

Pedro Henrique de Camargo Penteado Froner

**AUTOMAÇÃO DE
TACÔMETRO MAGNÉTICO
PARA COLUNAS DE
PERFURAÇÃO.**

Projeto de Graduação

Trabalho apresentado ao final do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica PUC - Rio como parte dos requisitos à conclusão do curso de Engenharia Mecânica.

Orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa

Rio de Janeiro, Julho de 2015.

Pedro Henrique de Camargo Penteado Froner

**AUTOMATION OF A
MAGNETIC TACHOMETER
FOR DRILLING COLUMNS.**

Undergraduate Final Project

Paper presented at the end of the Mechanical Engineering Undergraduate Course of the Mechanical Engineering Department PUC – Rio as part of the requirements for completing the Mechanical Engineering Course.

Tutor: Carlos Roberto Hall Barbosa

Rio de Janeiro, July 2015.

Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu pai Alfredo Froner e à minha mãe Nereida de Camargo Penteado Froner, que sempre me apoiaram e acreditaram em mim mesmo nos momentos mais difíceis dessa caminhada.

Pedro Henrique de Camargo Penteado Froner

Agradecimentos

Ao meu orientador, Dr. Carlos Hall, primeiramente pela disponibilidade e dedicação a este projeto e claro também pelos conselhos e teorias, sempre de grande ajuda.

A minha namorada, Camila R. Schiavo, pelo apoio e motivação durante todo esse tempo juntos.

Aos meus amigos e companheiros de curso da PUC-Rio, que me fizeram seguir em frente, sempre me apoiando e ajudando sempre que precisei.

Aos meus amigos que sempre me ajudaram e apoiaram em minhas decisões.

Aos meus pais, que sempre me incentivaram e se preocuparam comigo durante esta jornada.

A Deus por ter me dado forças e coragem para continuar e concluir este meu sonho.

Pedro Henrique de Camargo P. Froner.

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original".

Albert Einstein

Resumo

Este projeto de graduação dá prosseguimento a outros três anteriores, buscando sempre aperfeiçoar o protótipo. O primeiro projeto foi de Jean Philippe Dines Labarrere, finalizado em dezembro/2013, no qual se desenvolveu um protótipo preliminar de um tacômetro magnético para coluna de perfuração, tendo sido necessárias algumas simplificações, sendo a principal a utilização de um tubo de Nylon com ímãs acoplados para simular a coluna de perfuração.

Em uma segunda versão do tacômetro magnético, em Projeto Final de Luis Philipe Baptista e Silva Resano, finalizado em julho/2014, realizaram-se modificações no protótipo anterior, inicialmente trocando o tubo de Nylon por um tubo de aço proveniente de uma coluna de perfuração real e em seguida realizando melhorias no algoritmo de aquisição e processamento de dados.

A terceira versão foi realizada por Diogo Spazzafumo Reinoso, na qual se aprimorou o protótipo já existente, visando à aproximação do modelo com a realidade. Primeiramente substituiu-se o magnetômetro fluxgate, utilizado em ambos os projetos anteriores, por um sensor GMR (magnetorresistência gigante), mais econômico e de menores dimensões. Posteriormente, utilizou-se um motor CC acoplado ao tubo de aço carbono, permitindo com isso um melhor controle da velocidade. Finalmente, integrou-se o sistema em malha fechada, permitindo ao usuário definir a velocidade desejada em uma interface desenvolvida no ambiente LabView, controlando a tensão de alimentação do motor para que o mesmo atinja esta velocidade.

No projeto atual foram realizadas melhorias no controle do motor de corrente contínua, foi alterada a forma de aquisição de dados e melhorou-se a alimentação do circuito, o que ocasionou em uma proteção maior para o mesmo e em maior velocidade de medição da velocidade de rotação.

Palavras-chave: Tacômetro magnético, magnetorresistência gigante, colunas de perfuração.

Abstract

This project follows three previous others, always seeking to improve the prototype. The first project was developed by Jean Philippe Dines Labarrere, finalized in December/2013, who developed a preliminary prototype of a magnetic tachometer for drilling columns, being necessary some simplifications as the use of a Nylon pipe with magnets attached to simulate the drilling column.

In a second version of the magnetic tachometer, in the final project of Luis Philipe Batista e Silva, finalized in July/2014, there were changes in the previous prototype, initially replacing the Nylon pipe by a steel tube extracted from an actual drilling column, and then making improvements in the data capture algorithm and processing.

The third version was performed by Diogo Spazzafumo Reinoso, where the existing prototype has improved, aiming at approaching the model to reality. Initially, it was replaced the fluxgate magnetometer, used by both previous projects, by a GMR sensor (giant magnetoresistance). Later, a DC motor was coupled to the carbon steel tube, allowing a better speed control. Finally it was integrated in a closed-loop system, allowing the user to set the desired speed in an interface developed in LabView environment, and controlling the motor supply voltage so that it reaches this speed.

In the current version improvements were made in the control of DC motor, the form of data acquisition has changed and the power circuit was improved, leading to greater protection for the same and a faster measurement of the rotation speed.

Keywords: Magnetic tachometer, giant magnetoresistance, drilling columns.

ÍNDICE

1. Introdução	10
1.1. Descrição do Problema	10
1.2. Motivação do Projeto	13
1.3. Objetivo do Projeto	15
2. Tacômetros Comerciais	17
3. Magnetômetro GMR	19
4. Motor de Corrente Contínua	22
5. Circuito de controle de tensão e corrente	25
6. Bancada de Ensaios	27
7. Tacômetro Magnético	29
8. Procedimento Experimental.....	32
8.1. Análise dos resultados gráficos	32
8.2. Estudo dos Ganhos	32
9. Conclusão.....	39
10. Referências bibliográficas	41
10. Referências bibliográficas	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas do oceano (Fonte: http://www.petrobras.com.br)	10
Figura 2 – Profundidades das reservas de petróleo (Fonte: http://www.industria hoje.com.br)....	11
Figura 3 – Navio-Sonda (Fonte: navalunivali.wordpress.com).....	12
Figura 4 – Plataform Supply Vessel (Fonte: http://www.gpai.com).....	13
Figura 5 – Helicóptero de apoio offshore (Fonte: www.sikorsky.com).....	14
Figura 6 – Tacômetro digital SKF TKRT 10 (Fonte: www.skf.com.br).....	18
Figura 7 – Disposição das camadas de um GMR	20
Figura 8 – Magnetômetro GMR AA005-2	21
Figura 9 – Caixa de Redução 16:1	22
Figura 10 – Colar de Acoplamento	23
Figura 11 – Variação da velocidade de rotação do motor com a tensão de alimentação	24
Figura 12 – Circuito de alimentação projetado e simulado no programa TopSpice 8.1	26
Figura 13 – Bancada Experimental	28
Figura 14 – Sistema de aquisição de dados modelo NI USB-6221 do fabricante National Instruments	29
Figura 15 – Diagrama de Blocos do Programa LabView (Parte 1)	30
Figura 16 – Diagrama de Blocos do Programa LabView (Parte 2)	30
Figura 17 – Painel de controle do programa LabView	31
Figura 18 – Tempo de estabilização, ganho $2,0 \times 10^{-5}$ sem overshoot e intervalo de 10 a 90%	35
Figura 19 – Tempo de estabilização, ganho $1,0 \times 10^{-4}$ com overshoot e intervalo de 10 a 90%	35
Figura 20 – Tempo de estabilização, ganho $2,0 \times 10^{-5}$ sem overshoot e intervalo de 5 a 95%	36
Figura 21 – Tempo de estabilização, ganho $1,0 \times 10^{-4}$ com overshoot e intervalo de 5 a 95%	36

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Levantamento da relação entre rotação real e voltagem	23
Tabela 2 – Tempo de estabilização com medições entre 10 e 90%	33
Tabela 3 – Tempo de estabilização com medições entre 5 e 95%	34
Tabela 4 – Valores obtidos nos testes com ganho $k_I = 1,0 \times 10^{-4}$	38

1. Introdução

1.1. Descrição do Problema

Em 2006 a Petrobras deu início ao projeto do Pré-Sal, projeto esse motivado principalmente pela enorme quantidade de petróleo e gás natural nos poços descobertos. Porém, existia um grande impeditivo para a exploração, pois as tecnologias existentes até então não eram evoluídas o suficiente para a extração. A Petrobras, assim, teve de desenvolver novas tecnologias para que pudesse explorar os poços encontrados na Bacia de Santos.

O petróleo do pré-sal se encontra em uma faixa que vai de cinco mil metros até cerca de sete mil metros de profundidade em relação ao nível do mar. Além disso, para se chegar ao pré-sal, tem-se de passar pela coluna de água, com cerca de mil metros, pela camada pós-sal, com dois mil metros e também por uma camada de sal, que em alguns pontos pode atingir dois mil metros de espessura, conforme ilustrado na Fig. 1.

