

MEDIDOR IOT DE DEFORMAÇÃO DE BANDAGENS DE ROTORES DE MÁQUINAS ELÉTRICAS DE GRANDE PORTE USANDO EXTENSÔMETROS

Luis Augusto Vieira, Pablo Dutra Da Silva

Instituto Federal de Santa Catarina

Câmpus Jaraguá do Sul – Rau – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica

e-mail: luis.av@aluno.ifsc.edu.br, pablo.silva@ifsc.edu.br

Trabalho de Conclusão de Curso – 30/06/2022

Resumo – Com o advento da Internet das Coisas a busca por transmissão de dados de sensores teve crescimento exponencial, surgindo a proposta de desenvolvimento do estudo, construção e testes de um medidor de deformações aplicado em uma barra em flexão e um protótipo de célula de carga. Baseado na lei de Hooke para deformações no domínio elástico dos materiais. A concepção e o desenvolvimento deste medidor abordam desde a escolha de todos os componentes utilizados até o circuito condicionador de sinal. Testes experimentais de calibração indireta são realizados para correções e cálculo dos erros. Os resultados comprovam o funcionamento do medidor quando comparado a deformações obtidas em um programa de simulação.

Palavras-chave – Telemetria de Rotores, IoT, Medição de deformação, Extensômetro, ESP12E.

IOT METER OF ROTOR BANDAGE DEFORMATION OF LARGE ELECTRIC MACHINES USING EXTENSOMETERS

Abstract – With the advent of the Internet of Things, the search for transmission of sensor data has grown exponentially, giving rise to the proposal to develop the study, construction and testing of a strain gauge applied to a flexing bar and a load cell prototype. Based on Hooke's law for deformations in the elastic domain of materials. The design and development of this meter ranges from the choice of all components used to the signal conditioning circuit. Experimental tests of indirect calibration are performed to correct and calculate errors. The results prove the operation of the meter when compared to deformations obtained in a simulation program.

Keywords – Rotor Telemetry, IoT, Strain Measurement, Analog-to-digital, Extensometer, ESP12E..

I. INTRODUÇÃO

O elevado custo de fabricação e comercialização de máquinas elétricas girantes de grande porte, originou uma demanda

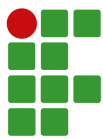
de sensoriaamentos para monitorar seu correto funcionamento. Conforme [1], no início do desenvolvimento e utilização das máquinas de grande porte, os circuitos de proteções eram simplórios e rudimentares. No entanto, atualmente, existem os mais avançados dispositivos de proteções e monitoramentos que transmitem dados para fora do rotor através de sistemas de telemetria com auxílio de receptores estacionários. Tal qual complementa [2], atualmente estão disponíveis os mais variados produtos para aplicações durante operações das máquinas, enviando dados do rotor via WiFi à receptores estacionários, diferente do começo no qual não era possível validar as hipóteses levantadas pertinentes ao controle de sincronismo das máquinas por ser realizável obter provas para comprovar as teses.

A utilização de sensores para medições de rotores em máquinas síncronas é uma das mais diversas aplicações para a indústria 4.0. O constante monitoramento das máquinas pode antecipar falhas, minimizando custos excessivos com manutenções e aumentando sua eficiência energética, monitorando em tempo real os dados relevantes para decisões estratégicas instantâneas [3].

Segundo [4] aproximadamente 40% dos danos são ocasionados em motores pelas falhas nos rolamentos e 10% pelas falhas nos rotores, com auxílio de sensores de temperatura, correntes nos estatores e vibrações tais falhas podem ser identificadas. Outro fator que pode aumentar as vibrações nos rotores segundo [3] são falhas fuga terra, prejudicando as isolações das bobinas e produzindo padrões de fluxos não simétricos, resultando em aquecimentos térmicos com potencial de acarretar em intensas vibrações e curvaturas no rotor.

O presente artigo propõe a criação de um medidor de deformação utilizando sensores do tipo extensômetro para identificar possíveis falhas por deformações em bandagens de rotores de máquinas elétricas de grande porte com transmissão de dados via protocolo WiFi.

Iniciando pela etapa de pesquisa e prototipação de um circuito condicionador de sinal para cálculo do coeficiente de deformações no microcontrolador, por meio das leituras de tensões em sua porta analógica-digital (AD). O projeto eletrônico desenvolvido utilizou a licença de estudante do programa Altium®. Este circuito condicionador de sinal deve ser aplicável tanto para medições dos coeficientes de



deformações de uma barra em flexão quanto para os coeficientes de deformações de uma célula de carga, com o microcontrolador transmitindo os dados para o banco de dados via protocolo WiFi.

Concluída a etapa do circuito condicionador de sinal, iniciaram-se os testes para validação do algoritmo de cálculo do coeficiente de deformação do microcontrolador variando a massa aplicada na barra em flexão. Utilizado a licença de estudante do programa Ansys® para obter os coeficientes simulados, tais dados possibilitaram a comparação entre os resultados práticos e simulados. A calibração do circuito condicionador de sinal utilizou o método de calibração indireta por meio de um multimedidor digital.

Com o algoritmo validado e os erros do medidor calculados, pode-se iniciar a pesquisa e projeto de um protótipo em nylon a ser acoplado ao eixo de um motor de indução trifásico (MIT) de pequeno porte. Este suporte deve possuir quatro furos passantes para inserção de cilindros maciços produzidos em aço SAE 1020, posicionados de forma simétrica para evitar vibração por desbalanceamento.

Em paralelo a pesquisa e projeto do protótipo em nylon ocorreu a pesquisa e projeto de um modelo de célula de carga para medir as deformações por meio de extensômetros. Esta célula de carga tem finalidade de conectar os cilindros ao suporte de nylon, recebendo toda força centrífuga causada pela velocidade angular do motor, ocasionando em uma deformação na célula de carga.

