

Trabalho Final

Apresentação

A Figura 1 representa uma montagem experimental feita no Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes¹ do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília. Seus principais constituintes são um motor de indução trifásico (MIT) e uma máquina de corrente contínua (MCC), os quais têm seus eixos acoplados de modo que o MIT atua como motor elétrico e a MCC como carga mecânica para o mesmo.

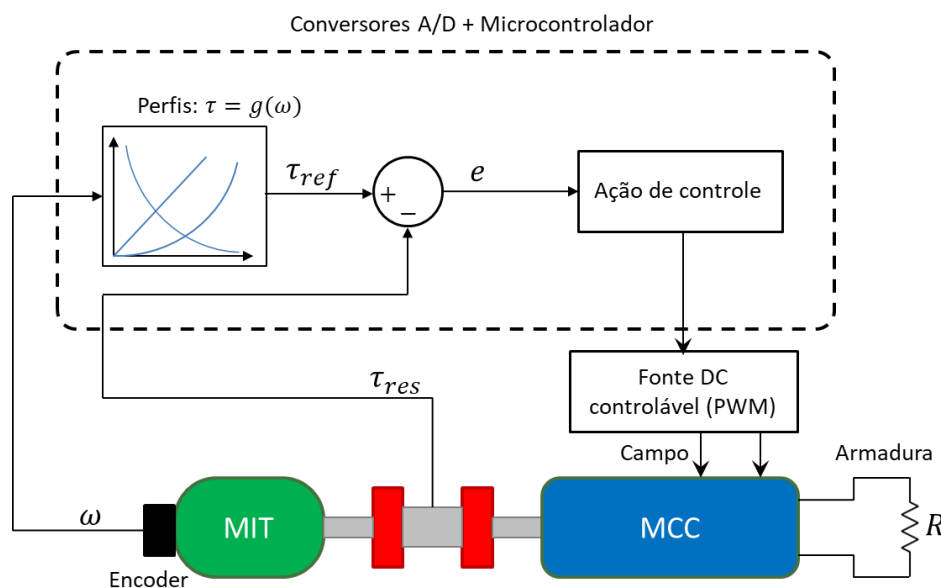


Figura 1 – Aparato experimental.

Uma carga resistiva é ligada ao circuito de armadura da MCC, assim, ao ser acionada pelo MIT, ela se comportará como um gerador de corrente contínua que alimentará essa carga. A corrente consumida no circuito de armadura leva à produção de um torque² resistente (τ_{res}) no eixo central, o que faz com que, do ponto de vista do MIT, o conjunto MCC/Resistor funcione como carga mecânica a solicitar uma potência dada por $P_{mec} = \tau_{res}\omega = v_a i_a / \eta_{MCC}$, onde ω é a velocidade angular no eixo, $v_a i_a$ é a potência elétrica consumida pelo resistor e η_{MCC} é o rendimento do gerador. O MIT supre essa potência aplicando um torque motor τ_{mot} ao eixo à velocidade ω .

Para que a MCC atue como gerador, é preciso que um campo magnético se estabeleça no entreferro de modo que uma força eletromotriz (FEM) possa ser induzida na armadura. Esse campo é produzido pelo circuito de campo do estator, o qual, na

¹ Antigo Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica.

² Em se tratando de máquinas elétricas, tradicionalmente, no Brasil, se usa o termo conjugado em vez de torque.

montagem da Figura 1, é alimentado de forma independente³ da armadura. Desse modo, a corrente que circula por esse circuito (i_f) produz o fluxo magnético responsável pela geração da FEM induzida na armadura.

A Figura 2 ilustra o modelo para os circuitos de campo (esq.) e de armadura (dir.) da máquina CC, dados como circuitos RL. As equações que regem o funcionamento do gerador são dadas pelas Eq. (1) e (2).