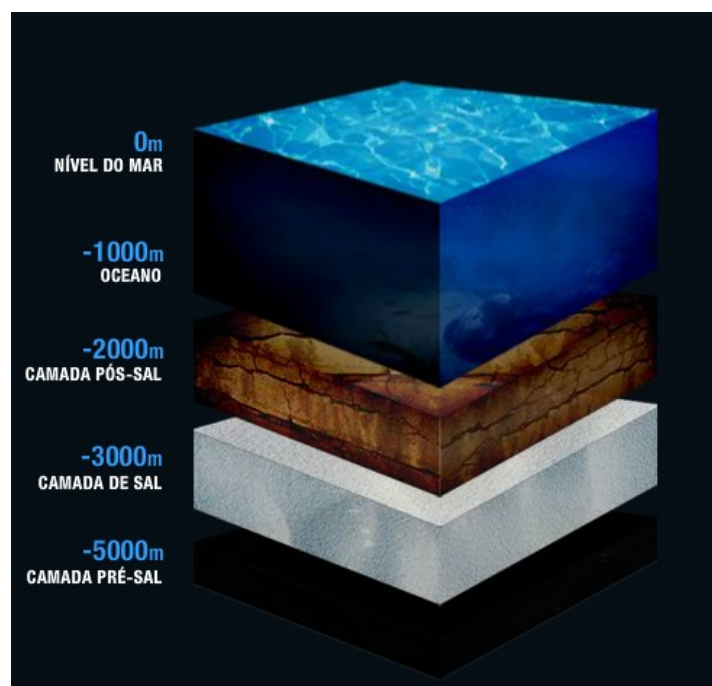


Figura 1 – Camadas do oceano (FONTE: <http://www.petrobras.com.br>)

Pode-se entender melhor a dificuldade no processo de extração do óleo na camada pré-sal, quando se comparam as profundidades até então atingidas para perfuração de poços com as dos novos poços, conforme Fig. 2. Anteriormente se extraía petróleo em profundidades de no máximo cinco mil metros abaixo da superfície do mar, além de não ser necessário atravessar a camada de sal.

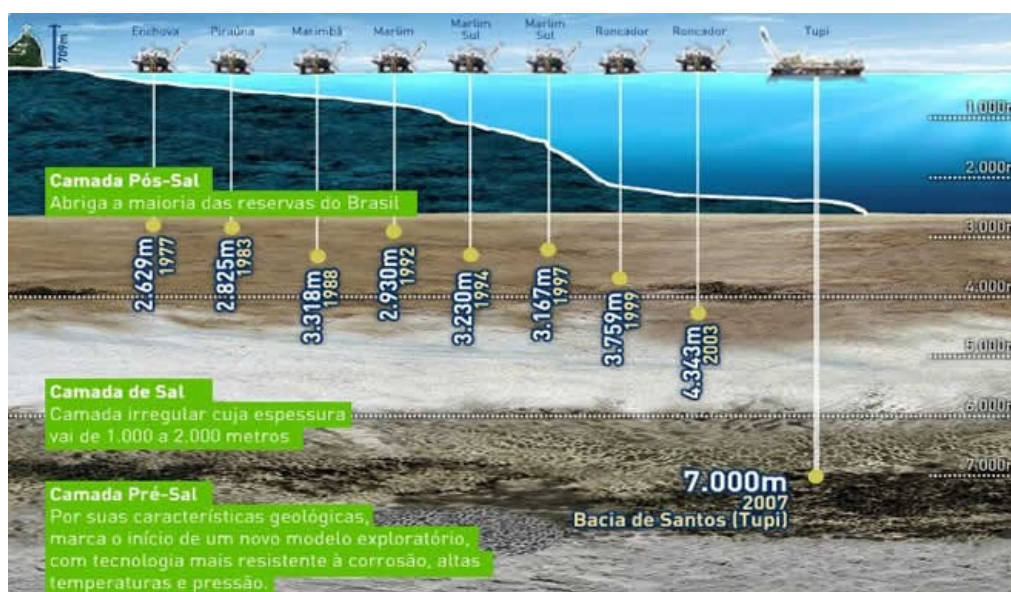


Figura 2 – Profundidades das Reservas de petróleo (FONTE: <http://www.industriahoje.com.br>)

Um dos principais desafios encontrados na extração do óleo na camada pré-sal é a perfuração do poço, pois esta é uma fase extremamente delicada no processo. A perfuração é feita por sondas. Realizar a perfuração envolve vários riscos, tanto ambientais quanto econômicos. Devido a essas adversidades, novas tecnologias de perfuração se fizeram necessárias, algumas delas sendo a criação de navios-sondas, como o ilustrado na figura 3, e plataformas semissubmersíveis.

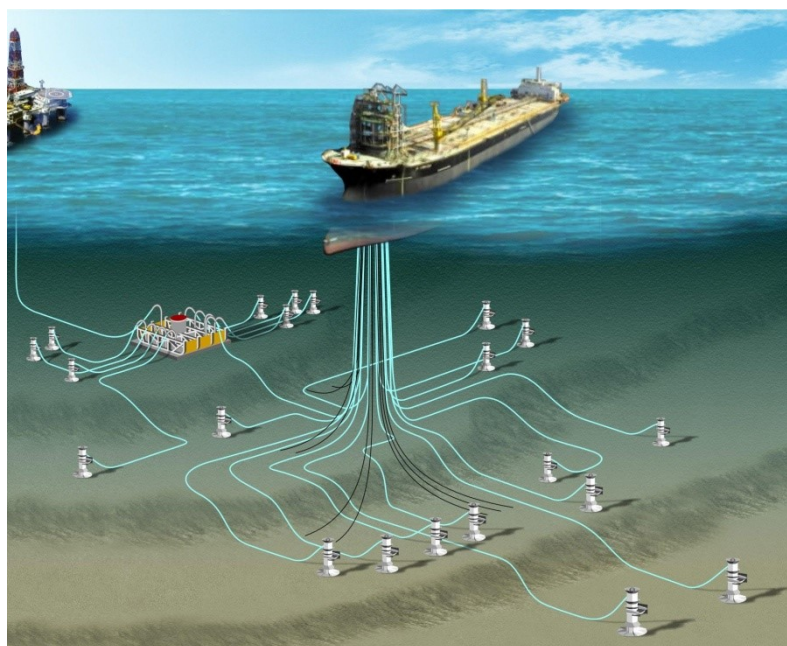


Figura 3 - Navio-Sonda (FONTE: navalunivali.wordpress.com)

O principal aspecto considerado neste projeto é o sistema de rotação. Para sondas comuns o conjunto mais utilizado é composto pela mesa rotativa, que fica na plataforma da sonda e que gira a coluna de perfuração, pelo Kelly, que é o elemento que transmite a rotação da mesa rotativa à perfuratriz e pelo Swivel, que é o equipamento que separa os elementos rotativos daqueles estacionários na sonda de perfuração e também por onde o fluido de perfuração é injetado. Em outras sondas, equipadas com *top drive*, a rotação é transmitida diretamente ao topo da coluna de perfuração por um motor acoplado à catenária.

Um dos equipamentos fundamentais no processo é aquele responsável pela medição da velocidade de rotação do bloco de perfuração. Tal equipamento envia a velocidade medida a um sistema de monitoramento localizado no painel do sondador. Neste painel estão também informações importantes como, por exemplo, pressão de bombeio do fluido de perfuração, vazão das bombas, velocidade de rotação da mesa rotativa e peso da broca.

1.2. Motivação do Projeto

Os poços de petróleo e gás do pré-sal se localizam a uma grande distância da costa, cerca de trezentos quilômetros, o que torna a provisão de suprimentos uma tarefa realizada basicamente por transporte marítimo, através de navios chamados de PSV (Plataform Supply Vessel), criados especialmente para esse tipo de tarefa, como mostrado na Figura 4. Outra forma de suprir os navios-sondas é através de transporte aéreo feito por helicópteros (figura 5), porém esse é um meio muito mais caro e com menor capacidade de carga, tanto em volume como peso.



Figura 4– Plataform Supply Vessel (FONTE: <http://www.gpai.com>)



Figura 5 – Helicóptero de apoio offshore (FONTE: www.sikorsky.com)

Devido às adversidades apresentadas, a tripulação de uma plataforma ou de um navio-sonda tem de ser extremamente técnica e capaz de realizar manutenções e reparos emergenciais. Contudo, para que esse tipo de atuação seja possível, o estoque de peças e equipamentos sobressalentes tem de ser bastante completo, já que o transporte pode ser demorado, o que ocasionaria em um grande tempo de espera e de paralisação de serviços, acarretando em custos elevados. Por outro lado, existem também equipamentos cuja manutenção é feita somente por pessoal autorizado ou habilitado pelo fabricante, o que torna inviável o reparo imediato realizado pela tripulação.

