um AmpOp tradicional a um bloco de ganho de uso geral, no qual

Gostou? **Junte-se à comunidade Embarcados**

Os amplificadores IN/INA por sua vez possuem aplicações um pouco mais restritas; entretanto, possuem a capacidade de desempenhar sua função com resultados superiores se comparado a um AmpOp tradicional. De uma maneira simples, um AmpOp tradicional é extremamente flexível, podendo se adequar a maioria das necessidades através da realimentação. Um IN/INA por sua vez atuará somente como amplificador em uma faixa específica e bem delimitada de ganho.

Como vimos no artigo anterior, a configuração de amplificador diferencial pode ser obtida através de um AmpOp e quatro resistores externos, conforme a Figura 1.

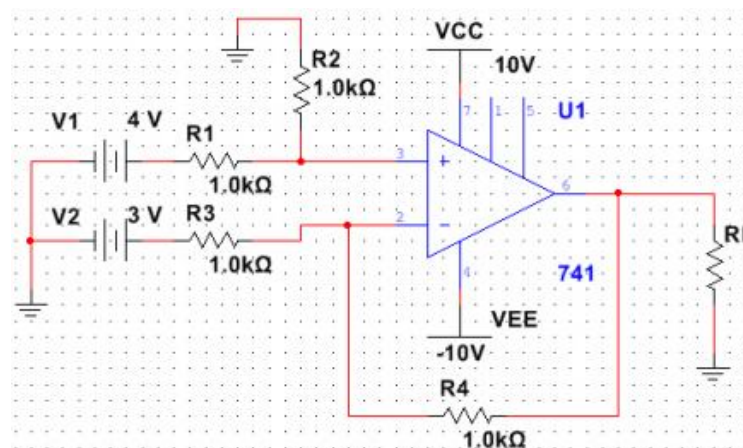


Figura 1 – Amplificador diferencial.

Fonte: Próprio autor, arquivo pessoal

Uma das principais características desta configuração tem relação com a alta rejeição a sinais de modo comum, ou, *common mode rejection* (CMR). Entretanto, devido à utilização de componentes discretos externos esta rejeição a sinais de modo comum pode não funcionar tão bem quanto esperado.

Gostou? [Junte-se à comunidade Embarcados](#)

Na condição mais ideal de operação, temos que "R1 = R3" e "R2 = R4", nos levando seguinte equação:

$$v_{out} = (V_1 - V_2) \times \left(\frac{R_4}{R_3} \right)$$

(01)

A CMR alcançada pela configuração é dependente da precisão dos componentes externos em especial os resistores. A relação "R1/R2" e "R3/R4" deve ser idealmente igual, o q resultaria em um CMR infinito, entretanto vivemos em um mundo repleto de limitações serem transpostas. A equação a seguir apresenta o cálculo do CMR, onde a variável "Kr" representa a diferença percentual entre as duas relações citadas anteriormente em s forma fracionária:

$$CMR = 20 \times \log_{10} \left[\frac{1 + \frac{R_4}{R_3}}{Kr} \right]$$

(02)

Considerando "R4 = R3", obteremos os seguintes CMR de acordo com a diferença percentual de Kr:

Kr (%)	CMR (dB)	CMRR (V/V)
0,1	66,02	1/1999,86

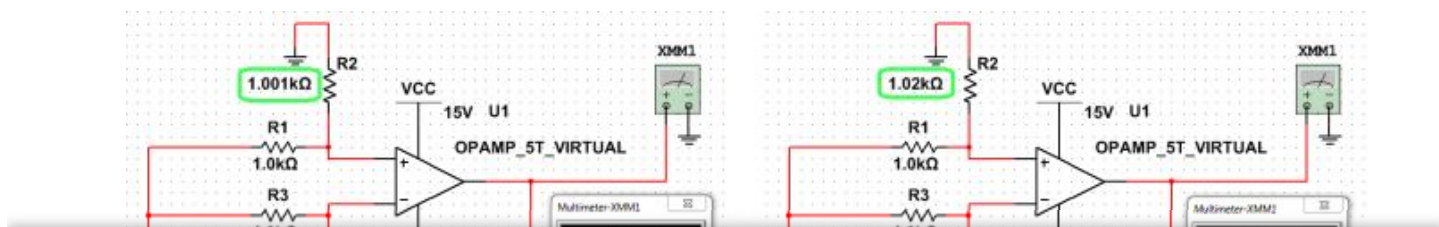
Gostou? [Junte-se à comunidade Embarcados](#)

0,2	60,00	1/1000,00
0,5	52,04	1/399,94
1,0	46,02	1/199,98
2,0	40,00	1/100,00

Notamos que quanto maior o ganho melhor será o *CMR*, além do impacto da tolerância dos resistores. Em uma abordagem realista, mesmo utilizando resistores com tolerância de 1% e ainda selecionando os melhores disponíveis em uma cartela, dificilmente alcançarem 66dB de *CMR*.

