



## ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO RESISTOR DE *SHUNT* NA MEDIÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA EM SERVOMOTORES DE ROBÔS INDUSTRIAIS

### ANALYSIS OF THE APPLICATION OF SHUNT RESISTOR IN MEASUREMENT OF ELECTRIC CURRENT IN SERVOMOTORS OF INDUSTRIAL ROBOTS

Diego Katlen de Oliveira Coelho<sup>1, i</sup>

Alex Pisciotta<sup>2, ii</sup>

Marco Rogério da Silva Richetto<sup>3, iii</sup>

Data de submissão: (14/12/2024) Data de aprovação: (16/05/2025)

#### RESUMO

O artigo aborda a aplicação de resistores de *shunt* na medição de corrente elétrica em servomotores de robôs industriais, motivado pela necessidade de soluções eficientes e de baixo custo para sistemas de controle de movimento. O principal objetivo do estudo é explorar o funcionamento e as vantagens desse método em relação a alternativas mais caras, como sensores de efeito Hall. A metodologia utilizada inclui a análise teórica e a simulação de um circuito de *shunt* duplo, acoplado a um modulador sigma-delta, responsável pela conversão da tensão em sinal digital para processamento. Foram realizadas simulações no software Multisim V14, permitindo a compreensão detalhada do método, ainda que a ferramenta não contemple todos os componentes utilizados na prática. Os resultados demonstram que o uso de resistores de *shunt* proporciona medições precisas de corrente elétrica, além de reduzir significativamente os custos e o espaço físico em sistemas robóticos, caracterizando uma solução técnica e economicamente viável para a robótica industrial, especialmente em aplicações que exigem controle rigoroso de corrente.

**Palavras-chave:** robôs industriais; resistor *shunt*; servomotor; servo-amplificador; sensor de corrente; modulação Sigma Delta.

#### ABSTRACT

This article discusses the use of shunt resistors to measure current in industrial robot servomotors, motivated by the need for efficient, low-cost solutions for motion control systems. The main objective of the study is to explore the operation and advantages of this method over more expensive alternatives such as Hall effect sensors. The methodology used includes theoretical analysis and simulation of a double shunt circuit coupled to a sigma-delta modulator responsible for converting the voltage into a digital signal for processing. The simulations were carried out using Multisim V14 software, which allows a detailed

<sup>1</sup> Pós-graduado em Automação Industrial e Robótica na Faculdade de Tecnologia SENAI Félix Guisard. E-mail: diegokatlencoelho@gmail.com

<sup>2</sup> Docente e Mestre em Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia SENAI Félix Guisard. E-mail: alex.pisciotta@sp.senai.br

<sup>3</sup> Docente e Mestre em Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia SENAI Félix Guisard. E-mail: marco.richetto@sp.senai.br

understanding of the method, although the tool does not include all the components used in practice. The results show that the use of shunt resistors provides accurate electrical current measurements and significantly reduces cost and space in robotic systems. Based on the simulations and analysis of the data obtained, the study concludes that the shunt resistor measurement method is a technically and economically viable solution for industrial robotics, especially in applications that require strict current control.

**Keywords:** industrial robots; shunt resistor; servo motor; servo amplifier; current sensor.

## 1 INTRODUÇÃO

A medição de corrente elétrica em circuitos de controle de motores é essencial para controle de torque e velocidade de um Servomotor, além de desempenhar um papel fundamental em funções de proteção, como detecção de sobrecorrente e curto-circuito. O método de medição de corrente a ser utilizado depende de diferentes fatores, incluindo nível de potência, custos envolvidos, requisitos de precisão na medição e espaço físico disponível (Vogel *et al.*, 2019). Existem vários tipos de sensores e métodos de medição de corrente elétrica, como sensores de efeito Hall, transformadores de corrente, resistores *shunts*, bobinas Rogowski, sensores de efeito Magneto Resistência (MR), entre outros (Zhang, Leggate e Matsuo, 2017). A precisão na medição da corrente elétrica que flui através das 3 fases de um Servomotor de ímã permanente é crucial para o correto funcionamento do sistema controlador, pois erros na medição podem afetar diretamente o desempenho do servomotor (Olca, Ekim e Boz, 2019).

Em motores industriais, é padronizada a técnica de medição utilizando sensores de efeito Hall por possuir alta acurácia, baixa manutenção e estrutura completamente isolada, principalmente em aplicações críticas de segurança. Contudo, técnicas de reconstrução da corrente através de resistores *Shunt* têm sido gradualmente adotadas devido aos fatores econômicos para manter as empresas competitivas (Zhang, Leggate e Matsuo, 2017).

O método de medição de corrente elétrica utilizando resistores *shunt* torna-se cada vez mais popular devido ao seu baixo custo em relação a outras estratégias de medição (Dianov, 2022), fortalecido pela crescente demanda por redução de custos na fabricação de *drivers* industriais (Zhang, Leggate e Matsuo, 2017). Assim, esse método é considerado uma opção viável em projetos mais recentes (Huang e Shimizu, 2018). Além dos custos de produção de sensores específicos, os parafusos e cabos que seriam necessários para a conexão do sensor de efeito Hall ou TC (transformador de corrente) são desnecessários nessa técnica, e como a medição pode ser feita no próprio circuito eletrônico, aliado ao fato de resistores *shunt* ocuparem volume reduzido, o espaço físico utilizado no servo-amplificador do robô é reduzido (Suzuki *et al.*, 2018). Dessa forma, essas características resultam em redução tanto da quantidade de peças utilizadas quanto no tempo de produção e consequente mão-de-obra, impactando em redução de custo (Vogel *et al.*, 2019).

O maior desafio ao especificar o resistor de *shunt* em um circuito de medição de corrente elétrica é relacionado ao seu valor ôhmico e tamanho físico, pois ambas as características estão correlacionadas à potência nominal do Servomotor, da qual uma parcela será dissipada no resistor para a realização da medição (Huang e Shimizu, 2018).

O uso de resistores *shunt* mostra-se vantajoso com o desenvolvimento de moduladores delta-sigma operando com entrada da ordem de 50 mV, exigindo menor dissipação de potência nos resistores *shunt* e proporcionando a transmissão da informação sem interferências até o controlador.

A tabela 1 apresenta uma comparação de custo, precisão da medição, espaço físico e esforço necessário para montagem entre as técnicas de medição mais difundidas: Resistor *shunt*, sensor de efeito *Hall* circuito fechado e Sensor de efeito *Hall* circuito aberto.

**Tabela 1 – Diferenças entre os principais métodos de medição de corrente.**

<b>Método Utilizado</b>	<b>Resistor <i>Shunt</i> + Modulador Delta-Sigma</b>	<b>Sensor de efeito <i>hall</i> circuito fechado</b>	<b>Sensor de efeito <i>hall</i> circuito aberto</b>
<b>Precisão de medição</b>	Alta	Alta	Média
<b>Custo monetário</b>	Baixo	Alto	Médio
<b>Espaço necessário</b>	Baixo	Muito alto	Alto
<b>Esforço para montagem</b>	Muito baixo	Alto	Alto
<b>Configuração de montagem</b>	Soldado na PCB	Montagem, conexão de cabos e plugs.	Montagem, conexão de cabos e plugs.

Fonte: Adaptado de (Vogel *et al.*, 2019)

Nos circuitos de medição de corrente elétrica em servossistemas, de forma geral, é comum o uso do método de dois ou três sensores de corrente. Os sistemas de controle vetorial, também empregados em robôs industriais, adotam o método de dois sensores de corrente e um sensor de posição no servomotor, como, por exemplo, um *resolver* ou *encoder*. Esses sensores têm a função de coletar dados de corrente e de posição do servomotor, o que melhora tanto o custo quanto o volume do sistema de controle (Chen e Cai, 2022).

