



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

FLÁVIO APARECIDO LEITE

**COMPARATIVO ENTRE VARIADORES DE VELOCIDADE E
INVERSORES DE FREQUÊNCIA**

ARAXÁ-MG

2018

FLÁVIO APARECIDO LEITE

**COMPARATIVO ENTRE VARIADORES DE VELOCIDADE E
INVERSORES DE FREQUÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Wanderley Alves Parreira
Coorientador: Eng. Nilson Antônio de Souza

ARAXÁ-MG

2018



Serviço Público Federal
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL / ARAXÁ

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC – ATA DE DEFESA

ATA DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL do aluno Flávio Aparecido Leite

Às 20h. do dia 10 de dezembro de 2018, reuniu-se, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG/ Unidade Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado “**Comparativo entre variadores de velocidade e inversores de frequência**”, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Engenheiro de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, *Prof. Dr. Wanderley Alves Parreira*, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final.

Após a reunião da Banca Avaliadora, o candidato foi considerado: Aprovado
com nota final de: 92 /100 (noventa e dois pontos).

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. O aluno abaixo-assinado declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que as mesmas identifiquem claramente a fonte original, explicitando as autorizações obtidas dos respectivos autores, quando necessárias. Declara ainda, neste âmbito, não estar a violar direitos de terceiros.

Flávio Aparecido Leite Flávio Aparecido Leite Araxá, 10 de dezembro de 2018.
Nome do aluno Assinatura Local e data

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Araxá, 10 de dezembro de 2018.

Wanderley Alves Parreira
Prof. Dr. Wanderley Alves Parreira
Orientador

Nilson Souza
Prof. Nilson Souza
Coordenador

Admarço Vieira da Costa
Prof. Dr. Admarço Vieira da Costa
Avaliador

Sérgio Luiz da Silva Pithan
Prof. Dr. Sérgio Luiz da Silva Pithan

Marcos Cícero Faria da Silva
Prof. Me. Marcos Cícero Faria da Silva

Avaliador

Avaliador/Suplente

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO

Dedico este trabalho a Deus, que permitiu que tudo pudesse ser realizado. Aos meus pais e irmãos que contribuíram para esta conquista. E ao orientador Prof. Dr. Wanderley Alves Parreira e ao coorientador Eng. Nilson Antônio de Souza pelos valiosos ensinamentos e entusiasmo com a pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e irmãos, que ofereceram apoio em todas as etapas da minha vida.

Sou grato aos colegas de trabalho por torcerem e vibrarem com a minha conquista. Gratidão eterna aos meus orientadores, que foram incansáveis desde o primeiro encontro e nunca negaram uma ajuda.

Meu muito obrigado a Deus, que alimentou minha alma com força e tornou esse sonho possível.

EPÍGRAFE

“Escreva algo que valha a pena ler ou faça algo que valha a pena escrever.”

BENJAMIN FRANKLIN

RESUMO

Nas indústrias sempre houve uma grande necessidade de controle de vazões, na maioria das vezes a chave para o controle de um processo é exatamente o controle de uma determinada vazão. Mas durante muito tempo esse controle de vazão foi limitado devido à deficiência tecnológica, com isso esse controle era implementado com uso de motores de velocidade fixa como primeiro dispositivo de conversão de energia elétrica para energia mecânica. Era necessário um segundo dispositivo para conversão de energia que utilizava componentes mecânicos, hidráulicos ou elétricos. Em um primeiro instante para suprir essa flexibilidade de controle surgiram os controles de motores Corrente Contínua (CC). E esses, devido sua eficiência são muitos utilizados até hoje. Um problema com o uso de conversores CC é que os motores CC requerem muita manutenção se comparados com motores Corrente Alternada (CA). Com a necessidade cada vez maior de economia de energia elétrica seja devido á escassez ou devido à redução de custos de produção houve a necessidade da busca por novas tecnologias para efetuar essa variação de velocidade de forma mais econômica e eficaz. O avanço da eletrônica possibilitou a criação dos inversores de frequência. Com os inversores passou a ser possível a variação de velocidade final do motor. Com isso ficou possível o controle de velocidade com apenas um elemento, o que gerou uma grande economia, economia de energia elétrica uma vez que o motor deixou de trabalhar com sua velocidade nominal e fixa e economia de equipamentos já que não era mais necessário um segundo elemento para conversão de energia. E também com a redução de elementos necessários para essa conversão foi também reduzido o gasto com manutenção e mão de obra.

Palavras-chave: Inversor de Frequência. Eficiência energética. Controle.

ABSTRACT

In industries, there has always been a great need for flow control, most of the time the key to controlling a process is exactly the control of a certain flow. However, for a long time this speed control was limited due to technological deficiency, with this control was implemented with the use of fixed speed motors as the first electric energy conversion device for mechanical energy. A second power conversion device using mechanical, hydraulic or electrical components was required. In a first moment to supply this flexibility of control appeared the controls of motors Direct Current (DC). And these due to their efficiency are many used to date. One problem with using DC converters is that DC motors require a lot of maintenance compared to AC (AC) motors. With the increasing need for electric energy savings due to the shortage or due to the reduction of production costs, it was necessary to search for new technologies to effect this variation of speed in a more economical and efficient way. The advancement of electronics enabled the creation of frequency inverters. With the inverters, it became possible to vary the final speed of the engine. This made it possible to control speed with only one element, which generated a great saving, saving of electric energy since the engine stopped working with its nominal and fixed speed and saving of equipment since it was not necessary a second element for energy conversion. And also with the reduction of the necessary elements for this conversion was also reduced the expense with maintenance and manpower.

Keywords: Frequency Inverter. Energy efficiency. Control.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Variador tipo polia de vários estágios.....	18
FIGURA 2 - Sistema de variação por polias cônicas.....	19
FIGURA 3 - Sistema de variação por polias variadoras.....	20
FIGURA 4 - Variadores do tipo moto redutor.....	21
FIGURA 5 - Aspectos Construtivos do Motor CC.....	23
FIGURA 6 - Estrutura básica de um motor CC.....	24
FIGURA 7 - Princípio de funcionamento do motor de corrente CC.....	24
FIGURA 8 - Modo A.....	25
FIGURA 9 - Modo B.....	26
FIGURA 10 - Modulo de Potência.....	33
FIGURA 11 - Corrente Elétrica de Entrada.....	33
FIGURA 12 - Corrente elétrica de entrada.....	34
FIGURA 13 - Módulo de controle de um inversor de frequência.....	34
FIGURA 14 - Esquema blocos de um inversor de frequência.....	36
FIGURA 15 - Retomadora de rodas de caçambas.....	41
FIGURA 16 - Britador de Mandíbula.....	42
FIGURA 17 - Britador de Mandíbula.....	42
FIGURA 18 - Alimentador de Sapatas.....	44
FIGURA 19 - Alimentador de Sapatas.....	44
FIGURA 20 - Fluxograma de Processo antes da instalação dos inversores.....	45

FIGURA 21 - Fluxograma de processo apresentando os locais onde foram instalados inversores.....	45
FIGURA 22 - Fluxograma de processo dosagem de reagentes.....	46
FIGURA 23 - Fluxograma de processo dosagem de reagentes com inversores.....	47
FIGURA 24 - Fluxograma do controle de vazão com regulador de velocidade hidrodinâmico.....	49
FIGURA 25 - Conjunto de acionamento com regulador de velocidade hidrodinâmica.	49
FIGURA 26 - Conjunto de acionamento sem regulador de velocidade hidrodinâmica.	50
FIGURA 27 - Ilustração do regulador hidrodinâmico tipo Gyrol Fluid Drive.	50
FIGURA 28 - Vista interna mostrando os detalhes mecânicos do regulador hidrodinâmico Gyrol Fluid Drive.	51

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Tempo de Trabalho X Potência	54
TABELA 2 - Consumo sem inversor X Consumo com inversor.....	54
TABELA 3 - Ganhos.....	55
TABELA 4 - Custos	55
GRÁFICO 1 - Curva V/F.....	30
GRÁFICO 2 - Consumo mensal de energia médio.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CA - Corrente Alternada
- CC - Corrente Continua
- CMT - Complexo de Mineração da Tapira
- F - Frequência
- TCC - Trabalho de Conclusão de Curso
- V - Tensão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Tipos de controles antes do uso de inversores.....	17
2.1.1 VARIADORES MECÂNICOS.....	18
2.1.2 VARIADORES HIDRÁULICOS.....	21
2.1.3 VARIADORES ELETROMAGNÉTICOS.....	22
2.1.4 VARIADORES ELETROELETRÔNICOS.....	23
2.2 História do Inversor de Frequência.....	27
2.3 Inversor de Frequência.....	28
2.3.1 COMO FUNCIONA.....	29
2.3.2 TIPOS DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	29
2.3.3 VANTAGENS.....	30
2.3.4 FUNÇÕES.....	31
2.3.5 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	32
2.3.6 MÓDULOS.....	32
2.3.7 ECONOMIA DE ENERGIA.....	36
3 RELAÇÕES CUSTO/BENEFÍCIO.....	37
3.1 Em Aplicações Industriais.....	37
3.2 Alguns exemplos reais.....	38
3.3 Exemplos de cases de sucessos na Mosaic.....	40
3.3.1 RETOMADORA DE MINÉRIO.....	40
3.3.2 BRITADOR DE MANDÍBULA.....	42
3.3.3 ALIMENTADORES DE SAPATAS.....	43
3.3.4 CONTROLE DE DOSAGEM DE ÁCIDO SULFÚRICO PARA REAÇÃO 46	
3.3.5 CONTROLE DE VAZÃO EM CAIXA DE POLPA DE MINÉRIO.....	48
3.4 Estudo de caso na Mosaic CMT.....	51
3.5 Programa de uso racional de energia da Tapira - MG.....	53
4 RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	54
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

As indústrias brasileiras estão se modernizando, e cada dia mais é necessário que estas encontrem maneiras mais eficientes de controle de seus processos, pois os produtos necessitam cada vez mais qualidade, maior padronização, e também serem mais competitivos em relação a preços, e para se alcançar isso as empresas estão sempre buscando equipamentos que tenham maior precisão, que sejam de fácil instalação, e que não necessitem de muita manutenção. Há uma tendência mundial com o uso racional das fontes energéticas, onde o objetivo é utilizar o mínimo necessário de energia aumentando a produção e elevando a qualidade dos bens produzidos. Há também uma grande preocupação para que sejam usadas tecnologias que não agredam o meio ambiente, isso quando se diz respeito à indústria deve se levar em conta dois fatores fundamentais: deve-se utilizar o mínimo dos recursos naturais, tais como combustíveis e energia elétrica, e não se devem utilizar produtos que poluam ou que não gerem resíduos poluentes.

Um equipamento que possibilita ter todas as vantagens citadas acima e que vem sendo cada vez mais utilizado nas indústrias é o inversor de frequência. Inversores de frequência (também chamados de conversores de frequência) são utilizados em diversas aplicações no meio industrial para controle: de velocidade de alimentadores; de velocidades de bombas; onde eram usadas válvulas de controle; de velocidade em correias transportadoras e muitas outras aplicações.

