

MEDIÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA COM TRANSFORMADORES DE CORRENTE (TC)

TEORIA DE FUNCIONAMENTO

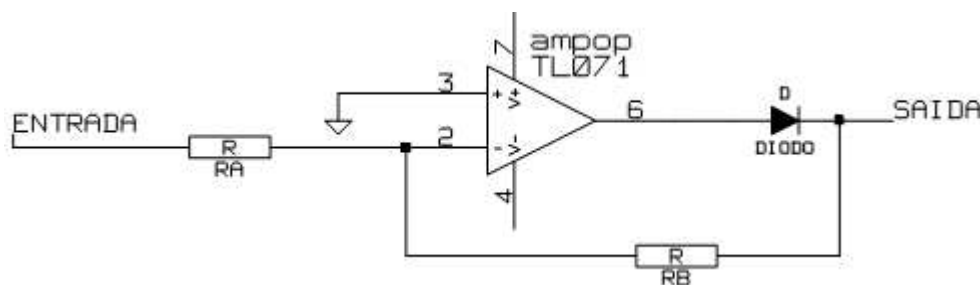
O circuito aqui proposto – retificador e condicionador de tensão – foi desenvolvido com o propósito de tornar mais flexível a utilização dos transformadores de corrente (TC em português ou CT, em inglês). É muito interessante a utilização de TCs, na medição de corrente elétrica, devido ao isolamento proporcionado entre os circuitos de medição e a rede a ser medida. Além disso, quando bem dimensionado, o TC apresenta ótima linearidade e precisão, com um baixo custo.

O padrão de mercado para TCs, durante anos, contempla secundários com corrente de 5 A, o que é útil na medição de correntes elevadas, acima de 100 A, por exemplo. Porém, para medir correntes menores, a utilização de TCs com secundários de correntes menores é mais indicada. Por exemplo, secundários de 1 A, 0,1 A ou menos. Na maioria dos casos – inclusive em TCs com secundário de 5 A, há necessidade de amplificar o sinal fornecido no secundário, o que exige a aplicação de um amplificador operacional, que é o foco deste artigo. Com isto, pode-se em alguns casos, medir correntes a partir 1 mA. O objetivo é condicionar o sinal presente na saída do TC e aplicá-lo a um microcontrolador (neste artigo, optamos pela família PIC, da Microchip, com entrada de sinal entre 0 e 5 Vcc).

Sempre que necessitamos uma grande faixa de medição, onde a tensão deve atingir valores baixos em baixa corrente, e devemos converter o sinal AC para DC – com o objetivo de aplicar a um circuito de leitura – vamos nos deparar com o seguinte problema: a barreira de potencial dos diodos. Um diodo de silício, quando polarizado diretamente, não conduz até que se atinja aproximadamente 0,7V. No instante inicial, essa condução é altamente não-linear devendo, portanto, ser evitada. Isto limita sua utilização direta em retificadores de baixíssima tensão.

Um dos procedimentos possíveis para se eliminar este inconveniente se baseia em fazer circular uma corrente contínua no diodo, polarizando-o diretamente. Mas, há o inconveniente de não ser muito prático, e muitas vezes não garante uma boa precisão em faixas amplas de medição.

A maneira mais eficaz de retificar baixas tensões consiste em inserir os diodos em um circuito amplificador, tornando-o “classe B assimétrico”, ou seja, fazendo-o amplificar apenas meio ciclo do sinal. Isto é realizável por meio de amplificadores operacionais.

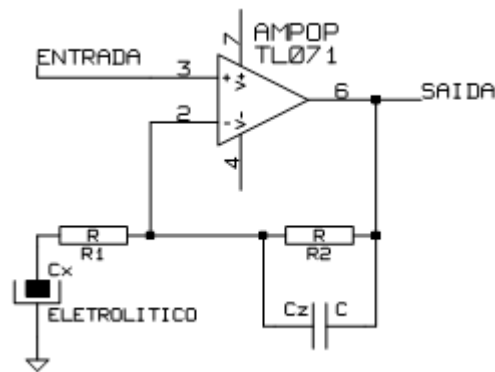


A figura acima ilustra um típico circuito retificador de meia onda com operacional. O diodo é posto entre a saída e a realimentação, o que faz com que a saída atue apenas nos semiciclos positivos. No semiciclo negativo, o diodo entra em corte, não desenvolvendo tensão na saída. O elo de realimentação faz com que a saída do operacional “polarize” dinamicamente o diodo, eliminando as inconveniências da barreira de potencial.

Se for requerida tensão contínua, deve-se filtrar a tensão pulsante de saída com, por exemplo, um circuito RC de constante de tempo de, pelo menos, 10 vezes o período da corrente alternada filtrada (período=1/freqüência).