A utilização de um medidor de deformação aplicado em uma célula de carga que simula a expansão de bandagens de amarração dos barramentos de rotores de máquinas elétricas de grande porte irá permitir a identificação de falhas por meio do estresse mecânico (vibração) e deformação excessiva. Além de auxiliar no desenvolvimento e pesquisa de novas tecnologias para produtos, mantendo a integridade do sinal de deformação ao ser enviado pelo protocolo WiFi sem utilização de qualquer meio mecânico de contato entre o eixo do motor, qual o protótipo está rotacionando e a carga do motor.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Extensômetro de Resistência

O extensômetro é composto por um filamento de cobre sobreposto a um fino substrato polimérico utilizado para fixação sobre a superfície determinada. Regido pela segunda lei de ohm como princípio físico, sua resistência (R) depende do produto da resistividade elétrica (ρ) do condutor pelo comprimento (L) em razão da área de seção transversal (A) conforme Eq.(1).

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (1)$$

Tal sensor converte toda deformação mecânica em variação de resistência elétrica, assegurando que mesmo as menores variações podem ser processadas pelos circuitos eletrônicos. Na indústria o extensômetro é empregado como um meio auxiliar para análises e obtenção de dados das máquinas e

estruturas, fornecendo informações importantes para correções ou melhorias [5].

De acordo com [6] a equação que descreve o coeficiente de deformação (ϵ) é a razão da variação do comprimento (ΔL) pelo comprimento inicial (L_o) demonstrado na Eq. (2), também descrita pela razão da variação da resistência (ΔR) pelo produto do fator de deformação (k) e a resistência inicial (R_o) Eq.(3). O fator de deformação (k) é unidirecional e fornecido pelo fabricante no catálogo do produto.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta R}{k R_o} \quad (3)$$

B. Ponte de Wheatstone

As deformações as quais os extensômetros estão submetidos são a milionésima parte do metro, resultando em pequenas variações de suas resistências. De acordo com [6] é indicado a utilização de uma ponte de Wheatstone, que mede pequenas diferenças de potencial entre seus braços. Um braço é a estrutura com duas resistências em série alimentada por uma diferença de potencial elétrico. Conforme [6], recomenda-se utilizar o arranjo completo da ponte de Wheatstone com quatro extensômetros, para compensar desbalanceamentos térmicos em suas resistências.

Pode-se verificar na Figura 1 que ao aplicar uma tensão elétrica na ponte de Wheatstone (U_E) a variação da tensão diferencial (U_A) entre os braços é proporcional a variação das suas resistências. A Eq.(4) pode ser utilizada para o cálculo do coeficiente de deformação, tal equação também é conhecida como equação genérica para qualquer arranjo dos extensômetros [6].

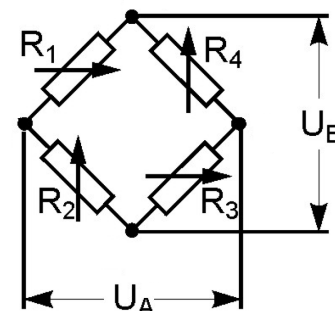


Fig. 1. Ponte de Wheatstone completa. Retirado de [6]

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (4)$$

C. Barra em Flexão com quatro extensômetros

De acordo com os estudos de [7], para os materiais que respeitem a lei de Hooke, pode-se afirmar sobre a deformação sofrida pelo extensômetro fixado na superfície inferior da barra submetida a força de compressão tem o mesmo valor em módulo do coeficiente de deformação fixado na superfície superior submetido a uma força de tração. Essa consideração só é válida quando os extensômetros estão orientados a mesma distância do ponto de engaste da barra e com mesmo sentido ao da força gravitacional.

Utilizando as consideração de [7] e a Eq. (4) conhecida como equação geral da ponte de Wheatstone, obtém-se a Eq. (5) que calcula o coeficiente de deformação para uma ponte de Wheatstone completa. Valida para os casos dos extensômetros fixados conforme a Figura 2.

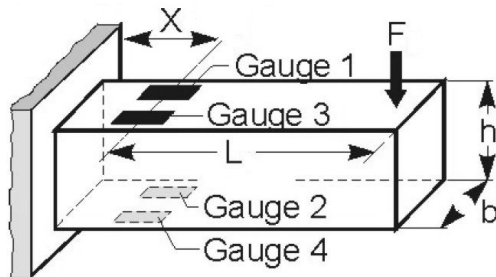


Fig. 2. Barra engastada sob flexão. Retirado de [6]

$$\varepsilon = \frac{U_A}{kU_E} \quad (5)$$

D. Circuito de Condicionamento de Sinal

Sabendo que a deformação a ser medida é a milionésima parte do metro, a variação da resistência elétrica dos extensômetro pode ser considerada pequena, como consequência, a diferença de potencial fornecida pela ponte de Wheatstone se aproxima das centenas de microvolts. Para estes valores de tensões costuma-se utilizar circuitos com amplificadores operacionais elevando a níveis que o microcontrolador consiga mensurar, assim garantindo medidas precisas e controles de processos [8].

A topologia utilizada para processar sinais tão pequenos é a do amplificador diferencial em configuração de amplificador de instrumentação conforme a Figura 3. A vantagem de utilizar um amplificador diferencial é sua elevada taxa de rejeição a sinais de modo comum, tais sinais quando amplificados produzem flutuações, perdas de exatidão das medidas e até espúrios no sinal da saída [7] e [8].

Outra configuração do amplificador de diferenças que será utilizada para o circuito do condicionador de sinal é a do amplificador subtrator, possibilitando a subtração de níveis de tensões indesejáveis. Segundo [8] e após considerações dos resistores conforme a Figura 4, a tensão de saída do amplificador subtrator é a subtração da tensão na entrada inversora (V_-) do

amplificador diferencial pela tensão na entrada não inversora (V_+) conforme a Eq. (6).