O inversor de frequência de uma maneira bem simplificada é um equipamento eletrônico capaz de controlar a velocidade de motores de indução. Com a utilização do inversor de frequência o motor passa a trabalhar com frequência diferente da frequência da rede, isso possibilita que se possa controlar a velocidade de giro do motor de acordo com a necessidade do processo. Além disso, os inversores também trazem várias outras vantagens almejadas pelas indústrias. Vantagens como partida suave de motores, o que aumenta a vida útil dos mesmos, economia de energia elétrica, são muito precisos se comparados a outros meios para controle de velocidades, pouca manutenção, não necessita de calibrações periódicas. Como requer pouca manutenção e não requer calibração periódica isso significa alta disponibilidade de equipamento. Além das características citadas, eles disponibilizam funções extras, tais como: acionamentos de relés e temporizadores

incorporados. O inversor de frequência é um equipamento importante para que as indústrias possam alcançar esses objetivos.

Os inversores de frequência vêm substituindo outros equipamentos que eram utilizados para controle de velocidade, torque, economia de energia, entre outras aplicações no ambiente industrial (FRANCHI, 2013, p. 15).

As indústrias vêm substituindo controles onde eram usadas várias outras tecnologias como variadores eletro pneumáticos, variadores de velocidade hidráulicos, variadores para motores de Corrente Contínua (CC), controle com válvulas pneumáticas. E ainda de acordo com Franchi (2013, p. 15), “Aliada a esse aspecto está à dificuldade em obter material didático em literatura nacional que aborde o tema de forma clara sem perder a essência técnica”. Estas condições motivaram o interesse em desenvolver um Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) voltado a este assunto. Como o autor desta pesquisa trabalha na indústria e inclusive participa da substituição de outros equipamentos por aplicações com inversores de frequência foi possível desenvolver um TCC que visa ser útil para outros profissionais e que possibilite a minimização de dúvidas sobre esse assunto.

De um modo geral, através deste TCC espera-se demonstrar o motivo pelo qual tem crescido significativamente o número de aplicações em que a variação de velocidade de motores de indução é feita por uso de inversores de frequência.

Com o intuito de alcançar os objetivos propostos, iniciou-se este trabalho com uma revisão bibliográfica e posteriormente realizou-se a pesquisa de campo. Na pesquisa teórica foram analisados os tipos de controles, funcionamento, tipos de instalação e uma comparação entre os diversos tipos de inversores estudados.

Na pesquisa de campo, foi realizado um levantamento de dados de potência de motores antes e após a substituição dos controles antigos por controles com inversores de frequência. Efetuou-se também um levantamento estatístico com os dados que informavam o número de horas perdidas em manutenção no controle com inversores de frequência e nos controles antigos utilizados nas unidades da Vale Fertilizantes S.A. Posteriormente realizou-se uma comparação entre os dois métodos para se avaliar o custo/benefício e a viabilidade econômica da substituição dos controles antigos por inversores.

A pesquisa foi desenvolvida na empresa Vale Fertilizantes S.A. no Complexo de Mineração da Tapira, localizada na cidade de Tapira, Minas Gerais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para que empresas mantem-se competitivas conseguindo cada vez mais oferecer produtos mais baratos e de maiores qualidades é imprescindível que os controles de processos estejam sempre estáveis e controlados dentro de limites bem definidos. E dentro destes controles podem-se destacar principalmente os controles de insumos, que devem ser utilizados o mínimo possível sem degradar as especificações de forma não afetar os lucros do produto final.

Inicialmente vários tipos de dispositivos finais de controles foram utilizados, sendo as válvulas de controle, indiscutivelmente, os elementos finais mais utilizados e aplicados para variar ou manipular o fluxo de material que flui na variável a ser controlada, ou seja, no valor desejado desta variável.

Todavia, não desmerecendo sua importância, devido o foco do trabalho foram detalhados os elementos de controles relacionados aos equipamentos que principalmente permitem de alguma forma variar a velocidade de rotativos que afetarão as principais variáveis de processos. Assim, a seguir poderá conhecer desde os mais antigos até os mais modernos recursos usados como estratégias para conseguir manipular o controle de processo por atuação direta ou indiretamente na velocidade de equipamentos rotativos.

2.1 Tipos de controles antes do uso de inversores

Devido à velocidade dos motores elétricos de indução ser fixa, que está relacionada à característica construtiva do motor e a frequência da rede a qual está ligado, várias estratégias foram adotadas a fim de conseguir alterar a velocidade final para acionar os equipamentos. Apenas para dar uma idéia dos diferentes tipos que já foram adotados com sistemas de variação de velocidade a seguir serão destacados os seguintes tipos:

- Variadores mecânicos;
- Variadores hidráulicos;
- Variadores eletromagnéticos;
- Variadores eletroeletrônicos.

2.1.1 VARIADORES MECÂNICOS

Os variadores mecânicos são os de maiores simplicidades de construção, possuem um baixo custo e incrivelmente são utilizados até os dias atuais em alguns processos onde exigem pequenas variações de velocidade condicionada a certos limites dos equipamentos. Estes variadores subdividem em:

2.1.1.1 Polias fixas

Neste sistema não é possível realizar uma variação contínua da velocidade, ele permite variações discretas e fixas sendo utilizado onde é necessária a redução ou ampliação da velocidade final. Sempre que necessitar alterar a rotação, faz-se necessário parar a máquina para alterar a posição de correias de forma a conseguir outra relação de rotação. Além de o motor estar sempre na rotação nominal, o que produz baixo rendimento, este sistema possui outro inconveniente do ponto de vista operacional por não permitir modificações na velocidade final sem parar o equipamento e isso consegue alterar para valores já pré-definidos. A seguir é apresentado um sistema deste tipo de variação de velocidade.

FIGURA 1 - Variador tipo polia de vários estágios.

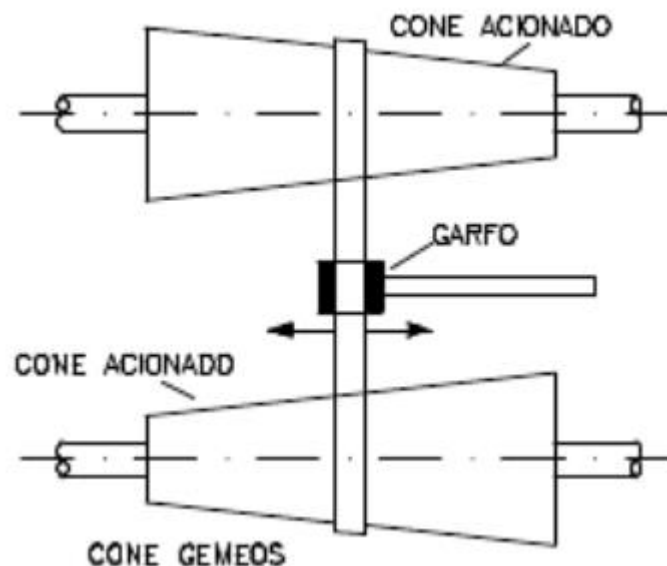


Fonte: Autoria própria.

2.1.1.2 Polias cônicas

Para este sistema são utilizadas duas polias contrapostas e com a atuação em um mecanismo chamado “garfo” é possível variar a rotação de saída de forma contínua mudando a posição da polia sobre os cones. Este sistema é utilizado onde não é desejável precisão e velocidade de alteração na velocidade final, pois a mesma depende do posicionamento da polia sobre os cones que ocorre por esforço mecânico de forma lenta e impreciso. A seguir é apresentada a ilustração deste sistema.

FIGURA 2 - Sistema de variação por polias cônicas.



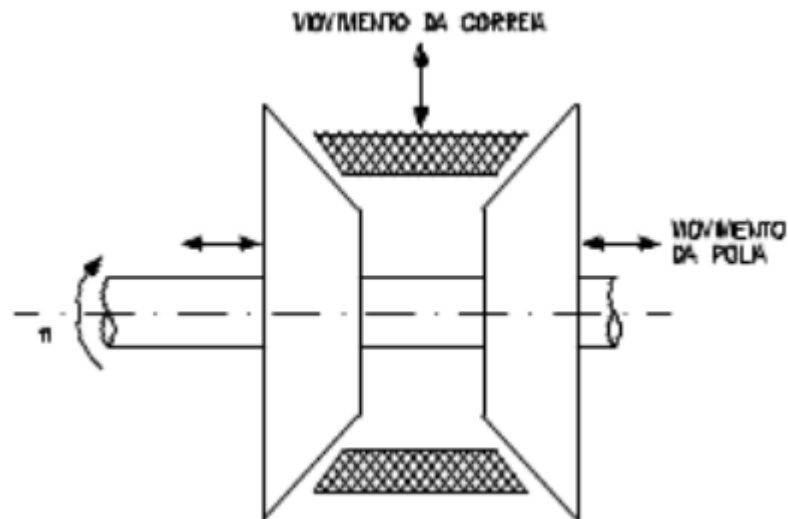
Fonte: WEG INDÚSTRIAS, s.d., p. 167.

2.1.1.3 Polias variadoras

Este sistema permite alterar a velocidade de saída através da alteração do diâmetro de uma das polias que geralmente é a polia do lado acionado. Esta polia é composta por duas flanges cônicas que podem se movimentar sobre o eixo acionado permitindo a polia, ou correia, ir para próximo do eixo ou distanciar dele. Assim, consegue alterar o diâmetro da polia acionadora consequentemente alterando a relação de redução. Este sistema é utilizado da mesma forma e

características do sistema de variação por polias cônicas. A seguir é apresentado o sistema de variação por polias variadoras.

FIGURA 3 - Sistema de variação por polias variadoras.



Fonte: WEG INDÚSTRIAS, s.d., p. 168.

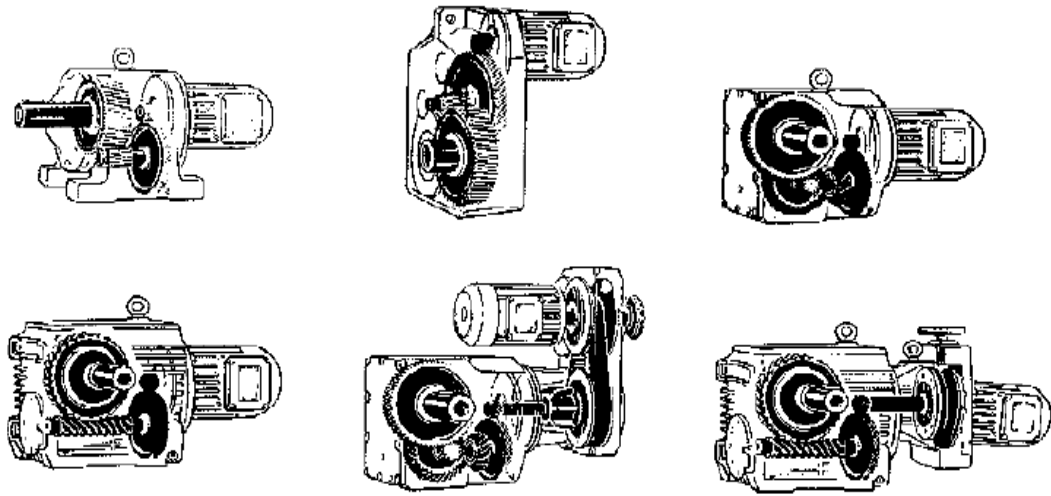
2.1.1.4 Moto redutores

Estes equipamentos permitem alterar a rotação de saída contínua ou discretamente dependendo do tipo, porém o motor sempre estará na rotação nominal, ou seja, há desperdício de energia.