Neste ponto você pode estar se perguntando, "Ok, mas o que significam estes *dB's*?". Os *dB's* indicam o quão atenuado será o sinal de modo comum. Por exemplo, para um sinal de modo comum de 2,5V aplicado a um amplificador diferencial com *CMR* de 66,02dB, esse sinal será atenuado aproximadamente 2000 vezes, ou seja, poderíamos representar esse mesmo sinal como uma fonte de 1,25mV aplicado diretamente a entrada diferencial.

A Figura 2 a seguir apresenta uma simulação com *Kr* de 0,1% e 2%.



Gostou? [Junte-se à comunidade Embarcados](#)

Figura 2 – CMR em um amplificador diferencial. 0,1% à esquerda, 2,0% à direita.

Fonte: Próprio autor, arquivo pessoal

Em uma análise mais profunda, além da tolerância dos resistores influenciarem o CMR, a própria impedância série da fonte de sinal pode afetar este parâmetro caso não esteja balanceada entre as duas entradas.

Para nossa felicidade o problema causado pela tolerância entre os resistores pode ser minimizado através da utilização de um amplificador diferencial de precisão, ou *precision difference amplifier*. Um componente que além do amplificador diferencial já incorpora internamente os quatro resistores, sendo estes trimados a laser para garantir a melhor precisão. Como exemplo podemos citar o **SSM2141** da Analog Devices (AD) ou o **INA133** da Texas Instruments (TI), ambos com CMR típico acima de 80dB. Mesmo com um amplificador de precisão a impedância das fontes de sinal pode afetar o resultado final do CMR.

Não estranhe caso encontrar CMRR expresso em dB ou CMR em V/V, existem divergências entre os diversos fabricantes, mas o importante é que ambos em sua essência apresentam a mesma relação.

O Amplificador de Instrumentação

Gostou? [Junte-se à comunidade Embarcados](#)

degradado pela impedância série da fonte de sinal. Os amplificadores de instrumentação surgem como grandes aliados conseguindo agregar características como elevado CMR , elevada impedância nas entradas, baixo *offset* e **baixa corrente de bias**. Em resumo podemos dizer que agrega a maior quantidade possível das características mais desejadas pelos projetistas.

A Figura 3 a seguir apresenta um *IN/INA* com suas conexões. No exemplo notamos uma **ponte de wheatstone** conectada ao amplificador de instrumentação através de suas duas entradas, inversora e não inversora. Junto aos terminais de alimentação encontramos os tradicionais e necessários capacitores de desacoplamento. A grande diferença a ser notada é que não existe um arranjo de resistores externo controlando o ganho, mas sim apenas um único resistor (R_G), podendo em muitos casos ter seu ganho controlado a partir sinais lógicos ou mesmo diferentes níveis de tensão.

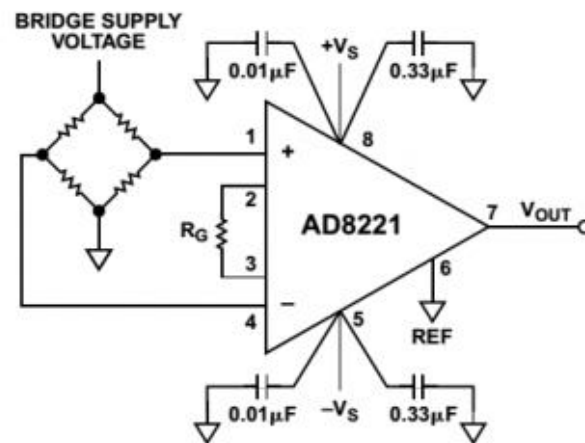


Figura 3 – Amplificador de instrumentação.

Fonte: Analog Devices [2]

O elevado CMR agregado ao ganho elevado é extremamente importante em aplicações que necessitam lidar com sinais de baixíssima amplitude e que estejam sobrepostos a um nível de ruído elevado.