No entanto, existem limitações práticas. As tensões muito baixas (poucos milivolts) devem ser evitadas, pois perde-se linearidade devido a fatores como: tensão de off-set do operacional, corrente de fuga do diodo, etc. E devemos evitar dar ganho de tensão a esta etapa, para manter o máximo de linearidade. Ou seja, a tensão de pico de saída deve ser igual à tensão crista de meia onda de entrada. Isto é cumprido fazendo $RA=RB$.

Para resolver esta questão, basta amplificar o sinal de entrada, para entregá-lo ao retificador em um nível adequado.



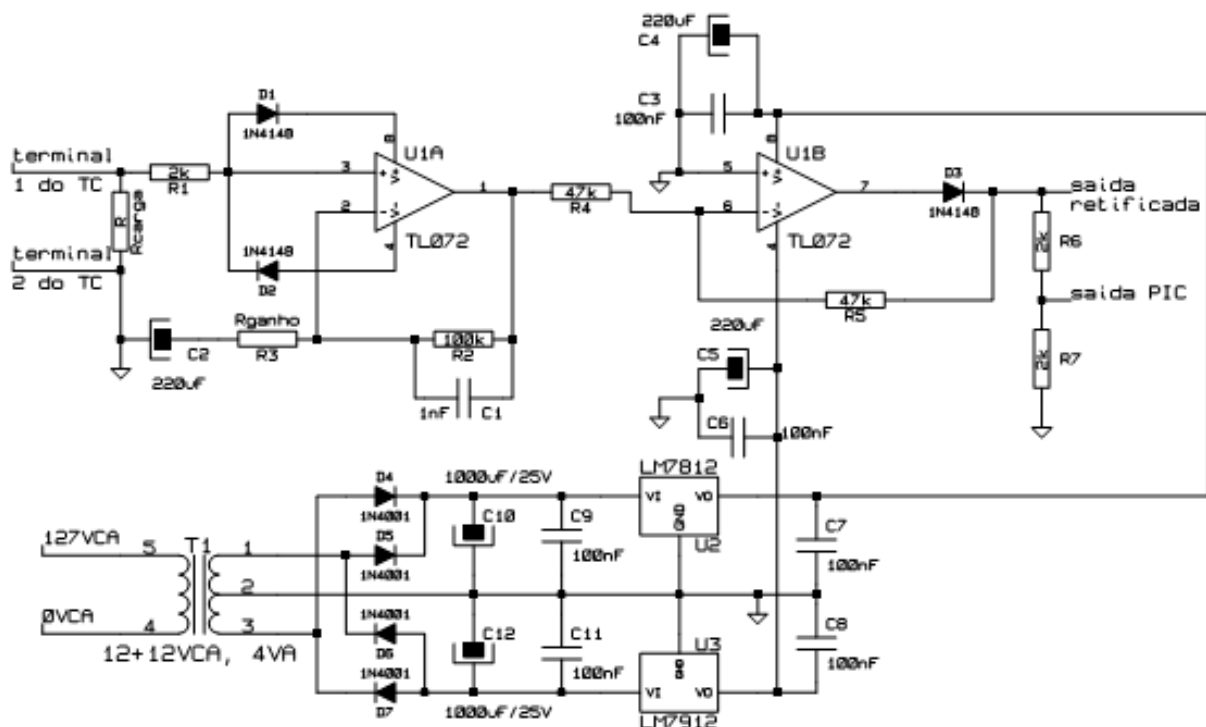
Este é um típico amplificador de tensão não-inversor com operacional. O ganho de tensão é definível por $(R2/R1)+1$, devendo ser evitado o uso de resistores de valor excessivamente elevado, para manter imunidade ao ruído. Valores abaixo de 200K são preferíveis. Por exemplo, com $R2=100K$ e $R1=10K$, teremos um ganho de 11 vezes. Tendo 100mV de pico no TC, encontraremos 1,1V na entrada do retificador.

Deve-se evitar a tentação de remover o capacitor Cx , ligando o elo de realimentação direto a massa, pois sem este capacitor ocorre um efeito colateral: quanto maior o ganho, maior o offset da saída, afetando a precisão do retificador.

O capacitor Cz tem como função reduzir o ganho do circuito em frequências altas, tendo como resultado maior estabilidade e maior imunidade a ruídos.

Para maior simplicidade e confiabilidade do circuito, não se recomenda ganhos muito elevados (mais de 100 vezes, ou 40dB).

O CIRCUITO



Este é o circuito completo do retificador de precisão, com a etapa de ganho precedendo a etapa retificadora. Foi desenvolvido para as aplicações mais comuns de TC. Basta determinar o ganho conforme a aplicação.