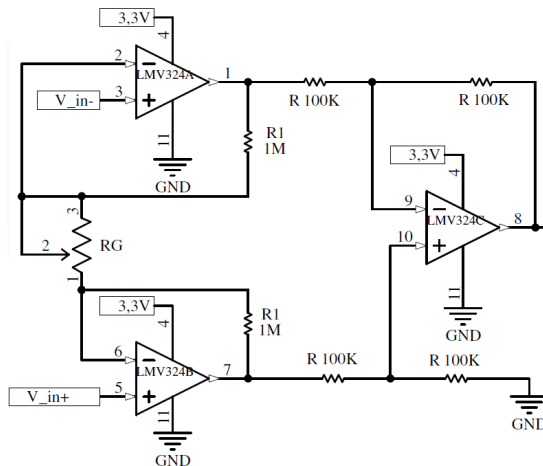


Fig. 3. Amplificador de Instrumentação. Fonte: Autor

$$V_{Saída} = V_+ - V_- \quad (6)$$

O amplificador operacional utilizado foi o LMV324 [9], devido seu baixo custo e baixo consumo de potência com “Low Voltage” faixa de alimentação simples de 2,7 à 5,5V, “rail-to-rail” de 0,01 à 2,69V quando alimentado com 2,7V e quatro amplificadores operacionais em seu encapsulamento.

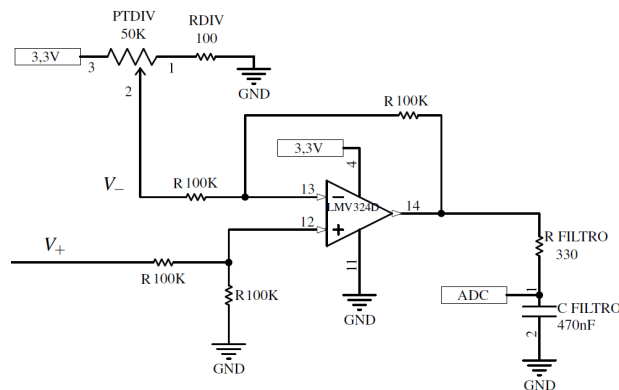


Fig. 4. Amplificador Diferencial. Fonte: Autor.

E. Microcontrolador

A escolha do ESP12E como microcontrolador para os cálculos do coeficiente de deformação foi devido seu módulo WiFi integrado a sua placa atuar no modo AP, cliente, ad hoc ou WiFi Direct, dimensões compactas e sua porta AD possuir uma resolução de 10 bits com a limitação da tensão de 1V [10] e [11].

Para baixar o algoritmo direto na memória interna do ESP12E foram necessários resistores de pull-up com valores de 10kΩ nos terminais EN, IO0, IO2, RST e resistor de pull-down com valor de 10kΩ no terminal IO15. Utilizado dois botões para conexão do 0V aos terminais, RST para reiniciar o ESP12E

e IO0 para colocar o ESP12E em modo de programação. O modo de inicialização pela memória SPI Flash apenas funciona se as ligações nos terminais IO0, IO2 e IO15 seguirem conforme ilustra a Figura 5.

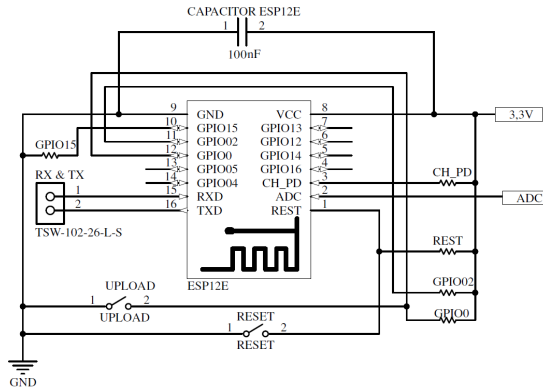


Fig. 5. Esquema elétrico para download de firmware na memória SPI Flash do ESP12E. Fonte: Autor.

III. METODOLOGIA

A. Metodologia, projeto e dimensionamento da barra em flexão

Iniciou-se pelo estudo de deformação de uma barra em flexão, definida com dimensões de 300mm (L) X 20mm (b) X 5mm (h) confeccionada em aço SAE 1020 conforme Figura 2. A mesma foi desenhada no programa de simulações mecânicas Ansys® e submetido a ensaios de deformações escalonados a massas padrões de 102g, limitado a 612g pela quantidade de padrões disponíveis durante os ensaios.

A simulação utiliza a força (F) como parâmetro de cálculo do coeficiente de deformação, considerado a aceleração da gravidade como uma constante no valor de $9,81\text{m/s}^2$ (g), calculado então as forças resultantes pela Eq.(7) e inserido no programa. Os coeficientes de deformações obtidos no programa de simulação foram na linha média de fixação situada a 50mm do ponto de engaste, distância X verificada na Figura 2, mesmo local em que foram fixados os extensômetros na barra. A Tabela III contém os coeficientes de deformações e deformações calculadas através da Eq. (2).

$$F = mg \quad (7)$$

Antes de iniciar o projeto do circuito de condicionamento de sinal, foi definido o extensômetro de modelo BF350-3AA com coeficiente de deformação de 2,2 e comprimento de 4,7mm. O regulador de tensão AMS1117 de 3,3V para alimentar o microcontrolador ESP12E, ponte de Wheatstone e o amplificador operacional LMV324.

Após definido o modelo do extensômetro e tensão de alimentação da ponte de Wheatstone (U_E) pode-se calcular pela Eq. (5) a maior diferença de potencial (U_A) na ponte. Mediante o coeficiente de deformação simulado para massa de 612 [g] de $83,5\mu\text{m/m}$ retirado da tabela III, calculou-se uma tensão

diferencial de $606,21\mu\text{V}$. Sabendo essa tensão, foi estipulado o ganho (A_V) do amplificador de instrumentação em 1000 para uma leitura de $606,2\text{mV}$ na porta AD com uma margem de tolerância para não extrapolar a tensão máxima permitida na porta AD.

O projeto do circuito condicionador de sinal iniciou pela definição do uso de uma bateria de 9V alcalina da marca Elgin para alimentar o regulador de tensão AMS1117. A necessidade de uma tensão de 3,3V para o circuito de condicionamento de sinal veio da tensão de alimentação do ESP12E, recomendado no catálogo do produto.

A Figura 6 apresenta o circuito eletrônico projetado do regulador de tensão, acrescido de um capacitor eletrolítico de $10\mu\text{F}$, um capacitor cerâmico de 100nF ambos em paralelo a saída do regulador e terminais para alimentação de circuitos externos.