Estes possuem inúmeras vantagens quando comparado aos anteriores, pois estes por possuírem um conjunto de engrenagens permitem maiores precisões nos ajustes apesar de ainda possuírem baixo rendimento.

Devido as suas características construtivas, seu uso é limitado à determinada faixas de rotação e potência. A seguir é apresentado este tipo de variador de velocidade.

FIGURA 4 - Variadores do tipo moto redutor.



Fonte: WEG INDÚSTRIAS, s.d., p. 169.

2.1.2 VARIADORES HIDRÁULICOS

2.1.2.1 Motor hidráulico

Este tipo de variador utiliza um complexo sistema composto por bomba, válvulas e tubulações sendo que o motor hidráulico de deslocamento positivo é projetado para converter a potência hidráulica em potência mecânica controlada através de dispositivos de engrenagens planetárias ou através do acionamento de pistões controlados por válvulas. A velocidade de saída é controlada através do controle da pressão do fluido hidráulico por meio de válvula. Esta forma de controle provoca grandes perdas no sistema e devido à quantidade de componentes, o mesmo torna-se bastante caro para operar e manter.

2.1.2.2 Variador hidráulico ou hidrodinâmico

Este sistema permite a variação da velocidade de saída de forma contínua do valor zero até muito próximo da velocidade de entrada. O seu princípio de funcionamento é bastante simples e pode ser detalhado por analogia utilizando-se ventiladores. Quando se tem um ventilador rodando em sua velocidade nominal e se colocarmos outro de mesmas características em sua frente, o fluxo de ar do

ventilador que está em funcionamento passará através do outro forçando-o a iniciar o seu giro. O segundo ventilador atingirá praticamente a mesma rotação do primeiro, não será igual devido às perdas. Se você colocar qualquer objeto entre os dois ventiladores restringindo a passagem de ar, poderá controlar a velocidade do segundo ventilador em função da redução de ar. No sistema variador hidráulico o princípio é exatamente igual, apenas com algumas alterações, sendo o ar substituído por óleo e as pás das do ventilador por discos aletados e tudo enclausurado dentro de uma caixa.

Resumindo, o conjunto é formado por um disco que gira na velocidade nominal do eixo de entrada, o segundo eixo de saída irá girar de acordo com a quantidade de fluido hidráulico entre os discos que permitirá transmitir maior ou menor velocidade para o eixo de saída.

Este sistema possui grande utilização onde deseja possuir uma ampla faixa de variação e precisão no ajuste de velocidade.

2.1.3 VARIADORES ELETROMAGNÉTICOS

2.1.3.1 *Embreagens eletromagnéticas*

O conceito de variação de velocidade antes predominantemente mecânico ganhou novo posicionamento uma vez que passa a utilizar conceitos envolvendo princípios físicos das correntes de Foucault, utilizando um sistema de discos acoplados por um campo magneticamente variável, variando-se assim a velocidade de saída. Porém, deve-se atentar para os seguintes pontos:

- A rotação de saída máxima será a rotação nominal do motor, nunca maior;
- Independente da rotação de saída, o motor sempre estará na velocidade nominal, ou seja, sempre existirá desperdício de energia;
- Devido às perdas por aquecimento e ruído, este sistema possui baixo rendimento;
- Devido às peças girantes, exige constantes ajustes e manutenções constantes.

Existem inúmeras formas e tipos de equipamentos que conseguem variar a velocidade de saída. As principais e mais adotadas foram já detalhadas acima permitindo que o leitor tenha o conhecimento básico para comparar estes equipamentos com as novas tecnologias disponíveis.

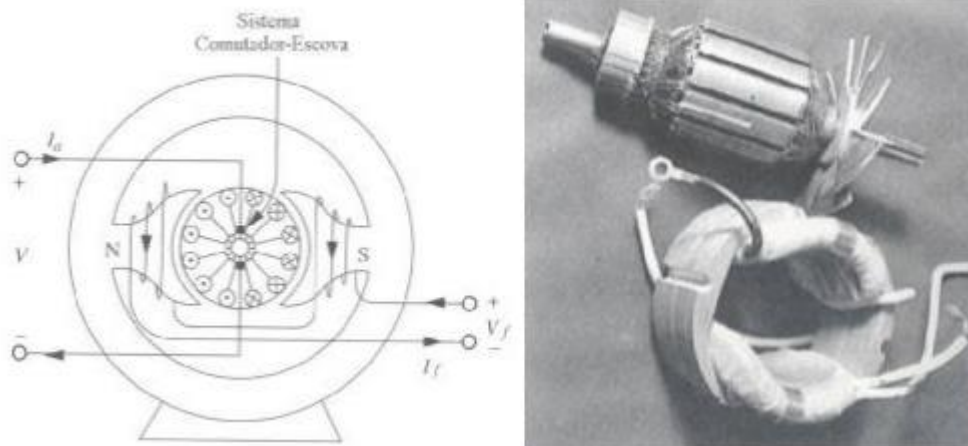
2.1.4 VARIADORES ELETROELETRÔNICOS

2.1.4.1 Motor de Corrente Contínua: princípio de funcionamento

Os motores CC são alimentados por corrente contínua. Essa tensão aplicada ao motor tem por finalidade energizar os enrolamentos, produzindo pólos eletromagnéticos que formarão a força eletromotriz (CARVALHO, 2007).

O motor de corrente contínua é composto de duas estruturas magnéticas, sendo um estator (enrolamento de campo ou ímã permanente) e um rotor (enrolamento de armadura), conforme a FIG. 5.

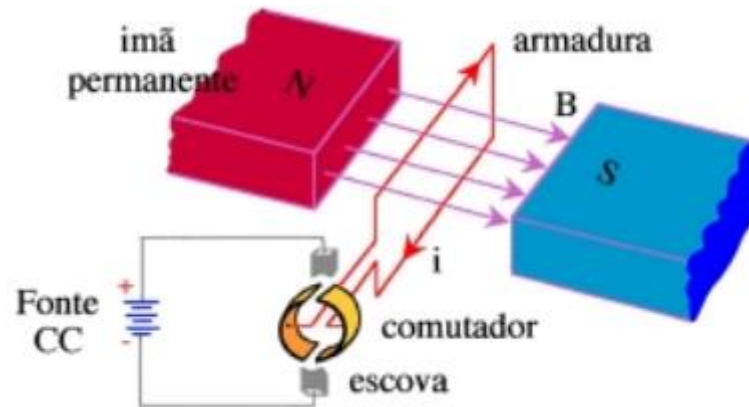
FIGURA 5 - Aspectos Construtivos do Motor CC.



Fonte: SIEMENS, 2006, p. 3.

Para auxiliar o entendimento de um motor de corrente contínua elementar com ímã permanente no estator a FIG. 6 apresenta a estrutura básica de um motor CC, onde a armadura possui apenas uma espira (dois pólos) e que o comutador possui apenas dois segmentos. As escovas de grafite são fixas e, à medida que a armadura gira uma volta, cada uma delas fica em contato elétrico com uma metade do comutador. Ou seja, a corrente na espira da armadura em um momento está em um sentido, de acordo com a comutação das escovas fica no sentido contrário. Esse mecanismo é essencial para o funcionamento dos motores CC, evitando que a armadura estacione em uma posição de equilíbrio.

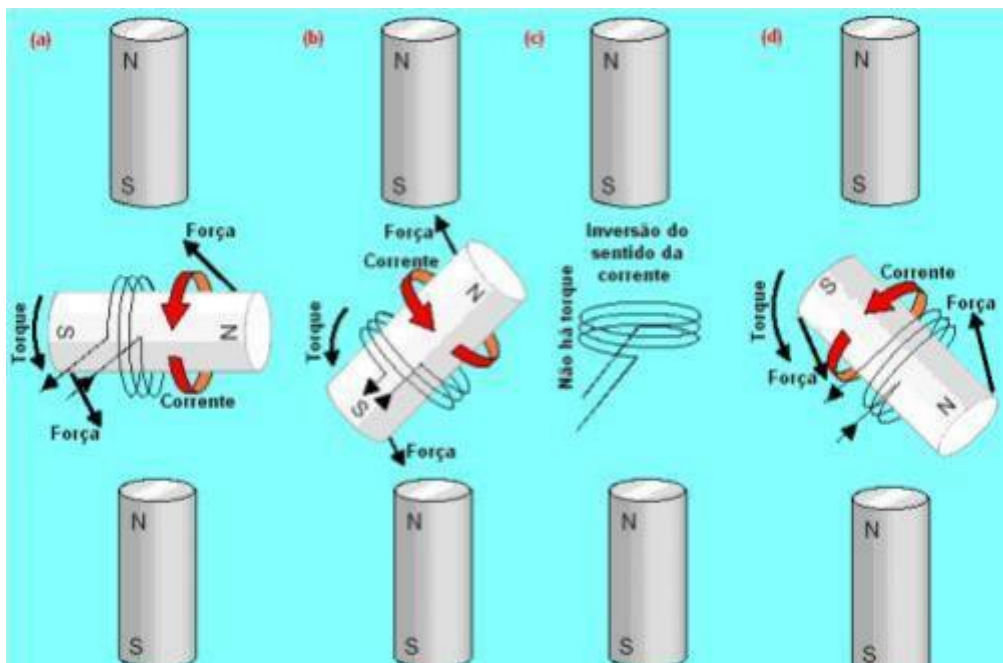
FIGURA 6 - Estrutura básica de um motor CC.



Fonte: França, 2001 p. 146.

Conforme França (2001) o funcionamento dos motores CC baseia-se no princípio do eletromagnetismo clássico pelo qual um condutor carregando uma corrente e mergulhado em um fluxo magnético fica submetido a uma força eletromagnética. Dessa forma, um condutor transportando uma corrente elétrica é atravessado por um fluxo magnético fica submetido a uma força de natureza eletromagnética. A FIG. 7 apresenta o princípio de funcionamento do motor CC.

FIGURA 7 - Princípio de funcionamento do motor de corrente CC.



Fonte: SIEMENS, 2006, p. 4.

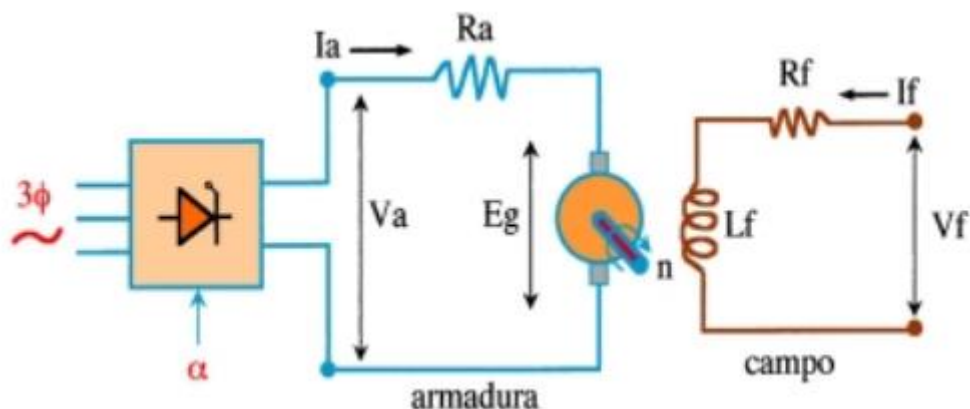
2.1.4.2 Controle de velocidade com uso de motores contínuos

O motor CC era muito utilizado nas mais variadas indústrias de diversos segmentos por possuir características que possibilitam a variação de sua velocidade, o que tornava o motor CC um grande atrativo para aplicações em processos indústrias visto que a maioria desses processos necessitam dessa característica seja para controle de uma determinada alimentação, seja para controle de vazão ou de nível de uma determinada caixa, enfim, pode possuir as mais diversas aplicações em malhas de controle, ou seja, sua aplicação é para o acionamento de cargas que precisam ter sua velocidade variada de forma controlada. De acordo com França (2006), os motores CC com excitação independente, por exemplo, podem ter sua velocidade facilmente controlada através de dois modos com base na equação:

$$n = \frac{V_a - R_a I_a}{K L_f I_f} \text{ rpm}$$

Modo A: Variando-se a tensão de armadura, V_a , através de um retificador controlado por tiristores (mantendo as demais variáveis fixas ou quase), como ilustra a FIG. 8.