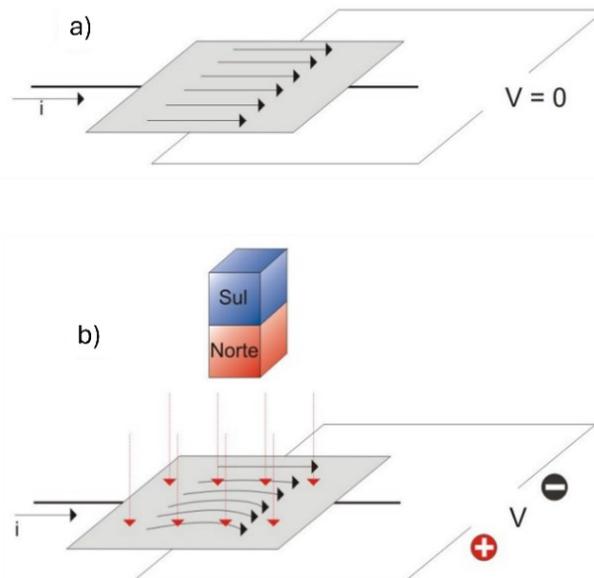
Para a leitura e o monitoramento da corrente elétrica que flui pelas fases do servomotor em cada um dos seis eixos do manipulador, os servo-amplificadores Fanuc utilizam dois resistores *shunt* para cada eixo do robô. Neste artigo, é apresentado como é feita a especificação desses resistores *shunt* e qual a técnica de transmissão do dado de corrente elétrica obtido até o controlador.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Por muito tempo, os sensores de corrente de efeito *Hall* dominaram a aplicação de medição de corrente elétrica em aplicações de alto desempenho. O funcionamento de um sensor de corrente por efeito *hall* se baseia no efeito eletromagnético originado pela passagem de corrente elétrica em um condutor. Esse campo magnético gerado pelo condutor, quando próximo ao sensor, causa uma perturbação na concentração de corrente elétrica que passa nesse corpo, de forma que se pode medir uma diferença de potencial nas laterais do condutor (internamente ao sensor), proporcional à intensidade da corrente que o gerou (Patsko, 2006). A figura 1 representa o princípio de funcionamento de um sensor de efeito *hall*.

As desvantagens do uso de sensores de efeito *hall* encontram-se no fato de que exposições a campos magnéticos intensos podem comprometer a medição, além do fato dos sensores necessitarem ser posicionados próximos aos condutores de potência, que levam energia aos motores. Considerando-se que geralmente utilizam-se motores com mais de uma fase, existe sempre a preocupação do posicionamento de um não interferir na leitura do outro.

**Figura 1 - Princípio de funcionamento de um sensor de efeito *hall***



Fonte: Adaptado pelo autor de (Patsko, 2006)

A medição de corrente pode também ser realizada por transformadores de corrente, normalmente referenciados como TC's, que transformam correntes elevadas do seu primário em pequenas correntes secundárias pelo fenômeno da conversão eletromagnética segundo uma relação de transformação (Mamede Filho, 2020). Os transformadores de corrente podem ser classificados de acordo com a disposição do enrolamento primário e a construção do núcleo:

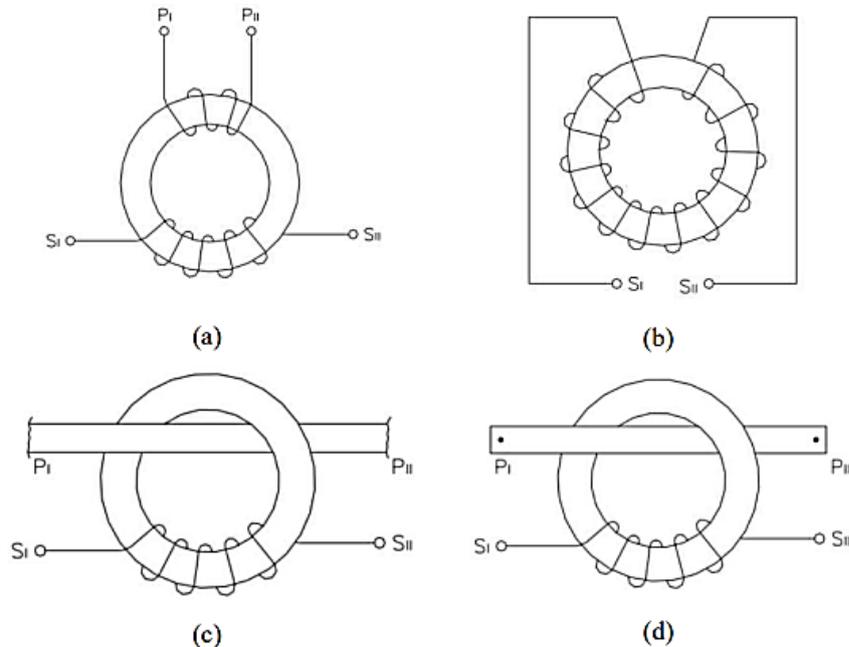
- TC tipo barra: o primário é constituído por uma barra fixa através do núcleo;
- TC tipo enrolado: o enrolamento se constitui em uma ou mais espiras ao redor do núcleo;
- TC tipo janela: abertura através do núcleo por onde passa o condutor, transformando este último em seu primário;
- TC tipo núcleo dividido: semelhante ao tipo janela, mas com núcleo separado para permitir o envolvimento do condutor primário;
- TC tipo bucha: similar ao tipo barra, mas sua instalação é feita diretamente na bucha dos equipamentos monitorados (aplicados a transformadores, disjuntores, etc.).

A figura 2 ilustra os diferentes tipos de transformadores de corrente.

O método de medição de corrente elétrica que utiliza resistores *shunt* baseia-se na

introdução de um resistor em série com a fase do motor monitorado, permitindo a leitura de uma queda de tensão provocada pela corrente elétrica sobre esse resistor. Com o valor da resistência conhecido, é possível determinar a corrente elétrica pela aplicação da Lei de Ohm.

Figura 2 - Tipos construtivos de TC: (a) Tipo enrolado. (b) Tipo bucha. (c) Tipo janela. (d) Tipo barra.



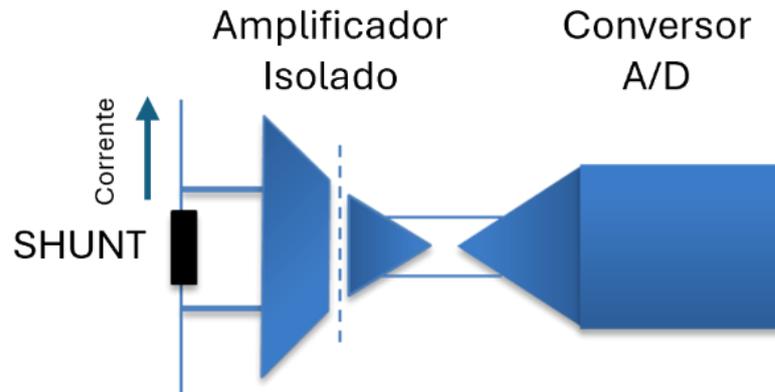
Fonte: (Ribeiro, 2024)

Obviamente esse método gera uma dissipação de potência sobre o resistor, e, por isso, esse método era empregado apenas para acionamentos de cargas de baixa potência e baixo custo, como eletrodomésticos e ferramentas manuais.

O resistor de *shunt* precisa ter o menor valor ôhmico possível para dissipar a mínima potência e assim minimizar sua interferência no circuito do motor. Mas isso depende também da capacidade de leitura de baixos valores de queda de tensão obtidos a baixas correntes. O uso de resistores *shunt* como sensor de corrente para alta potência requer isolamento do sinal analógico, o que pode impactar negativamente o custo do projeto, bem como a precisão. Por exemplo, circuitos integrados opto-acopladores lineares apresentam baixa linearidade e precisão quando comparados com sensores de corrente de efeito *hall* fechado (Patsko, 2006).

Existem diferentes métodos de medição de corrente isolada; no entanto, um dos principais métodos empregados nos subsistemas VE/VEH (veículos elétricos e veículos elétricos híbridos) e amplamente utilizado na medição com *shunt* em robôs industriais é baseado em *shunts* que utilizam amplificadores isolados ou moduladores isolados, os quais podem ser vistos, respectivamente, nas Figuras 3 e 4 (Maniar, 2023).

