



PSI 3214 - LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO ELÉTRICA

TUTORIAL

AMPLIFICAÇÃO DE SINAIS PARA MICROCONTROLADORES

Maurício O. Perez Lisboa e Elisabete Galeazzo, versão 2019.

1. Introdução

A utilização de conversores analógico-digitais (ADCs) unipolares, geralmente existentes em microcontroladores, requer o cuidado de somente sinais positivos serem utilizados nas suas entradas. Por esta razão, sinais provenientes de circuitos amplificadores, ao serem aplicados na entrada dos conversores unipolares, devem ter tensão de offset.

O ADC de entrada unipolar faz a conversão de sinais analógicos entre 0 e V_{CC} (5 V, tipicamente). Para um conversor de 8 bits, por exemplo, o LSB é dado por:

$$LSB = \frac{V_{REF+-0}}{2^8} = \frac{V_{REF+}}{2^8} = \frac{5-0}{256} = 19,531mV$$

O LSB representa o passo (ou o *step*) de tensão da conversão, ou seja, corresponde ao valor quantizado (permitido) que o conversor utiliza. Por outro lado, a tensão de fundo de escala (FS) corresponde ao valor da tensão de referência (V_{REF}) menos o valor de 1 LSB. Para os ADCs de 8 bits com entrada unipolar temos:

$$FS = V_{REF} - 1LSB = V_{REF} \cdot \frac{2^N - 1}{2^N} = 4,98047V$$

Os códigos quantizados em hexadecimal para este conversor de 8 bits estão mostrado na Figura 1.

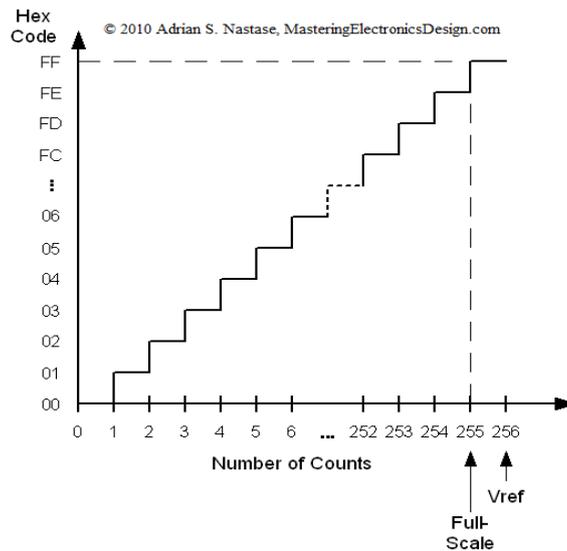


Fig. 1. Códigos binários em função das contagens [1].

Já para um conversor de 10 bits teremos 1024 passos. A Figura 2 ilustra a conversão do sinal de um sensor, que varia de 0 a 5 V, e o efeito da tensão de offset num conversor ADC da ATMEGA.

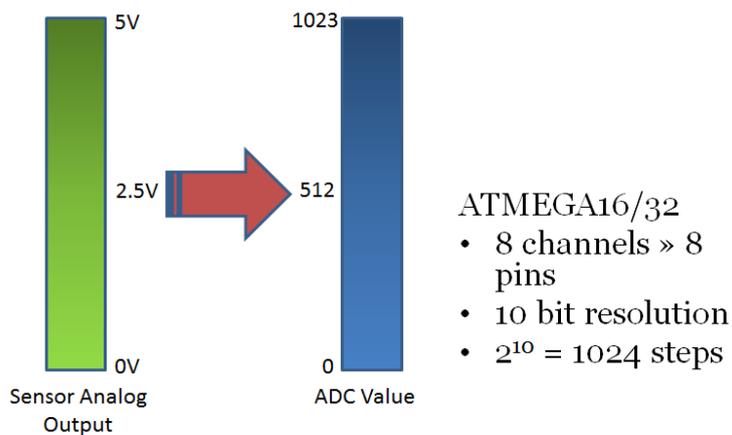


Fig. 2. Tensão de offset e códigos binários num ADC de 10 bits [2].

A Tabela 1 apresenta um resumo das características principais para conversores AD com tensões de referência de 5 V ($V_{REF} = 5,0$ V).

Tabela 1. Características de ADCs com diferentes resoluções.