Utiliza-se de um único operacional duplo, como TL072, NE5532, JRC4558, uPC4570, AD712, NJM2068, etc. Recomenda-se a escolha de tipos com alta impedância de entrada (entrada JFET, como o

TL072), e com a menor tensão de offset possível (como o AD712). No nosso protótipo, foi utilizado com sucesso o TL072, que é fácil de encontrar no mercado, e é barato. Com este operacional, temos uma saída linear a partir de 20mV de pico, na prática.

Notar que o R1, em conjunto com D1 e D2, grampeia a tensão de entrada do operacional para que a tensão do pino de entrada não ultrapasse a tensão de alimentação, mais a barreira do diodo. É recomendável manter estes componentes.

A tensão de alimentação não é crítica, por se tratar de um circuito de baixo consumo (poucos mA). Não se requer transformador grande, nem se necessita de dissipador nos reguladores. O trafo deve entregar uma tensão 4VCC superior à da saída do regulador, para segurança. No protótipo foi utilizado um trafo de 12+12VCA, 3,7VA, apenas. É imperativo que a fonte seja simétrica, para uma maior praticidade.

Pode-se colocar um LED para indicar que o circuito se encontra energizado.

A tensão de saída só excursiona para valores positivos, e há uma queda de tensão natural dos elementos do circuito. Por exemplo, com uma tensão de alimentação de +/-12VCC, temos uma saída máxima de +10V de pico, logo antes de saturar o operacional. Se for ligar esta saída à entrada de um conversor A/D, que só suporta +5V, basta conectar ao ponto do esquema que diz "SAÍDA PIC", onde há um divisor de tensão conveniente. Este divisor também exerce carga ao diodo, e não deve ser removido.

Então, para maior aproveitamento da escala, deve-se calcular o ganho do circuito para que entregue +10V, com a corrente máxima, que desenvolve a tensão X no secundário do TC, com a devida carga (Rcarga, no esquema, ou *shunt*). Partindo de 20mV, temos uma variação possível de $10/0,02=500$ vezes. Numa escala até 100A (10V), o mínimo a ser medido é 200mA (20mV).

Notar que a saída do retificador não possui, obviamente, impedância de saída tão baixa quanto de um amplificador de tensão normal, sendo que se a distância entre este circuito e o circuito de leitura for muito grande (acima de 1 metro, ou de 5 metros com cabo blindado), faz-se necessário construir um circuito reforçador (*buffer*), que consiste num amplificador de tensão normal, com ganho 1, após o retificador.

Para um melhor desempenho, recomenda-se blindar o circuito. Basta uma chapa por baixo da placa dos componentes ligada ao terra (0V) do circuito.

Todos os resistores são de 1/8W, e podem ser de metal-filme de 1% de tolerância, para uma maior precisão.

Todos os capacitores não-polarizados de desacoplamento podem ser disco cerâmicos, para 25V ou mais. Eles devem ser postos o mas próximo possível dos terminais dos CI's, e não devem ser omitidos.

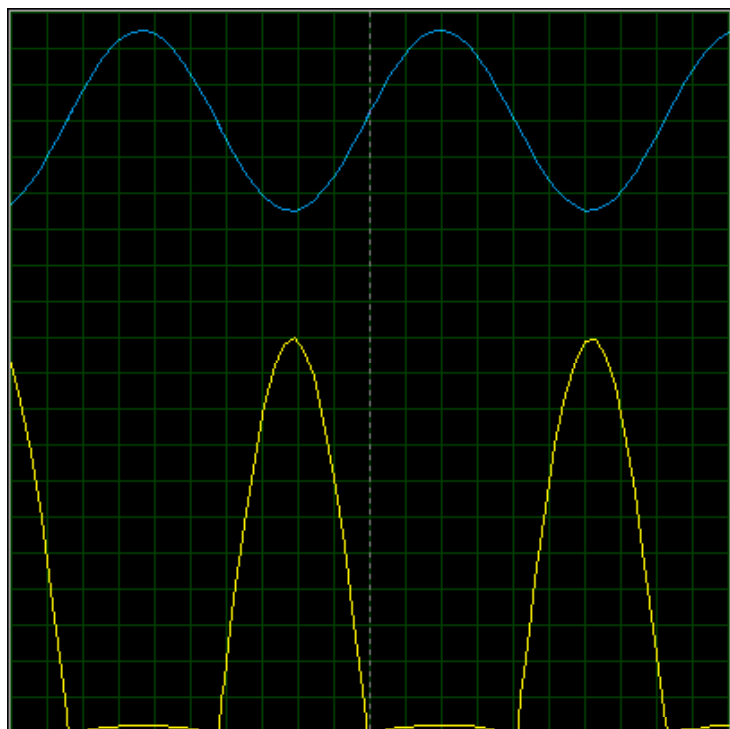
Os capacitores eletrolíticos, se não descrito no diagrama, são de 16V.