Figura 3 - Amplificador Isolado

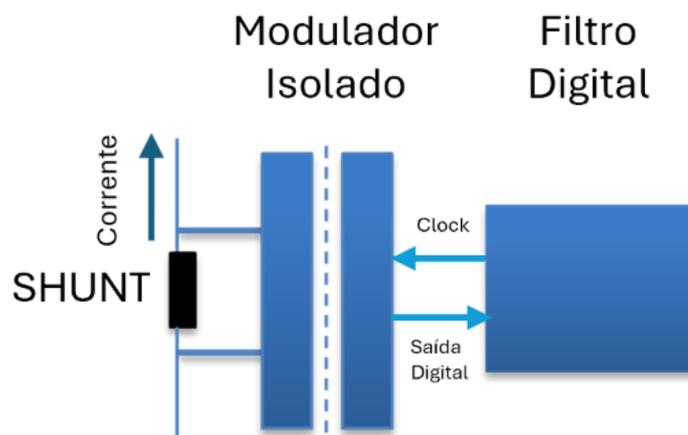


Fonte: Elaborado pelo autor

Os moduladores delta-sigma são atualmente produzidos por diversas empresas, com a função de realizar a modulação do sinal de entrada analógica obtido do resistor de *shunt* e fornecer um fluxo de dados isolado (ou fluxo de bits) para o sistema de controle (Anuchin *et al.*, 2018). Atualmente são fabricados moduladores isolados com sensibilidade na faixa de 50 mV, que permitem aplicações em medições de correntes mais baixas.

Devido ao aumento da necessidade de precisão na medição de corrente, observa-se uma migração dos projetistas para métodos baseados em *shunt*, especialmente em ambientes de alta corrente. Entre os fornecedores automotivos, verifica-se uma tendência de passar de soluções baseadas em amplificadores isolados para moduladores isolados; essa mudança visa melhorar ainda mais a precisão da medição da corrente elétrica em motores elétricos (Maniar, 2023).

Figura 4 - Modulador Isolado



Fonte: Elaborado pelo autor

A modulação delta-sigma é uma técnica que permite a transmissão de valores que representam grandezas de precisão com taxas de amostragem significativamente inferiores que os sistemas de conversão Analógico-digital (ADC) convencionais. Esses moduladores

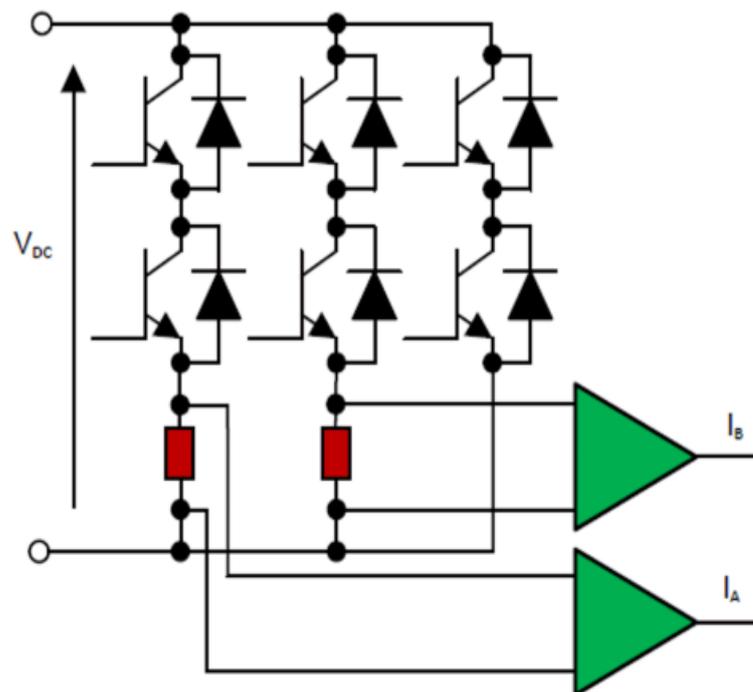
foram desenvolvidos nos anos 1960, inicialmente aplicados em sistemas de telefonia. Esses moduladores quantificam a diferença (delta) do sinal de entrada e a soma (sigma) das diferenças anteriores (Prada, Sedano e Vizcaya, 2008).

O método de medição de corrente com *shunt* duplo é um dos métodos mais comumente utilizados para medir as correntes das fases de um motor trifásico (Rohm, 2023). Este método apresenta um bom equilíbrio entre vantagens e desvantagens, sendo, portanto, adequado para a maioria das aplicações com motores (Popa, 2018).

A medição de corrente com *shunt* duplo utiliza o princípio da Lei das Correntes de Kirchhoff (KCL), que estabelece que a soma das correntes em um único nó é igual a zero. Medindo apenas correntes bifásicas, a terceira é calculada pelo circuito de controle com a aplicação da Lei de Kirchhoff. A Figura 5 apresenta um circuito para a técnica de medição de corrente de dois *shunts* (Lim, 2020).

O trabalho de Vogel *et al.* (2019) mostra que a redução de custos com o uso de resistores *Shunt* em relação aos sensores de efeito *hall* de malha aberta é de 19€, e de 49€ se comparado aos sensores de efeito *hall* em malha fechada na Alemanha.

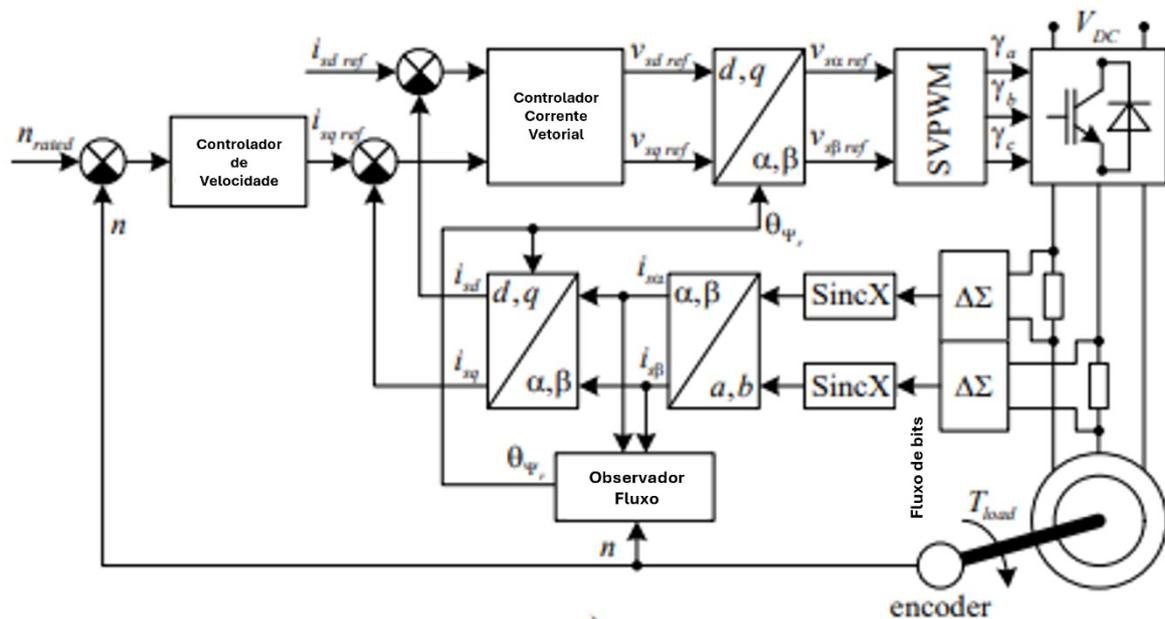
Figura 5 - Circuito de medição de *Shunt* duplo



Fonte: (Lim, 2020)

A figura 6 apresenta um diagrama de blocos da estrutura de um driver de controle de servomotor robótico utilizando um conjunto duplo *shunt* e moduladores delta-sigma para a medição da corrente e, assim, proporcionar o controle de torque e posição do conjunto robótico (Anuchin *et al.*, 2018).

Figura 6 - Diagrama de blocos do driver testado



Fonte: (Anuchin et al., 2018)

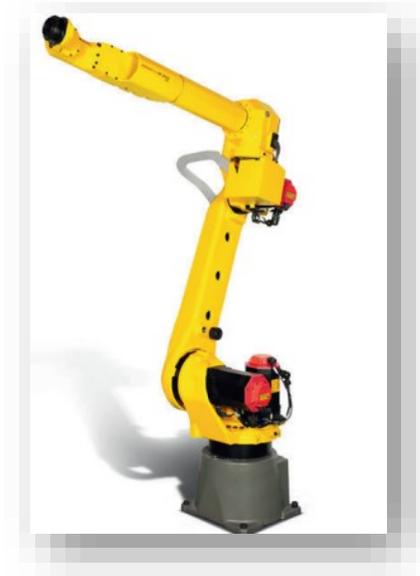
### 3 DESENVOLVIMENTO

Existem diversos tipos de manipuladores robóticos de distintas marcas de robôs industriais que poderiam ser considerados para a presente análise. No entanto, a fim de proporcionar uma compreensão mais aprofundada do método de medição de corrente com resistores *shunt*, opta-se por concentrar a investigação no modelo de manipulador M20iA/12L, fabricado pela empresa Fanuc.