Resolução	LSB	FS	$V_{in} = 0$, HEX	$V_{in} = F_s$, HEX
8 bits	19,531 mV	4,980469 V	00	FF
10 bits	4,88281 mV	4,995117 V	00	3FF
16 bits	76,2939 μ V	4,999962 V	0000	FFFF

Como indicado na Figura 2, para sinais variáveis no tempo é necessário acrescentar um valor de offset. Isto fará com que a conversão seja realizada em torno desta tensão de offset (no caso ideal em torno de 2,5 V), como mostrado na Figura 3 a seguir.

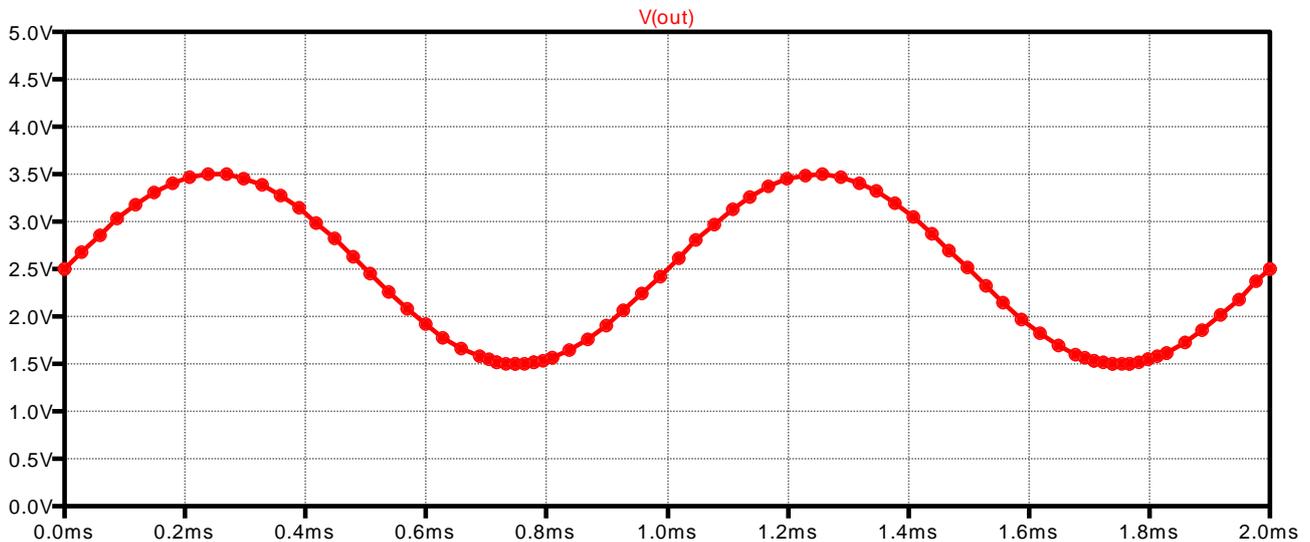


Fig. 3. Efeito da tensão de offset num sinal variável no tempo.

2. Amplificação dos sinais

Existem várias alternativas de circuitos para amplificar um sinal antes de ser aplicado na entrada de um microcontrolador, no entanto a escolha deverá levar em conta diversos fatores como: ganho, frequência de operação, tipo de alimentação e custo. Nestes casos, são utilizados geralmente circuitos com amplificadores operacionais ou com transistores.

Transistores bipolares, JFETs e MOSFETs são utilizados em circuitos com configurações simples ou complexas para amplificação. A Figura 4 mostra uma aplicação de um amplificador com um único estágio com transistor bipolar.

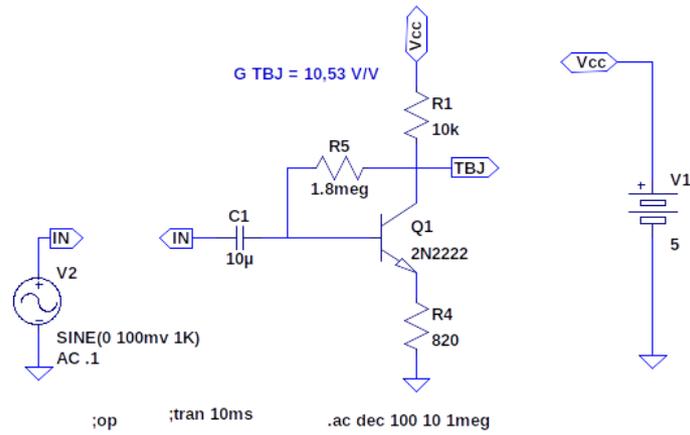


Fig. 4. Circuito amplificador com transistores simples e ganho pequeno.