Assim, como a sonda não pode trabalhar sem a medição instantânea da velocidade de rotação, devido a riscos operacionais como quebra de ferramentas e fratura de poços, o tacômetro, instrumento encarregado de medir esta velocidade, é um desses equipamentos essenciais e que não podem ficar parados esperando por reparos. Portanto, é interessante haver outras opções de medição de velocidade de rotação para que se evite a paralisação dos trabalhos por grandes períodos.

Atualmente, o método alternativo utilizado é extremamente rudimentar e bastante sujeito a falhas humanas, consistindo na utilização de um barbante amarrado na coluna de perfuração, que serve como um contador de giros o qual, conforme vai sendo enrolado ao redor da coluna tem seu tempo medido. Finalmente, de posse desses valores de quantidade de rotação e do tempo em que o barbante demorou para se enrolar, estima-se a velocidade em rotações por minuto.

1.3. Objetivo do Projeto

Sabendo da dificuldade de se suprir equipamentos, peças e mão de obra em um lugar onde o acesso rápido é complicado, e sabendo também da impossibilidade de interrupção dos trabalhos lá realizados, Jean Philippe Dines Labarrere propôs, na primeira versão deste projeto, a criação de um tacômetro magnético, que seria capaz de fornecer ao operador uma estimativa da velocidade de rotação da coluna de perfuração. Este equipamento seria uma alternativa em momentos nos quais o sistema principal de medição estivesse em manutenção ou em reparo, permitindo que esta medição pudesse ser realizada de uma forma mais exata e precisa do que as formas alternativas de medição atualmente utilizadas, como o método do barbante. O protótipo inicial era constituído de um tarugo de Nylon com ímãs acoplados, uma furadeira comum, um transdutor magnético Fluxgate, uma placa conversora A/D e um instrumento virtual criado na plataforma LabView.

Na segunda versão deste projeto, realizada por Luis Philipe Baptista e Silva Resano, buscou-se a aproximação do modelo anterior com a realidade, com a substituição do tarugo de Nylon por um tubo de aço carbono proveniente de uma coluna de perfuração real. Além disso, foram feitas melhorias na aquisição e no processamento de dados.

A terceira versão do projeto foi realizada por Diogo Spazzafumo Reinoso, tendo sido realizadas melhorias no modelo com a introdução de um motor de corrente contínua, o que possibilitou um melhor controle da velocidade de rotação. Outra melhoria feita foi a integração do

sistema, tornando possível com isso definir a velocidade de rotação por meio da tensão de alimentação do motor no programa em LabView, podendo-se, assim, comparar a velocidade calculada na saída do programa com a velocidade previamente definida pelo usuário.

Nesta atual versão procurou-se melhorar a segurança do modelo, adicionando um controle PI (Controlador Proporcional Integral), fazendo-se para isso um estudo dos ganhos nesse controle. Também foram feitas melhorias na aquisição e no processamento de dados, aumentando a velocidade de medição.

Nos capítulos seguintes são apresentados os equipamentos utilizados e os motivos pelos quais os mesmos foram escolhidos. Também está descrito o procedimento por meio do qual os testes foram realizados e os resultados obtidos.

2. Tacômetros Comerciais

Tacômetros são dispositivos que medem a velocidade de rotação de um eixo, normalmente expressa na unidade rotações por minuto (RPM), apesar da unidade no Sistema Internacional (SI) ser radianos por segundo. A conversão entre as duas unidades é dada pela equação (1).

$$1 \text{ rad. s}^{-1} = \frac{1}{2\pi/60} \text{ RPM} \quad (1)$$

São equipamentos muito importantes e têm diversas aplicações, desde medir a velocidade de rotação do motor de automóveis até medir a velocidade de rotação de uma coluna de perfuração de petróleo, objetivo deste projeto. Há basicamente dois tipos de tacômetro, os de contato e os sem contato. Os de contato (figura 6), como o nome já diz, precisam estar em contato com o eixo, assim como também devem estar sincronizados ao sistema em questão para que se possa medir a posição angular (rotação), podendo também informar a velocidade de rotação. Já os tacômetros sem contato não precisam estar conectados ao eixo, o que pode ser uma vantagem em certas ocasiões, pois não exigem esforço extra do elemento girante e também não exigem um acoplamento ao eixo, o que nem sempre é simples de ser feito.



Figura 6 – Tacômetro digital SKF TKRT 10 (FONTE: www.skf.com.br)

Neste projeto foi proposto o uso de um tacômetro sem contato. Os tacômetros sem contato têm grande utilização em diversas situações, sendo mais comum o de frequência, que utiliza a frequência de um sinal de corrente alternada, medido por transdutores do tipo eletromagnético, capacitivo ou óptico, gerando impulsos cuja frequência temporal de repetição é proporcional à velocidade de rotação da máquina.

3. Magnetômetro GMR

Nas duas primeiras versões deste projeto foi utilizado um transdutor magnético Fluxgate comercial, já na terceira versão utilizou-se um chip sensor GMR (Giant Magnetoresistance), sendo este o magnetômetro utilizado nesta versão atual.

O GMR apresenta uma principal desvantagem em relação ao magnetômetro Fluxgate, que é a sensibilidade aproximadamente trinta vezes menor. Entretanto, o GMR possui pontos positivos, como o tamanho reduzido e o baixo custo, ambos fatores relevantes por se tratar de um modelo para uso portátil. A sensibilidade inferior exige o acoplamento de um ímã permanente ao todo de aço, sendo os resultados apresentados pelo GMR bastante satisfatórios.

O fenômeno da magnetorresistência gigante (GMR- Giant Magnetoresistance) consiste em mudanças bruscas na resistência de um material em função da variação do campo magnético externo ao mesmo.

Na década de 80 foram fabricados os principais materiais possuidores do efeito GMR, que consistiam de uma série de filmes finos de ferro e cromo, funcionando a uma temperatura em média maior que a temperatura ambiente, o que dificultava seu uso. Desde então, esses materiais foram alvos de pesquisa, fruto da necessidade de desenvolvimento de melhores dispositivos de gravação magnética que pudessem funcionar à temperatura ambiente e detectassem pequenas variações de campo magnético.

Os dispositivos GMR atualmente têm como principal configuração a denominada “válvula de spin” ou “spin valve”, a qual apresenta grande variação de resistência em uma região em torno do campo magnético nulo ($H=0$). O GMR possui, em geral, quatro camadas de filmes

finas, sendo duas de materiais ferromagnéticos, uma de material condutor e outra de material antiferromagnético. As camadas devem estar dispostas como exibido na Figura 7.

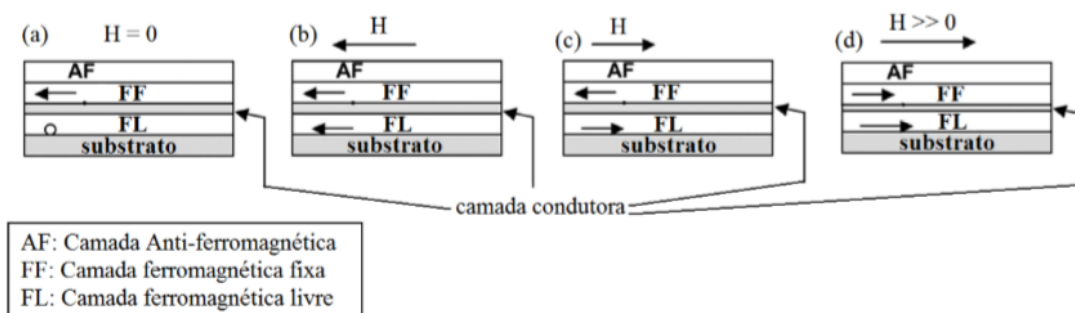


Figura 7 – Disposição das camadas de um GMR

Observando-se a figura 7, a camada antiferromagnética fixa a magnetização da camada ferromagnética adjacente. Quando as magnetizações das camadas são paralelas entre si, e com o mesmo sentido, os elétrons sofrem menos espalhamento ao se deslocarem de um estado eletrônico em uma camada ferromagnética para outro estado similar na outra camada. Consequentemente, os elétrons conseguem se locomover mais facilmente, reduzindo a resistência elétrica.

Pode-se repetir a estrutura “válvula de spin” criando assim estruturas com mais camadas. Dessa forma, consegue-se aumentar a sensibilidade dos dispositivos, que em uma estrutura única tem uma faixa de medição de 10^{-4} T, com resolução de densidade de fluxo magnético da ordem de 10 nT.

No presente trabalho, assim como em sua versão anterior, utilizou-se o transdutor magnético GMR AA005-02 (figura 8), alimentado por uma fonte de tensão contínua de 12,5 V e gerando uma tensão elétrica CC de saída proporcional ao campo magnético medido, com uma sensibilidade de 5,6 mV/Oe.



Figura 8 – Magnetômetro GMR AA005-02

4. Motor de Corrente Contínua

Um motor de corrente contínua foi utilizado para simular a mesa rotativa do bloco de perfuração real. Para a utilização do motor selecionado, necessitou-se o acoplamento de uma caixa de redução 16:1 (figura 9), pois o torque do motor disponível era baixo demais para movimentar o tubo de aço, e a velocidade de rotação era muito alta até para tensões de alimentação baixas.