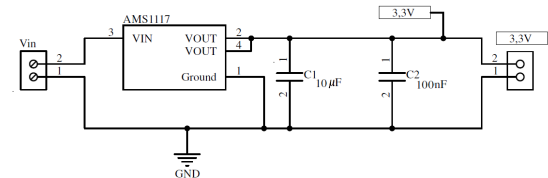


Fig. 6. Diagrama eletrônico do regulador de tensão 3,3 [V]. Fonte: Autor.

Através do ganho do amplificador de instrumentação, definido anteriormente, foram estipulados os valores dos resistores do circuito condicionamento de sinal. O resistor R de valor de $100\text{k}\Omega$ com precisão de 10%, R_1 de $1\text{M}\Omega$ com precisão de 10% e R_G , um trimpot multivoltas de $50\text{k}\Omega$, ajustado em aproximadamente $2\text{k}\Omega$ proveniente do cálculo pela Eq. (8).

$$A_V = 1 + \frac{2R_1}{R_G} \quad (8)$$

A Figura 3 mostra o projeto eletrônico do circuito amplificador de instrumentação projetado com os componentes detalhados anteriormente, a Figura 4 ilustra o circuito do amplificador subtrator. Durante esta etapa foi identificado a necessidade de um filtro passa-baixas RC para atenuar os ruídos proveniente das frequências maiores a 1kHz. Escolhido o capacitor cerâmico 470nF e através da Eq. (9) calculou-se o resistor de 330Ω utilizado no filtro da porta AD do ESP12E.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (9)$$

A Figura 5 ilustra o esquemático eletrônico para o circuito de alimentação, de download do algoritmo e conexão da porta AD do ESP12E ao filtro passa-baixas junto ao microcontrolador. Finalizando a etapa de projeto com o circuito de conexão dos extensômetros na ponte de Wheatstone. O esquemático eletrônico projetado, pode ser utilizado para uma aplicação com quatro extensômetros ou com dois extensômetros em diagonal e dois pontenciômetros multivoltas conforme a Figura 7.

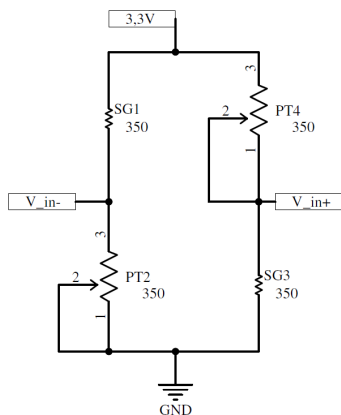


Fig. 7. Esquema eletrônico de alimentação e conexão da ponte de Wheatstone. Fonte: Autor.

Com todos os circuitos eletrônicos projetados, foi iniciado a etapa de desenho das trilhas para conexão e soldagem dos componentes, como resultado tem-se o plano superior na Figura 8 e o resultado do plano inferior na Figura 9. No plano superior foi projetado uma malha com a tensão 3,3V e no plano inferior uma malha conectada a referência, funcionando como um grande capacitor para atenuar as oscilações da tensão.

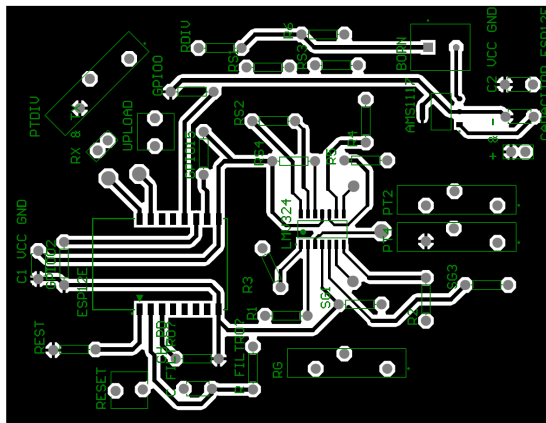


Fig. 8. Trilhas PCI plano superior. Fonte: Autor.

O processo de confecção da PCI necessitou de uma placa de fenolite nas medidas de 130mm X 100mm, limpá-la da oxidação com auxílio de uma palha de aço e remover a gordura superficial com auxílio de água e detergente líquido.

A trilhas da PCI que não serão corroídas pela solução de perclorato de ferro foram impressas em uma impressora a laser em papel fotográfico. Já posicionamento dos leiautes sobre a placa de fenolite contou com auxílio de três furos para alinhamento das trilhas.

Transferido o leiaute da PCI por processo térmico com auxílio de um ferro de passar roupas até transferência completa de todas as trilhas. O processo de corrosão durou aproximadamente quinze minutos e os furos foram realizados de forma manual com uma microretífica e broca de 1mm.

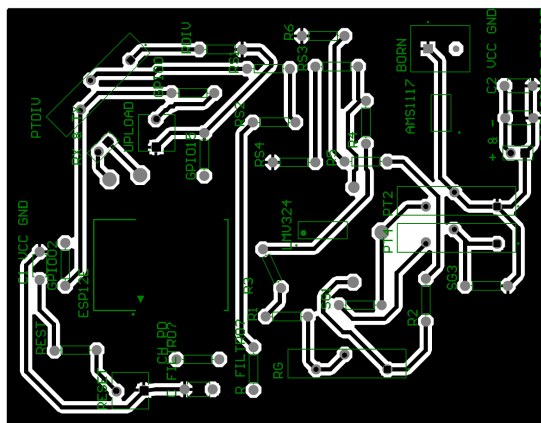


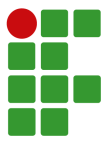
Fig. 9. Trilhas PCI plano inferior. Fonte: Autor.

A soldagem dos componentes foi a etapa seguinte, qual contou com auxílio do multímetro digital com resolução de 6½ dígitos do modelo DMM4050 da marca Tektronix®. Após soldados os jumpers, o regulador de tensão AMS1117, os capacitores e alimentação de 9V, iniciou-se as medições das tensões nas trilhas de alimentações verificando possíveis curtos-circuitos ou trilhas interrompidas. Concluída essa etapa, passou-se para o processo de fixação do amplificador operacional LMV324 e os resistores do circuito do amplificador de instrumentação bem como a fixação do potenciômetro de ganho.