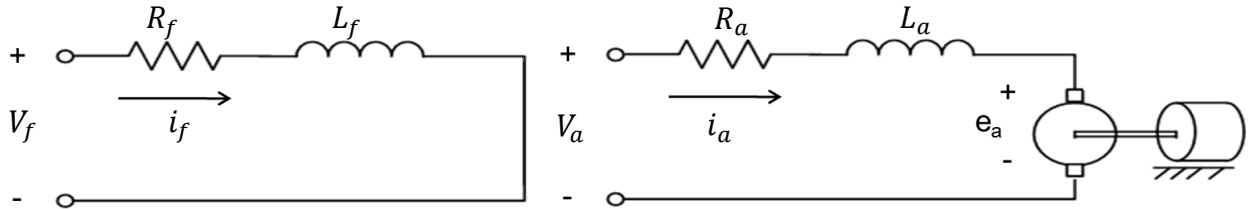


Figura 2 – Circuitos de campo e armadura

$$\tau_{res}(t) = K i_f(t) i_a(t) \quad (1),$$

$$e_a = K i_f(t) \omega(t) \quad (2).$$

Nas Eqs. (1) e (2), K é uma constante que depende de aspectos construtivos da MCC. Sendo R a resistência da carga resistiva, a relação entre a tensão na armadura e sua corrente é dada simplesmente pela Eq. (3).

$$i_a(t) = \frac{V_a(t)}{R} \quad (3).$$

O propósito desse aparato consiste em usar a MCC para emular perfis de carga no eixo do MIT. Tais perfis são funções do tipo $\tau_{res} = g(\omega)$, ou seja, elas determinam como o torque resistente aplicado ao eixo do MIT depende da velocidade. Convém notar que os perfis normalmente são definidos para valores em regime permanente, de modo que o ideal seria adotar a definição $\tau_{res}(\infty) = g(\omega(\infty))$. Para perfis de carga comuns na indústria, g pode ser uma função linear, quadrática ou exponencial. Portanto, o objetivo da montagem consiste em controlar a corrente de campo da MCC de modo que a relação entre τ_{res} e ω seja dada por uma função g especificada⁴. Como mostra a Figura 1, esse objetivo pode ser alcançado medindo-se τ_{res} e ω , que então são realimentadas para um controlador, o qual gera um sinal de controle para a fonte de tensão controlada que alimenta o circuito de campo da MCC, de modo a produzir o perfil desejado.

Do ponto de vista da instrumentação e acionamento, a plataforma experimental requer, entre outras coisas:

- medidores de tensão para os circuitos de campo e armadura (medição de V_a e V_f);
- medidores de corrente para os mesmos circuitos (medição de i_a e i_f);

³ Essa é a chamada ligação independente da MCC. É possível usar a própria tensão da armadura para alimentar o circuito de campo, como nas ligações série e paralelo, desde que haja uma magnetização residual mínima do material ferromagnético do rotor e estator.

⁴ Em regime permanente e com i_f constante, a MCC tem perfil de carga linear, ou seja, $\tau_{res} = a\omega + b$, onde a e b são constantes.

- medidor de torque;
- medidor de velocidade angular ω ;
- controle da corrente de campo i_f por meio da variação da tensão de campo V_f .

Sua tarefa neste trabalho final se resume a projetar parte dos circuitos de instrumentação necessários – dentre os descritos acima – para que a plataforma experimental cumpra seu propósito. Nos tópicos seguintes são apresentados em detalhes os elementos a serem projetados e os requisitos a serem cumpridos.

1. Medição de Tensão

1.1 Sistema de medição

Seu grupo deverá projetar apenas o medidor necessário para a medição da tensão de armadura V_a . A medição dessa grandeza não é essencial para o propósito da plataforma, uma vez que o torque deverá ser medido, entretanto, por questões de segurança, é importante o seu monitoramento durante a execução dos experimentos. Para tanto, deverá ser adotado o transdutor de tensão de efeito Hall LV 25-P da fabricante LEM, mostrado na Figura 3, bem como a montagem básica necessária para a sua utilização.

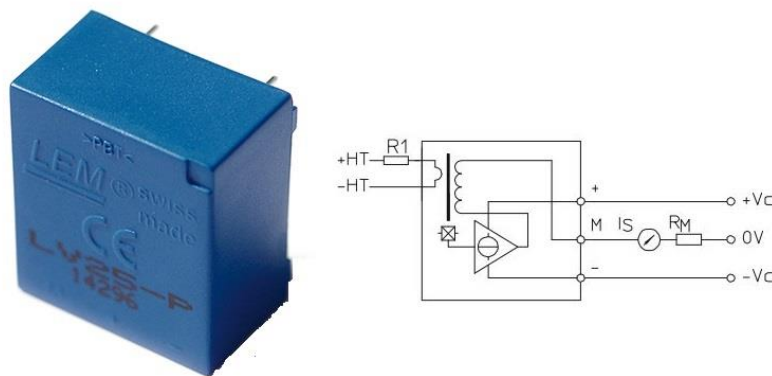


Figura 3 – Transdutor LV 25-P.