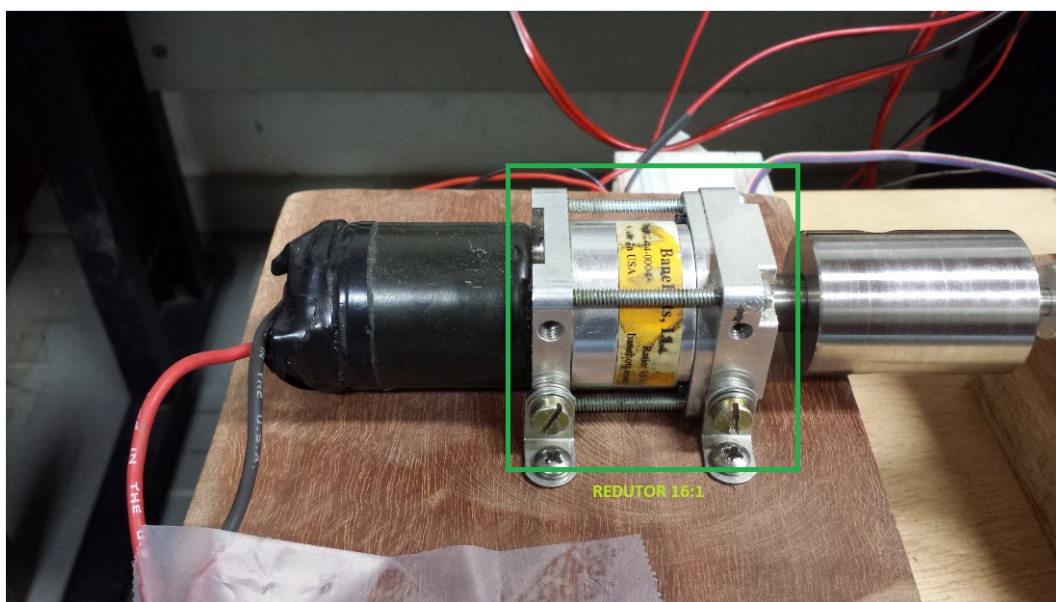


Figura 9 – Caixa de redução 16:1

Devido à diferença de diâmetros entre o eixo da caixa redutora e do tubo de aço, foi necessário o uso de um colar de acoplamento (figura 10), que em uma extremidade possui um orifício de 12,7 mm de diâmetro e na outra extremidade um eixo de alumínio de 6 mm de diâmetro.

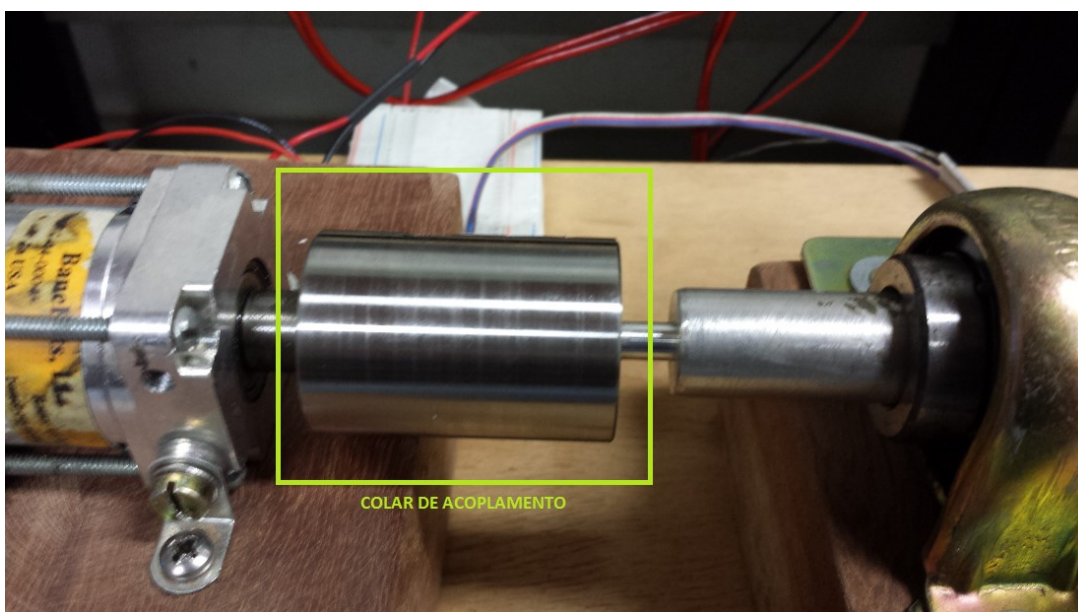


Figura 10 – Colar de acoplamento

Foi feito um levantamento experimental para estimar como a velocidade de rotação varia com a tensão de alimentação, obtendo-se os dados mostrados na tabela 1 e o gráfico mostrado na Figura 11.

Tabela 1 – Levantamento da relação entre rotação real e voltagem

Rotação Setpoint	Voltagem	Rotação Real
60	2,75	127,06
70	2,93	137,92
80	3,12	149,25
90	3,31	161,34
100	3,49	171,88
110	3,68	183,52
120	3,87	195,37
130	4,06	206,13
140	4,24	217,82
150	4,43	228,88
160	4,62	241,057
170	4,80	253,12

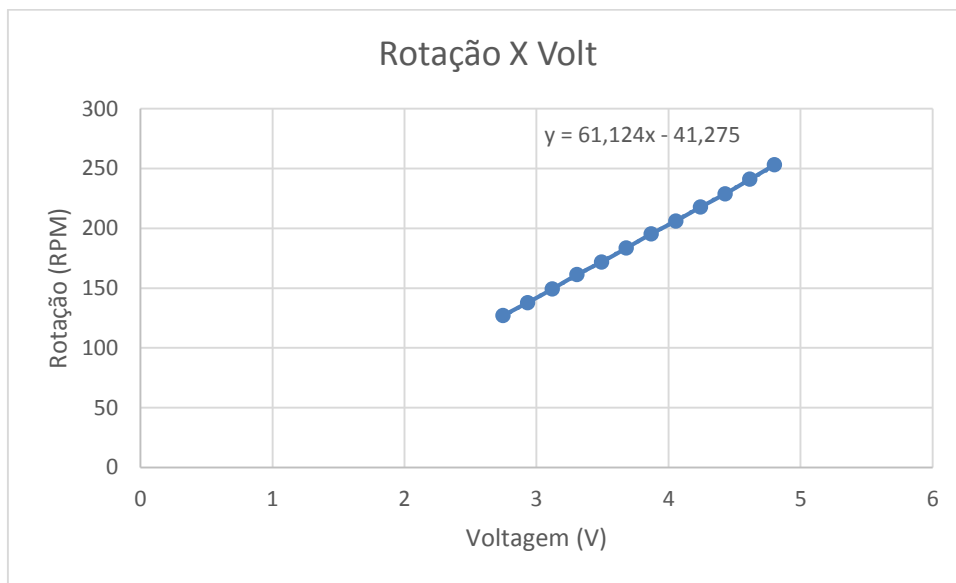


Figura 11 – Variação da velocidade de rotação do motor com a tensão de alimentação

Percebe-se uma tendência linear na velocidade de rotação do motor com relação à tensão de alimentação, de acordo com a equação (2), a qual foi posteriormente utilizada no algoritmo de controle criado no LabView.

$$Volts = \frac{(RPM + 41,275)}{61,124} \quad (2)$$

5. Circuito de controle de tensão e corrente

Na versão anterior, foi projetado e fabricou-se um circuito que tinha como função controlar a tensão e fornecer a corrente de entrada do motor CC. Nesta atual versão foram realizadas melhorias neste circuito. Foram utilizados os mesmos componentes, um transistor do tipo FET (IRF 1405), um amplificador operacional (ampop – modelo LM741C), uma fonte de tensão contínua, com a exceção do resistor, o que deu uma maior segurança ao circuito.

A retirada do resistor foi possível devido à mudança na forma de alimentação do ampop utilizada que, por não ser “rail-to-rail” precisa de uma alimentação negativa para que se possa garantir uma saída de 0 V. Na versão anterior, este ampop era alimentado por +14 V e 0 V, o que ocasionava uma tensão mínima de saída de aproximadamente 2 V, o que fazia com que o motor já iniciasse o movimento, mesmo com o comando de 0 V pelo sistema digital. A queda de tensão, em um resistor de 1 Ω conectado em série com o motor, garantia que a tensão efetivamente fornecida ao mesmo fosse próxima de 0 V. Contudo, este resistor tinha uma dissipação de aproximadamente 4 W, o que causava um sobreaquecimento do mesmo, com risco de ruptura. Nesta nova versão, com a alimentação negativa de -4,25 V do ampop, foi possível retirar o resistor, garantindo uma maior segurança no circuito, pois evita-se que o mesmo queime e também que outros componentes sejam sobrecarregados e possam queimar, como é o caso do próprio ampop. O circuito aperfeiçoado está representado abaixo na figura 12.