Nessa etapa foi verificado que para ajuste da resistência do RG seria necessário adaptar um jumper para interromper o circuito e medir a resistência do RG sem influência da impedância dos terminais do LMV324. As entradas diferenciais do amplificador de instrumentação foram conectadas à referência para verificar o correto funcionamento, o mesmo limitou o nível de tensão de sua saída ao valor de tensão dentro da faixa de offset indicado na ficha de dados do componente [9] entre 1,7mV e 6mV.

Verificado o correto funcionamento do circuito amplificador de instrumentação e suas conexões, foi iniciado a etapa de fixação dos extensômetros na barra de aço SAE 1020 confeccionada pelos técnicos do suporte de mecânica do IFSC Campus Rau. O processo de fixação contou com a utilização de palha de aço para limpeza das oxidações e álcool isopropílico para limpeza da gordura. Com auxílio de uma fita adesiva, foram posicionados os quatro extensômetros conforme indicado na Figura 2 na linha média (X) com distância de 50mm do ponto de engaste da barra. Soldado os cabos de conexões dos extensômetros na PCI e medido a tensão diferencial inicial com a barra sem carga. Ao abrir o jumper do circuito do resistor RG se obtém a tensão diferencial entre as saídas do primeiro estágio do amplificador de instrumentação, esta diferença de potencial pode influenciar na tensão de amplificação por somar com a tensão diferencial da ponte.

Com o correto funcionamento do circuito do amplificador de instrumentação, foi iniciado a etapa de fixação dos componentes



do divisor de tensão que irá alimentar a entrada inversora do amplificador subtrator e os componentes para o amplificador subtrator. Nessa etapa não havia sido soldado o capacitor do filtro passa-baixas, interrompendo a conexão da trilha entre a saída do circuito condicionador de sinal e a porta AD do ESP12E, este componente será soldado apenas quando o circuito condicionador de sinal estiver devidamente ajustado para evitar sobre tensões na porta AD. Através do trimpot do divisor de tensão, ajustou-se a tensão de saída do amplificador subtrator para valores próximos de 0V na condição do estado inicial da barra em flexão sem carga aplicada.

Por último, foram soldados os resistores de pull-up e pull-down do circuito eletrônico do ESP12E, botão de upload, botão de reset e o microcontrolador ESP12E, permitindo baixar o algoritmo que faz a leitura da porta AD com resolução de 10 bits. A tensão analógica do conversor AD utiliza uma resolução digital de 1024 níveis de tensões diferentes. Sabendo a tensão máxima da porta AD, se obtém a informação que a cada 976,56 [uV] o ESP12E muda seu nível de tensão digital. O algoritmo para conexão via Wifi com o servidor e armazenamento no banco de dados está sendo desenvolvido em outro projeto de pesquisa do campus, viabilizando a utilização no presente artigo sem fazer parte dos objetivos.

A sequência dos botões para colocar o ESP12E em modo programação se dá mantendo o botão de upload pressionado enquanto é realizado um pulso no botão de reset conforme a Figura 5. O conversor USB/Serial precisa estar com o jumper de tensão ajustado para 3,3V e com as referências interconectados através do terminal de referência disponibilizado na PCI, atentar para os terminais de RX e TX do conversor estarem conectado de forma cruzada ao terminais de RX e TX do ESP12E.

Com mais essa etapa concluída foram variados os pesos na extremidade oposta a fixação da barra em flexão, na massa de 612g, definida como máximo peso, foi medido a tensão na saída do circuito condicionador de sinal e verificado que não passou da tensão máxima permitida na porta AD. Soldado o ultimo componente do circuito condicionador de sinal, o capacitor do filtro passa-baixas. Obtidos os coeficientes de deformação e tensão na porta AD do ESP12E pelo acesso ao banco de dados rodando no servidor.

B. Metodologia, projeto e dimensionamento do protótipo mecânico

O estudo do protótipo rotacional que irá ser fixado no eixo de um MIT iniciou com a limitação do diâmetro máximo de 140mm devido a largura do material de nylon disponível no campus para confecção do suporte. Durante todo o projeto do suporte de nylon, foi considerado simetria evitando qualquer desbalanceamento e vibrações por distribuição desigual de massa do nylon. Os furos que serão inseridos os cilindros de aço SAE 1020 possuem largura de 21mm e comprimento de 22mm com raio de 10,5mm e distância do centro de 50mm conforme pode ser visto na Figura 10.

Os furos para fixação da célula de carga no suporte de nylon

foram M3 com distância do centro do suporte de 25mm e altura projetada do suporte de 51mm conforme a Figura 12. Os cilindros a serem inseridos dentro dos furos do suporte possuem diâmetro de 20mm conforme Figura 11, diâmetro menor que o furo no nylon. Determinadas para que o cilindro possa deslizar em sentido da força centrífuga e transferir toda a força para os extensômetros através de deformação sem atrito com o nylon.

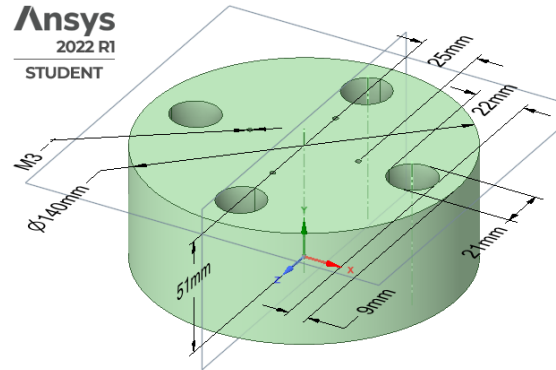


Fig. 10. Suporte de nylon para fixação no eixo de motores elétricos. Fonte: Autor.

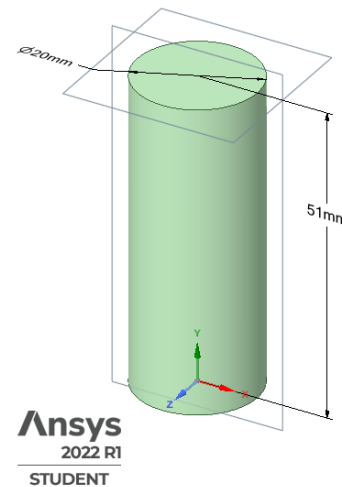


Fig. 11. Cilindro de aço SAE 1020. Fonte: Autor.