As Figuras 5 e 6 ilustram as características de ganho, resposta em frequência e comportamento no tempo para este tipo de circuito amplificador.

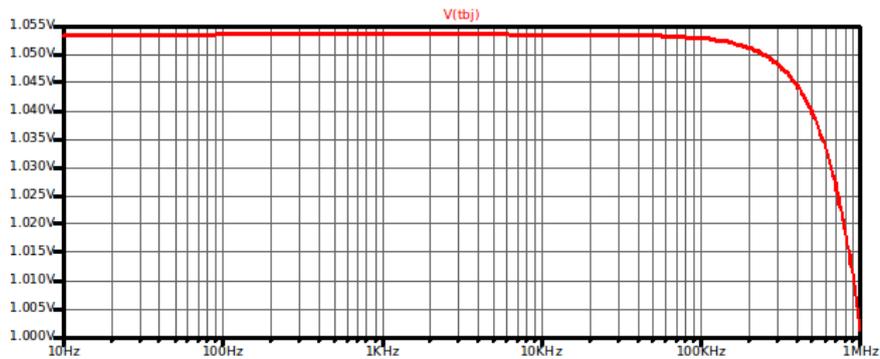


Fig. 5. Ganho e resposta em frequência para o circuito da Figura 4.

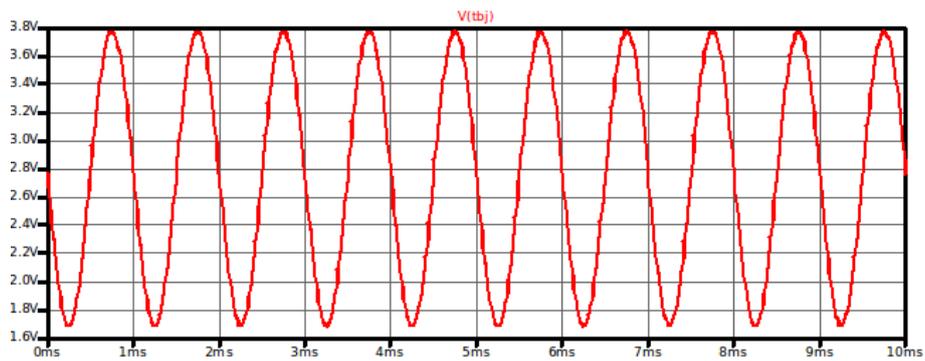


Fig. 6. Resposta do amplificador para um sinal senoidal de entrada de 100mV.

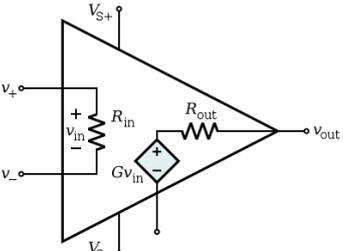
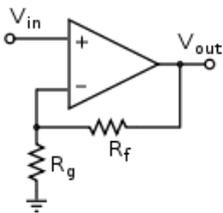
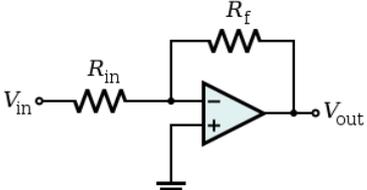
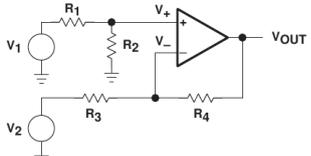
2.1 Amplificadores Operacionais

No caso de serem utilizados circuitos com amplificadores operacionais (AmpOps) para amplificar sinais na entrada de um microcontrolador, preferência deve ser dada a AmpOps que possam operar com uma única tensão de alimentação (+Vcc). A justificativa para isto é a facilidade de polarização, visto que sempre haverá uma fonte de alimentação simples disponível junto com o microcontrolador.

No caso específico do Arduino, como sua tensão de alimentação corresponde a 5 V, é interessante que os amplificadores operacionais possam funcionar se alimentados com 5 V também.