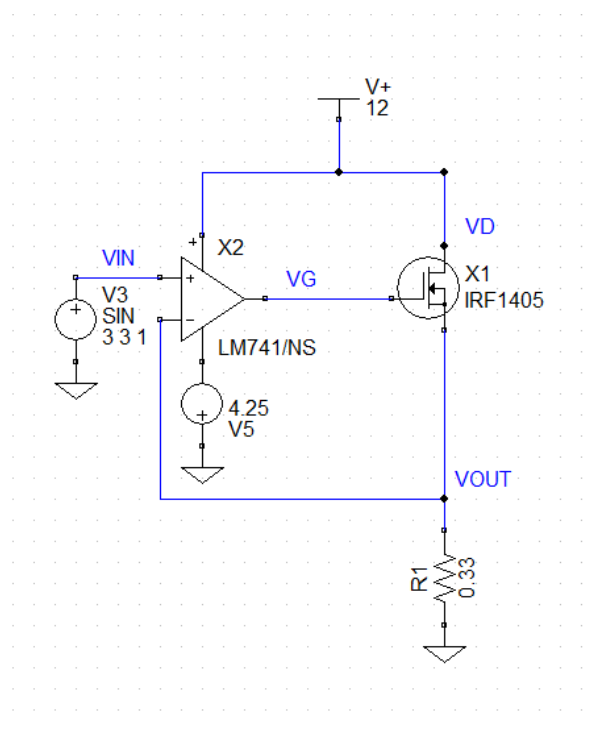


Figura 12 – Circuito de Alimentação projetado e simulado no Programa TopSpice 8.1

No esquema do circuito pode-se observar que a tensão gerada pela placa D/A (VIN) é transferida para o ponto VOUT pelo ampop em configuração de seguidor de tensão. A saída do ampop polariza o gate do FET, permitindo a passagem da corrente CC fornecida pela fonte de tensão contínua de 12 V. Desta forma, consegue-se controlar a tensão de alimentação do motor CC pela placa D/A, simultaneamente fornecendo a corrente demandada pelo motor CC (no máximo 2 A) pela fonte de tensão (modelo ICEL P-4000), sem sobrecarregar a saída da placa D/A (que tem baixíssima capacidade de corrente). O resistor de 0,33 ohms representa eletricamente o motor CC.

6. Bancada de Ensaaios

A bancada de ensaios utilizada para simular uma coluna real de perfuração com rotação do eixo principal foi a mesma utilizada previamente, tendo sido confeccionada por Jean Philippe Labarrere, Luis Philipe Baptista e Silva Resano e Diogo Spazzafumo Reinoso, porém ajustes foram realizados.

Foi acoplado um ímã ao tubo de aço carbono A1040 para aumentar o campo magnético gerado, possibilitando assim o uso do magnetômetro GMR. A bancada completa está ilustrada na figura 13 abaixo.

Os seguintes materiais e equipamentos foram utilizados:

- Prancha de madeira;
- Paralelepípedos em madeira;
- Mancais;
- Rolamentos;
- Parafusos;
- Eixo de alumínio;
- Hastes em "L";
- Ímã;
- Motor CC;
- Tubo de Aço carbono A1040;
- Circuito para controle de tensão e corrente;
- Computador;
- Placa A/D USB NI-6221 da National Instruments;

- Caixa de redução;
- Eixo de alumínio;
- Colar de acoplamento;
- Fonte de tensão modelo P-4000 da ICEL;
- Luvas de nylon;
- Magnetômetro GMR AA-005-02.

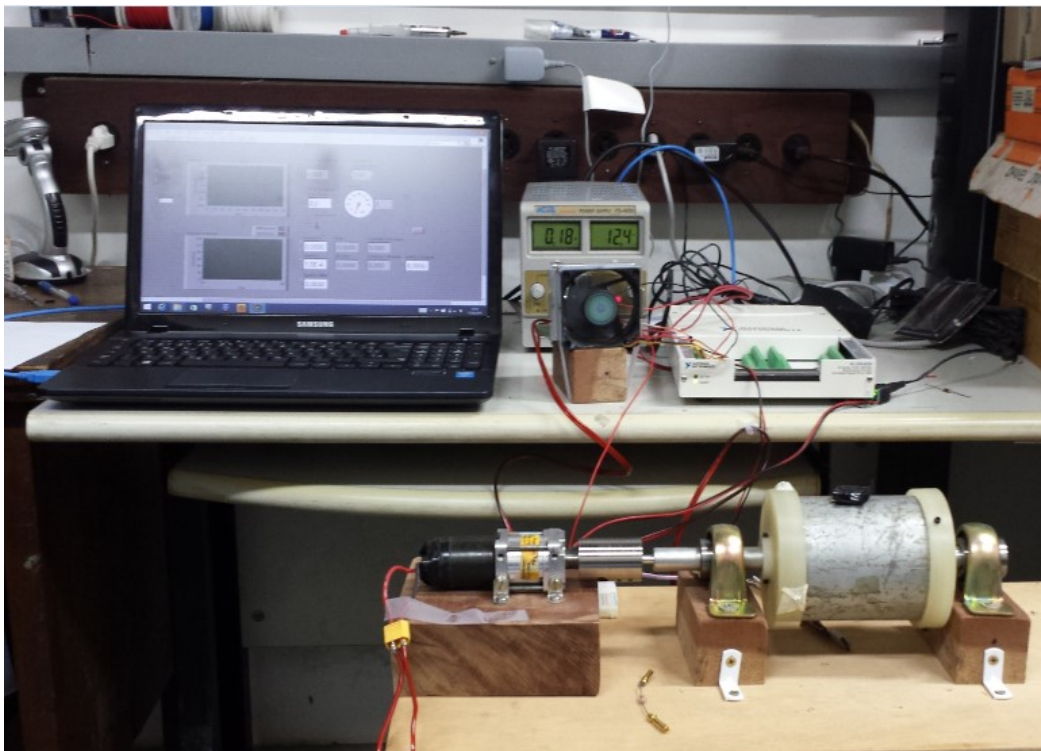


Figura 13 - Bancada experimental

7. Tacômetro Magnético

Para que a implementação do tacômetro magnético fosse realizada, utilizou-se o transdutor GMR AA-005-02, descrito na seção anterior e cujo datasheet encontra-se em anexo, com a tensão de saída gerada pelo transdutor sendo adquirida por uma placa de aquisição de dados modelo NI USB-6221 da fabricante National Instruments (figura 14), de 16 bits e capacidade de entrada analógica de tensão de -10 V a 10 V. Esta placa recebe o sinal analógico unidimensional correspondente à leitura do campo magnético por meio do magnetômetro GMR.



Figura 14 - Sistema de aquisição de dados modelo NI USB-6221 do fabricante National Instruments

Auxiliado por um instrumento virtual desenvolvido na plataforma LabView, também produzida pela National Instruments, processam-se os dados obtidos pelo conversor A/D. Utilizando-se a linguagem G para a programação do código, pode-se visualizar o diagrama de blocos nas Figuras 15 e 16.

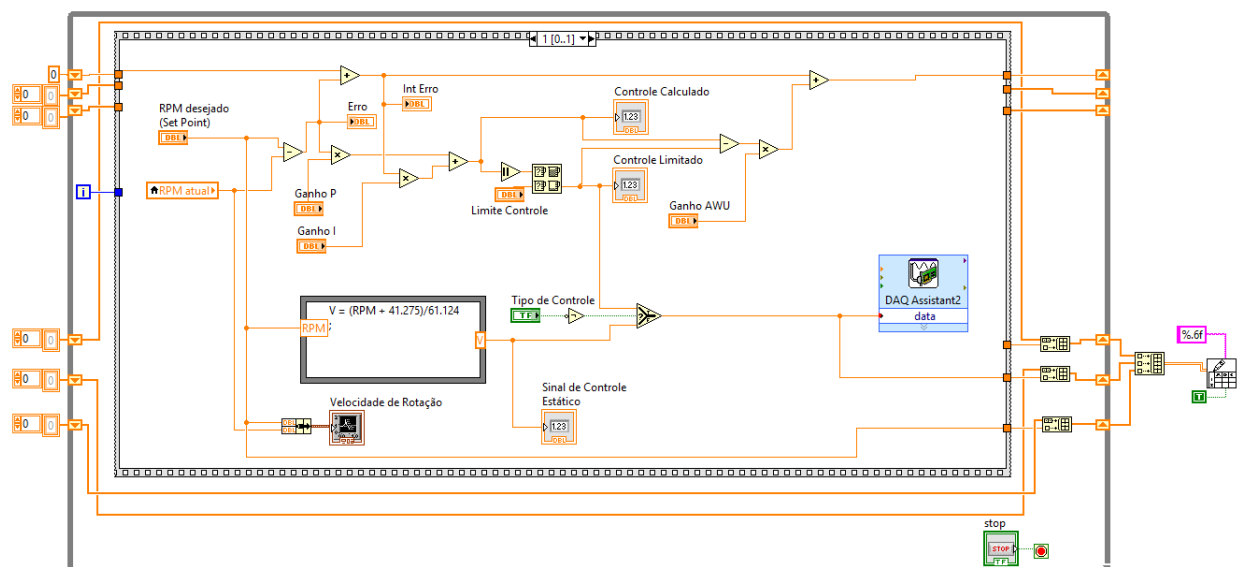


Figura 15 – Diagrama de Blocos do Programa LabView (Parte 1)