A célula de carga foi projetada para possuir uma área de fixação dos extensômetros de 8mm de comprimento por 6mm de largura e espessura de 1mm suportando uma força máxima de 1800N (P_{max}), calculado pela Eq. (10) com valor de área de $6\mu m^2$ e tensão de escoamento de 300GPa. Em seus pontos de fixações a espessura da célula de carga é de 3mm garantindo que a deformação ocorra na região projetada para fixação dos extensômetros. A célula de carga possui um raio de 18mm entre a espessura de 1mm e 3mm para diminuir os pontos de singularidade de tensão, transferindo toda a deformação para a região de fixação do extensômetro.

$$P_{max} = \sigma A \quad (10)$$

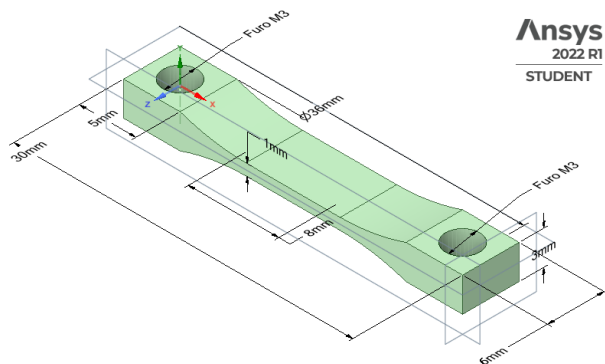
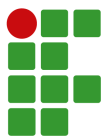


Fig. 12. Célula de carga desenvolvida. Fonte: Autor.

Após a confecção do suporte de nylon, o cilindro maciço e a célula de carga conforme a Figura 13 do conjunto, iniciou-se a alteração do circuito de condicionamento de sinal da barra em flexão para a medição de deformação da expansão das bandagens de amarração dos rotores. A instalação da célula de carga para fixação do cilindro ao suporte de nylon utilizou parafusos com chanfros, rosca M3 e comprimento de 10mm. Durante a etapa de fixação foram identificados problemas no nylon, por não permitir um torque similar ao torque realizado no aperto entre a célula de carga e o cilindro maciço.

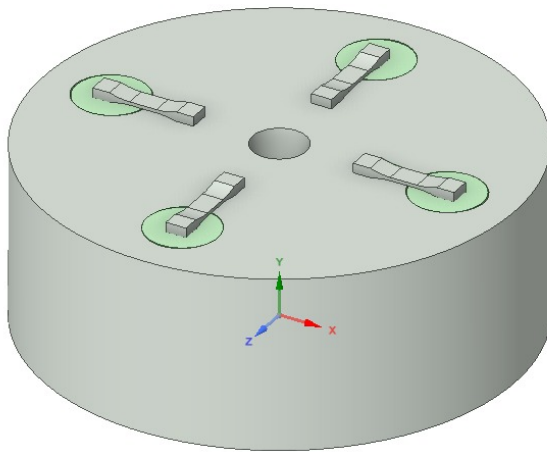


Fig. 13. Conjunto completo do protótipo. Fonte: Autor.

Seguido da fixação dos extensômetros na célula de carga, que também utilizou palha de aço para limpeza da oxidação e remoção da gordura com álcool isopropílico. Soldados no circuito de condicionamento de sinal os dois trimpots projetados para a ponte de Wheatstone e os cabos de conexões dos extensômetros, iniciando os testes com o circuito condicionador de sinais fixados no suporte de nylon, publicando os dados no banco de dados.

C. Calibração Indireta

A calibração do equipamento foi realizada com as informações da barra em flexão e replicada para a célula de carga. Com a indisponibilidade de recursos para aferição

de medições de deformações e comprovação da precisão do medidor, foi utilizado o método de calibração indireta. A calibração se deu através da leitura de tensão com o multímetro na porta AD do ESP12E, convertido em coeficiente de deformação e determinado este como o valor verdadeiro convencionado (VVC) devido a sua precisão de leitura.

Se tratando de um método de calibração indireto e todas medições disponibilizadas pelo medidor serem expressas em termos de deformação foi utilizado a Eq.(5) para converter a tensão lida pelo multímetro em deformação, para os cálculos dos erros do medidor.

Foram obtidas 100 amostras pelo multímetro e 105 amostras pelo medidor de deformação. O fator “t” de “Student” para a probabilidade de 95,45% e número de 100 amostras foi 2,025. A Eq.(11) mostra como é calculado o erro sistemático e a correção (C), sendo $\bar{I}$ a média das indicações do medidor.

O calculo do erro aleatório utilizou as equações Eq.(12) e Eq.(13). A equação Eq.(12) mostra como é calculado a incerteza padrão (u) e a Eq.(12) mostra como é calculado a repetitividade (R_e) do medidor.

$$C = VVC - \bar{I} \quad (11)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n E_{a_i}^2}{n-1}} \quad (12)$$

$$R_e = \pm t * u \quad (13)$$

IV. RESULTADOS

Durante a etapa de corrosão da PCI a ser utilizada foram encontrados dificuldades com as trilhas. Foram corroídas quatro placas até corrigir problemas de curto-circuito entre as trilhas e não condutividade. A quarta PCI confeccionada foi desenvolvida conforme as etapas descritas na metodologia, testando e validando cada etapa individual do circuito de condicionamento de sinal. Após isso foi realizado o ajuste do valor de resistência do RG, utilizando a escala de resistência do multímetro, variando o trimpot até indicar aproximadamente 2kΩ.

Com o ganho ajustado foram iniciados os testes do circuito do amplificador de instrumentação. Durante a leitura de tensão da saída do amplificador de instrumentação com a barra em flexão sem carga, a tensão medida pelo multímetro foi de 969,2603mV, quando o esperado era, o ganho teórico de 1000 multiplicado pela tensão diferencial da ponte de 76,16668μV que resultaria no valor de 76,16668mV. Tal discrepância necessitou de uma análise mais detalhada do problema, até identificar no decorrer dos testes que ao retirar o jumper do trimpot RG, existia uma tensão diferencial entre as saídas do primeiro estágio de amplificação do amplificador de instrumentação no valor de 893,2603μV. Essa leitura de diferença de tensão ocorre devido a faixa de offset das saídas dos amplificadores operacionais.