Gostou? [Junte-se à comunidade Embarcados](#)

médica, controle e medição eletrônica, áudio, vídeo, entre outros.

Modelos como o **AD8221** da *AD* ou o **INA333** da *TI* possuem *CMR* típico (para o nível I com $G \geq 10$) de 100dB , ou seja, o sinal de modo comum é atenuado pelo menos 100.0 vezes.

Agora que sabemos os fundamentos dos amplificadores *IN/INA*, suas principais características e aplicações, abordaremos de maneira bastante simples as anatomias mais clássicas. Esta abordagem tem caráter didático visando entender o circuito interno, entretanto devemos lembrar que em uma aplicação prática será muito difícil alcançar as mesmas características de um componente padrão.

IN/INA com dois AmpOp's

Este pode ser considerado como o arranjo mais econômico para ser implementado com componentes discretos já que necessita de apenas dois amplificadores operacionais. O circuito básico de exemplo é apresentado na Figura 4.

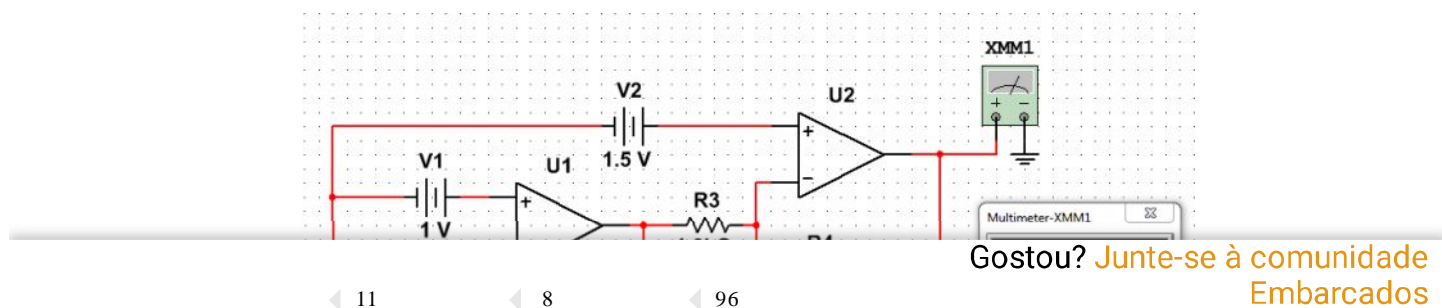




Figura 4 – Amplificador de instrumentação com dois AmpOp's.

Fonte: Próprio autor, arquivo pessoal

Analizando a figura podemos notar que ambas as fontes de sinal são aplicadas às entradas não inversoras dos AmpOp's, desta maneira garantimos uma elevada impedância entrada. Para análise dessas configurações novamente utilizaremos o teorema superposição.

Considerando o exemplo anterior, ao zerar "V1" sabemos que a tensão na saída de "U1" será 0V em um dispositivo ideal, ou muito próximo disso em um dispositivo real. O cálculo tensão de saída em "U2" será baseado na fórmula utilizada para o AmpOp não inversor.

$$v_{out2} = v_2 \times \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \quad (03)$$

Como resultado obteremos "4,5V" na saída para "V2".

O próximo passo é zerar "V2" e analisamos a saída para "V1". Para o AmpOp "U1" tem novamente uma configuração não inversora. A saída desta etapa é aplicada em "U2" através de uma polarização inversora. Cascadeando as etapas obteremos a seguir equação:

Gostou? [Junte-se à comunidade Embarcados](#)

$$v_{out1} = v_1 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times \left(-\frac{R_4}{R_3}\right) \quad (04)$$

Para esta segunda equação obteremos "-3V" na saída. Agora completando a superposição somamos os resultados independentes, alcançando o mesmo resultado de "1,5" apresentado na Figura 4.

Considerando que " $R1 = R4$ " e " $R2 = R3$ ":

$$v_{out} = v_{out1} + v_{out2} \quad (05)$$

$$v_{out} = (V_2 - v_1) \times \left(\frac{R_4}{R_3}\right) \quad (06)$$

Esta configuração possui alguns contras tornando-se menos utilizada. É notável que caminho de " $V1$ " será mais longo que " $V2$ ", gerando certa latência entre os sinais, o q interfere diretamente sobre o *CMR* de sinais alternados de alta frequência.