Este manipulador, dotado de 6 eixos, possui uma capacidade de carga de 12 kg e é amplamente utilizado em ambientes industriais (Fanuc, 2023). A figura 7 apresenta a aparência física do manipulador. Os conceitos abordados, explicados e aplicados nas simulações para este manipulador podem ser utilizados de forma análoga em outros modelos de manipuladores robóticos.

Para a leitura e monitoramento da corrente elétrica que flui através das fases dos servomotores do manipulador robótico de 6 eixos, o servo-amplificador FANUC A06B-6400-H102 utiliza um método de leitura que envolve dois resistores de *shunt* para cada eixo do robô. O resistor de *shunt* deve possuir baixo valor de resistência elétrica, a fim de evitar alterações na carga (motor) e prevenir o superaquecimento do resistor devido à dissipação de potência, uma vez que este componente é inserido em série com a carga. Assim, a corrente consumida pela carga flui pelo resistor de *shunt* e então a queda de tensão é lida pelo componente HCPL-7860 (Broadcom, 2015), constituído por um modulador opticamente isolado que, em conjunto com o filtro digital HCPL-0872, permitem a medição da corrente elétrica nas fases dos motores de alta potência (Avago, 2014).

Figura 7 - Manipulador robótico FANUC M20iA/12L



Fonte: (FANUC America, 2024)

O primeiro passo na especificação do resistor de *shunt* consiste em determinar a corrente de pico que fluirá através dele, ou seja, a corrente de pico a ser medida no motor. Após essa etapa, é necessário consultar a folha de dados do modulador isolado para identificar o valor de tensão máxima recomendada para seus terminais de entrada, o que permitirá calcular a resistência máxima do *shunt*. Essa resistência pode ser obtida dividindo-se a tensão máxima encontrada para os terminais do modulador isolado pela corrente de pico do motor, acrescida de uma taxa de sobrecarga de 50% (Avago, 2014).

As correntes de pico dos servomotores instalados no manipulador de 6 eixos FANUC M20iA/12L podem ser consultadas utilizando-se o software Roboguide®, de propriedade da fabricante, seguindo o caminho: *Menu > Status > Version ID*, conforme ilustrado na figura 8.

Figura 8 - Correntes máximas dos motores do robô FANUC M20iA/12L

GR:	AX:	MOTOR ID AND INFO:	1/84
1	1	aiS12/4000 80A	H1 DSP1-S1
2	1	aiS12/4000 80A	H2 DSP1-S2
3	1	aiS8/4000 80A	H3 DSP1-S3
4	1	biSR0.5/6000 40A	H4 DSP1-S4
5	1	biSR0.5/6000 40A	H5 DSP1-S5
6	1	biSR0.4/6000 40A	H6 DSP1-S6

Fonte: Elaborado pelo autor, extraído do software Roboguide®

Utilizando o método anteriormente descrito, foi possível calcular os resistores de *shunt* ideais para o robô FANUC M20iA/12L, empregando a corrente de pico obtida com o auxílio do software Roboguide®, com os valores registrados na tabela 2. Assume-se uma tensão máxima de 200 mV para os terminais de entrada do modulador isolado, valor sugerido pelo datasheet do fabricante Avago (2014).

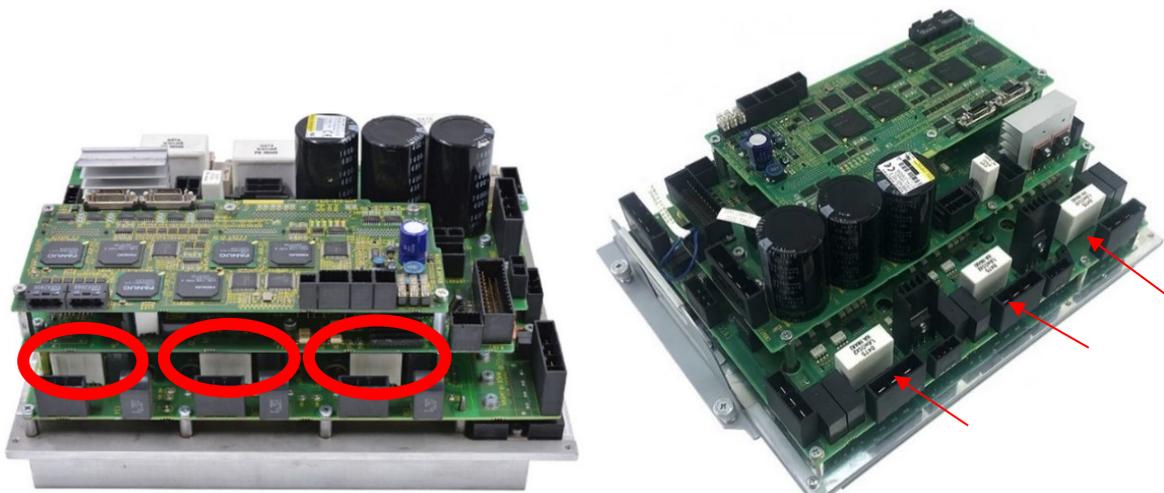
Os resistores de *shunt* instalados no servo amplificador FANUC A06B-6400-H102 (2013), utilizados para a leitura da corrente de cada eixo do manipulador M20iA/12L estão descritos na segunda coluna da Tabela 2. A localização dos resistores pode ser verificada na figura 9. Para cada eixo do robô, são utilizados dois resistores de *shunt* que compartilham um único encapsulamento (Rx2), conforme demonstrado na figura 10.

Tabela 2 – Descrição dos resistores reais e resistores calculados

Eixo do Manipulador	Resistor de Shunt Encontrado no Servo Amplificador (mΩ)	Corrente de Pico (A) + 50% de taxa de sobrecarga em operação normal	Resistor de Shunt Calculado (mΩ) (R = V/I)
Eixo 1	1.6 mΩ	(80A x 1.5) = 120 A	200 mV/120 A= 1.66 mΩ
Eixo 2	1.6 mΩ	(80A x 1.5) = 120 A	200 mV/120 A= 1.66 mΩ
Eixo 3	1.6 mΩ	(80A x 1.5) = 120 A	200 mV/120 A= 1.66 mΩ
Eixo 4	3.2 mΩ	(40A x 1.5) = 60 A	200 mV/60 A = 3.33 mΩ
Eixo 5	3.2 mΩ	(40A x 1.5) = 60 A	200 mV/60 A = 3.33 mΩ
Eixo 6	3.2 mΩ	(40A x 1.5) = 60 A	200 mV/60 A = 3.33 mΩ

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 9 - Localização dos resistores duplo *shunt* no servo amplificador FANUC



Fonte: Elaborado pelo autor

A indicação x2 após o valor da resistência indica que são dois resistores dentro de um mesmo encapsulamento.

Figura 10 - Resistores de *Shunt* do servo amplificador A06B-6400-H102



Fonte: Elaborado pelo autor

O componente empregado pela fabricante FANUC para receber a tensão resultante da corrente que flui através do resistor de *shunt* é o modulador isolado HCPL-7860. A Figura 11 apresenta uma imagem do componente eletrônico soldado na placa de potência do servo amplificador, enquanto a Figura 12 mostra a constituição física do modulador, bem como suas características elétricas, retirada da folha de dados da Avago (2014).