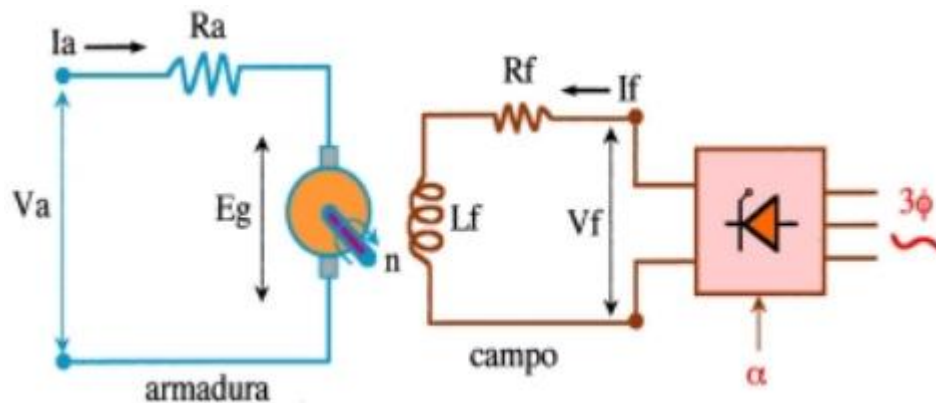
FIGURA 8 - Modo A.



Fonte: França, 2006, p. 151.

Modo B: Variando-se a corrente de campo, I_f , através de um retificador controlado por tiristores (mantendo as demais variáveis fixas ou quase), como ilustra a FIG. 9.

FIGURA 9 - Modo B.



Fonte: França, 2006, p. 151.

2.1.4.3 Controle de velocidade com o uso de inversores de frequência

A velocidade de saída no eixo dos motores de indução é determinada pela sua característica construtiva e frequência da tensão que alimenta este motor conforme a fórmula a seguir:

$$V = (120 * F) / P$$

Sendo:

V = velocidade angular síncrona do motor, em rpm;

F = frequência da rede, em Hz;

P = número de pólos;

Pela fórmula, é possível observar que pode-se alterar a rotação do motor de duas formas:

- Alterando o número de pólos, se dá de maneira discreta e como é óbvio é uma alteração física no motor;
- Alterando a frequência da rede, se dá de maneira contínua bastando apenas alterar a frequência da tensão que alimenta o motor.

Existem motores construídos propositalmente com possibilidades de alterar a quantidade de pólos de forma a alterar a sua velocidade fornecida, mas não se focará neste tipo neste estudo. O foco aqui será através da variação da frequência da tensão que alimenta o motor uma vez que o atual desenvolvimento da

eletrônica torna este processo bastante eficiente a um baixo custo permitido abranger uma ampla faixa de variação da rotação com grande precisão.

A variação da frequência é a forma mais eficiente de controlar a velocidade de rotação de um motor assíncrono permitindo controlar os equipamentos por eles acionados de forma linear e precisa desde valores tão baixos quanto zero até os valores superiores a rotação nominal do motor dependendo do variador de frequência utilizado.

2.2 História do Inversor de Frequência

O desenvolvimento de conversores de frequência com dispositivos de estado sólido ocorreu através do avanço da eletrônica de potência. Os antecessores dos inversores de frequência foram os ciclos de conversores, já que esses eram usados na conversão de 60hz da rede em uma frequência de menor valor, essa conversão era CA-CA, já os atuais inversores usam a conversão primeiro em CA-CC e depois em CA.

Durante os anos 90, o controle eletrônico era marcado pela utilização de chaves eletrônicas. Foi através desse tipo de controle que tornou-se possível melhorar consideravelmente a qualidade do acionamento, pois além de ser efetivo tinha um menor gasto de matéria-prima.

Nas indústrias o controle de velocidade de motores elétricos é muito utilizado. Esse controle de velocidade vinha sendo feito com a aplicação de motores de corrente contínua quando se almejava um controle de velocidade contínuo. Porém, devido à evolução da eletrônica de potência equipamentos adequados foram desenvolvidos, esses equipamentos são os inversores de frequência.

Os inversores de frequência estão sendo utilizados em situações energeticamente desfavoráveis, pois ao alterarem a operação do sistema de abastecimento trazem com eles o objetivo de economizar energia elétrica. Os inversores de frequência são equipamentos eletrônicos que quando conectados ao motor e a bomba tem a função de regular a velocidade de rotação de motores elétricos que utilizam corrente do tipo alternada.

2.3 Inversor de Frequência

De acordo com Hanson; Weigand & Orloff (1996), os inversores de frequência regulam a frequência de motores elétricos de forma a deixar no valor mínimo o rendimento nominal.

Tal característica faz com que os inversores de frequência sejam dispositivos com alta capacidade para auxiliar na conservação de energia elétrica através do controle de frequência de alimentação de motores adequados a mesma solicitação de carga.

Além da conservação de energia elétrica esses inversores possuem outras vantagens, como, o baixo gasto de potência reativa; o controle do tempo de aceleração e o controle da corrente de partida.

Os inversores de frequência podem ser considerados como uma caixa preta que afluente corrente elétrica, em uma dada tensão e frequência e é apto para produzir uma frequência alterada e ajustável à tensão (CAMOIRANO e DELLEPIANE, 2005).

O propósito dos acionamentos do tipo inversor de frequência é efetuar a alimentação dos motores assíncronos, de maneira que se obtenha atributos de funcionamento diferentes da sua utilização convencional mantendo a constância de amplitude e frequência.

Existem no mercado inversores de frequência para dois tipos de controle: o vetorial e o escalar. O inversor para controle vetorial é recomendado para situações onde o torque é elevado com baixa rotação, controle preciso de velocidade e torque regulável. O inversor para controle escalar é aconselhado para partidas suaves, para operações com velocidade acima da velocidade nominal do motor e operações que possuem constantes reversões. O inversor para controle escalar é uma função de tensão/frequência (V/F).

Os inversores de frequência são constituídos por uma ponte retificadora e capacitores de filtros que vão alimentar um barramento DC. Esse barramento DC alimenta transistores IGBT's que são coordenados através de uma lógica de controle, que liga e desliga-os de forma que se alterne o sentido da corrente que passa pelo motor.

2.3.1 COMO FUNCIONA

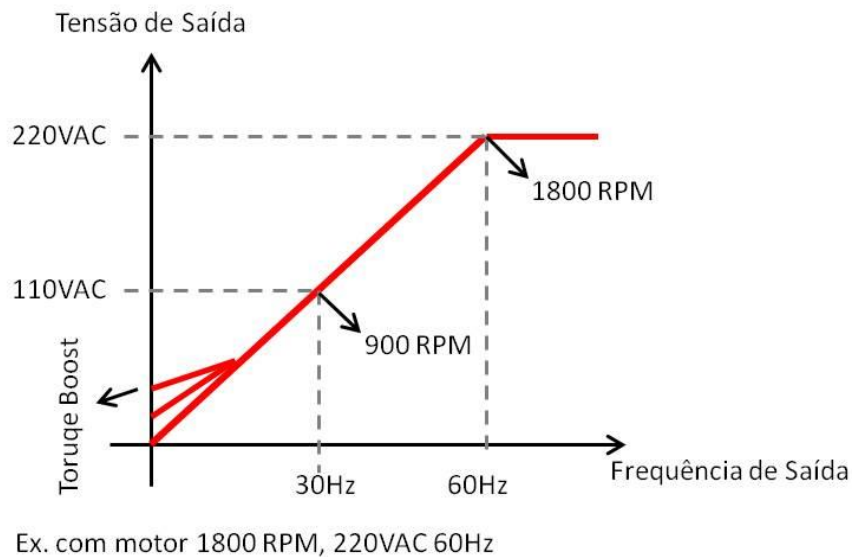
A frequência de entrada no motor estabelece a velocidade síncrona do campo elétrico pela qual o motor trabalha. O inversor trabalha alterando a frequência no momento da entrada desta no motor, se a frequência for maior, por conseguinte a velocidade do motor será maior, se a frequência for menor a velocidade também será menor.

2.3.2 TIPOS DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Conforme já citado anteriormente neste trabalho existem dois tipos de inversores de frequência: o vetorial e o escalar. A principal diferença entre eles está na curva torque x rotação.

O inversor de frequência de controle escalar funciona utilizando como referência uma curva tensão por frequência. Essa relação deve ser mantida na mesma proporção para que o torque na carga se mantenha constante. Levando isso em consideração ao se variar a frequência de alimentação do motor o inversor de frequência escalar deve também haver uma variação na tensão da alimentação de tal forma que a relação entre a frequência e a tensão seja constante. O inversor de frequência por controle escalar não possibilita altos torques em baixas rotações. Esse tipo de inversor possibilita a parametrização da curva V/F. A curva V/F está exemplificada no gráfico 1.

GRÁFICO 1 - Curva V/F.



Fonte: Service Drive, 2018.

O inversor de frequência de controle vetorial não possui uma curva parametrizada. A curva desse tipo de inversor varia com a solicitação do torque. Dessa forma, este inversor possui circuitos que variam a frequência do motor e a tensão, através de um controle das correntes do rotor e de magnetização.

2.3.3 VANTAGENS

De acordo com Ilinski (2000), Wu (2007), Braghiroli, (2005) e Rodrigues (2007) as vantagens de se utilizar um inversor de frequência em sistemas de bombeamento são:

- Limitação da corrente de partida;
- Racionamento de energia: a economia de energia onde é utilizado os inversores de frequência pode variar entre 30% a 50%;
- Diminuição do índice de vazamentos;
- Diminuição de problemas de cavitação no sistema de bombeamento relacionados à operação de válvulas de controle a baixo fluxo;
- Aperfeiçoamento no controle do processo: ajuste de vazão e pressão para as situações de operação imprescindíveis ao processo, onde pequenas oscilações podem ser corrigidas mais depressa pelo inversor de frequência do que por outra

maneira de controle, o que significa uma melhoria na performance do processo, pois possibilita a ela operar não muito distante de seu ponto de melhor rendimento;

- Aumento da vida útil da bomba, mancais e vedações pela redução do desgaste mecânico. Como o sistema que possui o inversor atua na medida exata das exigências operacionais, haverá uma maior preservação dos equipamentos e acessórios, aumentando assim a vida útil e diminuindo os gastos com manutenção;
- Troca de variadores mecânicos e eletromagnéticos;
- Automatização, segurança e flexibilidade em processos industriais;
- Instalação fácil;
- Redução de choques mecânicos na partida do motor;
- Menor intervenção humana nos processos.