Há várias opções de amplificadores operacionais para isto: a linha 358 da *Texas Instruments* e a linha LT1006 da *Analog Devices* são alguns exemplos, sendo que, entre as possíveis configurações de circuitos amplificadores com AmpOps, as mais comuns são: configuração inversora, não inversora e a diferencial.

A Figura 7 ilustra tais configurações [4, 5, 6, 7 e 8] e suas principais características:

 <p>Fig. 7a) Modelo equivalente de um Amp.Op.</p>	<p>No amplificador ideal:</p> $R_{in} = \infty; R_o = 0 \text{ e } G = \infty$ <p>No amplificador real temos:</p> $R_i = 1 \text{ M}\Omega \text{ a } 100 \text{ M}\Omega;$ $R_o = 10 - 50 \text{ }\Omega \text{ e } G = 100000$
 <p>Fig. 7b) Configuração não inversora.</p>	<p>Resistência entrada, igual a Rin do Operacional real.</p> $\text{Ganho: } Av = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_g}$
 <p>Fig. 7c) Configuração inversora.</p>	<p>Resistência de entrada, igual a Rin do Operacional real.</p> $\text{Ganho: } Av = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_f}{R_{in}}$
 <p>Fig. 7d) Amplificador Diferencial.</p>	<p>Resistência de entrada, $R_1 + R_3$.</p> $\text{Ganho: } Av = \frac{V_{out}}{V_1 - V_2} = \frac{R_4}{R_3},$ <p>para $R_2 = R_4$ e $R_1 = R_3$</p>

As equações de ganho apresentadas nos circuitos das Figuras 7b a 7d são válidas para tensões DC ou para sinais de baixa frequência. Deve-se destacar também que o ganho “G” do amplificador operacional (figura 7a) é muito dependente da frequência. Sua frequência de corte é da ordem de dezenas de Hz.

3. Aplicações com Arduino

Apresentaremos alguns circuitos (amplificadores ou não amplificadores) que podem ser utilizados com o microcontrolador Arduino. A ideia aqui é apresentar alguns exemplos de circuitos para aplicações genéricas com sensores de temperatura resistivos e com a utilização do AmpOp LM358. Para isto, faremos simulações com o LTSpice e utilizaremos uma biblioteca do amplificador operacional LM358 disponibilizada neste simulador de circuitos.

Antes de apresentarmos os circuitos amplificadores com o AmpOp LM358, vamos analisar seus limites de operação: quando o operacional é alimentado com tensão de $V_{cc} = 5\text{ V}$, apresenta, entre suas características, tensão máxima de saída de **3,8 V** e mínima de **180 mV**. Assim, a tensão de offset ideal deve ser de **1,81 V** e não de 2,5 V como teríamos no caso ideal. Os gráficos da Figura 8 ilustram o comportamento deste AmpOp numa configuração inversora e ganho unitário, destacando-se seus limites de operação. Nesta figura, do lado esquerdo temos o esboço do circuito amplificador na configuração inversora e do lado direito, parte inferior, é representada a tensão de saída em função da tensão de entrada. No gráfico superior direito, apresenta-se a variação da saída em função da entrada (dV_{out} / dV_{in}), ou seja, podemos verificar o comportamento do ganho do circuito nesta faixa de operação. Note que abaixo de 200 mV ou acima de 3,8 V o ganho é variável, limitando-se a faixa de operação do LM358 entre estes valores.