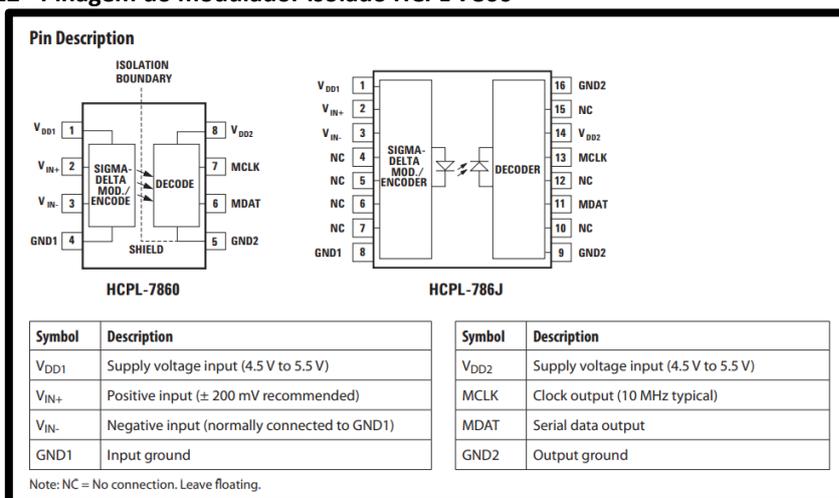
Figura 11 - Modulador isolado HCPL-7860 utilizado pela FANUC



Fonte: Elaborado pelo autor

O modulador isolado sigma delta trabalha com o sinal de entrada analógico, convertendo-o em um fluxo de bits de alta velocidade, antes da transmissão através da barreira de isolamento óptico. Os dados do modulador recebidos no lado isolado são então enviados a um processador para interpretação, seguindo os padrões de dados definidos pelo fabricante e apresentados na tabela 3 (Avago, 2014).

Figura 12 - Pinagem do modulador isolado HCPL-7860



Fonte: (Avago, 2014)

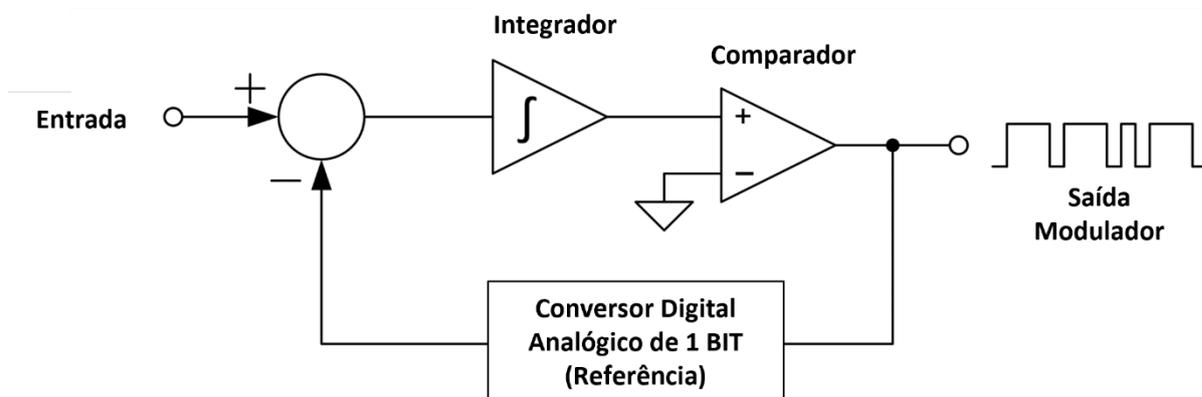
Tabela 3 - Faixa de entrada escala completa e código associado

Entrada Analógica	Tensão de Entrada	Saída Digital
Faixa de escala completa	640 mV	32768 LSBs
Tamanho de passo mínimo	20 $\mu$ V	1 LSB
Escala + completa	+320 mV	1111111111111111
Zero	0 mV	1000000000000000
Escala - completa	-320 mV	0000000000000000

Fonte: Traduzido pelo autor de (Avago, 2014)

O conversor analógico digital Delta-Sigma é construído a partir de um modulador Sigma Delta e um filtro digital. O modulador converte a entrada analógica em um fluxo de bits, enquanto o filtro digital converte o fluxo de bits em uma palavra de dados que representa a magnitude da entrada analógica, como visto na Figura 13 (Wu, 2015).

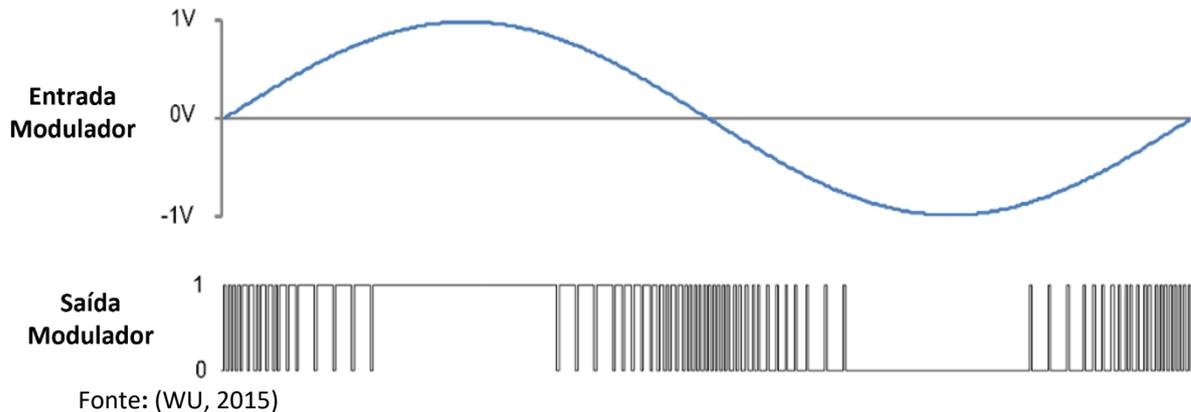
Figura 13 - Representação de um ADC Sigma Delta



Fonte: (WU, 2015)

A Figura 14 mostra um exemplo do sinal de entrada e o fluxo de bits de saída do modulador sigma delta, assumindo uma referência de 1 V. À medida que a entrada se aproxima de 1 V, o fluxo de bits do modulador se aproxima de uma densidade de nível lógico alto de 100%. Por outro lado, conforme a entrada se aproxima de -1 V, a densidade do fluxo de bits nível lógico alto se aproxima de 0%. Quando a entrada é 0 V, a densidade de nível lógico alto é 50%. Portanto, a diferença de potencial entre a tensão de referência e o negativo da tensão de referência pode ser medida sem ultrapassar o modulador (Wu, 2015).

Figura 14 - Onda senoidal (superior) e fluxo de bits de saída modulado (inferior)

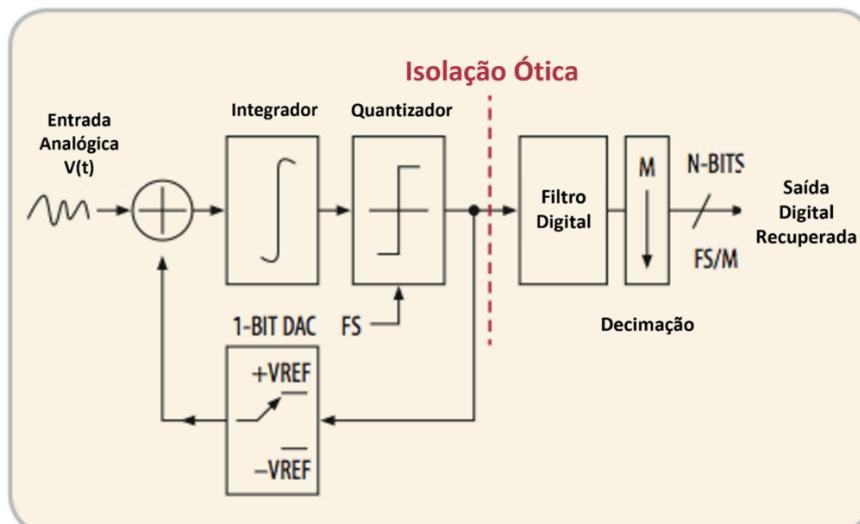


Fonte: (WU, 2015)

O filtro de decimação calcula a média ou decima o fluxo de bits super-amostrado de alta velocidade para uma taxa mais baixa, por um fator comumente conhecido como taxa de decimação (Avago, 2014).

Na figura 15 tem-se em detalhe como é construído um componente modulador sigma delta isolado. A imagem nos ajuda a entender o processo interno que ocorre nesse componente, desde o recebimento do sinal analógico que vem do resistor de *shunt*, que representa a corrente que flui pelas fases do motor do robô, até a saída digital enviada ao componente que trabalha com o dado final tratado.