Esse transdutor gera um sinal de corrente I_s na saída, o que é conveniente, pois, como foi visto na disciplina, a transmissão de sinais na forma de corrente é mais robusta contra tensões de interferência no modo série. Esse tipo de interferência é bastante comum nas proximidades de máquinas elétricas AC, como o MIT. Portanto, da saída do transdutor, o sinal de corrente deverá ser transportado por um dos fios de um par trançado (o segundo é o fio corresponde ao 'terra' ou GND) até uma placa de condicionamento de sinais, a qual consistirá num conversor corrente-tensão, seguido de um amplificador diferencial. A saída do amplificador será conectada a um conversor analógico digital (ADC – *Analog to digital converter*), cuja leitura será transmitida a um microcontrolador responsável pelo controle. A Figura 4 ilustra essa montagem.

1.2 Requisitos

Nessa etapa, seu grupo deverá projetar:

- a) o circuito necessário para a utilização do transdutor LV 25-P, tendo em vista as características do circuito da armadura da MCC dados no fim deste roteiro. Seu

projeto deverá prever uma folga de 10% em relação aos dados nominais da MCC. Isto é, o limite máximo de tensão a ser medido deverá ser 10% maior que a tensão nominal de armadura do gerador. Deve-se observar que, como a tensão de armadura é DC, o sinal de saída do transdutor será sempre positivo (se o terminal positivo da armadura for ligado ao terminal HT+ do LV 25-P).

- b) o circuito de conversão de corrente-tensão usando o amplificador operacional OPA27 (ou outro semelhante) tendo em vista a saída do transdutor e os requisitos do conjunto amplificador diferencial/ADC dados na seção 4, “Conversor A/D”.



Figura 4 – Montagem para a medição de tensão.

Para a execução do item “a” deverão ser usados os *datasheets* e catálogos fornecidos pelo professor. Os componentes deverão ser escolhidos entre valores disponíveis no mercado. Mais detalhes podem ser encontrados na seção 5, “Componentes eletrônicos”.

Portanto, deverão ser apresentados no relatório:

- os esquemáticos dos circuitos (poderão ser feitos à mão);
- os cálculos de especificação dos componentes;
- os valores escolhidos para os componentes a partir da disponibilidade dos mesmos no mercado.
- o novo cálculo das relações entre entrada e saída dos circuitos uma vez que os componentes escolhidos não possuem valores idênticos aos projetados.

2. Medição de Corrente

2.1 Sistema de medição

Deverá ser projetado o circuito para a medição da corrente de campo i_f . A medição dessa variável é importante não só para o monitoramento, mas também para sua utilização em uma malha interna de controle (não mostrada na Figura 1). Para tanto, deverá ser adotado o transdutor de corrente de efeito Hall LAH 25-NP da fabricante LEM, mostrado na Figura 5.

O condicionamento de sinais para a medição de corrente será idêntico ao do circuito de medição de tensão, a menos da magnitude do sinal de saída do transdutor. Assim, o sinal de corrente I_s do transdutor será transportado por um par trançado até um conversor corrente-tensão, o qual será ligado ao conjunto amplificador/ADC.

2.2 Requisitos

Nessa etapa, seu grupo deverá projetar:

-

Para a execução do item “a” deverão ser usados os *datasheets* e catálogos fornecidos pelo professor. Os componentes deverão ser escolhidos entre valores disponíveis no mercado. Mais detalhes podem ser encontrados na seção 5, “*Componentes eletrônicos*”.

- a) os esquemáticos dos circuitos (podem ser feitos à mão);
- b) os cálculos de especificação dos componentes;
- c) os valores escolhidos para os componentes a partir da disponibilidade dos mesmos no mercado.
- d) o novo cálculo das relações entre entrada e saída dos circuitos uma vez que os componentes escolhidos não possuem valores idênticos aos projetados.