2.3.4 FUNÇÕES

No momento em que se está projetando, especificando e fazendo a instalação do acionamento de motores trifásico é imprescindível que seja analisado alguns pontos para que o sistema seja capaz de atender as expectativas de produção e também potencialize os resultados dos investimentos que foram realizados durante a instalação e a operação.

Um dos vários pontos que devem ser analisados é o ciclo do motor X sua potência, já que quanto maior a potência do motor maior será a corrente na partida. Se durante o estudo que antecede a instalação for observado que o motor irá ser acionado várias vezes em pouco espaço de tempo, uma boa escolha será a utilização do inversor de frequência.

Outro aspecto extremamente importante é a utilização de acionamentos com inversores de frequência para fazer com que a eficiência energética seja aumentada por meio da regulação da velocidade do motor, fazendo com que o motor de certa forma trabalhe menos nos momentos em que o processo exige menos de todo o conjunto. Isso torna possível uma atuação de maneira mais eficiente em termos de consumo de energia elétrica.

2.3.5 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O funcionamento de um inversor de frequência ocorre em receber uma tensão alternada e retificar o sinal por meio de diodos, produzindo uma tensão contínua. O inversor filtra a tensão contínua resultante da retificação usa essa tensão contínua filtrada como entrada do circuito de inversão e faz a conversão em alternada por meio do chaveamento de transistores. O chaveamento irá gerar uma série de pulsos com uma largura controlada e variável. Quando se aplica essa saída de tensão pulsada em um motor, a forma de onda que resultará por meio do enrolamento do motor irá ser parecida com a forma senoidal de um circuito alternado.

A rede AC é retificada logo no início. Por meio de um capacitor há a formação de um barramento de tensão contínua ou de um circuito intermediário. A tensão DC pode chegar a 380 VCC para redes trifásicas de 220 VCA e até 660 VCC para redes de 380 - 480 VCA.

Os IGBT's são chaveados de três a três, o que faz com que se formem uma tensão alternada nas saídas U, V e W defasadas de 120° elétricos, como a rede. A diferença é que ele não forma uma onda senoidal, mas sim uma onda quadrada. Dessa forma, o motor elétrico AC cuja alimentação é feita por um inversor possui em seus terminas uma onda quadrada de tensão.

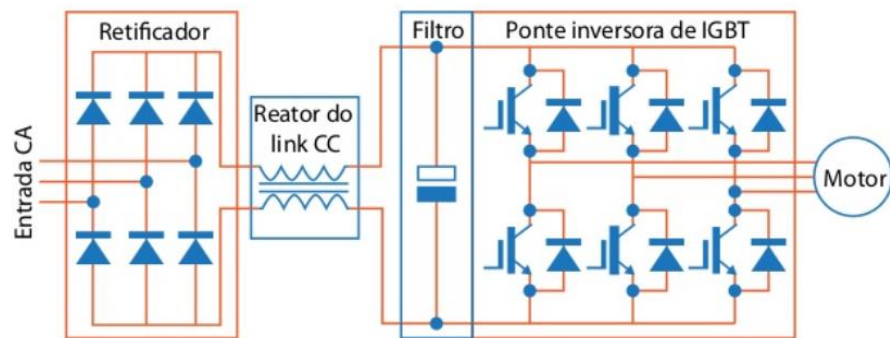
Uma tensão DC torna-se AC da seguinte forma: uma tensão da rede é filtrada fazendo a formação de um barramento DC. Em um lado da ponte estará um pólo positivo e de outro lado um pólo negativo. O circuito que faz o comando dos IGBT's é o responsável por fazer a geração dos pulsos de controle dos transistores de potência. Efetuando sob a taxa de variação do chaveamento de transistores, é possível controlar a tensão e a frequência do sinal gerado. Isso possibilita o conversor até ultrapassar a frequência da rede.

2.3.6 MÓDULOS

2.3.6.1 Módulo De Potência

O módulo conhecido como módulo de potência normalmente é formado por uma fonte retificadora, um barramento DC e uma secção inversora.

FIGURA 10 - Modulo de Potência.

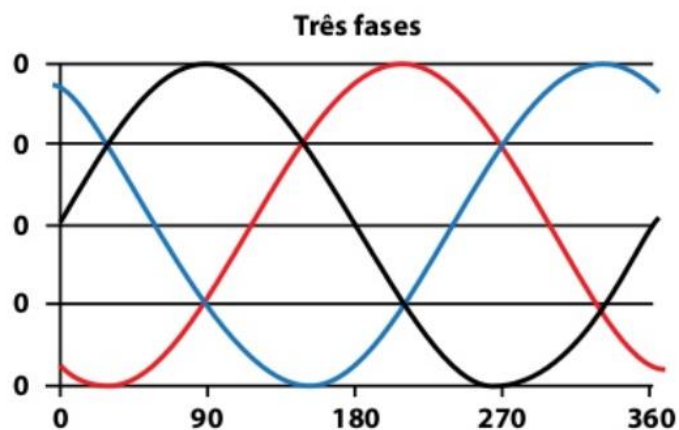


Fonte: SENAI, 2009, p. 45.

As principais partes do módulo de potência são:

- Fonte Retificadora: nos bornes L1, L2, L3 é que são conectados os cabos da alimentação externa. Essa alimentação normalmente é de 220Vac ou 380 Vac. Na FIG. 11 está representada a corrente elétrica de entrada.

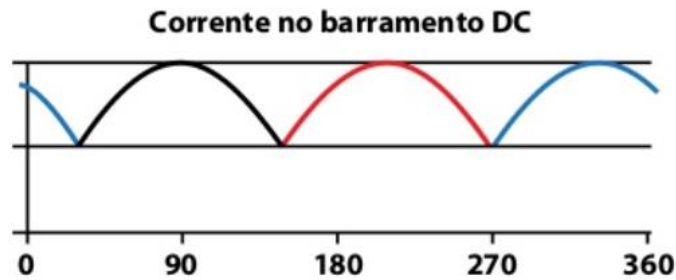
FIGURA 11 - Corrente Elétrica de Entrada.



Fonte: SENAI, 2012, p. 45.

- Barramento DC: é nesta parte que a parte negativa da corrente elétrica deixa de existir, ou seja, a corrente deixou de ser alternada e passou a ser contínua.

FIGURA 12 - Corrente elétrica de entrada.



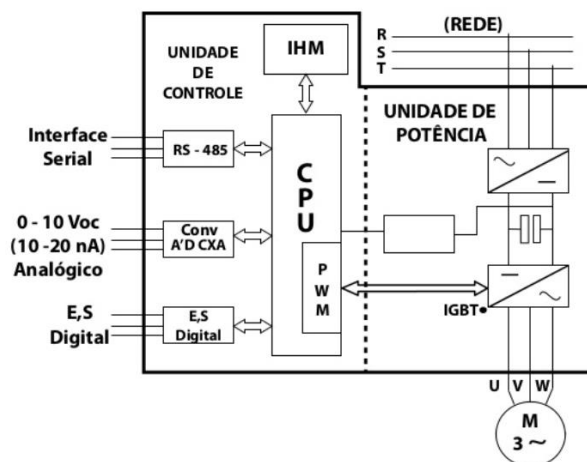
Fonte: SENAI, 2012, p. 46.

- Secção Inversora: é na secção inversora que a DC é convertida novamente em tensão trifásica AC. É por meio do controle PWM que os IGBT's são acionados. Esse controle *Pulse Width Modulation* (PWM) refere-se ao conceito de pulsar rapidamente um sinal digital em um condutor. O PWM nada mais é do que uma maneira de codificar digitalmente níveis de sinal analógico.

2.3.6.2 Módulo de Controle

O módulo de controle é constituído pela CPU, pelos blocos de interface digital e blocos de interface analógica, um módulo de interface homem máquina e uma interface de comunicação RS232/RS485 conforme mostra a FIG. 13.

FIGURA 13 - Módulo de controle de um inversor de frequência.



Fonte: SENAI, 2012, p. 51.

O módulo de controle fica recebendo sinais de entrada sejam digitais, analógico ou bus e é são desses sinais de entrada que são retiradas as principais informações necessárias para uma operação com excelência. Essas informações são: o momento em que a partida e a parada do motor precisam acontecer, se o sentido de rotação do motor é anti-horário ou horário, a velocidade que o motor deve girar em Hz. É por meio dessas informações de entrada que a CPU se torna capaz de executar os cálculos necessários, é também a CPU que determina quando cada IGBT deve ser acionado.

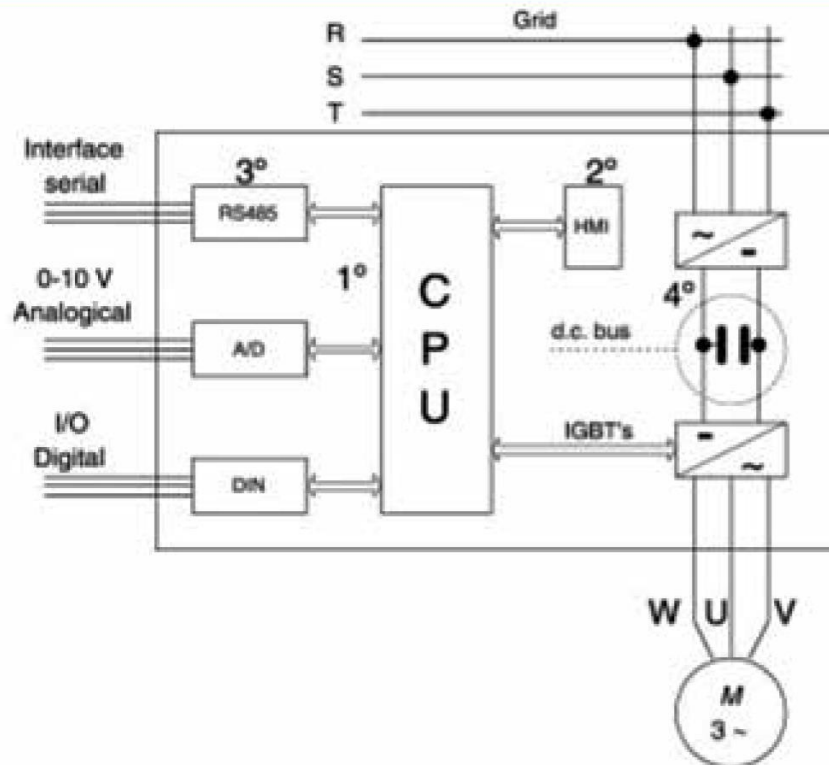
2.3.6.3 Blocos de um módulo de controle de inversor de frequência

Irvine e Gibson (2002), Capelli (2002), Wilk (2000) classificam os inversores em quatro blocos, sendo eles:

- 1º bloco - CPU (unidade central de processamento). Esse bloco é constituído por um microprocessador ou um Controlador Lógico Programável (PLC). É neste bloco que ficam armazenadas todos os dados e parâmetros do sistema. É também esse bloco que executa funções como gerações de pulsos de disparos dos IGBT'S, que basicamente são transistores que fazem a conexão do circuito, oscilando o sentido da corrente que circula no motor.
- 2º bloco - IHM (interface homem máquina). Esse dispositivo permite a visualização da forma que o inversor está parametrizado e alterá-lo caso seja necessário.
- 3º bloco - Interfaces. É o bloco que permite a interação externa com o inversor efetuando comandos que podem ser digitais ou analógicos.
- 4º bloco - Etapa de Potência. Este bloco é formado por um circuito retificador que faz a alimentação através de um barramento de corrente contínua, o módulo IGBT.

Nas FIG. 14 está esquematizados todos os blocos constituintes de um inversor de frequência.

FIGURA 14 - Esquema blocos de um inversor de frequência.



Fonte: Morante, 2015, p. 3.

2.3.7 ECONOMIA DE ENERGIA

O controlador PID dos inversores de frequência WEG ajuda a obter o melhor desempenho. Mesmo com uma redução mínima de velocidade de 20%, quase imperceptível na aplicação, o consumo de energia é reduzido quase à metade (WEG, 2013).

3 RELAÇÕES CUSTO/BENEFÍCIO

3.1 Em Aplicações Industriais

A maioria dos inversores de frequência disponíveis no mercado possuem incorporados em suas funcionalidades o controle através do regulador PID. Como exemplo pode-se citar o CFW700 que possui algumas funcionalidades que permitem adequar melhor os comandos do inversor à aplicação em si. Estas funcionalidades foram agrupadas num conjunto de aplicações, podendo ser simples, como o comando de avanço e retorno, ou mais elaboradas, como um regulador PID.

As aplicações foram implementadas utilizando a função SoftPLC, ou seja, nada mais são que aplicativos implementados em *ladder* já disponibilizados no CFW700. Isto permite que o usuário de posse do WLP e do aplicativo padrão implementado, possa alterá-lo e posteriormente utilizá-lo como um aplicativo do usuário.

O parâmetro P1003 permite selecionar uma aplicação e carregá-la para o CFW700. O CFW700 possui as seguintes aplicações já implementadas:

- ✓ Regulador PID.
- ✓ Potenciômetro Eletrônico (P.E.).
- ✓ Multispeed.
- ✓ Comando a Três Fios (Start/Stop).
- ✓ Comando Avanço e Retorno.

3.1.1.1 Aplicação Reguladora PID para CFW700

O CFW700 dispõe da aplicação Reguladora PID, que pode ser utilizada para fazer o controle de um processo em malha fechada. Essa aplicação coloca um regulador proporcional, integral e derivativo superposto ao controle normal de velocidade do CFW700. O CFW700 irá comparar o setpoint com a variável do processo e controlar a rotação do motor para tentar eliminar qualquer erro e manter a variável do processo igual ao setpoint. O ajuste dos ganhos P, I e D determinam a velocidade com que o inversor irá responder para eliminar esse erro (WEG, 2015).

3.2 Alguns exemplos reais

- ✓ Controle da vazão ou da pressão em uma tubulação.
- ✓ Temperatura de um forno ou estufa.
- ✓ Dosagem de produtos químicos em tanques.
- ✓ O exemplo a seguir define os termos utilizados pelo regulador PID.

De acordo com manual WEG CFW700 2015 uma moto bomba utilizada em um sistema de bombeamento de água onde se deseja controlar a pressão desta no cano de saída da bomba. Um transdutor de pressão é instalado no cano e fornece um sinal de realimentação analógico para o CFW700, que é proporcional à pressão de água. Esse sinal é chamado de variável de processo, e pode ser visualizado no parâmetro P1012. Um setpoint é programado no CFW700 via HMI (P1025) ou através de uma entrada analógica (como um sinal de 0 a 10 V ou de 4 a 20 mA) ou via redes de comunicação. O setpoint é o valor desejado da pressão de água que se quer que a bomba produza independente das variações de demanda na saída da bomba em qualquer instante.

Para o funcionamento da aplicação regulador PID, é necessário programar o parâmetro P0221 ou P0222 em 7 = SoftPLC.

Fica definido que:

- Função 1 da Aplicação nos parâmetros P0231 ou P0236 representa o valor do Setpoint do PID.
- Função 2 da Aplicação nos parâmetros P0231 ou P0236 representa o valor da Realimentação do PID.
- Função 1 da Aplicação nos parâmetros P0251 ou P0254 representa o valor do Setpoint do PID.
- Função 2 da Aplicação nos parâmetros P0251 ou P0254 representa o valor da Realimentação do PID.
- Função 1 da Aplicação nos parâmetros P0263 a P0270 representa o comando Manual / Automático.
- Função 1 da Aplicação nos parâmetros P0275 a P0279 representa a condição $VP > VP_x$.
- Função 2 da Aplicação nos parâmetros P0275 a P0279 representa a condição $VP < VP_y$.

O setpoint do PID pode ter como fonte a entrada analógica AI1 ou AI2, sendo necessário programar P1016 em 1 = AIx e selecionar qual a entrada analógica será utilizada em seu respectivo parâmetro P0231 (para AI1) ou P0236 (para AI2), programando-o em 5 = Função 1 da Aplicação para que a mesma seja habilitada ao funcionamento.

Caso não seja, será gerada a mensagem de alarme “A770: Programar AI1 ou AI2 para Função 1 da Aplicação”.

O valor do setpoint do PID pode ser indicado via saída analógica AO1 ou AO2, sendo necessário programar P0251 (para AO1) ou P0254 (para AO2) em 17 = Função 1 da Aplicação. O fundo de escala da variável é 100.0 % e corresponde a 10 V ou 20 mA.

A realimentação do PID pode ter como fonte a entrada analógica AI1 ou AI2, sendo necessário programar o parâmetro P0231 (para AI1) ou P0236 (para AI2) em 6 = Função 2 da Aplicação para que a mesma seja habilitada ao funcionamento. Caso não seja, será gerada a mensagem de alarme A772: Programar AI1 ou AI2 para Função 2 da Aplicação”.

Caso as entradas analógicas AI1 e AI2 sejam programadas com a mesma função, Setpoint ou Realimentação do PID, será gerado a mensagem de alarme “A774: AI1 e AI2 foram programadas para a mesma função” e o funcionamento da aplicação não será habilitado.

O valor da realimentação do PID pode ser indicado via saída analógica AO1 ou AO2, sendo necessário programar P0251 (para AO1) ou P0254 (para AO2) em 18 = Função 2 da Aplicação. O fundo de escala da variável é 100,0 % e corresponde a 10 V ou 20 mA (WEG, 2018).

O comando Manual / Automático é feito por uma das entradas digitais DI1 a DI8, devendo ser programado em um dos respectivos parâmetros (P0263 a P0270) o valor 20 = Função 1 da Aplicação. Caso mais de um parâmetro for programado para esta função, será considerado pela lógica de funcionamento somente o comando da entrada digital mais prioritária, sendo DI1>DI2>DI3>DI4>DI5>DI6>DI7>DI8. Caso não seja programada nenhuma entrada digital, o regulador PID irá funcionar somente no modo automático.

A entrada Manual / Automático é ativa quando está em 24 V indicando comando automático, e inativa em 0 V indicando comando manual.

As saídas digitais DO1 a DO5 podem ser programadas para acionar lógicas de comparação com a variável de processo (VP), devendo ser programadas em um dos respectivos parâmetros (P0275 a P0279) o valor 34 = Função 1 da Aplicação ($VP > VP_x$) ou 35 = Função 2 da Aplicação ($VP < VP_y$).

3.3 Exemplos de cases de sucessos na Mosaic

Os inversores de frequência são utilizados dentro da industriais para substituir os mais diversos sistemas de controle de parâmetros de processo dentro das indústrias objetivando redução de custos com eficiência energética, mão de obra, manutenção e paradas não programadas.

O presente trabalho apresentará de forma macro alguns sistemas de controle de variáveis de processo que foram substituídos os sistemas convencionais por sistemas onde a forma de controle é realizada através de inversor de frequência.

Pode-se descrever os seguintes sistemas:

- ✓ Sistemas de controle de retomadora de minério;
- ✓ Sistema de acionamento de britador de mandíbula;
- ✓ Sistema de controle de acionamento de alimentador de sapatas;
- ✓ Sistema de controle de nível de caixa de polpa de minério;
- ✓ Sistema de controle de vazão de ar de ventilador.

3.3.1 RETOMADORA DE MINÉRIO.

Equipamento responsável pela retomada de minério de forma que o minério seja homogeneizado pelo corte da roda de caçambas e transportado do pátio de minério empilhado até o silo de alimentação das usinas de concentração através de correias transportadoras. A retomadora é composta basicamente de uma roda de caçambas composta por 10 caçambas, o carro responsável pela movimentação transversal da roda e o truck responsável pela movimentação da retomadora.

No período de utilização de motores de corrente contínua, havia várias paradas ocasionadas por falhas nos sistemas porta escova dos motores, troca frequente de escovas e anéis coletores, maior complexidade na manutenção dos

motores, nos conversores CA/CC e número elevado de paradas para manutenção corretiva devido à falta de diagnóstico disponível.

Todos os motores de corrente contínua foram substituídos por motores de indução tipo gaiola com acionamento através de inversores de frequência, os ganhos obtidos foram redução do número de horas paradas para corretiva, eliminado necessidade de substituição de escovas, porta escovas e anéis coletores, redução do custo com manutenção de motores, visto que a manutenção em motores de indução é muito inferior se comparado com motor CC e maior agilidade no retorno após parada para manutenção corretiva devido à disponibilidade de diagnóstico de falhas agregados ao sistemas de comando composto pelos inversores de frequência.

Ainda se pode destacar o ganho relacionado às variáveis de processo visto que o sistema possibilita maior controle com relação à velocidade de deslocamento do truck, velocidade de deslocamento do carro de acordo com a altura da pilha, e velocidade de giro da roda de caçambas, todas essas flexibilidades operacionais permitem ao operador selecionar a forma de controle mais adequada a cada tipo de pilha de minério confeccionada de forma a garantir a melhor homogeneização do minério contribuindo assim para maior recuperação nas usinas de beneficiamento.

FIGURA 15 - Retomadora de rodas de caçambas.



Fonte: Direct Industry.

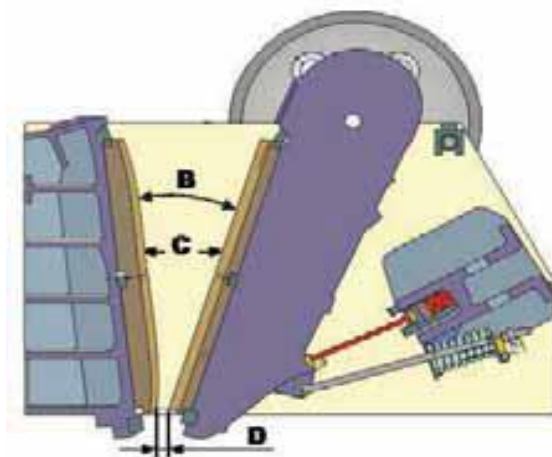
3.3.2 BRITADOR DE MANDÍBULA

FIGURA 16 - Britador de Mandíbula.



Fonte: Metso, 2010, p. 1.