Quando calculado a tensão de saída para a barra em flexão sem carga, por meio da soma dos valores de tensão diferencial de $893,2603\mu V$ entre as saídas e tensão na ponte de Wheatstone de $76,16668\mu V$, multiplicando pelo ganho teórico, resulta em uma tensão de $969,42698\mu V$ próxima a medida pelo multímetro, confirmando que a diferença de potencial entre as saídas dos amplificadores operacionais influencia significativamente no processo de medição do coeficiente de deformação.

A Tabela I mostra os valores de ganhos para cada massa aplicada na barra em flexão, considerando a tensão diferencial entre as saídas dos amplificadores operacionais constante ao longo de todos os testes. O cálculo do ganho médio bem como sua repetitividade foi de $945,1629691 \pm 31,1659521$. A diferença entre o ganho real em relação ao projetado pode ter sido ocasionada pela precisão dos componentes utilizados no circuito de condicionamento.

TABELA I

Ganhos de acordo com testes de massas

Massa (g)	0	102
Tensão Diferencial Total (μV)	969,42698	1088,6734
Tensão Amplificada (V)	0,8959609	1,022503
Ganho Médio	924,217005	939,2192369
Massa	204	306
Tensão Diferencial Total (μV)	1217,2573	1337,9391
Tensão Amplificada (V)	1,141092	1,266318
Ganho Médio	937,4287589	946,4690882
Massa	408	510
Tensão Diferencial Total (μV)	1453,8762	1593,0194
Tensão Amplificada (V)	1,389474	1,519618
Ganho Médio	955,7031059	953,9230972
Massa	612	
Tensão Diferencial Total (μV)	1714,4719	
Tensão Amplificada (V)	1,644488	
Ganho Médio	959,1804917	

Finalizando os testes do circuito condicionador de sinal, iniciou-se o ajuste de tensão da saída do circuito subtrator através da leitura realizada pelo multímetro na porta AD do ESP12E para uma flexão de barra sem carga. Aplicou-se o ajuste no trimpot do divisor de tensão até obter a menor tensão na saída do circuito, obtido a tensão de $1,055774mV$ no multímetro. Essa tensão após convertida em termos de deformação resultou no coeficiente de deformação de $0,1538606788\mu m/m$, utilizada como o VVC para o cálculo de correção do erro sistemático. Repetidos os testes com as cargas já estipuladas chegou-se nos

resultados disponíveis na Tabela II e os erros na Tabela V.

A Tabela III e Tabela IV apresentam os valores dos coeficientes de deformações e as deformações submetidas para a barra em flexão obtidos através de simulação e cálculo pela tensão lida pelo multímetro.

TABELA II

Barra em Flexão - Deformação Medidor

Massa (g)	Coef. Deformação (m/m)	Deformação (μm)
0	0,000000145423	0,00068349
102	0,0000111196	0,0522619
204	0,0000241117	0,127425
306	0,0000437568	0,205657
408	0,0000598416	0,281256
510	0,0000764924	0,359514
612	0,0000934132	0,439042

TABELA III

Barra em Flexão - Deformação Simulada

Massa (g)	Coef. Deformação (m/m)	Deformação (μm)
0	0	0
102	0,0000139	0,0653
204	0,0000278	0,13066
306	0,0000417	0,19599
408	0,0000557	0,26179
510	0,0000696	0,32712
612	0,0000835	0,39245

TABELA IV

Barra em Flexão - Deformação Multímetro

Massa (g)	Coef. Deformação (m/m)	Deformação (μm)
0	0,000000144984	0,0006814
102	0,000011086	0,0521041
204	0,0000270298	0,12704
306	0,0000436246	0,205036
408	0,0000596608	0,280406
510	0,0000762613	0,358428
612	0,0000931335	0,437727

Ao calcular o percentual da repetitividade em relação a deformação do medidor, é possível verificar que ela se torna mais precisa conforme se aproxima ao fundo de escala. Um dos fatores que contribui para esse problema é a proporção entre a tensão de conversão do AD em relação a tensão amplificada pelo circuito condicionador de sinal.

De forma contrária acontece com o erro entre a deformação do medidor em relação a deformação do simulador. É possível



verificar durante as comparações conforme a carga na barra é aumentada, aumenta também a diferença percentual entre as deformações, o pior caso ocorre com a massa de 612g com um erro percentual de 11,87%. Essa diferença está muito além da faixa de repetitividade e pode ter sido ocasionada pela escolha dos componentes com tolerâncias elevadas e não indicadas para utilização em medidores.

TABELA V
Erros de Deformação do Medidor

Massa (g)	0	102
Re (μm)	0,000572534	0,009260922
C ($\mu\text{m/m}$)	-0,500237741	-0,116734275
VVC ($\mu\text{m/m}$)	0,145423416	11,11956336
Massa (g)	204	306
Re (μm)	0,006954524	0,015536237
C ($\mu\text{m/m}$)	-0,058543306	-1,371579677
VVC ($\mu\text{m/m}$)	27,11174931	43,75680441
Massa (g)	408	510
Re (μm)	0,021664187	0,015639839
C ($\mu\text{m/m}$)	-1,861304359	-2,116807851
VVC ($\mu\text{m/m}$)	59,84161157	76,49243802
Massa (g)	612	
Re (μm)	0,015396778	
C ($\mu\text{m/m}$)	-2,57893964	
VVC ($\mu\text{m/m}$)	93,41319559	

Com as análises e erros do medidor calculados iniciou-se os testes da célula de carga. Durante os primeiros testes rotacionais foram encontrados problemas na leitura de deformação do medidor. Ao analisar o circuito de condicionamento de sinal foi identificado que os trimpots utilizados na ponte de Wheatstone estavam com problemas de flutuações nos valores de suas resistências, possivelmente era algum mal contato quando rotacionados e submetidos a forças centrífugas.