IN/INA com três AmpOp's

Gostou? [Junte-se à comunidade Embarcados](#)

No início do artigo voltamos ao amplificador diferencial. Podemos enxergá-lo como modelo mais simples de um amplificador de instrumentação, entretanto, tínhamos três pontos críticos:

- A impedância da fonte de sinal influencia no *CMR*;
- A impedância das entradas é dependente dos resistores;
- A impedância das entradas vista pelas fontes não é simétrica.

Felizmente estes três pontos podem ser facilmente melhorados com a utilização de dois *AmpOp*'s adicionais na configuração de *buffer*. Com isso isolamos a fonte do sinal de entrada do amplificador diferencial, garantindo alta impedância de entrada. A baixa impedância de saída do *buffer* afetará pouco o *CMR*, tornando-o primordialmente dependente da precisão dos resistores do *AmpOp* diferencial. Este circuito é apresentado na Figura 5:

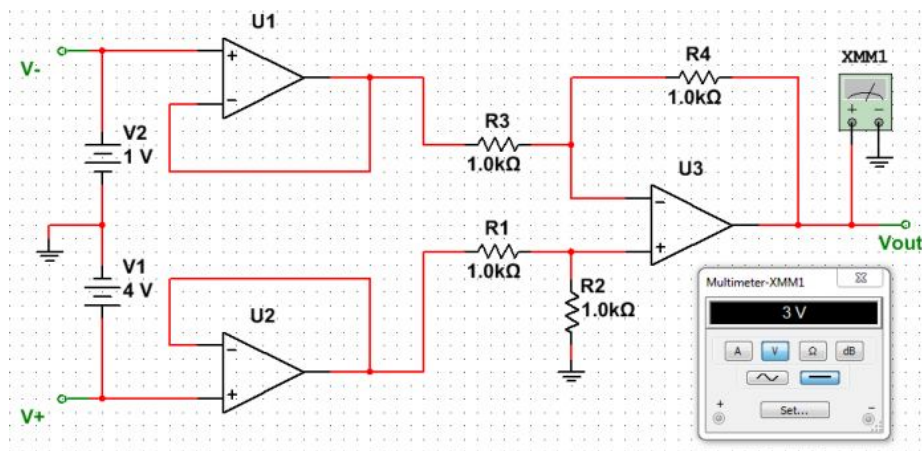


Figura 5 – Amplificador de instrumentação com 3 *AmpOp*'s – Buffers na entrada.

Fonte: Próprio autor, arquivo pessoal

A fórmula para o cálculo de ganho desta configuração será a mesma que estudamos.
Gostou? [Junte-se à comunidade Embarcados](#)

entretanto ainda é possível acrescentar mais funcionalidades a este circuito através alguns resistores.

As boas práticas de projeto nos dizem para evitar ganhos acima de $100\times$ em um único estágio para que o circuito não perca estabilidade ou mesmo *bandwidth*. Neste ponto nos última configuração poderia ser insuficiente para trabalhar com sinais realmente pequenos como um biopotencial de *ECG*.

Ao invés de inserirmos mais uma etapa de ganho na saída, incrementando a complexidade do circuito, da *PCB* e o *BOM* (*build of materials*) do projeto, incrementaremos apenas três resistores adicionais, transformando os *buffers* da entrada em amplificadores não inversores com um ganho diferente do unitário. Esta característica permitirá alcançar elevados ganhos para o *IN/INA*. O circuito padrão é apresentado na Figura 6 a seguir.