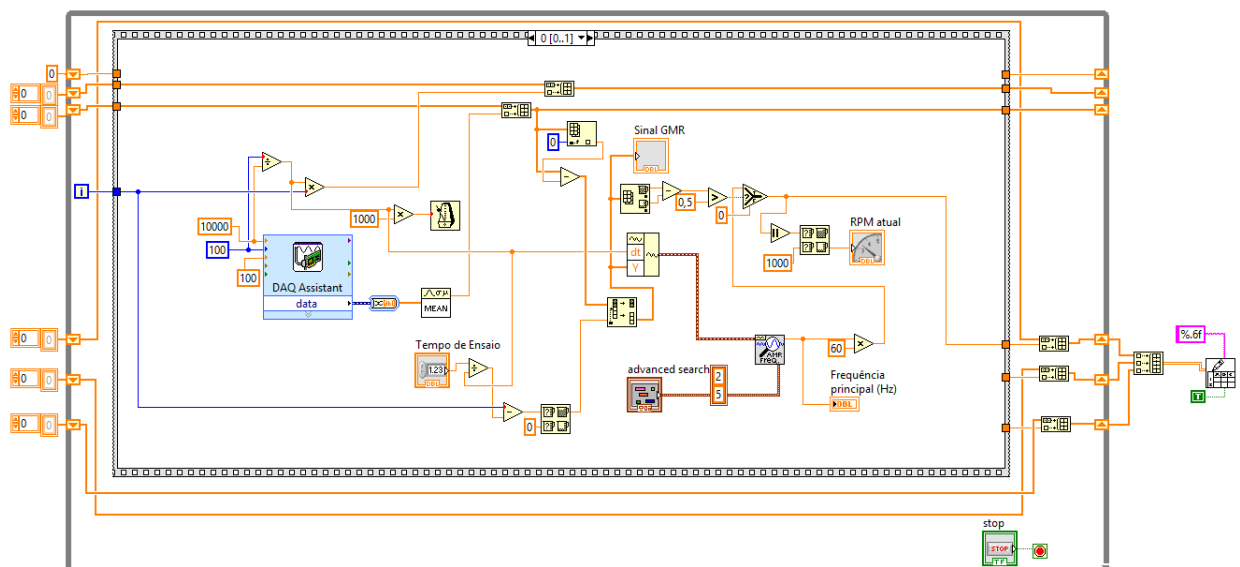


Figura 16 – Diagrama de Blocos do Programa LabView (Parte 2)

No sistema implementado, o usuário define a velocidade de rotação desejada no painel de controle (figura 17). Essa velocidade desejada é convertida para uma tensão proporcional à rotação desejada, de acordo com a equação (2) anteriormente apresentada. Na sequência, utiliza-se o bloco DAQ Assistant, que recebe o valor de tensão elétrica calculada e utiliza a placa D/A

para gerar uma tensão analógica que controla a velocidade de rotação do motor CC. Ainda nesse primeiro bloco da programação tem-se uma chave seletora (“Tipo de Controle”), que permite a escolha entre o algoritmo de controle baseado na equação (2) ou um controle PI.

Na segunda tela de programação, o assistente A/D realiza a aquisição dos dados fornecidos à placa conversora. Na sequência, por meio de uma função display, exibe-se a variação do campo na direção X. Fazendo uso da função chamada “Extract Single Tone Information VI” (extrator de tonalidade), que detecta a frequência fundamental de um sinal periódico, é possível calcular a velocidade de rotação do sistema em RPM. O tempo de atualização dos dados de saída do sistema foi mantido conforme na versão anterior deste trabalho, configurado para cada 2 segundos. Contudo, diferentemente da versão anterior, que demorava 2 segundos para obter cada estimativa de velocidade, a versão atual possibilita uma atualização contínua da velocidade, após o tempo de 2 segundos que é necessário para obter a primeira estimativa. Os principais dados de configuração, entrada e saída se encontram no painel de controle do LabView (figura 17) para facilitar a utilização do programa.

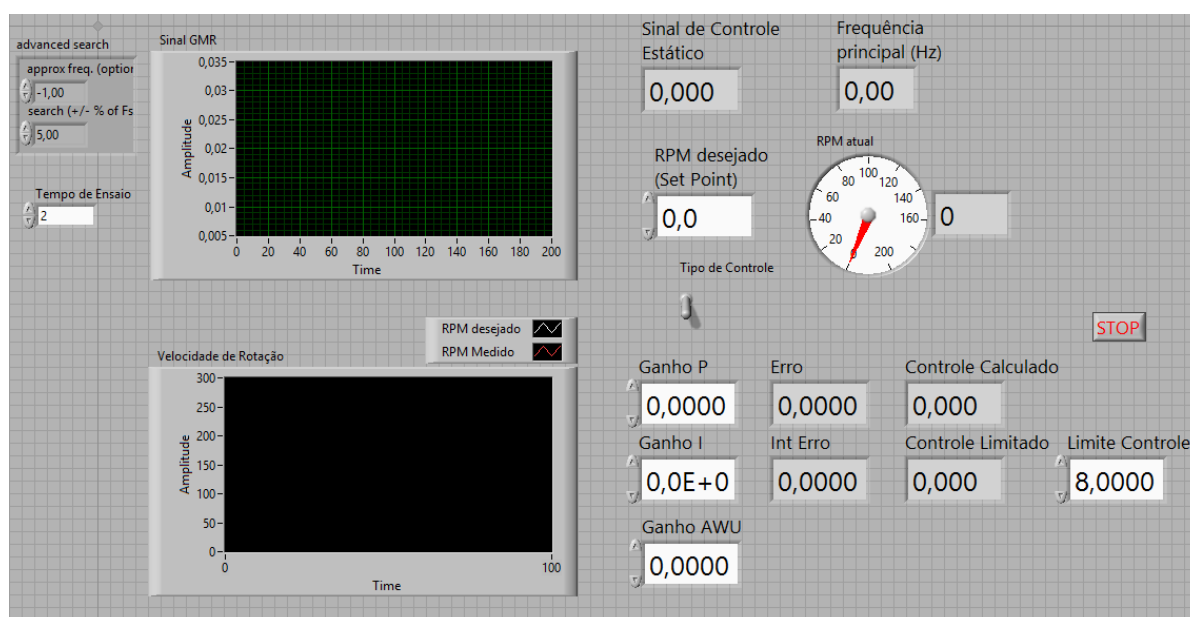


Figura 17 – Painel de Controle do Programa LabView

8. Procedimento Experimental

8.1. Relação da Velocidade de Rotação com a Tensão Aplicada

Como apresentado anteriormente no capítulo 4, foi realizado um levantamento da relação entre as velocidades de rotação reais e as tensões aplicadas no motor de corrente contínua, levantamento esse que gerou a equação (2) a partir do gráfico da figura 11.

8.2. Estudo dos Ganhos

Foram realizados testes com diferentes valores de ganho k_I (coeficiente de ganho integral), mantendo o ganho proporcional k_P nulo, sendo obtidos os tempos de estabilização até a velocidade desejada de 200 RPM. Ao todo foram feitos dez testes, começando em $k_I = 1,0 \times 10^{-5}$ e terminando em $k_I = 1,0 \times 10^{-4}$, como pode-se ver na tabela 2 abaixo. Como é de praxe em medições elétricas, o tempo de estabilização foi definido como o tempo decorrido entre os instantes correspondentes aos cruzamentos por 10% e 90% do valor final da curva. A frequência de aquisição utilizada foi de 100 Hz, o que equivale a um intervalo entre cada dois pontos de 10 milissegundos. Assim, de posse da quantidade de pontos e sabendo a duração de cada intervalo, foi possível calcular o tempo total de estabilização. Com isso foi possível estabelecer que, quanto maior o ganho, mais rápido se deu a estabilização da velocidade de rotação.