Com medições que envolvam muito baixas tensões no secundário do TC, recomenda-se não afastá-lo mais que uns 20cm do circuito, para evitar a captação de interferências, as quais levam a uma medição irreal.

Abaixo segue uma figura com uma típica forma de onda que deve ser encontrada na saída (amarelo), junto a uma forma de onda de entrada (azul).

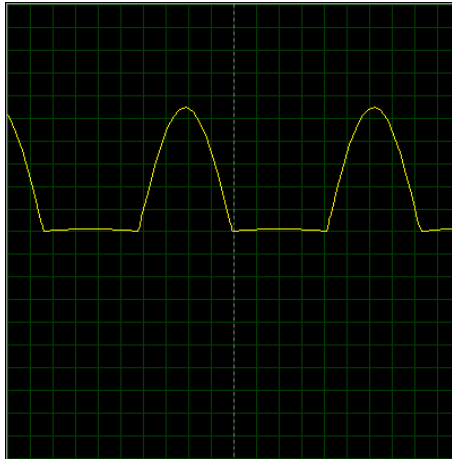
O canal amarelo encontra-se
Ajustado em 50mV/divisão, então
temos 550mV de pico.

O canal azul está ajustado em
20mV/divisão, então tem-se 50mV
de pico, ou 100mV pico-a-pico,
ou ainda aproximadamente
35,35mVRMS na saída do TC.



Isto confirma as expectativas, pois 11 vezes 50 é 550. Considera-se o pico de meia onda da senóide.

Notar que as entradas verticais estão deslocadas do eixo de zero, para facilitar a comparação. Se centrarmos o eixo da entrada amarela, que está monitorando a saída do retificador, encontraremos a seguinte forma de onda (escala de 100mV/divisão):



Veja que isto confirma que o sinal somente excursiona para valores positivos.

O circuito em teste foi projetado com ganho 11, com os resistores de ganho $R_2=100k$, e $R_3(R_{ganho})=10K$, igual ao exemplo dado na explicação sobre a etapa amplificadora.

CÁLCULOS

Devemos traduzir a tensão RMS do TC para tensão de pico (multiplicar por raiz quadrada de 2, ou 1,414), para realizar os cálculos da faixa de operação.

Exemplo: vamos supor que um TC está, com estes valores das medições, monitorando uma corrente de 3,5A. Com um amplificador de ganho 11, temos um limite de tensão de entrada de $10/11=0,909V$ de pico (são os 10 volts de pico divididos pelo ganho do amplificador, pois ao aplicarmos 0,909V de pico em um amplificador de ganho 11, vamos obter 11 vezes os 909mV, ou seja, 10Volts de pico). 900mV de pico corresponde a 643mVRMS ($0,909/1,414$), que é 18,18 vezes superior em amplitude em relação a 35,35mVRMS ($643/35,35$). Se era medido 3,5A, então no limite de escala teremos 63,6A.

Para determinar o valor mínimo a ser medido, consideramos que o retificador necessite dos 20mV de pico (14,14mVRMS) como mínimo para operar linearmente. Com ganho 11, isto corresponde a um sinal de saída do TC de $14,14/11=1,28mVRMS$. Este sinal é aproximadamente 28 vezes menor que os 35,35mVRMS, então pode-se medir uma corrente de 125mA. Isto dá uma faixa de leitura de 500 vezes, em aproximação.

Esta é a faixa encontrada na prática com este circuito. Do princípio, é mais fácil estimar. Se o fim da escale é 50A, teremos $50/500=0,1A$ de corrente mínima a ser medida. Se o TC entrega 2,12VRMS com 50A, temos que ajustar o ganho em $10/(1,414*2,12)=10/3=3,33$ de ganho.

Se obtém este ganho com, por exemplo, $R_2=100k$ e $R_3(R_{ganho})=43k$ ($100/43=2,33+1=3,33$, aproximadamente).

TRANSFORMADORES DE CORRENTE

A Toroid do Brasil projeta e fabrica TCs segundo a necessidade de cada cliente. Isto permite uma otimização do produto, pois possibilita aliar tamanho reduzido a custo menor, com melhor desempenho.

CONCLUSÃO

Com um bom circuito amplificador-retificador, podemos condicionar as tensões de saída de um TC conforme o circuito medidor, evitando saturações no núcleo e possibilitando utilizar TCs menores e mais baratos, inclusive otimizando a faixa mais linear possível de medida.

Outubro de 2007.

Alexandre Torchelsen Feldens

Paulo Koerbel Torres