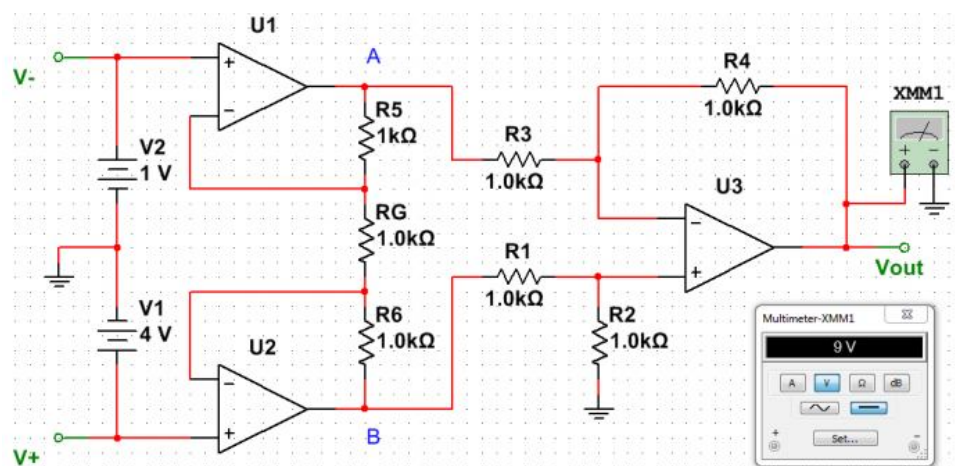


Figura 6 – Amplificador de instrumentação com elevado ganho.

Fonte: Próprio autor, arquivo pessoal

existe fluxo de corrente nas entradas.

Para o exemplo da Figura 6: sabemos que "4V" é aplicado à entrada não inversora de "U2" "1V" é aplicado à entrada não inversora de "U1". Com base na regra de ouro sabemos que mesmas tensões respectivamente são aplicadas às entradas inversoras de cada AmpOp primeira etapa, ou etapa de pré-amplificação. A partir deste conceito podemos calcular corrente circulante através de R_G .

$$i_{RG} = \frac{v_+ - v_-}{R_G} \quad (07)$$

Através da fórmula obtemos i_{RG} igual a "3mA". Novamente recorrendo à regra de ouro, cor não existe fluxo de corrente nas entradas sabemos que a corrente i_{RG} também atravessa resistores R_5 e R_6 , tornando possível calcular as quedas de tensão nestes component para então obter a tensão nos pontos "A" e "B" do circuito. A tensão nestes pontos aplicada então na etapa diferencial formada por "U3".

Tradicionalmente " $R_5 = R_6$ ", tornando possível calcular a tensão na saída diretamer através da seguinte equação:

$$v_{out} = (v_+ - v_-) \times \left(1 + \frac{2R_5}{R_G}\right) \times \left(\frac{R_4}{R_3}\right) \quad (08)$$

resultados e facilitar sua visualização na saída. Entretanto estas aplicações são amplamente utilizadas em sinais AC dos mais diversos tipos.

Para exemplificar uma aplicação do último arranjo apresentado simulou-se o seguinte circuito. Um gerador arbitrário é utilizado para gerar a forma de onda padrão de um ECG também um ruído branco. A forma de onda do ECG é aplicada sobre um divisor resistivo simulando a impedância do corpo e dois resistores adicionais injetam o ruído branco em modo comum. Um amplificador IN/INA com ganho de 462 foi implementado, sendo 21x estágio de pré-amplificação e 22x no estágio diferencial. O circuito simulado apresentando na Figura 7.

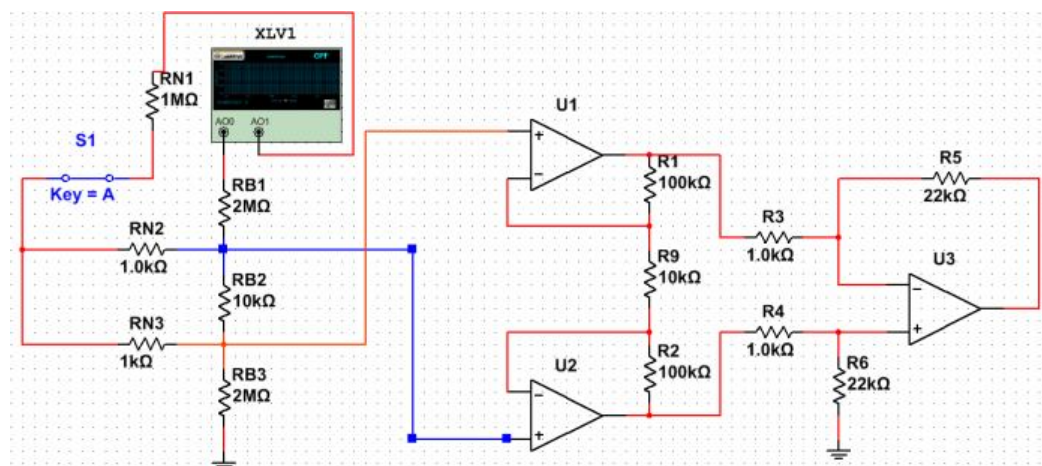


Figura 7 – Simulação de um amplificador INA para um ECG.