Com o protótipo em bancada e ao pressionar sobre os trimpots de forma manual, resultou em uma subtração do valor de offset do circuito pela diferença de potencial na ponte. A solução encontrada foi utilizar dois extensômetros no lugar deles e fixá-los no protótipo de nylon em regiões que não sofre deformação, essa correção é relevante ao considerar que uma ponte com quatro extensômetros compensa variações de temperatura no ambiente de testes.

Ainda em bancada durante a correção da tensão de saída da célula de carga para o caso sem deformação, foi identificado que o posicionamento dos extensômetros na ponte de Wheatstone ocasionava um decremento da tensão diferencial na ponte, inverso da tensão diferencial para a barra em flexão. A solução encontrada foi ajustar a tensão no AD do ESP12E próximo de 1V, quando submetido a velocidades angulares a tensão lida pela porta AD do microcontrolador diminuiu. Esta correção também foi replicada no processo de cálculo de deformação no algoritmo, resultando nos valores da Tabela VI. Importante

mentonar que as medições realizadas ocorreram em um teste único na frequência de 60Hz com pouco tempo de duração, devido ao medidor parar de funcionar e não houve tempo hábil para solução do problema. Não sendo possível relacionar as medidas de deformação com vibrações.

TABELA VI
Deformação Célula de Carga 60Hz

	Coefficiente Deformação	Deformação
ESP12E	0,000030174	0,141818
Ansys	0,0000388	0,18

V. CONCLUSÃO

O objetivo principal era a construção de um medidor de deformações com transmissão de dados via protocolo WiFi, qual foi validado por meio das comparações das deformações entre os resultados simulados e práticos, com um erro máximo de 11,87% para 602g de massa aplicada na barra em flexão.

Independente dos problemas encontrados durante a construção do circuito condicionador de sinal, o mesmo funcionou de forma compatível ao esperado, amplificando a tensão diferencial da ponte de Wheatstone com ajuste da tensão de saída para utilização tanto na barra em flexão quanto para célula de carga.

Ao analisar os valores de repetitividade calculadas com as deformações no medidor e comparar com o as deformações através do multímetro é plausível afirmar que tais erros se mostraram dentro da faixa de repetitividade. Foi necessário aplicar uma correção no microcontrolador para leitura de tensão, porém é facilmente implementável em seu algoritmo. Tais alegações permitem afirmar que para o presente estudo a escolha do microcontrolador ESP12E se mostrou viável.

O suporte fixado no eixo do motor construído em nylon serviu para o estudo deste artigo, mas fica a sugestão do autor a escolha de outro material com uma rigidez maior para fixação da célula de carga. Embora coletados poucos dados com a célula de carga, é possível validar a mesma como um instrumento de medição de deformações.

Devido aos atrasos durante a etapa de corrosão e testes do circuito condicionador de sinal não foi possível obter mais resultados para a etapa de testes com a célula de carga, ficando como trabalho futuro identificar o erro e corrigi-lo.

Como propostas de melhoras futuras, está a utilização de um circuito integrado com amplificador de instrumentação, sem precisar utilizar amplificadores operacionais na estrutura de amplificador de instrumentação, diminuindo a tensão de offset amplificada pelo mesmo. Bem como utilização de componentes com precisões maiores para diminuir os erros de deformações e a diferença do ganho real e teórico.



VI. AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em especial ao meu orientador, Prof. MSc. Pablo Dutra da Silva, por seu apoio e ensinamentos durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por acreditar em meu potencial, foi de grande importância para a realização deste trabalho.

Aos Profs. Drs. Marcos Antonio Salvador e Joel Stryhalski, por todo auxílio e contribuição para a execução das etapas deste trabalho. Também para meu colega de faculdade Matheus Willian Sprötte que direta ou indiretamente foi importante para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Hofmann, D. Phares, “Remote monitoring and diagnostics of large rotating machinery”, in *Cement Industry Technical Conference, 2003. Conference Record. IEEE-IAS/PCA 2003*, pp. 47–55, 2003, doi: 10.1109/CITCON.2003.1204708.
- [2] T. L. Borim, J. Casey, T. Begalke, C. Ogawa, “Benefits of monitoring the rotor electrical quantities and transmitting by wireless communication”, in *2015 IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC)*, pp. 1–11, 2015, doi:10.1109/PCICON.2015.7435111.
- [3] C. V. Maughan, J. M. Reschovsky, “Advances in motor and generator rotor health”, in *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 1–4, 2010, doi: 10.1109/ELINSL.2010.5549730.
- [4] A. Decner, “Telemetry diagnostic capabilities for asynchronous motors”, in *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, pp. 1841–1845, 2012, doi:10.1109/ICEIMach.2012.6350132.
- [5] S. N. Minela, *et al.*, “Extensometria: estudo e aplicação”, *Federal University of Santa Catarina (UFSC)*, 2017.
- [6] K. Hoffmann, *Applying the Wheatstone bridge circuit*, HBM Germany, 1974.
- [7] P. H. Guadagnini, F. d. Rocha, V. Barlette, “Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força”, *Latin-American Journal of Physics Education*, vol. 5, no. 4, pp. 753–762, 2011.
- [8] C. K. Alexander, M. N. Sadiku, *Fundamentos de circuitos elétricos*, AMGH Editora, 2013.
- [9] onsemi, “LMV321, LMV358, LMV324”, *Prod Datasheet*, 2015.
- [10] S. de Oliveira, *Internet das coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry PI*, Novatec Editora, 2017.
- [11] E. Datasheet, “ESP-12E WiFi Module”, *Prod Datasheet*, 2015.



LUIS AUGUSTO VIEIRA

MEDIDOR IOT DE DEFORMAÇÃO DE BANDAGENS DE ROTORES DE MÁQUINAS ELÉTRICAS DE GRANDE PORTE USANDO EXTENSÔMETROS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Elétrica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 30 de junho de 2022.

Prof. MSc. Pablo Dutra da Silva
Orientador
IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau

Prof. Msc. Elissa Soares de Carvalho
WEG

Prof. Msc. Carlos Henrique Vieira
WEG

Prof. Msc. Pablo Dutra da Silva
IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau