



UNIDADE DE ENSINO SUPERIOR DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RENÊ SANTOS CARDOSO

**CONTROLE PID APLICADO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE MOTORES ELÉTRICOS
TRIFÁSICOS.**

FEIRA DE SANTANA
Fevereiro de 2022

RENÊ SANTOS CARDOSO

**CONTROLE PID APLICADO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE MOTORES ELÉTRICOS
TRIFÁSICOS.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Elétrica, da Unidade de Ensino
Superior de Feira de Santana, em
cumprimento às exigências para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Márcio da Silva
Pereira Bove.

FEIRA DE SANTANA

Fevereiro de 2022

RENÊ SANTOS CARDOSO

**CONTROLE PID APLICADO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE MOTORES ELÉTRICOS
TRIFÁSICOS.**

Feria de Santana, 18 de fevereiro de 2022

Banca Examinadora:

Prof. Me. Márcio da Silva Pereira Bove
Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Orientador

Prof. Me. Reginaldo Barnabé Gonzalez Grimaldi
Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Avaliador

Prof. Me. Flávio Couvo Teixeira Maia
Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Senhor Jesus Cristo por ter me guiado nesta jornada acadêmica, me alimentando diariamente com energias necessárias, fortalecendo meu corpo e alma. Fazendo com que me mantivesse a cabeça erguida, mesmo diante dos momentos difíceis e de incerteza, mostrando-me através dos momentos adversos, que a vida é composta por altos e baixos. No mais quero aqui pontuar a grande importância que minha família teve nesta caminhada, dando os incentivos necessários para que eu continuasse este projeto de vida, mesmo diante de alguns momentos ver em mim o desgaste devido ao alto comprometimento que é exigido numa graduação de engenharia elétrica.

Em especial dedico esta vitória a minha mãe Valdete Francelina dos Santos e ao meu pai Estefanio Cardoso, estes tiveram um score altíssimo nesta conquista. Vale também lembrar, a positividade passada pelos meus irmãos, contribuindo fortemente no processo, além destes, não posso esquecer da minha esposa Marília Gabriela Santos de Almeida Cardoso, pelos incentivos, sempre me orientando para ser resiliente.

Por último não menos importante quero também agradecer a um grande amigo André, por ter me incentivado com palavras motivadoras lá no início da jornada acadêmica. Por fim quero também agradecer a todos professores que me propuseram os conhecimentos necessários na minha qualificação profissional e social. E em especial ao Prof. Me. Márcio da Silva Pereira Bove, por me auxiliar com dedicação e paciência na construção deste trabalho.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - ODEX Brasil. Fonte: (EPE, 2019).....	10
Figura 2 - A Relevância da eficiência energética. Fonte: (WEG, 2022).	11
Figura 3 - Estrutura do Rotor Bobinado. Fonte: (STEPHEN, 2013).....	13
Figura 4 - Estrutura do Motor com Rotor em Gaiola de Esquilo. Fonte: (STEPHEN, 2013).....	14
Figura 5 - Inversor de Frequência CFW500. Fonte (WEG, 2022).	14
Figura 6- Topologia do inversor de frequência. Fonte: (CLAITON MORO, 2014).	15
Figura 7 - Bloco Diagrama Regulador PID. Fonte: (WEG, 2021).	16
Figura 8 - Esquemático, Parte De Controle e Potência Do CFW500. FONTE: (WEG, 2021).	17
Figura 9- Estrutura Física do Sensor de Pressão Piezoelétrico. Fonte: (DANIEL THOMAZINI et al. 2018)..	18
Figura 10- Aspectos Construtivos do Sensor de Pressão Piezoelétrico. Fonte: (DANIEL THOMAZINI et al. 2018).....	18
Figura 11 – Curva Resposta em Forma de S. Fonte: (OGATA, 2010)	19
Figura 12 - Bancada Teste. Fonte: (PRÓPRIA AUTORIA, 2022)	20
Figura 13 - Dispositivos de Acionamento e Controle. Fonte: (PRÓPRIA AUTORIA, 2022).....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Método de Sintonia 1 de Ziegler e Nichols. Fonte: (OGATA, 2010).	19
Tabela 2 - Ajuste De Processo, para geração da base de dados. Fonte: (PRÓPRIA AUTORIA, 2022).	21

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Configuração do controle PID. fonte: (WEG, 2021).	17
Quadro 2 - Experimento 1. Fonte: (PRÓPRIA AUTORIA, 2022).	21
Quadro 3 - Experimento 2. Fonte:(PRÓPRIA AUTORIA, 2022).	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PEE	Plano de Eficiência Energética
WEG	Werner Ricardo Voigt Eggon João da Silva Geraldo Werninghaus
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
MIT	Motor de Indução Trifásico
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
AVA	Acionamento de Velocidade Ajustavel
CPU	Unidade de Processamento Central
PID	Proporcional Integrativo Derivativo
IHM	Interface Homem Máquina
Kp	Ganho proporcional
Ki	Ganho integral
Kd	Ganho derivativo
VP	Variável de Processo
R1	Registro 1
R2	Registro 2
R3	Registro 3

SUMÁRIO

1. Introdução.....	10
2. Fundamentação Teórica.....	12
2.1 Eficiência Energética na Indústria	12
2.2 Motor Elétrico Trifásico AC	13
2.2.1 Motor de rotor bobinado	13
2.2.2 Motor de rotor em gaiola de esquilo.....	14
2.3 Inversor de Frequência.....	14
2.3.1 Função do controlador PID no Inversor de frequência	15
2.3.2 Configuração do Controlador PID no Inversor de frequência	15
2.4 Sensor.....	18
2.4.1 Sensor Transdutor de Pressão	18
2.5 Método de Sintonia Ziegler Nichols	19
3. Materiais e Metodologia.....	20
3.1 Recursos do trabalho.....	20
4. Resultados	21
4.1 Experimento 1	21
4.2 Experimento 2	21
5. Conclusão	22
Referências	22

CONTROLE PID APLICADO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS.

RENÊ SANTOS CARDOSO

Departamento de Engenharia Elétrica, Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana,
Feira de Santana, Bahia, Brasil.

Abstract: As a result of the volume of units, of three-phase electric motors used in the current market, and because they become strong consumers of electric energy, in the face of losses caused by low performance, originating in most cases by means of actuation and/or inadequate control. . With that, it was sought to apply in this work, the PID control measure in closed loop together with frequency inverter, aiming to enhance energy efficiency during load oscillations, in its operation. Regarding the controller tuning method, the Ziegler-Nichols tuning was used for this, as it is a popular tool for professionals in the industrial sector and for presenting an excellent response in its application. However, it is necessary to make fine adjustments in order to obtain the lowest possible signal settling time. It can be verified in experiment 1 of step 1, efficiency of 72.82% and after performing the fine adjustment in experiment 2, step 1 obtained efficiency of approximately 81.88%. Therefore, based on these results, it is possible to prove the feasibility of applying PID control together with the frequency inverter, in the drive and control of three-phase electric motors.

Key-words: Energy Efficiency, PID Control, Ziegler and Nichols Tuning, Three-Phase Electric Motors.

Resumo: Em decorrência do volume de unidades, de motores elétricos trifásicos empregados no mercado atual, e por estes se tornarem fortes agentes consumidores da energia elétrica, diante as perdas causadas pelo baixo rendimento, tendo origem na maioria dos casos por formas de acionamento e ou controle inadequado. Com isso buscou-se aplicar neste trabalho, a medida de controle PID em malha fechada em conjunto com inversor de frequência, visando potencializar a eficiência energética durante as oscilações de cargas, em sua operação. No que refere-se ao método de sintonia do controlador, para este foi utilizado a sintonia de Ziegler-Nichols, por se tratar de uma ferramenta popular diante os profissionais do setor industrial e por apresentar uma excelente resposta em sua aplicação. No entanto é necessário efetuar ajustes finos na intenção de obter um tempo de acomodação do sinal o mais baixo possível. Podendo ser verificado no experimento 1 da etapa 1, eficiência de 72,82% e após efetuar o ajuste fino no experimento 2, etapa 1 obteve eficiência de aproximadamente 81,88%. Portanto, com base nestes resultados é possível comprovar a viabilidade da aplicação do controle PID em conjunto com o inversor de frequência, no acionamento e controle de motores elétricos trifásicos.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Controle PID, Sintonia de Ziegler e Nichols, Motores elétricos trifásicos.

1. Introdução

A eficiência energética vem se destacando, como uma temática de grande relevância para o setor industrial, onde visa-se otimizar o consumo da energia elétrica de forma a evitar desperdícios durante o processo produtivo. Neste sentido, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) criou, em 2000, o Programa de Eficiência Energética (PEE), tendo por finalidade estabelecer medidas eficientes que permeiam desde a distribuição da energia elétrica até o consumidor final, buscando incentivar o uso de métodos e equipamentos mais eficientes. Apresenta-se

na Figura 1 o gráfico com o desempenho, de medidas aplicadas em eficiência energética pelos setores: industrial, transportes e o residencial no Brasil, juntamente com o indicador ODEX, que servirá como fator de correção do efeito estrutura (ANEEL, 2020).

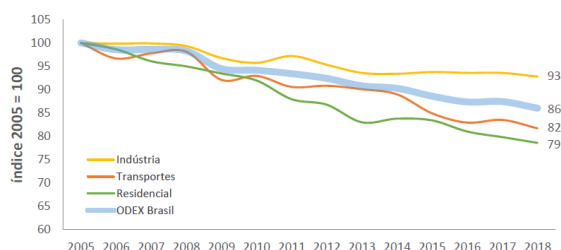


FIGURA 1 - ODEX BRASIL. FONTE: (EPE, 2019).

O gráfico ODEX Brasil demonstra a evolução no desempenho energético nos três setores citados anteriormente, tendo em vista a implementação de medidas voltadas para economia de energia elétrica, sendo possível analisar os ganhos obtidos desde o início do estudo em 2005 até o ano de 2018 no qual apresenta ganhos energéticos para o setor industrial, transporte e residencial de 7%, 18% e 21% respectivamente. Tornando-se uma necessidade e ponto de partida para as ações estratégicas na melhoria e no desempenho energético das instalações industriais. Na Figura 2 demonstra-se a relevância das aplicações em eficiência energética no setor industrial, mediante ações que podem ser desde a substituição direta de um motor ou até mesmo uma aplicação a nível de automação (M. KADDARI et al, 2018).

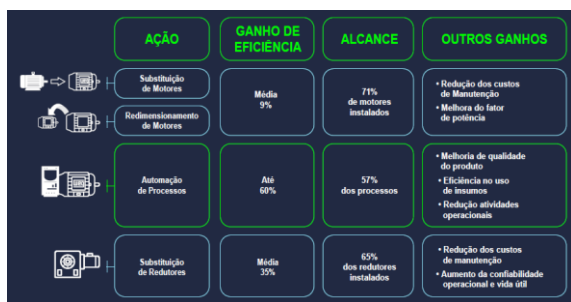


FIGURA 2 - A RELEVÂNCIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. FONTE: (WEG, 2022).

As ações adotadas permitem desde a substituição direta de um motor, neste caso é possível depara-se com algumas situações em plantas industriais em que por algum motivo o motor existente foi instalado sobre dimensionado ou apresenta baixa eficiência energética devidos desgastes. Também pode-se ocorrer a necessidade de implantar uma ação mais robusta diante a aplicação de automação, fazendo a instalação de um motor com índice de eficiência atualizado em conjunto com um inversor de frequência, por fim uma ação mais direcionada a mecânica, mas que remete benefícios diretos a parte elétrica, fazendo a substituição direta de redutores que apresentam ruídos e alta temperatura de trabalho.

Tendo em vista a expressiva utilização de motores elétricos de corrente alternada (CA) pelas indústrias, estes são responsáveis por cerca de 70% a 80% da energia consumida pelo conjunto de todas as indústrias na transformação de energia elétrica em energia mecânica. Faz-se necessário aprimorar as técnicas de manuseio aplicado aos Motores de Indução Trifásico (MIT) (FRANCHI, 2008). Diante deste cenário, estudos demonstram que o consumo de energia elétrica em diversos países aponta os motores elétricos entre os equipamentos mais intensivos no consumo da eletricidade (H. DALVAND AND M. ZARE, 2006).

Neste contexto, os dois tipos de motores mais empregados nas indústrias são: rotor bobinado e rotor em gaiola de esquilo, ambos trifásicos. Sendo que o motor de rotor bobinado exige cerca de 200% da corrente de partida e 20 segundos para atingir o pleno funcionamento, enquanto o motor de rotor em gaiola de esquilo exige entre 400% e 550% da corrente de partida e cerca de 60 segundos para atingir o pleno funcionamento. Tomando como base as aplicações de acionamento de cargas com alta inércia (PETRUZELLA, 2013).

Em paralelo a eletrônica de potência tem demonstrado um avanço marcante na parte de controle de velocidade e torque, possibilitando o emprego dos inversores de frequência no acionamento de motores elétricos trifásicos. Tornando-se a junção perfeita para equilibrar a demanda energética do motor, os inversores também podem ser chamados de Acionamento de Velocidade Ajustável (AVA), tendo como atributo controlar os motores elétricos através de rampas de tensão ou corrente, em modo escalar ou vetorial, de acordo a aplicação de carga solicitada no eixo do motor (NED MOHAN, 2015).

Além disso, nas últimas décadas várias teorias matemáticas foram desenvolvidas e implementadas em busca de um controle eficaz e eficiente em malha fechada,

favorecendo o avanço tecnológico, como por exemplo: aplicações aeronáuticas e similares. Neste mesmo intuito, foram desenvolvidas arquiteturas especiais com base em algoritmos clássicos, chamados de Proporcional, Integrativo e Derivativo, do inglês *Proportional, Integrative and Derivative* (PID) (PLÍNIO DE LAURO et al, 2018).

O controlador PID representa uma estrutura robusta e eficiente, mediante a escolha correta em sua aplicação. Estruturado por um algoritmo capaz de tratar de forma dinâmica o controle de um processo em malha fechada, em busca do rendimento próximo do ideal ou que satisfaça as condições iniciais da planta industrial, visando alcançar um sinal de saída estável e controlável. Com isso, surge a necessidade de ajustar o controlador de modo a inserir valores adequados e bem sintonizados aos parâmetros K_P , K_I e K_D , representando um passo importante na determinação de um controlador com alta performance (CLAITON, 2011).

De acordo com o processo de sintonização do controlador PID, é importante ressaltar a existência de diversos métodos de sintonia, entre eles: Chien-Hrones-Reswick; Kappa-Tau; Cohen Coon; Tyreus-Luyben e Ziegler-Nichols (ZN). Entre estas aplicações, o método escolhido para este trabalho se trata do tradicional método ZN. Essa escolha ocorreu, devido sua simplicidade e robustez na parametrização de plantas de médio ou grande porte, deixando de lado métodos analíticos que se tornam demorados, custosos ou inviáveis (SANKATA B, 2015).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo realizar a aplicação do controlador PID em malha fechada, tendo como planta uma bancada teste, composta por uma motor-bomba de indução trifásico, um inversor de frequência, e um sensor transdutor de pressão sendo este responsável pela monitoração da variável de processo (VP), que irá realimentar o controlador PID de forma dinâmica e, assim, utilizar o

método sintonia de ZN na parametrização dos ganhos K_P , K_I e K_D de modo a obter uma operação eficiente do controle PID embarcado no inversor de frequência, que, por sua vez, injetará potência de forma equilibrada no motor, proporcionando ganhos energéticos.

A organização deste artigo está estruturada da seguinte forma: no segundo capítulo apresenta-se a importância da aplicação de medidas direcionada à gestão da energia elétrica, de forma a minimizar as perdas energéticas. Em seguida são trabalhadas características técnicas, percorrendo por algumas das principais estruturas do MIT, abordando os dois tipos de rotores mais utilizado no setor industrial. A partir daí faz-se um *link* com inversor de frequência, responsável pelo controle de potência aplicado em motores trifásicos. Além disso, abordam-se questões da função e configuração do PID no inversor de frequência, e para fechar o capítulo 2, abordam-se as características construtivas do transdutor de pressão e o método de sintonia de Ziegler e Nichols. O terceiro capítulo, apresenta uma breve descrição referente as características nominais dos materiais utilizado no experimento. Já no quarto capítulo são demonstrados os resultados obtidos durante a realização do experimento. Finalizando com o quinto capítulo, no qual apresenta-se a conclusão.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Eficiência Energética na Indústria

No que tange a jornada pela gestão do consumo energético, data-se a partir de 1984 o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) sendo pioneiro nesse segmento, buscando incentivar o uso de equipamentos mais eficientes. Desde então, diversos programas foram criados para potencializar a eficiência energética na indústria, entre eles:

- Índices mínimos para motores e transformadores;
- Etiquetagem de motores, bombas e transformadores de distribuição;
- PROCEL indústria,
- Programa de Eficiência Energética PEE/ANEEL.

No qual aponta-se o PEE/ANEEL desde 2015, com investimentos de R\$7,6 milhões em 6 projetos na indústria no qual visam uma economia em ganhos energéticos de aproximadamente 133GWh/ano (EPE, 2019).

Com base neste cenário, impulsionado pela forte presença dos motores elétricos trifásicos na indústria, representando alto consumo de energia elétrica, em 2002 o motor elétrico tornou-se o primeiro equipamento a ser regulamentado através do decreto (nº 4508/2002) afim de atender os índices mínimos operacionais, com base na Lei de Eficiência energética (nº 10.295/2001), sendo atualizada pela (Portaria Interministerial Nº1/2017) na qual adotou-se a categoria premium (nível IR3). Além disso a regulação passou a contemplar potências maiores chegando até 500cv. Com isso, espera-se que, entre 2019 a 2030, obtenha-se uma economia acumulada em torno de 11,2 TWh (EPE, 2019).

2.2 Motor Elétrico Trifásico AC

Os motores elétricos de indução trifásicos assíncronos são máquinas elétricas acionadas por fonte de tensão alternada, capazes de converter energia elétrica em energia mecânica na forma angular, podendo ser empregado em quase todos tipos de processos. Esse movimento angular ou movimento rotacional é fornecido na ponta do eixo do motor, também conhecida como torque, sendo uma das características dos motores assíncronos na qual são classificados quanto a sua estrutura rotórica, podendo ser construídos em dois formatos

distintos: motor de rotor bobinado e motor rotor em gaiola de esquilo (GUILHERME, 2013).

2.2.1 Motor de rotor bobinado

A Figura 3 demonstra a estrutura do rotor bobinado, composta por um conjunto de bobinas montadas sobre o eixo dando forma ao rotor, tendo como ponto de conexão à rede elétrica AC através dos três anéis coletores também montados sobre o eixo porem eletricamente isolados (STEPHEN, 2013).

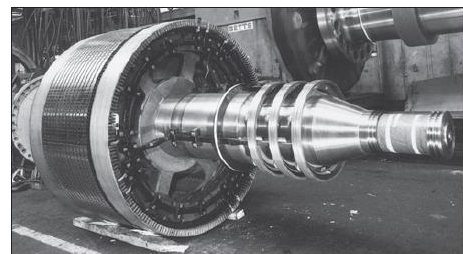


FIGURA 3 - ESTRUTURA DO ROTOR BOBINADO. FONTE: (STEPHEN, 2013).

Este tipo motor é pouco utilizado, devido aos altos custos de fabricação em versões de grande porte, tornando-se inviável à produção de motores com potencias menores. Outro ponto agravante na sua baixa aquisição, ocorre devido aos altos custos de manutenção em curtos intervalos de tempo. Por conta disso, seu emprego no segmento industrial apresenta poucas aquisições no mercado atual (STEPHEN, 2013).

Quanto ao emprego do motor de rotor bobinado, ele é usualmente aplicado no acionamento de cargas verticais, utilizado em guindastes no qual precisa-se fazer o controle preciso na elevação de cargas de alta inercia. A estrutura deste rotor é composta por bobinas habitualmente ligadas em estrela, tendo seus terminais ligados a três anéis presos mecanicamente ao eixo, porém, eletricamente isolados. Referente a sua conexão à rede de alimentação elétrica, esta ocorre via escovas comutadoras dispostas na parte fixa, chamada de estator (JOÃO MAMEDE, 2017).

2.2.2 Motor de rotor em gaiola de esquilo

O motor com rotor em gaiola de esquilo é um dos mais utilizados em vários segmentos do setor industrial. Sua expressiva presença ocorre perante sua simplicidade estrutural, que, embora simples, transmite muita robustez ligado à durabilidade de suas peças internas e externas, e pela linearidade operacional, quando comparado com o motor em rotor bobinado, que demanda mais cuidados em termos de manutenção. A seguir, na Figura 4, demonstra-se a estrutura do motor com rotor em gaiola de esquilo, sendo qualificado pelo alto desempenho rotacional e pelo baixo custo de aquisição e manutenção (STEPHEN, 2013).

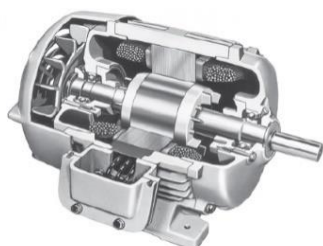


FIGURA 4 - ESTRUTURA DO MOTOR COM ROTOR EM GAIOLA DE ESQUILO. FONTE: (STEPHEN, 2013).

O rotor em gaiola de esquilo é caracterizado pelos baixos custos, tanto na parte de manutenção, quanto na parte operacional. Sua estrutura é composta por um conjunto de barras aletadas não isoladas e interligadas nas extremidades por anéis condutores curto-circuitados. Esta parte é responsável pela interação com as correntes estatóricas na formação do campo girante. Referente à parte fixa denominada estator, na qual estão previamente instaladas três bobinas defasadas de 120°, responsáveis pela formação do campo magnético girante, em que, através da frequência do sistema de alimentação, pode-se estabelecer a velocidade angular (JOÃO MAMEDE, 2017).

2.3 Inversor de Frequência

Os inversores de frequência são equipamentos eletrônicos capazes de fazer o acionamento e controle de motores elétricos trifásicos por rampa de tensão ou de corrente, podendo também atuar no controle da velocidade com base na modulação da frequência. Sua topologia se baseia comercialmente em quatro módulos, são eles: circuito de controle, de retificação, de potência e o circuito de comunicação. Juntos possibilitam atuar em distintos processos, tais como: compressores de ar, ventiladores, moinhos, esteiras transportadoras, injetoras, batedores, elevadores entre outros. Na Figura 5 é demonstrado o inversor de frequência CFW500 responsável por fazer o acionamento e ou controle de velocidade de motores elétricos trifásicos (CLAITON MORO, 2014).



FIGURA 5 - INVERSOR DE FREQUÊNCIA CFW500. FONTE (WEG, 2022).

O CFW500 é um equipamento versátil que pode ser utilizado em distintas aplicações, este modelo traz embarcado o soft PCL e a função PID, que sobrepõe o funcionamento normal do inversor (WEG, 2021). Segundo Claiton Moro (2014), na Figura 6, pode ser observado a topologia eletrônica do inversor de frequência, composta por quatro módulos, o primeiro tratar-se da CPU responsável pela lógica de controle, o segundo refere-se a Interface Homem Máquina (IHM), o terceiro, à comunicação representada pelo protocolo RS485, e o quarto, modulo de retificação de

tensão alternada (AC) para tensão contínua (CC).

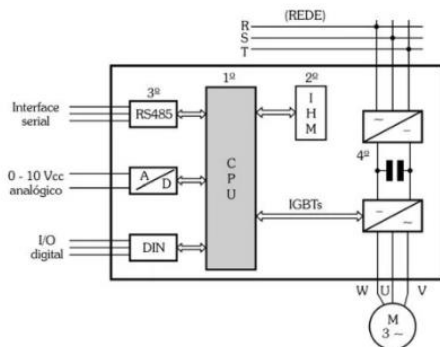


FIGURA 6- TOPOLOGIA DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA. FONTE: (CLAITON MORO, 2014).

A Unidade de Processamento Central (CPU) representa o primeiro módulo, responsável por armazenar todas informações tanto do estado do motor quanto do próprio inversor através da leitura das entradas e saídas lógicas, que podem ser digitais ou analógicas. O segundo módulo se refere à Interface Homem Máquina (IHM) ela proporciona suporte direto pelo *menu* de parametrização podendo ser facilmente visualizado todos os parâmetros disponíveis no equipamento, além disso é possível fazer o monitoramento tanto do inversor quanto do motor em tempo real. Já o terceiro módulo refere-se a *interface* de comunicação através do protocolo RS485 e pelas entradas e saídas digitais e analógicas, por fim o quarto módulo é direcionado a parte de potência no qual entra a tensão alternada transforma-se em tensão contínua e de forma intencional e lógica realiza-se a modulação do acionamento do motor.

2.3.1 Função do controlador PID no Inversor de frequência

A função do controlador PID no inversor de frequência CFW500 destina-se à uma tecnologia de fábrica, que já vem embarcado no equipamento. Possibilitando a aplicação em malha fechada, quanto a implementação do controlador, baseia-se no algoritmo denominado tipo acadêmico, no qual está estruturada a função de transferência no

domínio da frequência demonstrada na Equação 1. No entanto cabe ao usuário efetuar a configuração do PID e aplicar o método adequado para fazer sintonia dos parâmetros K_p , K_I e K_D (WEG, 2021).

$$y(s) = K_p * e(s) * [1 + 1 + sTd] * sTi \quad (1)$$

2.3.2 Configuração do Controlador PID no Inversor de frequência

Um dos pontos importantes para efetuar adequadamente a configuração de um equipamento eletrônico é, de fato, entender o processo no qual será implantado o sistema, e posse das informações pertinentes efetuar a parametrização respeitando as características nominais do equipamento visando atender a planta de forma eficiente. Nesse sentido, a WEG, através do manual de programação do inversor de frequência CFW500, prevê oito passos que deverão ser seguidos para realização adequada do controle PID. Na Figura 7 demonstra-se o bloco diagrama compondo os principais passos para realizar a configuração da função PID no inversor de frequência (WEG, 2021).

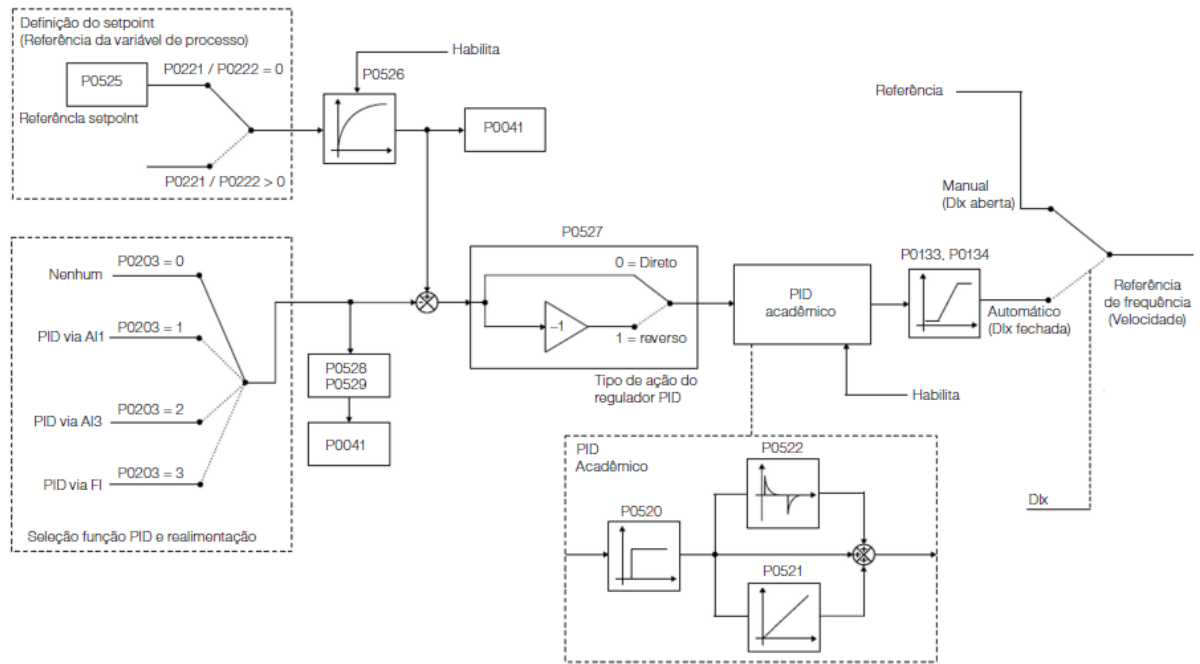


FIGURA 7 - BLOCO DIAGRAMA REGULADOR PID. FONTE: (WEG, 2021).

Através da descrição detalhada nos blocos será possível analisar questões como definição da variável de processo, escolha da entrada analógica dentre as possíveis opções para fazer a realimentação do controlador PID, definição do tipo ação do controlador podendo ser direto ou reverso, definição dos parâmetros do controlador PID acessível no bloco PID acadêmico e por fim compreender os estados de funcionamento manual e automático tendo como as características o ponto de referência de velocidade entre os dois modos de funcionamento (WEG, 2021).

De acordo as etapas de configuração do controlador, apresentada no bloco diagrama, demonstra-se, no Quadro1, a parametrização da função PID no inversor CFW500 (WEG, 2021).

Parâmetro	Ajuste	Descrição
P0230	1	Habilita PID via AI1
P0205	40	Display principal, mostra: Variável de processo
P0206	41	Display secundário, mostra: Set point
P0207	2	Mostra a velocidade do motor em % via barra gráfica
P0208	660	Fator de escala da referência
P0209	0	Unidade de engenharia
P02010	1	Forma da indicação da referência: wxy.z
P0213	660	Fundo de escala da barra
P0220	1	Operação situação: remoto
P0222	0	Referência remota: pela IHM
P0226	0	Sentido de giro do motor: horário
P0227	1	Gira/Para: entrada digital através das entradas digitais DI(x)'s
P0230	1	Zona morta ativa
P0232	1.000	Ganho da entrada analógica AI1
P0233	1	Sinal de entrada analógica AI1: 4 a 20mA
P0235	0.15s	Filtro da entrada AI1
P0236	1	Modo automático de P0525
P0263	1	Gira/Para: entrada digital através da entrada digital DI1
P0265	22	Função da entrada digital DI3: Manual/Automático
P0266	2	Função da entrada digital DI4: Habilita Geral
P0520	0,204	Ganho proporcional PID
P0521	0,393	Ganho integral PID

P0522	0,075	Ganho diferencial PID
P0525	20,0	Set Point do PID
P0527	0	Ação do PID: direto
P0528	100	Escala de indicação variável de processo
P0529	1	Forma de indicação variável de processo
P0536	1	P0525 em automático

QUADRO 1 - CONFIGURAÇÃO DO CONTROLE PID. FONTE: (WEG, 2021).

Com base nesta configuração apresentada o inversor estará pronto e em condições de operar sob regimento da função de controle PID em malha fechada. Na Figura 8 demonstra-se o esquemático da parte controle e de potência aplicado para este tipo de parametrização no CFW500 (WEG, 2021).

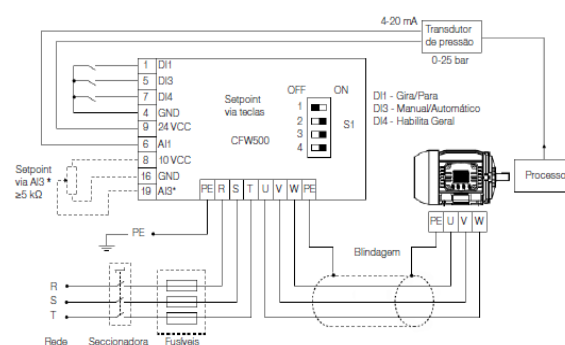


FIGURA 8 - ESQUEMÁTICO, PARTE DE CONTROLE E POTÊNCIA DO CFW500. FONTE: (WEG, 2021).

No esquemático apresentou-se um conjunto de ações dirigida a instalação elétrica do sistema de automação composto pelo inversor de frequência, motor trifásico, sensor transdutor de pressão, dispositivos de acionamento tais como botão de emergência através da entrada DI4, chave seletora gira/para pela entrada DI1 e a DI3 responsável pela seleção de manual para automático, além disso toda parte de potência direcionada a conexão do inversor na rede AC, tendo como proteção fusíveis de ação ultra rápida com objetivo de intervir na queima do equipamento bem como a chave de manobra que auxilia em momentos de manutenção (WEG, 2021).

2.4 Sensor

Um elemento sensor destina-se a leitura de formas de energias presente no meio ambiente, tais como: temperatura, pressão, vazão, velocidade, corrente elétrica, aceleração, posição entre outros. Porém, em alguns casos existem a necessidade de conversão do sinal de saída, no qual este processo é nomeado como, amplificação ou transdutor de sinal. Ha sensores que executam todo processo de leitura do sinal de entrada e conversão do sinal de saída em um único invólucro, já outros sensores efetuam apenas a leitura do sinal de entrada, necessitando de um conversor externo para ajustar o sinal de saída (DANIEL THOMAZINI et al., 2018).

Segundo Daniel Thomazini et al. (2018), os sensores são representados por duas famílias, sendo a primeira a dos sensores digitais, também conhecida como sensores discretos pelo simples fato de poder assumir apenas dois estados de saída ao longo do tempo, sendo zero (0) desligado ou um (1) ligado. A segunda família trata-se dos sensores analógicos, capazes de assumir qualquer valor ao longo do tempo, dentro da sua faixa de trabalho pré-estabelecido.

2.4.1 Sensor Transdutor de Pressão

O transdutor de pressão está estruturado na propriedade piezoelétrica, fornecida pelo cristal de quartzo, que atua como um gerador de sinal quando submetido a uma deformação elástica, produzindo uma diferença de potencial entre seus terminais através do plano cristalográfico, que normalmente tem formato de disco. Porém, existem outros modelos que variam de acordo o fabricante ou projeto. Na Figura 9 é possível analisar a forma construtiva e operacional do sensor de pressão piezoelétrico (DANIEL THOMAZINI et al., 2018).

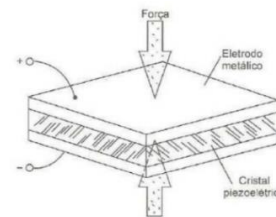


FIGURA 9- ESTRUTURA FÍSICA DO SENSOR DE PRESSÃO PIEZOELÉTRICO. FONTE: (DANIEL THOMAZINI et al. 2018).

A estrutura física do sensor transdutor de pressão baseia-se na composição de duas placas metálicas e ao centro localiza-se o material de quartzo responsável pela conversão da força mecânica em elétrica, e através de um circuito eletrônico específico é possível converter os sinais para ser lido em distintos equipamentos de controle industriais, comercialmente a maioria dos transdutores já conta com toda essa funcionalidade em um único encapsulamento. Na Figura 10 apresenta-se o encapsulamento do sensor de pressão, composto pelo disco de quartzo e o corpo de pré-carga (DANIEL THOMAZINI et al. 2018).

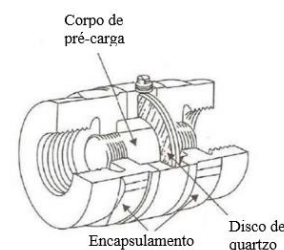


FIGURA 10- ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO SENSOR DE PRESSÃO PIEZOELÉTRICO. FONTE: (DANIEL THOMAZINI et al. 2018).

O sensor de pressão piezoelétrico apresenta características estruturais, com expressivo grau de dureza e excelente propriedade elétrica, capaz de transformar a deflexão oriunda da força mecânica imposta em sinais elétricos. O sinal mecânico gerado pela ação da força é captado pelo elemento sensível e transformado em tensão na ordem de milivolts, e por fim, por intermédio de um circuito interno no mesmo encapsulamento do sensor, estes sinais elétricos são tratados e amplificados

tornando-se de fácil leitura em equipamentos industriais. (DANIEL THOMAZINI et al. 2018).

2.5 Método de Sintonia Ziegler Nichols

Visando otimizar o processo industrial e viabilizar o comércio dos controladores, os pesquisadores Ziegler e Nichols (ZN) aliaram-se para desenvolver uma regra prática que contribuísse de forma otimizada e eficaz, tanto em plantas possíveis de modelar, quanto em sistemas complexos. Os esforços direcionaram-se na determinação dos parâmetros K_p , K_i e K_d , no intuito de obter valores satisfatórios, tanto em regime transitório quanto no regime permanente. No entanto, os valores encontrados inicialmente não devem ser tomados como absolutos, mas sim como ponto de partida na determinação dos parâmetros, na qual desta regra ZN, deriva-se os dois métodos de ajuste fino, tornando uns dos métodos mais popular no segmento industrial devido sua praticidade (OGATA, 2010).

O procedimento de sintonização do controlador no método 1 baseia-se inicialmente em colocar o controlador em modo manual. Deixando aberta a malha do sistema, e em seguida aplica-se um pulso unitário na entrada do controlador, possibilitando analisar a dinâmica do sistema, no qual espera-se um sinal aproximado em forma de S, neste sentido demonstra-se na Figura 11 o gráfico do sinal de saída do sistema obtida de forma experimental (OGATA, 2010).

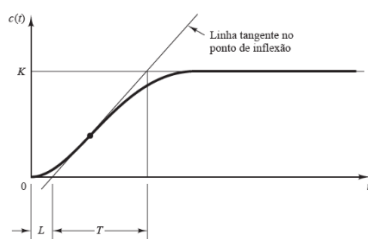


FIGURA 11 – CURVA RESPOSTA EM FORMA DE S. FONTE: (OGATA, 2010)

De acordo com Ogata (2010), tomando como exemplo a imagem gráfica, será possível traçar uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva para determinar a intersecção da reta com os eixos dos tempos e a linha $c(t) = K$, no intuito de obter as constantes de atraso e a constante de tempo, L e T , respectivamente. Além disso, servirão de base para verificar se o sistema poderá ser controlável, fazendo L/T no qual $\frac{L}{T}$ deve estar entre o intervalo $0,1 \leq \frac{L}{T} < 0,3$ e, conseqüentemente, servirá como ponto de partida na determinação dos parâmetros K_p , K_i e K_d , mediante utilização sugerida por ZN, demonstrada na Tabela 1, composta por formulas que variam de acordo o tipo do controlador escolhido podendo ser tipo P, PI ou PID.

Tipo de Controlador	K_p	K_i	K_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5 L$

TABELA 1 – MÉTODO DE SINTONIA 1 DE ZIEGLER E NICHOLS.

FONTE: (OGATA, 2010).

Esta tabela é composta por três tipos de controladores, o primeiro controlador tipo proporcional P, visa aplicar apenas o parâmetro K_p fazendo K_i tender ao infinito e K_d igual a zero, no segundo tipo de controlador trata-se do PI que trabalha com dois tipos de ação, proporcional K_p e integral K_i , por fim o terceiro tipo formado pela combinação das três ações de controle K_p , K_i e K_d fornecendo ajuste no tempo de acomodação do sinal, correção do erro e execução da ação preditiva mediante aplicação dos três ganhos respectivamente (OGATA, 2010).

3. Materiais e Metodologia

3.1 Recursos do trabalho

Este trabalho foi desenvolvido através da realização de experimentos com uso do protótipo, apresentado na Figura 12, compondo os dispositivos elétricos de controle e acionamento bem como a estrutura hidráulica na qual estão inseridos os três registros R1, R2 e R3 que possibilitam realizar as perturbações no sistema.



FIGURA 12 - BANCADA TESTE. FONTE: (PRÓPRIA AUTORIA, 2022)

O motor bomba é responsável por gerar vazão suficiente no sistema de modo a propor pressão e vazão de acordo a demanda de funcionamento do conjunto hidráulico. Na figura 13 destaca-se os equipamentos de controle, acionamento e proteção, responsáveis por gerir a operação do motor bomba.

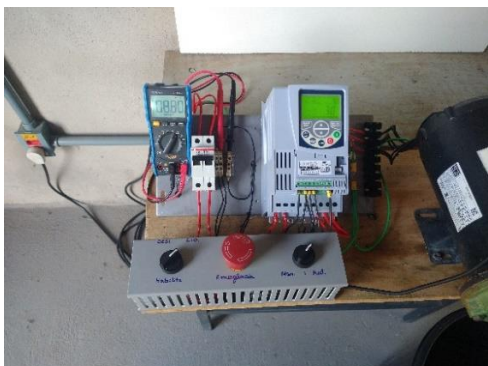


FIGURA 13 - DISPOSITIVOS DE ACIONAMENTO E CONTROLE. FONTE: (PRÓPRIA AUTORIA, 2022).

O protótipo é constituído de um motor-bomba WEG com rotor em gaiola de esquilo, potência de 3 CV operando em 220

VAC, um inversor de frequência modelo CFW500 WEG, para motor de até 3 CV em 220 V, contendo o *software* embarcado do controlador PID, um sensor, transdutor de pressão de 10 Bar e sinal de modulação entre 4 a 20 mA, um multímetro, duas chaves seletoras de duas posições, um botão de emergência e um disjuntor bipolar de 10 A. Além desses, foi utilizada a parte hidráulica composta por um metro de tubulação de 1", na qual estão conectados os três registros de 3/4", três metros de mangueira de 3/4", um metro de mangueira de 1" ambas transparente e uma válvula de retenção de 1".

O funcionamento estar estruturado da seguinte forma, ao energizar a bancada teste é possível operar a bancada em dois modos através da seleção da chave seletora, em manual ou automático, no modo manual pode-se realizar o acionamento direto sendo necessário intervenção humana para efetuar a modulação da velocidade via IHM do inversor de frequência, dessa forma variar a velocidade do motor analisando o comportamento da variável de processo no intuito de manter o valor desejado de *set point*. Já no segundo modo, automático não é necessário nenhum tipo de intervenção após sua ativação, pois o sistema será realimentado com sinais proporcionais lida em campo por um sensor analógico e de acordo a necessidade de ajuste da variável de processo, no qual por intermédio do controlador PID embarcado no inversor de frequência será possível fazer a modulação da velocidade do motor no intuito de manter o valor de *set point* de forma dinâmica e estável.

3.2 Metodologia

Para obter os parâmetros do controlador PID utilizou-se o método de ZN, no qual pode-se obter a curva de reação de duas formas, através de softwares supervisórios ou de forma dinâmica. Neste trabalho foi implementado a forma dinâmica que consiste em colocar o controlador PID em

modo manual e de forma a analisar a resposta do sistema, fazer a modulação do inversor no intuito de captar o tempo de resposta em cada modulação efetuada, para suprir a variável de processo e de posse dos intervalos de tempo de resposta para cada modulação será possível plotar o gráfico através do software Excel.

A Tabela 2, foi desenvolvida para gerar os dados de estudo com base nas 12 etapas distintas de acordo a pressão de *set point* e o valor proporcional à abertura de ambos registros, caracterizando as perturbações.

	Set Point	R1	R2	R3
1	1 Bar	OFF	OFF	OFF
2	2 Bar	OFF	OFF	OFF
3	3 Bar	OFF	OFF	OFF
4	1 Bar	10% ON	OFF	OFF
5	2 Bar	10% ON	10% ON	OFF
6	3 Bar	10% ON	10% ON	10% ON
7	1 Bar	15% ON	OFF	OFF
8	2 Bar	15% ON	15% ON	OFF
9	3 Bar	15% ON	15% ON	15% ON
10	1 Bar	20% ON	OFF	OFF
11	2 Bar	20% ON	20% ON	OFF
12	3	20% ON	20% ON	20% ON

TABELA 2 - AJUSTE DE PROCESSO, PARA GERAÇÃO DA BASE DE DADOS. FONTE: (PRÓPRIA AUTORIA, 2022).

Este modelo de processo foi desenvolvido no intuito de obter ao máximo o comportamento dinâmico do sistema em distintas situações geradas nas dozes etapas, relacionando o percentual de abertura de cada registro R_1 , R_2 e R_3 variando entre 10% a 20% de abertura em modo *ON* ou podendo estar completamente fechado, em modo *OFF*, em paralelo estão inseridos seus respectivos valores de pressão de *set point* para analisar a reação da planta entre 1 Bar a 3 Bar de pressão.

4. Resultados

Neste capítulo apresentam-se o processo para obtenção da pressão de saída e da potência consumida demonstrada na Tabela 2, bem como a dinâmica de cada etapa dos

experimentos 1 e 2 demonstrados no Quadros 2 e 3.

4.1 Experimento 1

No Quadro 2 é demonstrado os dados obtidos com base no ajuste de processo ao longo das 12 etapas, podendo ser verificado o desempenho da pressão de saída, potência consumida e eficiência do sistema.

Parâmetros: $K_p = 0,7$; $K_i = 3,48$; $K_d = 0,08$			
Etapas (N°)	Pressão de saída (Bar)	Potência consumida (KW)	Eficiência (%)
1	1,0	0,6	72,83
2	1,9	1,1	50,18
3	3,0	1,7	23,01
4	0,8	1,2	45,65
5	1,9	1,4	36,59
6	0,4	1,4	36,59
7	0,3	1,3	41,12
8	0,2	1,3	41,12
9	0,2	1,4	36,59
10	0,2	1,3	41,12
11	0,0	1,4	36,59
12	0,0	1,7	23,01

Quadro 2 - Experimento 1. Fonte: (PRÓPRIA AUTORIA, 2022).

Os resultados extraídos deste experimento apresentam ganhos energéticos que variam de 23,01% a 72,83%, proporcionando economia de recursos ambientais e econômicos, viabilizando sua aplicação. Embora apresente bons resultados diante da primeira sintonização dos parâmetros do controlador, foi verificado que, em algumas etapas do processo sem perturbações ou seja todos registros fechado, em modo *OFF*, ocorreram perdas de pressão de saída comparado com o *set point*, e em paralelo ocorreu aumento considerável do consumo de energia. Além disso as etapas com perturbações mais acentuadas a partir da sexta etapa apresentam percas altas de pressão e consumo de energia elevado.

4.2 Experimento 2

No Quadro 3 é demonstrado os dados

obtidos com base no ajuste de processo ao longo das 12 etapas, podendo ser verificado o desempenho da pressão de saída, potência consumida e eficiência do sistema.

Parâmetros: $K_p = 0,204$; $K_i = 0,393$; $K_d = 0,075$			
Etapa (Nº)	Pressão de saída (Bar)	Potência consumida (KW)	Eficiência (%)
1	1,0	0,4	81,88
2	2,0	1,0	54,71
3	3,0	1,7	23,01
4	1,0	1,4	36,59
5	1,4	1,5	32,07
6	0,4	1,3	41,12
7	0,4	1,3	41,12
8	0,5	1,5	32,07
9	0,6	1,3	41,12
10	0,3	1,3	41,12
11	0,3	1,3	41,12
12	0,1	1,4	36,59

Quadro 3 - Experimento 2.

Fonte: (PRÓPRIA AUTORIA, 2022).

Após a realização da segunda sintonização dos parâmetros do controlador, obteve melhores resultados, tanto em condições sem perturbações em que se mantem os registros R1, R2 e R3 todos fechados em modo *OFF*, quanto nas etapas com perturbações mais acentuadas que variam de 10% a 20% de abertura do registro no modo *ON*, promovendo melhor estabilidade do sistema em termos de pressão comparado com *set point*, conseguindo estabilizar a pressão de saída de forma mais eficaz, obtendo eficiência energética entre 23,01% a 81,88% representando melhor viabilidade quando comparado ao experimento 1.

5. Conclusão

Este artigo buscou aplicar medidas voltado a eficiência energética, relacionado ao uso do MIT, no intuito de estabelecer um consumo de energia proporcional à demanda solicitada na ponta do eixo de um motor, visando minimizar as perdas de energia elétrica durante as flutuações de cargas impostas em sua operação, tendo como motivação a expressiva presença dos

motores elétricos trifásicos, em diversos segmentos, principalmente no setor industrial, o qual apresenta uma alta taxa de consumo de energia elétrica decorrente do volume de unidades empregadas e pelo fato da eficiência do motor também contribuir diretamente no consumo da energia elétrica.

A aplicação do controle PID em malha fechada via inversor de frequência representou uma excelente performance no desempenho energético, podendo ser verificado nas etapas dos Quadro 2 e 3, com base na coluna de potência consumida e na coluna de eficiência, na qual verifica-se, no quadro 3, o consumo de 0,4KW, gerando eficiência de até 81,88%. Além disso, foi verificado que, quanto mais preciso for o ajuste dos parâmetros do controlador PID, mais eficiente torna-se o processo, contribuindo diretamente na eficiência energética. Para esta análise, pôde-se verificar no experimento 2, após fazer um novo ajuste dos parâmetros, que se obteve melhores resultados em ganhos energéticos.

Portanto, fica evidente a necessidade de aprimoração da técnica de controle PID, no intuito de potencializar o desempenho através de sintonização dos parâmetros. No entanto como melhoria futura, pode se realizar a sintonização do controlador utilizando outros métodos de sintonia como por exemplo: Chien-Hrones-Reswick; Kappa-Tau; Cohen Coon; Tyreus-Luyben.

Referências

ANEEL. *Programa de Eficiência Energética*. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/programa-eficiencia-energetica>>. Acesso em: 15 de abr. 2021.

KADDARI, Mohamed; EL MOUDEN, Mahmoud; HAJJAJI, Abdelwahed; SEMLALI, Abdellah. *Renewable Energies, Power Systems & Green Inclusive Economy*. (REPS-GIE) - Casablanca, Marrocos (2018.4.23-2018.4.24)]. IEEE 2018. p. 1-6. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8488820>>. Acesso em 15 abr. 2021.

H. Dalvand, M. Zare. **"Techno-Economic Evaluation of Energy Efficiency Measures in Iranian Industrial 3-Phase Electric Motors"**: International Power and Energy Conference, Putra Jaya, Malaysia. IEEE 2006, pp. 1-5, doi: 10.1109/PECON.2006.346608. Acesso em 16 abr. 2021.

MORO FRANCHI, Claiton. **Acionamentos Elétricos**: 4ª ed. São Paulo: Érica, 2008.

D. PETRUZELLA, Frank. **Motores Elétricos e Acionamentos**: São Paulo: AMGH, 2013.

MOHAN, Ned. **Maquinas elétricas e acionamentos**: - 1.ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CASTRUCCI, Plínio de Lauro, BITTAR, Anselmo, MOU RASALES, Roberto. **Controle Automático**: - 2. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2018.

KATSUHIKO Ogata. **Engenharia de controle modern**: tradutora Heloísa. Coimbra de Souza; revisor técnico Eduardo Aoun Tannuri: - 5. ed. - São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**: de acordo com a norma brasileira NBR 5419:2015 /. 9 ed. – Rio de Janeiro: LTC. 2017.

FILIPPO FILHO, Guilherme. **Motor de indução**: - 2. ed. - São Paulo: Érica, 2013.

THOMAZINI, Daniel et al. **Sensores Industriais-Fundamentos e Aplicações**: 4. ed. - São Paulo: Erica, 2018.

WEG. **Manual de Programação CFW500**: 2.2 ed. 2019.

Empresa Pesquisa Energética. **Atlas de Eficiência Energética Brasil**. Relatorios de indicadores EPE. 2019.

J. CHAPMAN. Stephen. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**: 5. Ed. : AMGH, 2013.