Figura 15 - Representação interna de um modulador Sigma Delta Isolado



Fonte: Traduzido pelo autor de (Avago, 2014)

#### 4 METODOLOGIA

O trabalho corrente consiste em uma pesquisa básica, com abordagem quantitativa e explicativa, e visa explicar a base de conhecimento através de simulações em software específico e medições em robô físico, exemplificando de forma mais clara como o processo de medição de corrente pelo método do resistor *shunt* acontece atualmente.

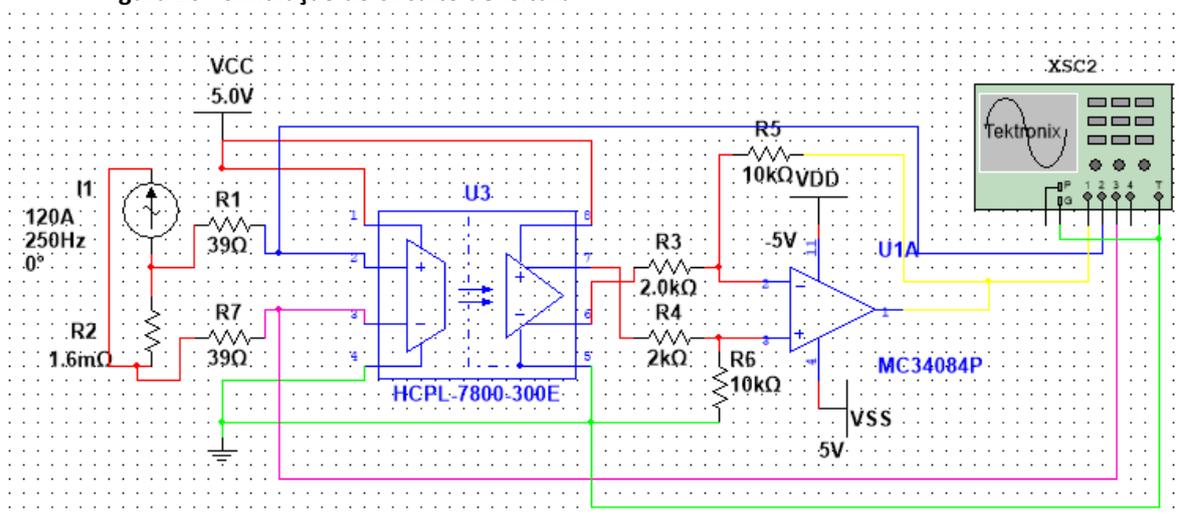
Para este estudo foi utilizado o software de simulação Multisim V14, da empresa *National Instruments*. O software possui uma biblioteca de componentes, os quais podem ser arranjados em circuitos e então simulados pelo módulo SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis* – Programa de Simulação com ênfase em Circuitos Integrados) da ferramenta, um poderoso padrão industrial de simulação, gerando os resultados em período transitório e permanente (Nagel e Pederson, 1973).

O Multisim V14 utilizado para a simulação do circuito como parte deste trabalho não possui, em sua biblioteca, o componente HCPL-7860. Por isso foi necessário adaptar o circuito utilizando um componente similar ao utilizado no manipulador FANUC M20iA/12L.

Por este motivo foi escolhido o componente HCPL-7800-300E utilizado nos modelos de servo amplificadores mais antigos da fabricante Fanuc, existente na biblioteca do simulador eletrônico Multisim V14. Esse componente é um amplificador isolado, e diferentemente o componente originalmente considerado, resulta em sinais analógicos em sua saída.

Foi inserida uma fonte de corrente de 120 A em série com o resistor de *Shunt* de 1.6 m $\Omega$ , simulando o fluxo de corrente através de uma das fases monitoradas de um motor do eixo 1, conforme visto na figura 16.

Figura 16 - Simulação do circuito de leitura

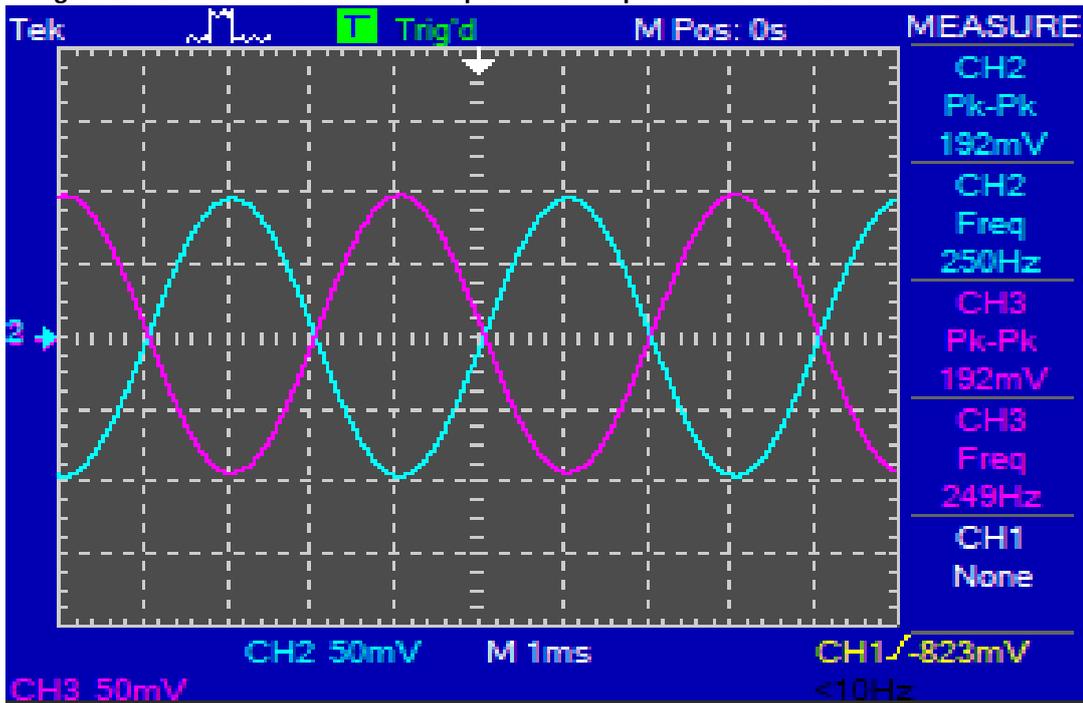


Fonte: Elaborado pelo autor, através do software Multisim V14

#### 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na figura 17 pode-se observar a forma de onda da queda de tensão sobre o resistor de *Shunt* de 1.6 m $\Omega$ . Destaca-se a queda de tensão indicada em torno de 200 mV de pico conforme esperado.

Figura 17 - Leitura dos sinais realizado pelo Osciloscópio do Multisim V14

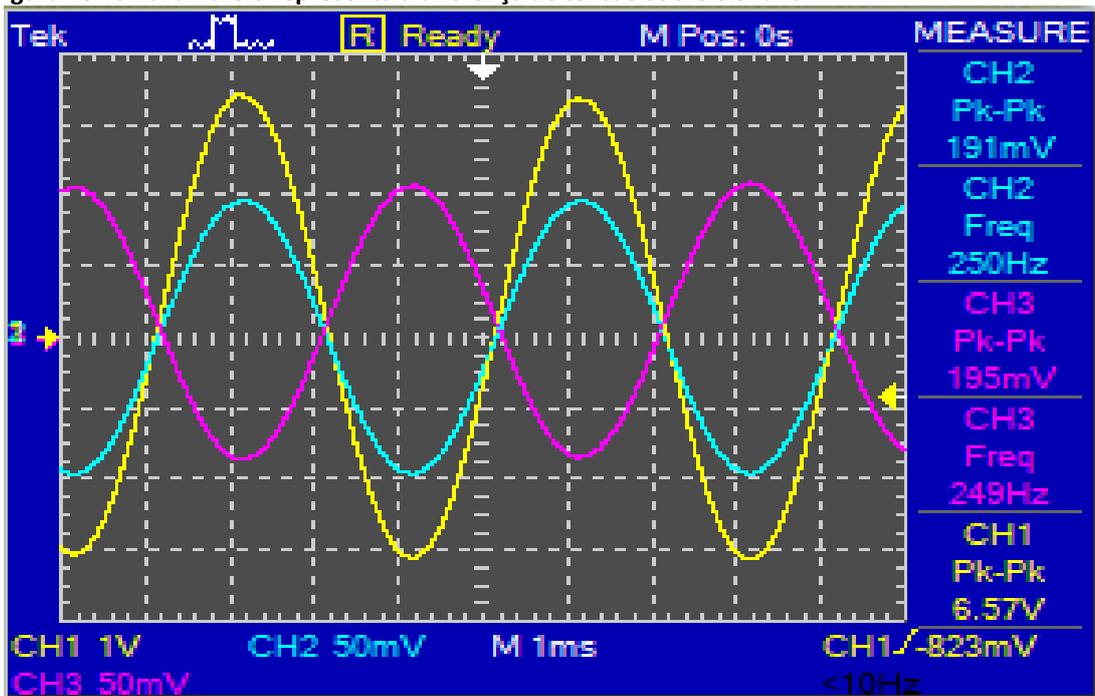


Fonte: Elaborado pelo autor

Na saída do HCPL-7800 foi colocado um amplificador operacional diferencial MC34084P para, desta forma, obter-se um sinal de saída referenciado à diferença dos sinais aferidos. Desse modo obtém-se o sinal analógico a ser interpretado pelo controlador.

A figura 18 inclui o sinal da saída do amplificador MC34084P, representado na cor amarela.

Figura 18 - Sinal amarelo representa a diferença de tensão sobre o Shunt



Fonte: Elaborado pelo autor

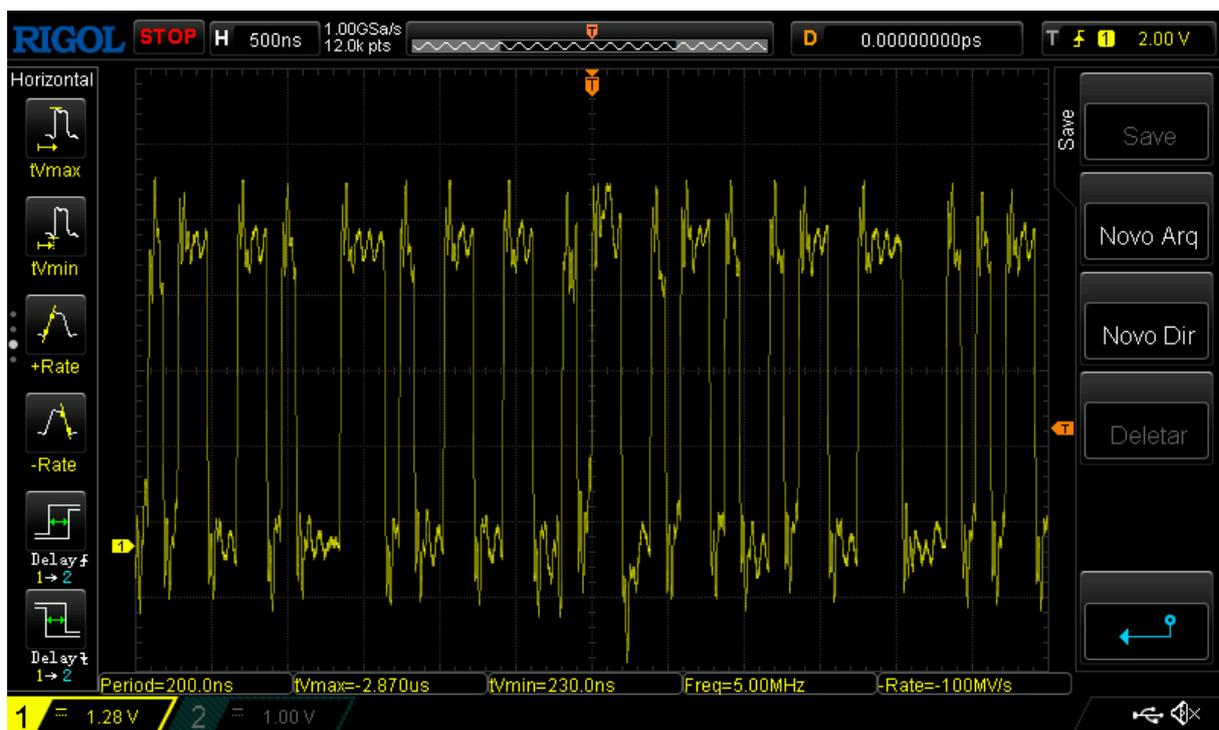
O sinal amarelo representa um sinal que passaria pela modulação Sigma Delta, o que acarretaria a conversão do sinal analógico para um sinal digital super-amostrado.

Considerando o Modulador isolado ao invés do Amplificador isolado, seria possível medir o sinal digital proveniente da decimação do sinal e o envio para um DSP (processador de sinais digitais), dentro da faixa digital correspondente, conforme descrito na folha de dados do fabricante do modulador isolado. Como não foi possível simular no *software* por falta do componente na biblioteca do *software* utilizado, foram realizadas medições reais em um robô físico, conforme apresentado.

Foram registrados os sinais digitais provenientes do pino 6 MDAT do componente HCPL-7860 utilizando-se um osciloscópio de 200MHz da marca Rigol, com o robô nas velocidades de 100% e depois em 30%, como pode ser observado pelas figuras 19 e 20 a seguir.

É possível identificar a modulação sigma-delta conforme teorizado, evidenciando a forma de onda das correntes provenientes no resistor *shunt*, que depois é interpretada pelo DSP utilizando-se algoritmos específicos.

Figura 19 - Sinal MDAT em velocidade 100%



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 - Sinal MDAT em velocidade 30%



Fonte: Elaborado pelo autor

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou que o uso de resistores de *shunt* na medição de corrente elétrica em servomotores de robôs industriais, como o modelo FANUC M20iA/12L, é uma solução prática e acessível. A análise detalhada dos componentes e o uso de moduladores isolados *Sigma-Delta* demonstraram ser eficazes para garantir uma medição precisa e confiável, atendendo às necessidades de controle e segurança no ambiente industrial.

Com testes e simulações realizadas com o motor funcionando na velocidade e torque nominais, foi possível investigar a estabilidade do circuito de corrente, realizando vários ajustes do filtro digital e flutuações de torque, que ocorrem devido a erros no feedback do sinal de medição da corrente elétrica que flui pelo motor, além de erros no chaveamento do PWM. Com base nos testes realizados, conclui-se que o método de medição de corrente utilizando resistores *shunt*, aliado aos circuitos integrados moduladores isolados *delta-sigma*, representa uma solução de baixo custo para controle de malha fechada em *drivers* e conversores de energia modernos, representando uma redução de custo significativa conforme o trabalho de Vogel (2014). A precisão da medição de corrente obtida por meio dos resistores *shunt* pode ser ajustada alterando a taxa de sobre-amostragem, chamada de OSR.

As simulações realizadas corroboraram que essa abordagem, embora simples, oferece vantagens significativas, como menor custo e economia de espaço, quando comparada a outras opções, como os sensores de efeito *Hall* e transformadores de corrente. Além disso, o método se mostrou adequado para manter o equilíbrio entre precisão, custo e facilidade de implementação, sendo uma excelente escolha para aplicações que exigem controle rigoroso de corrente e torque, sem sacrificar o desempenho dos sistemas robóticos.

Com os dados colhidos através de observação e com os circuitos eletrônicos estabelecidos a partir de medição e análise técnica, somado às simulações realizadas no software Multisim V14, pode-se compreender o método de leitura de corrente realizado pelo Servo Amplificador Fanuc do modelo R30iB de forma completa. Infelizmente no software Multisim v14 não foi possível simular diretamente o modulador isolado HCPL-7860, pois ainda não existe este componente disponível na sua biblioteca. Porém, a partir de conhecimentos técnicos de modelos anteriores ao Servo Amplificador A06B-6400-H102, foi possível realizar a simulação de um circuito que ajuda a compreensão de forma aproximada este método utilizado pela fabricante de robôs industriais FANUC.

Com base nesses resultados, é possível afirmar que o uso de resistores de *shunt* é uma alternativa viável e eficiente para o monitoramento de correntes em servomotores. Essa tecnologia tem grande aplicabilidade em sistemas de controle de motores, e pode ser amplamente explorada em aplicações automobilísticas, dado o rápido crescimento do mercado global de veículos elétricos.

## REFERÊNCIAS

ANUCHIN, A. *et al.* Current control of AC drives using shunt current sensors and delta-sigma modulation. *In: CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY - IECON, 44.*, Washington, DC, USA, 2018. **Anais eletrônicos** [...]. Washington: IEEE, 2028.

AVAGO TECHNOLOGIES. **Avago Tech Note:** Isolated current sensing with Sigma Delta optoisolators. AVAGO. 26 Oct. 2014. Disponível em: <https://www.radiolocman.com/review/article.html?di=152710>. Acesso em: 29 jul. 2023.

BROADCOM. HCPL-7860/HCPL-786J. **Broadcom**, 06 mar. 2015. Disponível em: <https://docs.broadcom.com/doc/AV02-0409EN>. Acesso em: 11 ago. 2023.

CHEN, H.; CAI, C. High-speed control of AC Servo motor using high-performance RBF neural network terminal sliding mode observer and single current reconstructed technique. **Electronics**, v. 11, n. 1646, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics11101646>. Acesso em: 11 ago. 2023.

DIANOV, A. Recommendations and Typical Errors in Design of Power Converter PCBs With Shunt Sensors. **Open Journal of the Industrial Electronics Society**, Yongin, v. 3, p. 329-338, 2022. DOI: 10.1109/OJIES.2022.3179705. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9786746>. Acesso em: 11 ago. 2023.

FANUC. Industrial robots for manufacturing. **Fanuc America**, 2023. Disponível em: <https://www.fanucamerica.com/products/robots>. Acesso em: 29 jul. 2023.

FANUC A06B-6400-H002 MRO electric product video, 2023. 1 vídeo (0,37 min). Publicado pelo canal MRO Electric and Supply. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=RJbTvReOEr0>. Acesso em: 29 jul. 2024.

FANUC AMERICA. FANUC America. Automation Solutions that redefine productivity. **FANUC**, 2024. Disponível em: <https://www.fanucamerica.com/>. Acesso em: 29 jul. 2024.

HUANG, P. Y.; SHIMIZU, T. High Power/Current Inductor Loss Measurement with Shunt Resistor Current-sensing Method. *In: INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS CONFERENCE (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*. Niigata: [s.n.]. 2018. **Anais [...]**. p. 2165-2169.

LIM, S. Sensorless-FOC for PMSM With Single DC-Link Shunt. **Texas Instruments**. 2020. Disponível em: [https://e2e.ti.com/cfs-file/\\_\\_key/communityserver-discussions-components-files/171/Current\\_2D00\\_Sensing\\_2D00\\_with\\_2D00\\_Single\\_2D00\\_DC\\_2D00\\_Link\\_2D00\\_Shunt.pdf](https://e2e.ti.com/cfs-file/__key/communityserver-discussions-components-files/171/Current_2D00_Sensing_2D00_with_2D00_Single_2D00_DC_2D00_Link_2D00_Shunt.pdf). Acesso em: 29 jul. 2024.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

MANIAR, K. Comparing Shunt- and Hall-Based isolated current-sensing solutions in HEV/EV. **Texas Instruments**. Dallas, p. 1-3. 2023. Disponível em: [https://www.ti.com/lit/ab/sbaa293c/sbaa293c.pdf?ts=1750244657729&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ab/sbaa293c/sbaa293c.pdf?ts=1750244657729&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F). Acesso em: 29 jul. 2024.

NAGEL, L. W.; PEDERSON, D. O. **SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)**. EECS Department, University of California. Berkley. 1973. (Technical Report No. UCB/ERL M382).

OLCA, Y.; EKIM, M. N.; BOZ, A. F. Investigation of the effects of current measurement methods on servo motor dynamics. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER ELECTRONICS (Ee)*, 20., Novi Sad, Sérvia: [s.n.]. 2019.

PATSKO, L. F. **Tutorial, aplicações, funcionamento e utilização de sensores**. Londrina: Maxwell Bohr, 2006.

POPA, D. D. Module 6: Current Sensing. **NXP Community**, 2018. Disponível em: <https://community.nxp.com/t5/Model-Based-Design-Toolbox-MBDT/Module-6-Current-Sensing-Part-1-2/m-p/781020>. Acesso em: 03 dez. 2023.

PRADA, J. P.; SEDANO, N. A.; VIZCAYA, P. Simulación de conversores A/D de alta resolución empleando modulación Delta-Sigma. **Memorias XIII Simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial**, Universidad Santo Tomas. Bucaramanga, 2008. Disponível em: <https://publicaciones.ustabuca.edu.co/images/Documentos%20Publicaciones/simposio/1-parte1.pdf>. Acesso em: Acesso em: 03 dez. 2023.

RIBEIRO, J. J. H. P. **Estudo de saturação de transformadores de corrente conforme a norma IEC 61869-2 utilizando o software ATPDraw**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2024. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/79214/3/2024\\_tcc\\_jjhpribeiro.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/79214/3/2024_tcc_jjhpribeiro.pdf). Acesso em: 29 jul. 2023.

ROHM. Current sense shunt resistors. **Rohm**, 2023. Disponível em: <https://www.rohm.com/electronics-basics/resistors/shunt-resistors>. Acesso em: 29 jul. 2023.

SUZUKI, T. *et al.* Pulsewidth modulation control algorithm for a six-phase PMSM: reducing the current in the inverter capacitor and current sensing with resistors. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 66, n. 6, p. 4240-4249, ago. 2018.

VOGEL, K. *et al.* Inverter cost reduction owing to current-measurement integration in power modules. **Bodo's Power Systems**, Gieben, Alemanha, Janeiro 2019. Disponível em: [https://www.bodospower.com/restricted/downloads/bp\\_2019\\_01.pdf](https://www.bodospower.com/restricted/downloads/bp_2019_01.pdf). Acesso em: 05 jul. 2024.

WU, J. Delta-sigma ADC basics: understanding the delta-sigma modulator. **Texas Instruments**, 2015. Disponível em: [https://e2e.ti.com/blogs\\_/archives/b/precisionhub/posts/delta-sigma-adc-basics-understanding-the-delta-sigma-modulator](https://e2e.ti.com/blogs_/archives/b/precisionhub/posts/delta-sigma-adc-basics-understanding-the-delta-sigma-modulator). Acesso em: 09 ago. 2023.

ZHANG, Z.; LEGGATE, D.; MATSUO, T. Industrial Inverter Current Sensing With Three Shunt Resistors : Limitations and Solutions. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Ohio, v. 32, n. 6, p. 4577-4586, jun. 2017.

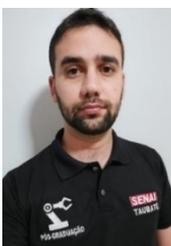
## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à instituição Faculdade de Tecnologia SENAI Félix Guisard e aos seus professores por compartilhar seus conhecimentos e a empresa Servnews, por permitirem a execução deste trabalho.

## Sobre os Autores:

---

<sup>i</sup> **Diego Katlen de Oliveira Coelho**



Graduado em Engenharia Elétrica pela UNIP, pós-graduação em Automação e Robótica pela Escola SENAI Felix Guisard (2023) e em Engenharia Eletrônica e Robótica pela Uninter (2024). Possui mais de 13 anos de experiência em reparo de placas eletrônicas de robôs industriais. Atualmente, atua como Coordenador de Manutenção no laboratório da empresa Servnews Robótica e Automação. Currículo ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7764-1240>



**ii Alex Pisciotta**



Doutorando na UNESP na área de Engenharia, mestre em Engenharia Mecânica, especialista em Automação Industrial e Controle, graduado em Engenharia Elétrica e Eletrônica, Técnico em Eletrônica. Possui 23 anos de experiência em indústrias do ramo automotivo e eletrônico, 7 anos de experiência acadêmica como professor de cursos técnicos, graduação e pós-graduação. Currículo ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3898-4263>

**iii Marco Rogério da Silva Richetto**



Doutorando em Engenharia (FEG/UNESP), graduado em Engenharia de Telecomunicações e mestrado em Automação Industrial e Robótica. Tem experiência como docente de ensino superior e técnico, nas áreas de Engenharia Elétrica e Engenharia de Automação e Controle. Consultor independente nas áreas de Telecomunicações e Automação Industrial. Currículo ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3755-4341>