Tabela 2 – Tempo de estabilização com medições entre 10 e 90%

10% a 90%		
Ganho	Número de amostras	Tempo de Estabilização (s)
$1,0 \times 10^{-5}$	2397	23,97
$2,0 \times 10^{-5}$	1085	10,85
$3,0 \times 10^{-5}$	948	9,48
$4,0 \times 10^{-5}$	444	4,44
$5,0 \times 10^{-5}$	288	2,88
$6,0 \times 10^{-5}$	253	2,53
$7,0 \times 10^{-5}$	198	1,98
$8,0 \times 10^{-5}$	161	1,61
$9,0 \times 10^{-5}$	145	1,45
$1,0 \times 10^{-4}$	123	1,23

Porém, pôde-se perceber a existência de “overshoot” em determinados valores de ganho. Segundo Katsuhiko Ogata, professor emérito da University of Minnesota, overshoot significa o valor máximo do pico da curva de resposta medido a partir da resposta desejada do sistema. O *overshoot* tem de ser considerado no momento em que se calcula o tempo de estabilização. Para destacar sua relevância, foi realizada uma segunda estimativa do tempo de estabilização, utilizando porém novos limiares, de 5% a 95% dos pontos, e os resultados obtidos estão na tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Tempo de estabilização com medições entre 5 e 95%

5% a 95%		
Ganho	Diferença de Pontos	Tempo de Estabilização (s)
$1,0 \times 10^{-5}$	3597	35,97
$2,0 \times 10^{-5}$	1723	17,23
$3,0 \times 10^{-5}$	1090	10,9
$4,0 \times 10^{-5}$	713	7,13
$5,0 \times 10^{-5}$	437	4,37
$6,0 \times 10^{-5}$	380	3,8
$7,0 \times 10^{-5}$	292	2,92
$8,0 \times 10^{-5}$	237	2,37
$9,0 \times 10^{-5}$	208	2,08
$1,0 \times 10^{-4}$	448	4,48

Na tabela 3, pode-se perceber que os valores do tempo de estabilização também diminuem conforme se aumenta o ganho, entretanto, o tempo de estabilização volta a aumentar a partir de $k_I = 1,0 \times 10^{-4}$, isso se devendo ao fator do overshoot desse caso não poder ser desconsiderado, pois está fora de uma faixa de $\pm 10\%$ do valor desejado de rotação, no caso 200 RPM.

Encontram-se abaixo quatro gráficos (figuras 18, 19, 20 e 21) que exemplificam a forma pela qual foram realizadas as medições dos tempos de estabilização e também de que forma o *overshoot* influencia nesse tempo.

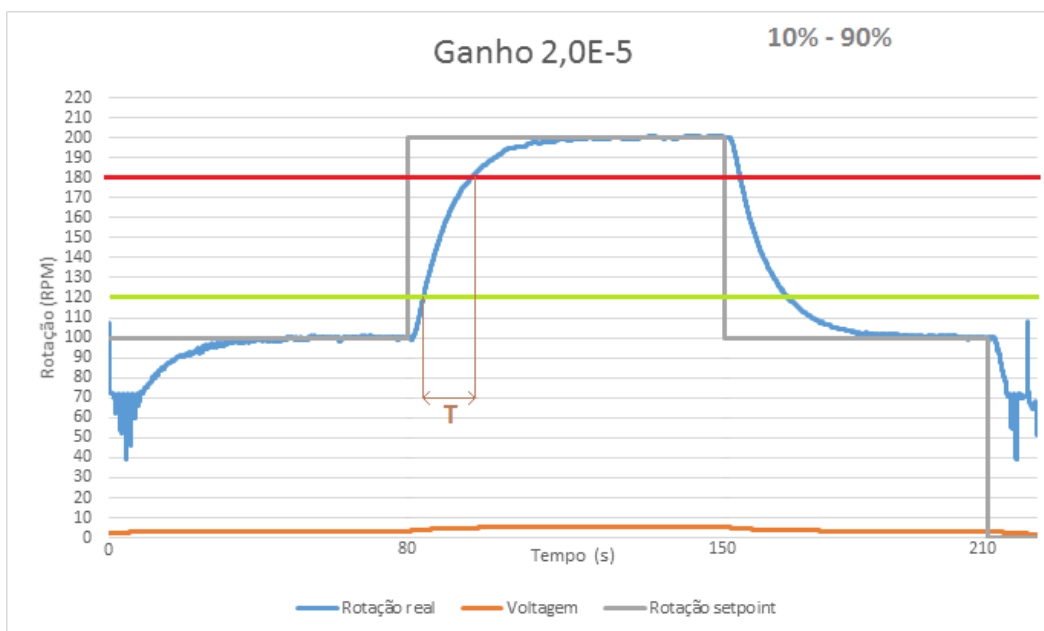


Figura 18 – Tempo de estabilização, ganho de $2,0 \times 10^{-5}$ sem overshoot e intervalo de 10 a 90%

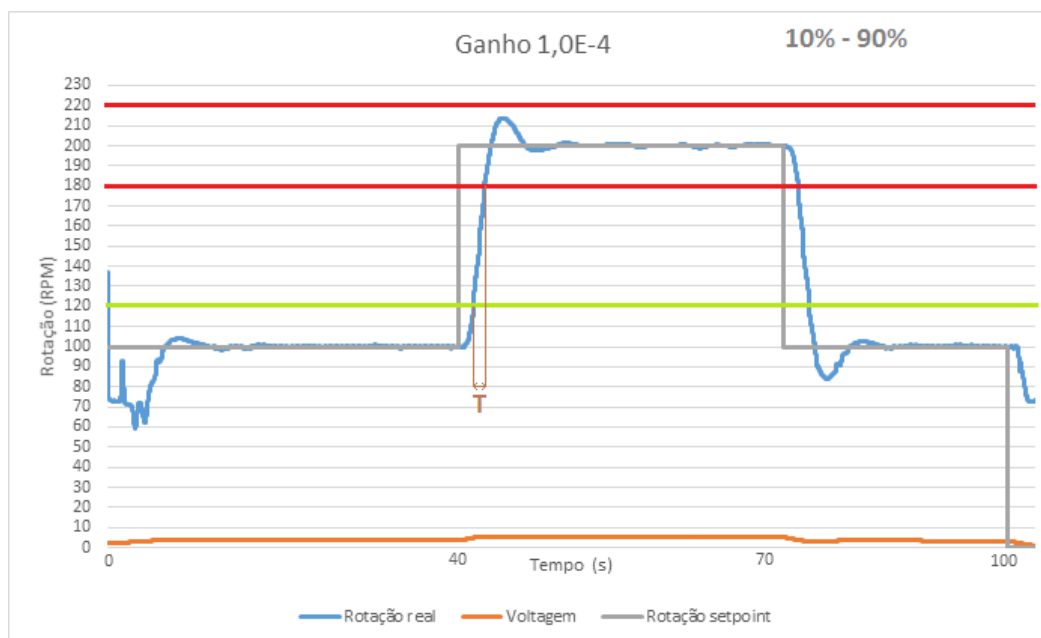


Figura 19 – Tempo de estabilização, ganho de $1,0 \times 10^{-4}$ com overshoot e intervalo de 10 a 90%

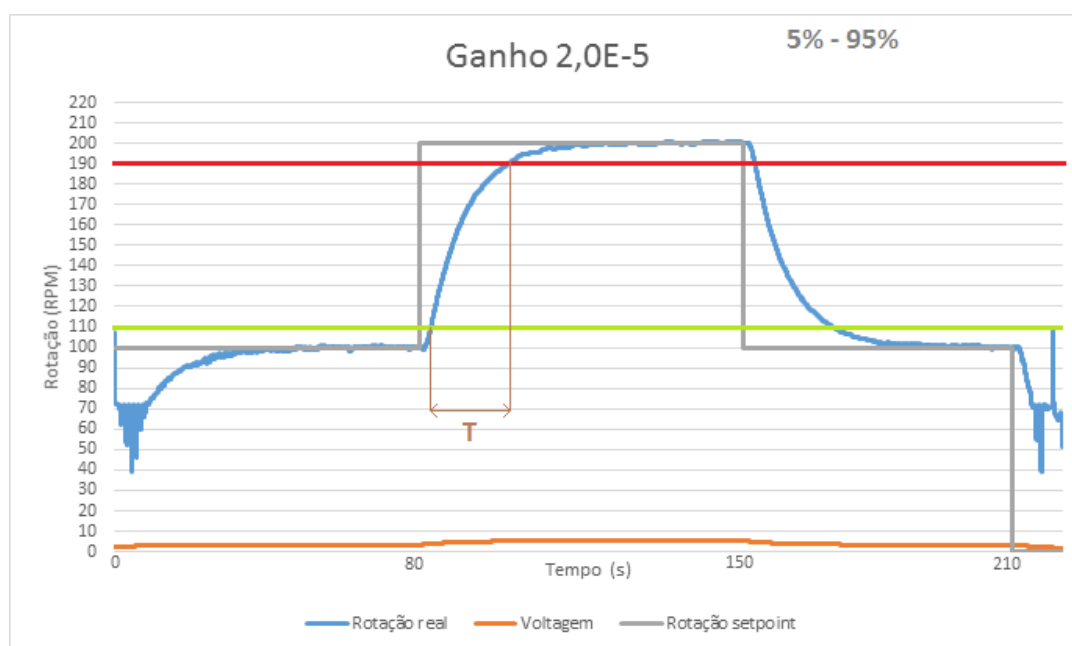


Figura 20 – Tempo de estabilização, ganho de $2,0 \times 10^{-5}$ sem overshoot e intervalo de 5 a 95%