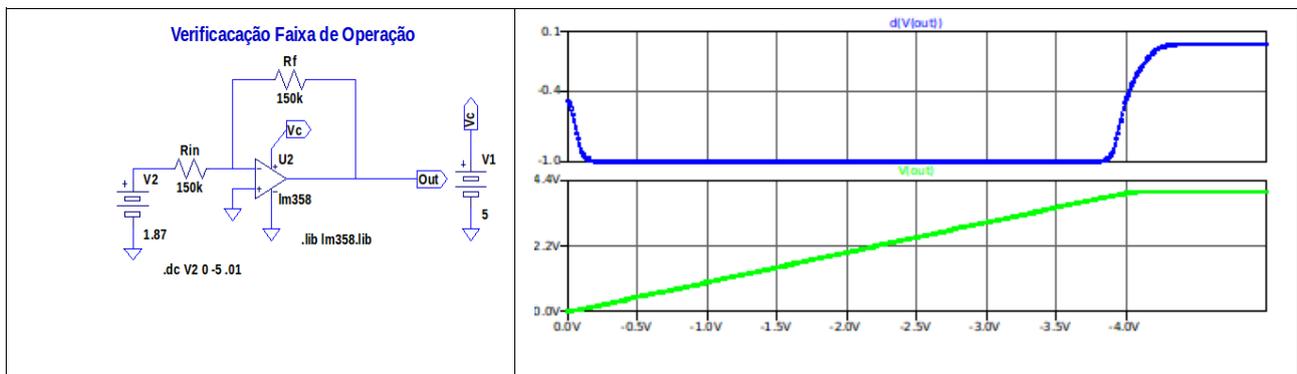


Fig. 8. Limites de operação do LM358.

3.1 Amplificador na Configuração Inversora

Para utilizarmos um circuito amplificador na configuração não inversora com o LM358 para aplicações com o Arduino, devemos incluir neste circuito uma tensão de offset, como já mencionado. Utilizaremos um valor próximo de 1,8 V como justificado no item anterior. Este valor de tensão será fixado na entrada não inversora do AmpOp através da relação dos resistores R1 (33k) e R2 (22k).

As Figuras 9 e 10, a seguir, mostram um exemplo de circuito amplificador inversor, que inclui um offset em torno de 2 V e possui um ganho de 10 V/V. O capacitor (C1) na entrada do circuito efetua o desacoplamento de tensões DC oriundas do circuito anterior a ele. Em relação ao sinal de entrada (V_{in}), o sinal V_{out} está amplificado de dez vezes, com offset de 2,0 V e defasagem de 180° .

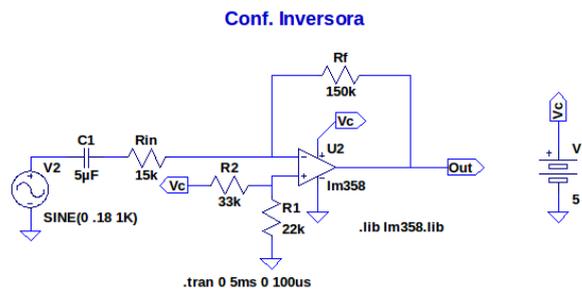


Fig. 9. Esquema elétrico da configuração inversora com offset de 2 V e capacitor de desacoplamento de tensão DC na entrada.

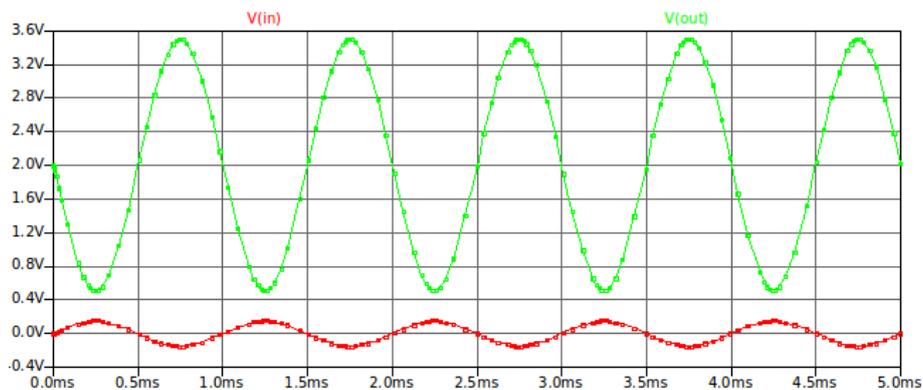


Fig. 10. Resposta das tensões de saída (V_{out}) e de entrada (V_{in}) em função do tempo no circuito com configuração não inversora, nas condições de polarização do circuito da Figura 9.

3.2 Amplificador na Configuração Não Inversora

A configuração não inversora está mostrada no esquema elétrico da Figura 11. Repare que neste caso a tensão de offset é aplicada diretamente na entrada não inversora (+). Nesta configuração há a

necessidade de serem utilizados dois capacitores de desacoplamento (de tensões DC): um para a entrada inversora (C1) e outro para a entrada não inversora (C2).

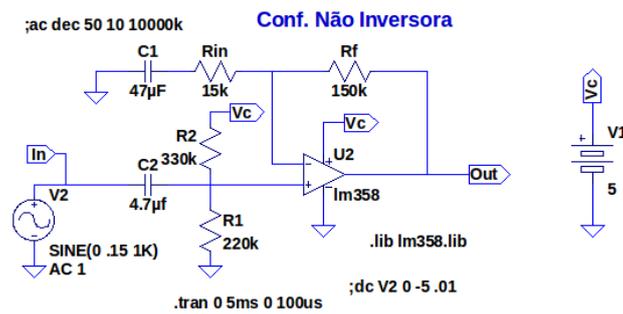


Fig. 11. Esquema elétrico da configuração não inversora.

A resposta elétrica para esta configuração está ilustrada na Figura 12, a seguir:

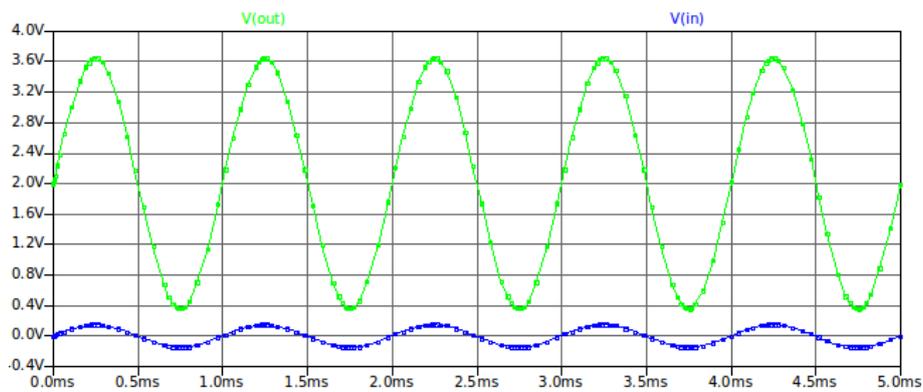


Fig. 12. Resposta do Circuito da configuração não inversora com offset de 2,0 V.

Observe que agora os sinais de entrada e saída estão em fase. Esta é uma das características da configuração não inversora: não há defasagem de sinais entre a entrada e a saída.

3.3 Amplificador para Sensor de Temperatura tipo RTD

Amplificar a resposta de sensores é uma das aplicações da configuração de amplificação diferencial. No exemplo a seguir temos um sensor de temperatura tipo PT100 num circuito ponte. A variação de temperatura provoca uma variação de sua resistência, e esta provocará uma variação da tensão entre os braços da ponte. Tal variação é amplificada pela configuração diferencial.

A Figura 13 mostra o circuito amplificador na configuração diferencial e a resposta que este circuito apresenta para uma variação de temperatura entre 0 e 100°C. Devido a não linearidade do circuito ponte, observa-se uma pequena variação do ganho na faixa de temperatura entre 5 a 90° C, aproximadamente (Fig. 14).

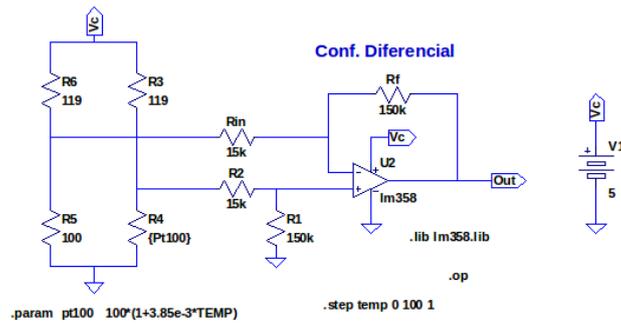


Fig. 13. Esquema elétrico de uma aplicação de um amplificador diferencial.

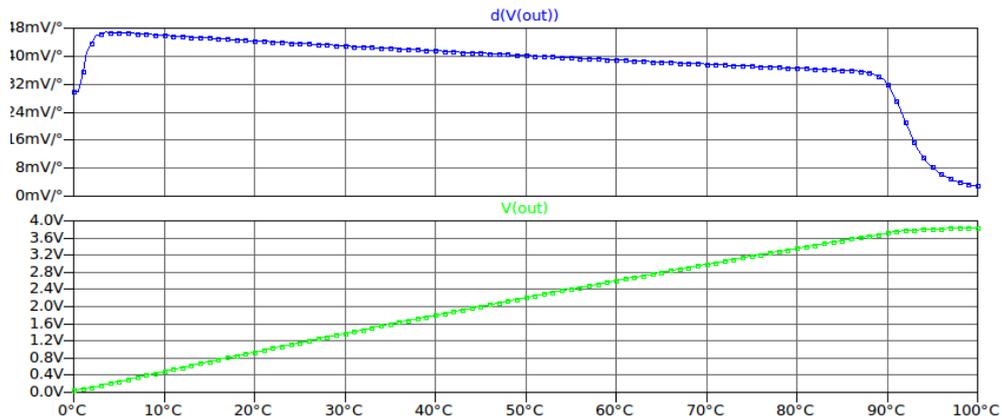


Fig. 14. Amplificação da variação da tensão da ponte com RTD.

3.4) Aplicações com Sensor de temperatura tipo NTC

Um sensor NTC apresenta variação exponencial da sua resistência com a temperatura. Devido a esta característica, muitas vezes é necessário efetuar uma linearização da sua resposta em torno de uma determinada temperatura. Isto é mostrado no circuito da Figura 15, no qual são utilizados resistores para realizar esta linearização.

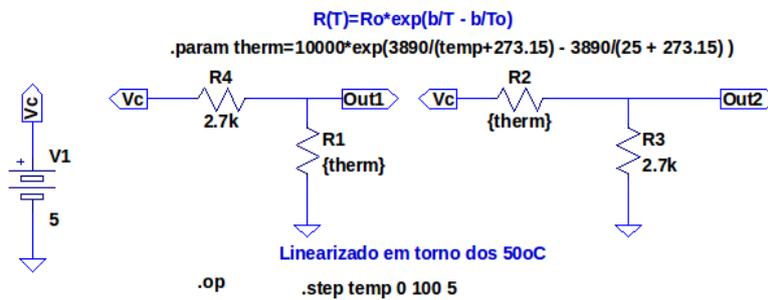


Fig. 15. Circuitos de linearização simples de termistores.

O resultado desta linearização é mostrado na Figura 16. São mostrados nestes gráficos as tensões e as variações das tensões. Note que a saída destes circuitos pode ir diretamente para o Arduino, não havendo a necessidade de amplificação!

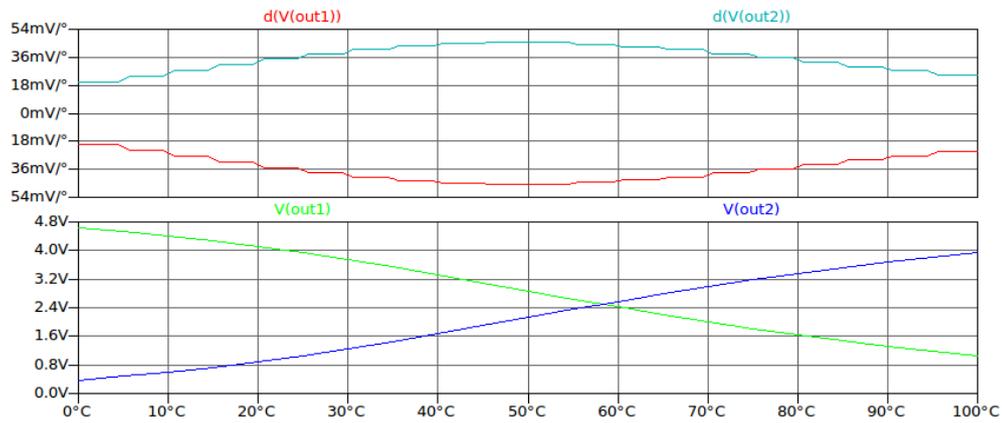


Fig. 16. Resposta dos circuitos NTC utilizando linearização.

Neste circuito, que a variação é máxima em torno dos 50 °C e sua resposta é linear entre 40 e 55 °C. A faixa de temperatura é controlada pelo valor do resistor em série com o NTC.

Bibliografia

- [1] <https://masteringelectronicsdesign.com/an-adc-and-dac-least-significant-bit-lsb/>
- [2] <http://maxembedded.com/2011/06/the-adc-of-the-avr/>
- [3] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1006fa.pdf>
- [4] <http://www.ti.com/lit/an/snoa662b/snoa662b.pdf>
- [5] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00682c.pdf>
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Operational_amplifier
- [7] <http://www.ti.com.cn/cn/lit/an/slaa068b/slaa068b.pdf>
- [8] https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_8.html