Fonte: Próprio autor, arquivo pessoal

A forma de onda pura aplicada na entrada no amplificador IN/INA possui aproximadamente $4,124mV_{pp}$. A saída do amplificador possui aproximadamente $1,909V_{pp}$, condizendo com o ganho calculado. Nas formas de onda resultantes fica evidente a atuação do amplificador de instrumentação sobre sinais de modo comum. Neste caso, o ruído branco simula uma interferência eletromagnética (EMI). Confira o resultado na Figura 8, em vermelho.

Gostou? [Junte-se à comunidade Embarcados](#)

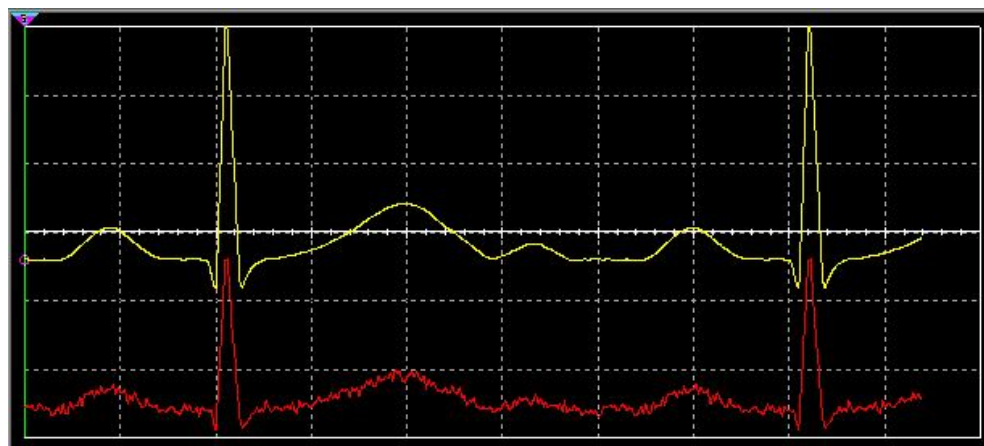


Figura 8 – Forma de onda resultante. Em vermelho entrada do amplificador de instrumentação (biopotencial + ruído), em amarelo a saída do amplificador.

Fonte: Próprio autor, arquivo pessoal

Caros leitores, estamos chegando ao fim de mais um artigo. Nesta terceira parte aglutinamos os conceitos apresentados anteriormente para possibilitar o entendimento um amplificador de instrumentação, suas principais características e topologias mais comuns.

No próximo e último artigo desta pequena saga abordaremos as configurações anteriormente apresentadas dentro da realidade dos nossos embarcados, onde tradicionalmente contamos apenas com fontes de alimentação simples e em muitos casos com limitações com relação ao nível de tensão já que muitos dispositivos podem ser alimentados através de baterias.

Obrigado e até a próxima!

Gostou? [Junte-se à comunidade Embarcados](#)

Referências

- [1] W. Jung. (2005). *Op Amp Applications Handbook*. Available: http://www.analog.cc/library/analogDialogue/archives/39-05/op_amp_applications_handbook.html
- [2] C. Kitchin and L. Counts. (2006). *A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers* (3rd Edition). Available: <http://www.analog.com/en/education/education-library/dh-designer-guide-to-instrumentation-amps.html>



Amplificador de Instrumentação com Amplificador Operacional por *Haroldo Amaral*. Esta obra está sob a licença [Creative Commons Atribuição-Compartilha 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Haroldo Amaral

<http://lattes.cnpq.br/3986982115883346>

Doutorando em Eng. Elétrica pela Poli-USP, mestre em Eng. Elétrica pela UNESP-Bauru e graduado em Tecnologia em Sistemas Biomédicos pela FATEC-Bauru. Um apaixonado por eletrônica que adora passar seu tempo "queimando alguns componentes" e escovando alguns bits. Entre outras paixões estão a música, uma boa reunião com os amigos, papear sobre tecnologia e afins.

in



Gostou? [Junte-se à comunidade Embarcados](#)



LoRa® Network Evaluation Kit

- *Permite um rápido processo Time-to-Market*
- *Possui 2 (duas) chaves de criptografia individuais*

WWW.ARTIMAR.COM.BR/EMBARCADOS/LORA

Gostou? [Junte-se à comunidade Embarcados](#)