3.1 Sistema de medição

$$\tau_{mot} - \tau_{res} = J_{eixo} \frac{d\omega}{dt} \quad (4).$$

Se J_{eixo} é desprezível em relação aos momentos de inércia do MIT e da MCC, tem-se $\tau_{mot} - \tau_{res} \approx 0$, ou seja, $\tau_{mot} \approx \tau_{res}$. A Figura 6 ilustra o método empregado para a medição do torque.

Ao eixo central é conectado um par de *strain-gauges* que sofrem tensão e compressão devido à torção sofrida pelo eixo, a qual é causada pela aplicação do torque τ . Na prática, outro par de *strain-gauges* é conectado do lado esquerdo do eixo, formando uma topologia em “X”. Os quatro extensômetros são conectados como braços de uma ponte de deflexão.

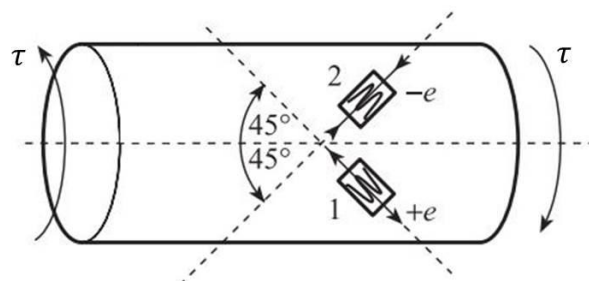


Figura 6 – Método para a medição de torque.

Para a medição da deformação do eixo e, conseqüentemente, do torque aplicado, deverá ser adotada a ponte completa de quatro elementos CEA-06-250US-350 da fabricante *Micro-Measurements-VPG*, voltada para a medição de torque. A Figura 7 mostra esse componente em detalhes, observe que os quatro extensômetros já estão montados na ponte de deflexão, bastando fazer as conexões externas nos terminais.

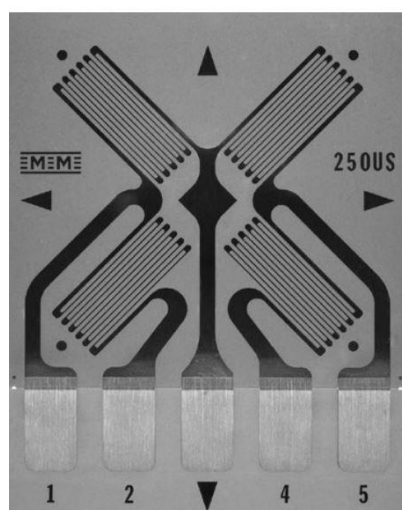


Figura 7 – Ponte completa de quatro elementos CEA-06-250US-350.

A Tabela 1 mostra os dados do eixo central a serem considerados no projeto. A relação entre a deformação experimentada pelas *strain-gauges* e o torque pode ser vista na seção 8.6 do capítulo 8 do livro-texto do Bentley (equação 8.63).

Tabela 1 – Parâmetros do eixo central usado na medição do torque.

Diâmetro	Módulo de torção S
100 mm	26 GPa

O circuito da ponte deverá ser alimentado por uma fonte de tensão AC com frequência de 1kHz. Essa tensão deverá ser gerada por um circuito oscilador com ponte de Wien

com amplitude ajustável por potenciômetro. A utilização de um sinal AC atende a dois propósitos básicos: primeiro, eliminar tensões de offset no circuito de amplificação e quaisquer outras tensões de interferência de baixa frequência; segundo, facilitar a transmissão sem fio do sinal por amplitude modulada. Como o eixo central deve girar, o sinal medido deve ser transmitido sem qualquer fio, o que será feito por um par transmissor-receptor que operam a 433 MHz. A Figura 8 ilustra o funcionamento do sistema.

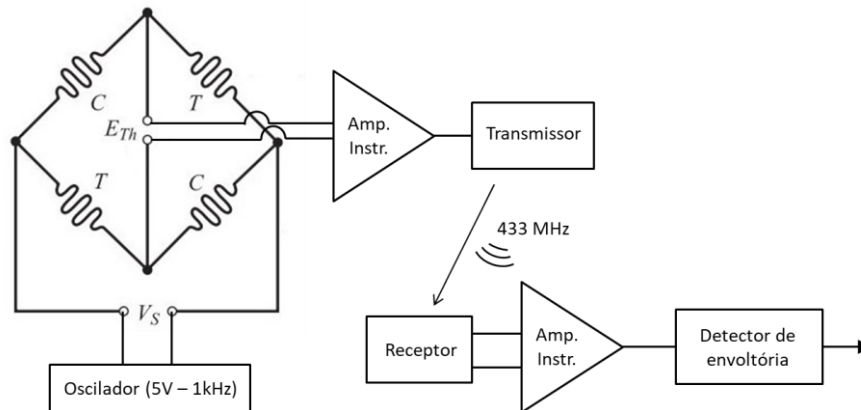


Figura 8 – Sistema de medição e transmissão do sinal de torque.