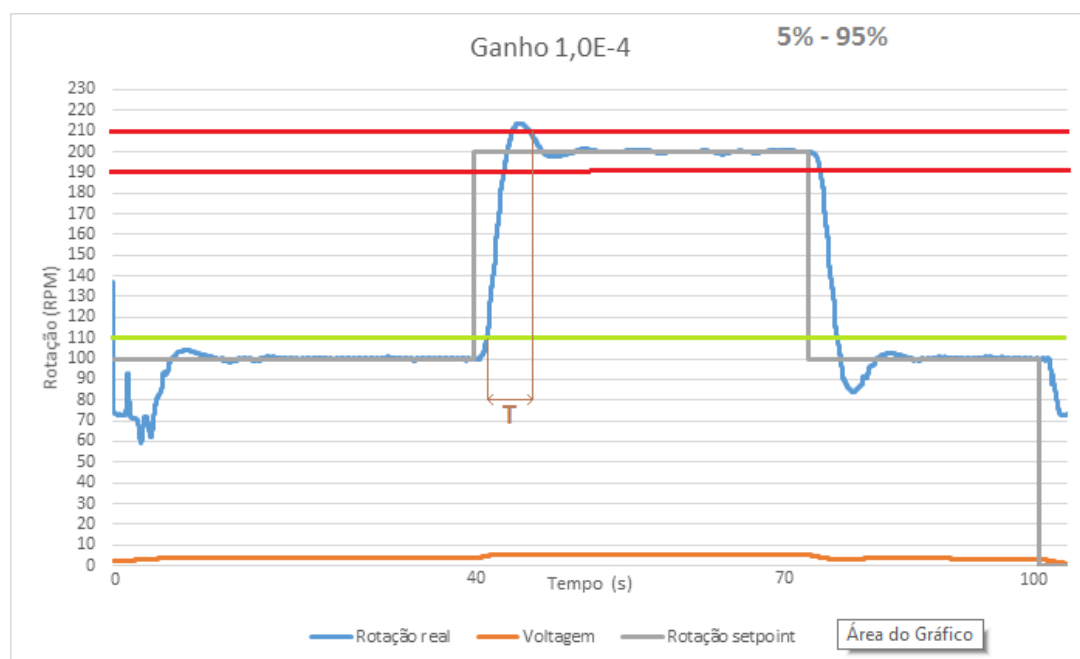


Figura 21 – Tempo de estabilização, ganho de $1,0 \times 10^{-4}$ com overshoot e intervalo de 5 a 95%

Fica evidente, na comparação das figuras 19 e 21, que a faixa utilizada para a obtenção do tempo de estabilização é determinante na relevância do *overshoot*. Ao se utilizarem os limiares de 10% a 90%, o *overshoot* não foi considerado em alguns casos, porém com os limiares de 5% a 95%, o overshoot foi determinante para o aumento desse tempo.

Já que a forma mais usual das medições elétricas utiliza um intervalo de 10 a 90% no intervalo, nesse experimento tem-se $k_I = 1,0 \times 10^{-4}$ como melhor ganho integral a ser utilizado para se obter um menor tempo de estabilização. Portanto, foram realizados mais dez testes com esse valor de ganho, visando à obtenção da incerteza padrão dessa medição, assim como seu erro e sua repetibilidade. Para o cálculo da incerteza padrão foi utilizada a equação (3) abaixo.

$$u = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \quad (3)$$

Considerando que foram realizadas $n = 10$ medições para o tempo de estabilização com ganho $1,0 \times 10^{-4}$, há, portanto, 9 graus de liberdade ($n - 1$). Com o valor do coeficiente t de Student para 95% de confiabilidade igual a 2,262, calculam-se as incertezas expandidas e a repetibilidade. Os resultados obtidos estão na tabela 4.

$k_1 = 1,0 \times 10^{-4}$		
Teste	Tempo de Estabilização (s)	Tempo Médio (s)
1	1,62	1,58
2	1,62	Incerteza Padrão (s)
3	1,59	0,038
4	1,62	
5	1,61	Incerteza Expandida (s)
6	1,55	0,087
7	1,51	
8	1,58	Repetibilidade
9	1,57	0,037
10	1,54	

Tabela 4 – Valores obtidos nos testes com ganho $k_1 = 1,0 \times 10^{-4}$

9. Conclusão

Este projeto teve como objetivo o aperfeiçoamento e continuação ao trabalho realizado anteriormente por Jean Philippe Dines Labarrere, Luis Philipe Baptista e Silva Resano e Diogo Spazzafumo Reinoso, com o intuito de criar um tacômetro magnético capaz de estimar a velocidade de rotação de uma coluna de perfuração. A dificuldade de acesso rápido aos navios-sondas, devido à distância, por um técnico para reparo dos medidores principais de velocidade de rotação, e também considerando os possíveis prejuízos tanto financeiros como ambientais acarretados pela interrupção do funcionamento de uma coluna de perfuração, foram os grandes incentivos para este projeto.

No atual projeto, utilizou-se um controle integrador no comando do motor de corrente contínua, o que fez com que se obtivesse uma maior exatidão e precisão da velocidade real de rotação em relação à velocidade definida pelo usuário. Melhorias também foram feitas no circuito de controle, uma delas, a de maior relevância, sendo a retirada do resistor, o que trouxe maior segurança para o circuito e também um menor consumo, devido à diminuição da tensão de alimentação utilizada, de 14 V para 12 V.

O aperfeiçoamento do sistema de medição em LabVIEW permitiu obter estimativas mais rápidas da velocidade de rotação. Os protótipos anteriores levavam 2 segundos para obter cada estimativa, enquanto a versão atual, após a primeira estimativa (que leva os mesmos 2 segundos), gera atualizações a cada 10 ms, permitindo assim acompanhar com maior exatidão as variações de velocidade de rotação.

Os testes obtiveram resultados satisfatórios, podendo-se afirmar que grande parte dos erros se devem a fatores externos como interferências, campos magnéticos externos dentro do laboratório de testes, além da inércia do motor para baixas velocidades.

Devido à baixa sensibilidade do magnetômetro GMR, que não permite detectar somente o campo magnético remanente do tubo de aço, foi necessário o uso de um ímã para garantir a imantação do tubo durante todos os testes. O experimento foi repetido para diversas velocidades de entrada e ganhos diferentes.

Para uma possível continuação deste projeto, sugere-se adicionar circuitos de condicionamento do sinal de saída do sensor GMR, amplificando-o e filtrando-o, visando a obter um magnetômetro de maior sensibilidade, que permita a medição da velocidade de rotação sem a necessidade do ímã permanente acoplado ao tubo. Pode-se investigar, ainda, o emprego de outros tipos de magnetômetro, como os baseados no fenômeno da Magnetoimpedância Gigante (GMI), potencialmente mais econômicos, de menores dimensões e mais sensíveis que o GMR. Pode-se também melhorar os componentes presentes no circuito de controle, como por exemplo utilizar um ampop que seja rail-to-rail ou também realizar um novo estudo de ganhos, de modo a diminuir ainda mais o tempo de estabilização da velocidade real de rotação. Outra sugestão seria acoplar um dínamo taquimétrico ao eixo do motor, de modo a se obter uma medição independente da velocidade de rotação, permitindo assim a calibração do tacômetro magnético.

Finalmente, conclui-se que o projeto tem uma finalidade real para o mundo altamente tecnológico da área de óleo e gás. O equipamento em desenvolvimento neste trabalho pode vir a ser utilizado em colunas reais de perfuração, levando em consideração todos os benefícios citados anteriormente.

10. Referências bibliográficas

- SILVA, E. C., Desenvolvimento de Transdutor Baseado na Fase da Magnetoimpedância Gigante para Medição de Campos Biomagnéticos. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Abr. 2010.
- REINOSO, D. S., Aperfeiçoamento de Tacômetro Magnético Para Bloco de Perfuração. Projeto de Graduação, PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Dez. 2014.
- RESANO, L. P. B. S., Aperfeiçoamento de Tacômetro Magnético Para Bloco de Perfuração. Projeto de Graduação, PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Jun. 2014.
- LABARRERE, J. P. D., Tacômetro Magnético para Colunas de Perfuração de Petróleo. Projeto de Graduação, PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Dez. 2013.
- Ogata, K., “Discrete-time control system”, Prentice-Hall, 1987.
- National Instruments – Disponível em: < <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-10/> > Acesso em 01/06/2015 às 16:57
- PCE Instruments - Disponível em: < <http://www.pce-instruments.com/> > Acesso em 13/06/2015 às 17:28
- Petrobras - Disponível em: < <http://www.petrobras.com.br/> > acesso em: 14/06/2015 às 16:11