A saída da ponte deverá ser amplificada de modo a atingir um máximo de 5V de tensão (valor de pico da senoide). Esse sinal será convertido num sinal de amplitude modulada – centrada em 433 MHz – pelo circuito transmissor – o qual emitirá o sinal por meio de uma antena. O circuito receptor captará o sinal, gerando uma senoide com 20 mV de pico de tensão e frequência de 1kHz. Esse sinal deverá ser amplificado e passar num detector de envoltória, capaz de produzir um sinal aproximadamente DC proporcional ao torque medido. A saída do detector de envoltória deverá ser compatível com o conjunto amplificador/ADC, tal como na medição de tensão e corrente. Não é preciso usar um demodulador sensível à fase, porquanto o sinal de medição do torque terá sempre valor positivo, uma vez que o MIT deverá girar num único sentido.

As características específicas das *strain-gauges* podem ser encontradas nos manuais e *datasheets* fornecidos pelo professor. Esse método de medição é exemplificado por alguns fabricantes, podendo ser vistos nos vídeos abaixo:

- Vídeo 1:
https://www.youtube.com/watch?v=y-dDurbXv_o
- Vídeo 2:
<https://www.youtube.com/watch?v=7IJ-pMNbi6g>
- Vídeo 3:
Parte 1: <https://www.youtube.com/watch?v=a9zBQbnW3g8>
Parte 2: <https://www.youtube.com/watch?v=OMbQNznIkVY>
Parte 3: <https://www.youtube.com/watch?v=JzUi9xyhHbc>

3.2 Requisitos

Nessa etapa seu grupo deverá projetar:

- a) o circuito de oscilação com ponte de Wien para alimentar a ponte com amplitude ajustável.
- b) o circuito de amplificação do sinal de saída da ponte a ser conectado ao transmissor. Assuma que a amplitude do circuito oscilador é ajustada em 5V de pico. O amplificador de instrumentação INA115 (ou outro similar) poderá ser adotado. Se necessário, pode-se adicionar outro estágio de amplificação (por exemplo, o amplificador inversor ou não-inversor). Para o projeto, deve-se considerar o torque máximo produzido pelo MIT, adotando-se uma folga de 10%. Logo, se o torque máximo acrescido de 10% for aplicado no eixo, na saída do amplificador deve-se atingir o valor máximo de pico permitido pelo transmissor.
- c) o circuito de amplificação do sinal de saída do receptor, o qual deverá estar de acordo com os requisitos do par amplificador diferencial/ADC. Também poderá ser utilizado o INA 115 nesse caso.
- d) o circuito de detecção de envoltória. Ele poderá ser implementado com um superdiodo em cascata com um filtro RC de primeira ordem. O filtro poderá ser passivo, entretanto, deve-se atentar para os problemas de carregamento em relação ao amplificador que antecede o ADC (se for preciso, projete um filtro ativo com um *amp-op*). Observe que a amplitude máxima de saída desse circuito será determinada pelo estágio anterior de amplificação.

Nos circuitos acima, pode-se utilizar o *amp-op* OPA27 ou qualquer outro similar. Em relação aos componentes, deve-se observar as regras descritas na seção 5. Portanto, no relatório deverão constar:

- a) os esquemáticos dos circuitos (poderão ser feitos à mão);
- b) os cálculos de especificação dos componentes;
- c) os valores escolhidos para os componentes a partir da disponibilidade dos mesmos no mercado.
- d) o novo cálculo das relações entre entrada e saída dos circuitos uma vez que os componentes escolhidos não possuem valores idênticos aos projetados.

4. Conversor A/D

4.1 Componentes

O conversor a ser utilizado nesse projeto é o ADS1274 da fabricante *Texas Instruments*. Ele possui quatro canais de conversão sigma-delta, com taxa de amostragem simultânea de até 144kamostras/s e 24 bits de resolução. Os sinais amostrados podem ser lidos por um microcontrolador por meio de vários protocolos, entre eles o ubíquo SPI. A Figura 9 mostra o diagrama de construção interna desse componente.

Os sinais dos três sistemas de medição das seções anteriores serão lidos pelo ADS1274, o qual transmitirá os sinais amostrados ao microcontrolador responsável pelo controle. O ADC desse projeto lê os sinais de forma diferencial, o que é conveniente pela alta taxa de rejeição de modo comum (CMRR – *common mode rejection ratio*) associada a esse método. Contudo, os sinais provenientes dos três sistemas de

referência são referidos ao 'terra' (*single-ended*). Para fazer a interface entre esses sistemas e o ADC, deverá ser usado o amplificador diferencial THS4524, também da fabricante *Texas Instruments*. A Figura 10 mostra como esse componente pode ser usado para a conexão com o ADC⁵.

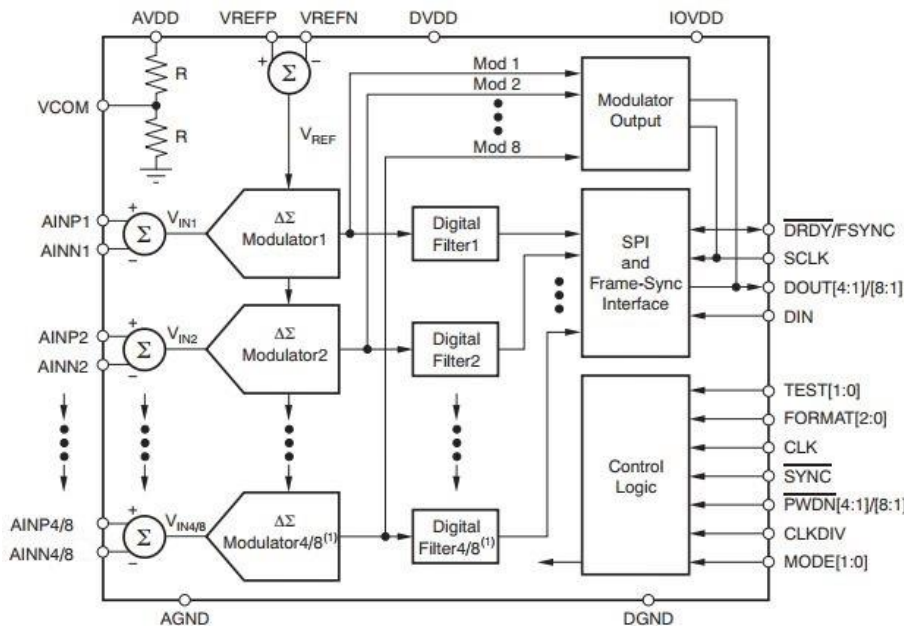


Figura 9 – Diagrama de blocos do ADC ADS1274.

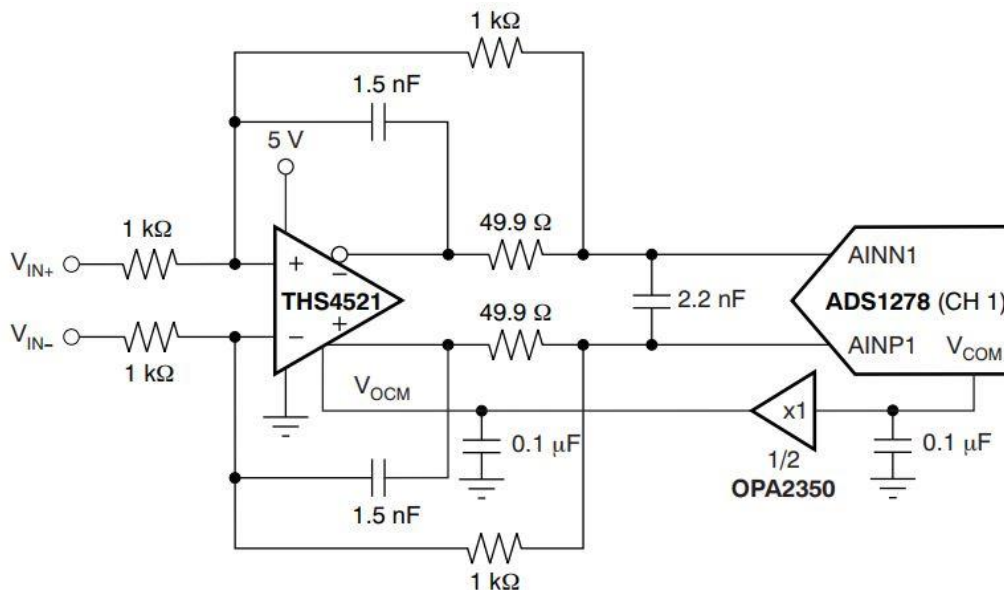


Figura 10 – Amplificador diferencial THS4524.

O amplificador diferencial pode aplicar um ganho DC ao sinal medido, entretanto, essa tarefa pode ficar a cargo dos estágios anteriores. Além de servir de interface para o ADC, o amplificador pode atuar como filtro passa-baixas, o que é útil para prevenir o problema de *aliasing*.

⁵ A figura mostra o amplificador THS4521 e o ADS1278, entretanto, são da mesma família do THS4524 e ADS1274, respectivamente. A única diferença é o número de canais.

4.2 Requisitos

Nessa etapa, seu grupo deverá projetar o circuito do amplificador diferencial em conjunto com a ADC. Seu projeto deverá seguir os exemplos de circuitos dados pelos *datasheets* e outros materiais fornecidos pelo professor, incluindo capacitores e resistores que não afetem o ganho ou a frequência de corte, entre outros (como o *amp-op* OPA2350 da Figura 10). Apenas os valores de alguns componentes deverão ser alterados, de acordo com o ganho e a frequência de corte desejados para cada canal. O filtro RC passa-baixas implementado deve usar um critério mais restrito que o de Nyquist.

Sendo assim, no relatório deverá constar:

- a) os esquemáticos dos circuitos (poderão ser feitos à mão). Se os projetos dos três canais forem idênticos, pode-se apresentar apenas um diagrama. Qualquer canal que diferir dos demais deverá ter seu esquemático fornecido.
- b) os cálculos de especificação dos componentes (aqueles que determinam os ganhos e as frequências de corte dos canais);
- c) os valores escolhidos para os componentes a partir da disponibilidade dos mesmos no mercado.
- d) o novo cálculo das relações entre entrada e saída dos circuitos uma vez que os componentes escolhidos não possuem valores idênticos aos projetados.
- e) A variação mínima das grandezas medidas (tensão, corrente e torque) tendo em vista a resolução do ADC.

Os projetos dos três sistemas de medição das seções anteriores devem ser feitos com base nas características dos projetos desta seção. Deve-se aproveitar ao máximo a faixa de entrada do ADC, de modo que, sempre que determinada grandeza medida atinge seu valor máximo previsto⁶, atinge-se o valor máximo permitido na entrada do conversor.

5. Componentes eletrônicos

5.1 Seleção

Os valores dos componentes calculados devem guiar a escolha dos mesmos em *sites* de distribuição e venda desses elementos, como os indicados abaixo:

<https://www.digikey.com/>

<https://www.mouser.com/>

<https://www.newark.com/>

Esses sites contêm filtros que facilitam a escolha dos componentes. Mesmo assim, a tarefa de seleção pode ser difícil pela grande liberdade de escolha ou pela indisponibilidade de componentes com o valor projetado. Por essa razão, é recomendável a utilização de ferramentas como Matlab ou Excel, que permitem o cálculo rápido de parâmetros como ganho e frequência de corte a partir da definição dos valores de resistores, capacitores, etc. Desse modo, facilita-se o processo de

⁶ Considerando-se as margens de 10% adotadas nos sistemas de medição, na verdade, espera-se que esse valor máximo nunca seja atingido, por segurança.

atendimento dos parâmetros diante da inevitável variação dos valores dos componentes que ocorre quando da seleção.

Os componentes selecionados deverão constar na lista de materiais (BOM – *Bill of materials*) seguindo o *template* fornecido pelo professor. Os dados da planilha podem ser extraídos diretamente dos sites de distribuição, porém, deve-se atentar para o fato de que os fabricantes possuem um código próprio de identificação dos seus componentes, enquanto os distribuidores também possuem os seus. Na planilha devem constar os códigos dos fabricantes (*part number*), que são invariáveis dentre os diversos vendedores.

Ainda, de preferência deverão ser escolhidos componentes do tipo para montagem em superfície (SMD – *surface-mount devices*). Para garantir que os projetos das placas de circuito impresso sejam compactos e robustos contra ruídos, devem ser escolhidos preferencialmente *footprints* pequenos, como 0201 ou 0402, no máximo 0805. A única exceção são os resistores de potência usados nos sistemas de medição de corrente e tensão, nesse caso, componentes *through-hole* poderão ser adotados. Em relação a esses últimos, deve-se atentar para a potência máxima de cada resistor. O fabricante dos transdutores de efeito Hall apresentam diretivas específicas em relação a isso em seus manuais e *datasheets*.

5.2 Alimentação dos circuitos

Os projetos das seções 1 a 4 preveem a utilização de fontes de alimentação diversa. Para tanto, deverão ser escolhidos reguladores de tensão DC lineares do tipo LDO (*low-dropout regulator*) capazes de fornecer a tensão desejada e suprir a corrente exigida pelos circuitos. Não é preciso projetar os circuitos para esses reguladores, basta selecionar aqueles que forem necessários.

Um regulador poderá ser compartilhado por diversos circuitos, desde que eles possam ser montados numa mesma PCB e tenham os mesmos requisitos de tensão. Qualquer regulador do circuito da ponte de deflexão da seção 3, por exemplo, não poderá ser compartilhado com os demais, pois ficará ligado ao eixo central rotativo entre as máquinas elétricas. Deve-se assumir que esses reguladores serão alimentados por baterias apropriadas ou fontes DC alimentadas pela rede elétrica.

Os materiais fornecidos pelo professor contêm esquemáticos com exemplos de utilização desses reguladores, os quais também deverão constar na BOM.

5.3 Capacitores de desacoplamento

Os diversos circuitos de uma placa compartilham reguladores de tensão, cada qual com seus requisitos de consumo de corrente e que variam no tempo. Logo, o consumo elevado de corrente por um circuito em um ponto da placa pode afetar a alimentação de outro circuito completamente independente, uma vez que a regulação de tensão dos reguladores não é perfeita. Sendo assim, nos terminais de alimentação de todos os componentes eletrônicos devem ser colocados os chamados capacitores de desacoplamento. Eles estabilizam a tensão de alimentação e ainda filtram ruídos produzidos em pontos distantes da placa. Esses componentes devem ser colocados fisicamente próximos dos terminais de alimentação. Valores típicos para essa finalidade são de 100nF ou 47nF. Normalmente os fabricantes dos componentes sugerem esses valores em seus esquemáticos de exemplo (observe os capacitores de

0,1 μ F na Figura 10, por exemplo). Os projetos das seções 1 a 4 devem prever a utilização desses capacitores, que deverão constar na BOM.

6. Dados das máquinas elétricas

A Tabela 2 mostra os dados da MCC necessários para os projetos das seções 1 e 2. Os dados do MIT, necessários para o projeto da seção 3 podem ser encontrados na folha de dados fornecida pelo professor.

Tabela 2 – Dados da MCC.

Parâmetro	Valor
Potência nominal	4,0 kW
Velocidade máxima	1800 RPM
Corrente de armadura	20,1 A
Tensão de armadura	240 V
Corrente de campo	0,77 A
Tensão de campo	240 V
Rendimento	83%
Resistência do enrolamento da armadura	2,0396 Ω
Indutância do enrolamento da armadura	12 mH
Resistência do enrolamento de campo	311,69 Ω
Indutância do enrolamento de campo	10 mH

7. Grupos

Esse trabalho poderá ser feito por grupos de no máximo 2 (dois) integrantes. Apenas um dos membros deverá entregar o trabalho pela atividade no *Google Classroom*.

8. Relatório

A única entrega desse trabalho consistirá um relatório em formato PDF. Esse documento deverá ser direto e sucinto. Ele precisará ser estruturado em tópicos correspondentes às seções 1 a 4 deste roteiro, onde em cada um será apresentado o que foi solicitado, como esquemáticos, cálculos de especificação dos componentes, a escolha de valores comerciais e o cálculo final a partir dessa escolha, etc. No fim do documento deverá ficar anexa a lista de materiais (dentro do PDF, não como planilha à parte).

9. Entrega

A data de entrega será aquela definida na atividade do Google Classroom.