FIGURA 17 - Britador de Mandíbula.



Fonte: Metso, 2010, p. 1.

Equipamento utilizado na britagem principalmente em britagens possibilitando a fragmentação de rochas de minério de grandes dimensões reduzindo-as de acordo com as necessidades dos processos seguintes.

Inicialmente era utilizado um motor de rotor bobinado para realizar o acionamento visto a necessidade de torque de partida elevado, o sistema de

acionamento do motor de rotor bobinado era composto por um painel com vários contadores os quais eram responsáveis pelo fechamento dos bancos de resistências durante a partida do motor até que a velocidade nominal fosse atingida. O sistema apresentava um número elevado de intervenções para substituição de escovas, porta escovas, limpeza de anéis coletores, substituição de contatos dos contadores, queima de resistência e número elevado de paradas para manutenção corretivas.

Realizado estudo de engenharia e o sistema foi substituído por um motor de indução tipo gaiola acionado por um inversor de frequência, de forma a flexibilizar os controles do acionamento do britador de acordo com as necessidades do processo. Dentre os ganhos obtidos com esta aplicação de inversor de frequência pode-se destacar a eliminação da necessidade de substituição de escovas, porta escovas, intervenção em anéis coletores, redução do custo com manutenção no motor, aumento da vida útil das correias de acionamento, menor fadiga mecânica do equipamento durante a partida, eliminação do número de horas paradas para manutenção corretiva e maior disponibilidade de informações para diagnóstico gerado através do inversor de frequência.

3.3.3 ALIMENTADORES DE SAPATAS

De acordo com Metso Alimentadores de Sapatas são o projeto preferido e definem o padrão para um alimentador quase livre de manutenção. O Alimentador de Sapatas Metso utiliza material rodante, correntes, roletes e rodas guias que também são usados em tratores e escavadeiras. Todos os componentes de trator são 'selados e lubrificados por toda a vida' e, portanto, não necessitam de lubrificação regular. Isso oferece ao usuário final do alimentador muitos anos de operação confiável e sem problemas.

Conforme definição da Metso, alimentadores de sapatas são equipamentos robustos com a confiabilidade necessária ao processo para o qual foram desenvolvidos, porém no exemplo que se apresenta o acionamento do alimentador era realizado através de um motor de corrente contínua devido à necessidade de variação de velocidade do processo. A velocidade era ajustada conforme o set point informado pelo operador no PID de controle do nível do silo de alimentação de minério. Como descrito anteriormente motores de corrente contínua

apresentam vários inconvenientes com relação à mão de obra, tecnologia e custo com manutenção, portanto, o sistema de acionamento foi substituído por um conjunto de motor de indução tipo gaiola acionado através de inversor de frequência, o que resultou em maior confiabilidade do sistema e conseqüentemente redução relacionado aos custos diretos e indiretos com manutenção do sistema, paradas não programadas e maior estabilidade do processo.

FIGURA 18 - Alimentador de Sapatas.



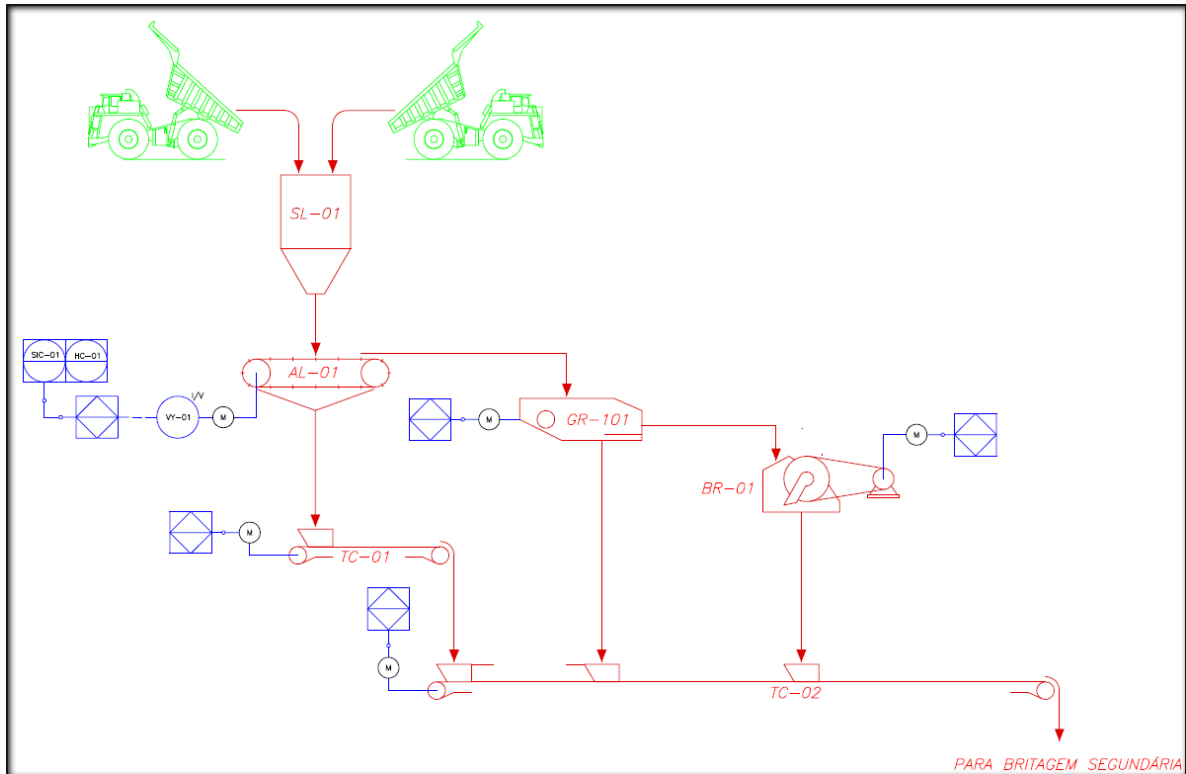
Fonte: Metso, s.d., p. 4.

FIGURA 19 - Alimentador de Sapatas



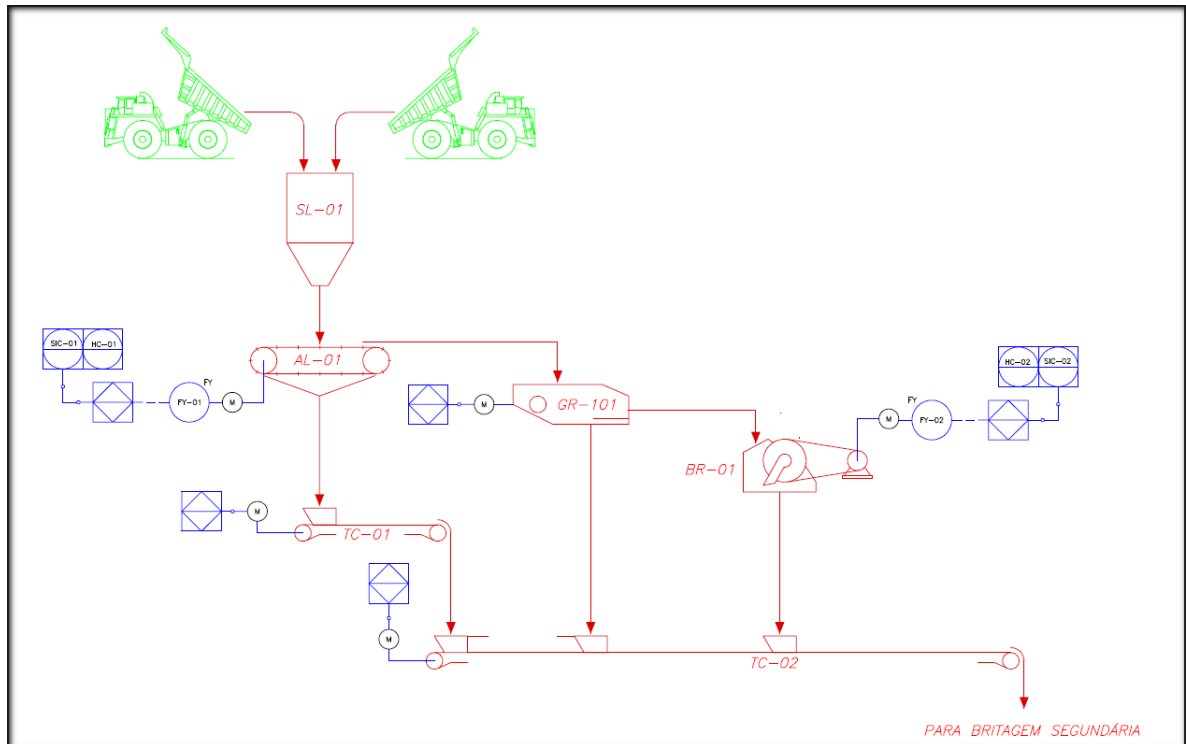
Fonte: Metso, s.d., p. 3.

FIGURA 20 - Fluxograma de Processo antes da instalação dos inversores.



Fonte: Autoria Própria.

FIGURA 21 - Fluxograma de processo apresentando os locais onde foram instalados inversores.

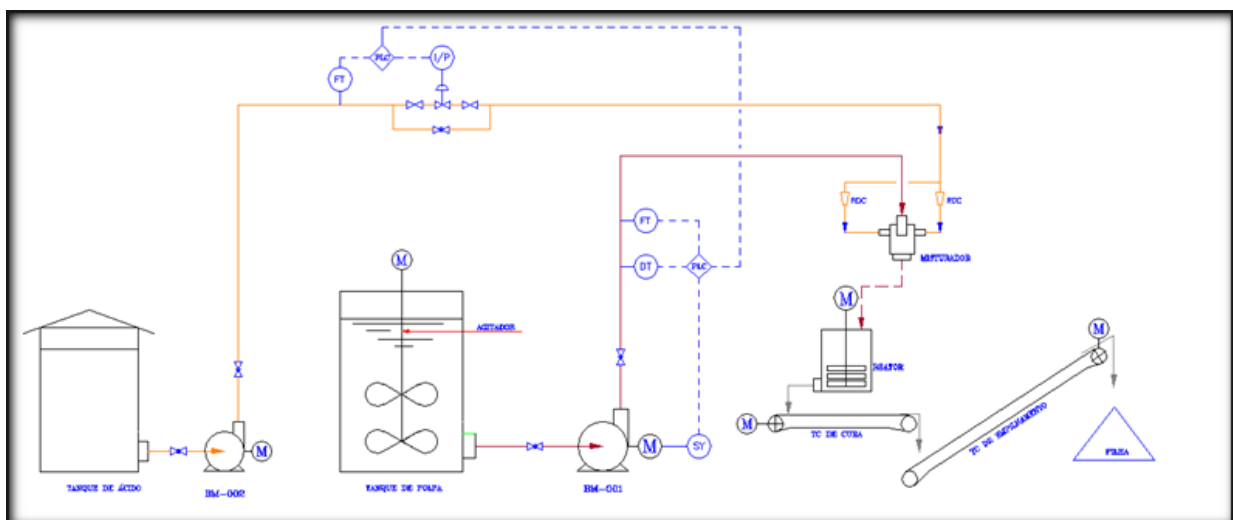


Fonte: Autoria Própria.

3.3.4 CONTROLE DE DOSAGEM DE ÁCIDO SULFÚRICO PARA REAÇÃO

No processo de produção de fertilizantes é necessário a introdução de ingredientes, geralmente rocha fosfática e ácido sulfúrico, em quantidades exatas mantendo sempre constante a relação entre estes visando manter a qualidade do produto gerado nesta reação. Durante muitos anos o processo típico mais comum adotado é o apresentado na FIG. 22.

FIGURA 22 - Fluxograma de processo dosagem de reagentes.



Fonte: Autoria Própria.

Neste processo, a relação de ácido sulfúrico e rocha fosfática são mantidas por meio de modulação de válvula de controle. Assim, quando o conjunto de medidores de vazão e densidade após a BM-001 detectam qualquer alteração na polpa, a lógica no PLC calculará a nova necessidade de vazão de ácido sulfúrico de modo a manter constante esta relação. Apesar de este sistema ser automático ainda existe os tempos de atuações da válvula que dependem de partes mecânicas tais como diafragmas e molas que devido à agressividade do ambiente industrial acabam provocando desvios devido aos atritos. Outro ponto importante a destacar, devido existir “movimentos constantes” na válvula para manter o controle e a proporcionalidade, faz com que seja necessária uma elevada manutenção.

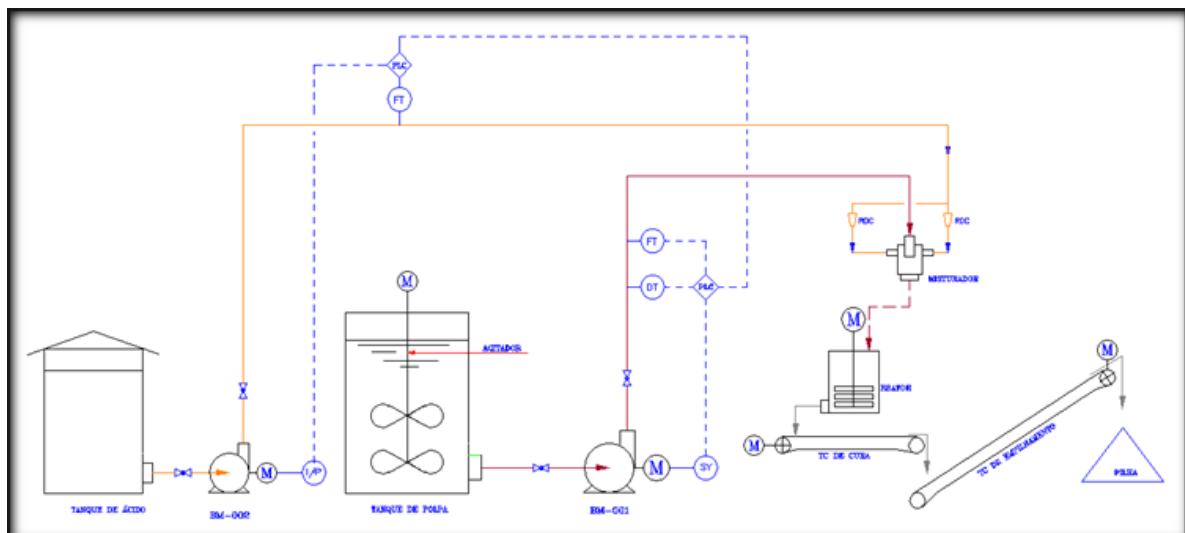
Com uma análise mais aprofundada é possível identificar outros importantes pontos que podem afetar diretamente as condições de segurança, vida útil e maior consumo energético dos equipamentos envolvidos tais como:

- Bomba BM-001 trabalhando na condição nominal independente da demanda por vazão de ácido sulfúrico;
- Pressão mais alta em toda a tubulação saindo da bomba BM-002 até válvula de controle principalmente quando a vazão demandada é baixa;
- Desgaste acelerado no rotor da bomba quando trabalhando em baixas vazões devido à recirculação interna;
- Possibilidade de vazamentos de ácido sulfúrico causando danos pessoais ou ambientais por contato com produto altamente corrosivo.

Visando minimizar as deficiências do sistema acima e ainda melhorar a velocidade de correção no controle mantendo o mais estável a relação ácido sulfúrico e polpa de rocha fosfática, bem como reduzir custos de manutenções e acima de tudo melhorar a condição de segurança realizou-se a substituição do controle por válvula de controle por controle com inversor de frequência.

Conforme pode ser observado no novo fluxograma abaixo, toda a parte mecânica de válvulas para o controle da vazão é eliminada e conseqüentemente os impactos negativos deixam de existir.

FIGURA 23 - Fluxograma de processo dosagem de reagentes com inversores.



Fonte: Autoria Própria.

Com o controle de vazão pela rotação da bomba BM-002, a relação é mantida mais estável, pois a correção é muito mais rápida. A tubulação é menos exigida, pois pode trabalhar com pressões mais baixas. Devido a estes fatores ocorre também menor consumo de energia.

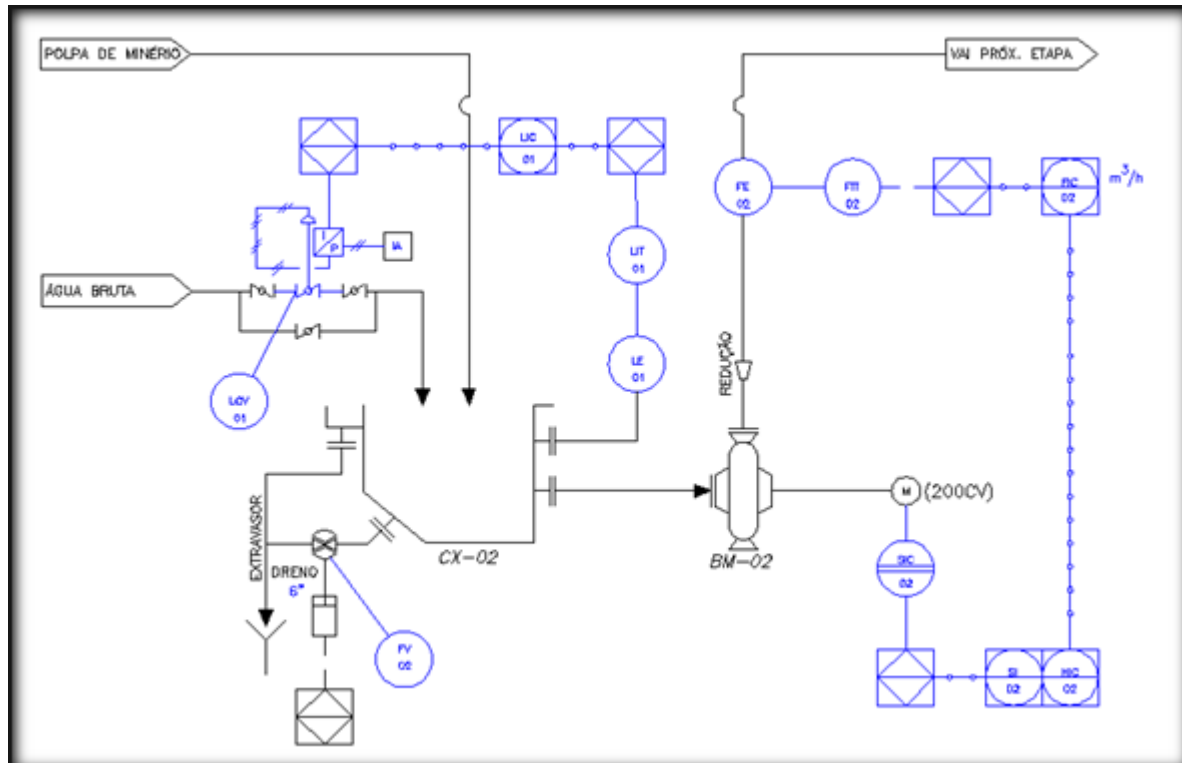
Portanto, a substituição de válvula de controle por inversor de frequência neste caso, traz inúmeros benefícios para a qualidade do processo, para a segurança, custos que juntamente todos impactam positivamente nos resultados do negócio.

3.3.5 CONTROLE DE VAZÃO EM CAIXA DE POLPA DE MINÉRIO

Nesta etapa do processo era utilizado um conjunto com motor, redutor, regulador de velocidade hidrodinâmico e uma bomba centrífuga, de forma que o regulador de velocidade hidrodinâmico possibilita-se a alteração da velocidade de acionamento da bomba centrífuga e conseqüentemente a vazão de polpa de minério que alimentação a sequência do processo produtivo. Apesar do regulador de velocidade atender as necessidades do processo, o motor era mantido sempre na sua velocidade nominal independente da necessidade de vazão do processo, o que não é uma situação benéfica do ponto de vista de eficiência energética, outro ponto importante a salientar neste exemplo é o elevado número de paradas para intervenção de manutenções corretivas no regulador de velocidade. Após a substituição do conjunto por um conjunto acionado por inversor de frequência foi possível obter ganhos relacionados à eficiência energética visto que o motor somente será operado nas condições de potência e velocidades necessárias para atender o processo e não na sua capacidade nominal, outros pontos importantes são:

- Redução do número de horas paradas para manutenção corretiva;
- Eliminação de custo com manutenção do regulador de velocidade;
- Maior estabilidade das variáveis de processos;
- Eliminação da necessidade de mão de obra especializada para manutenção no regulador de velocidade;
- Redução do espaço físico necessário para a instalação do conjunto.

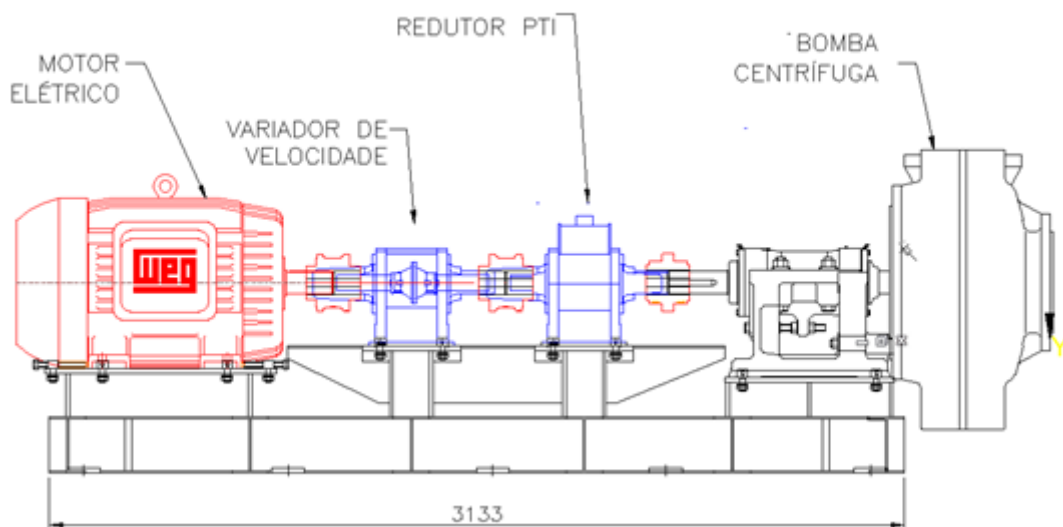
FIGURA 24 - Fluxograma do controle de vazão com regulador de velocidade hidrodinâmico.



Fonte: Autoria própria

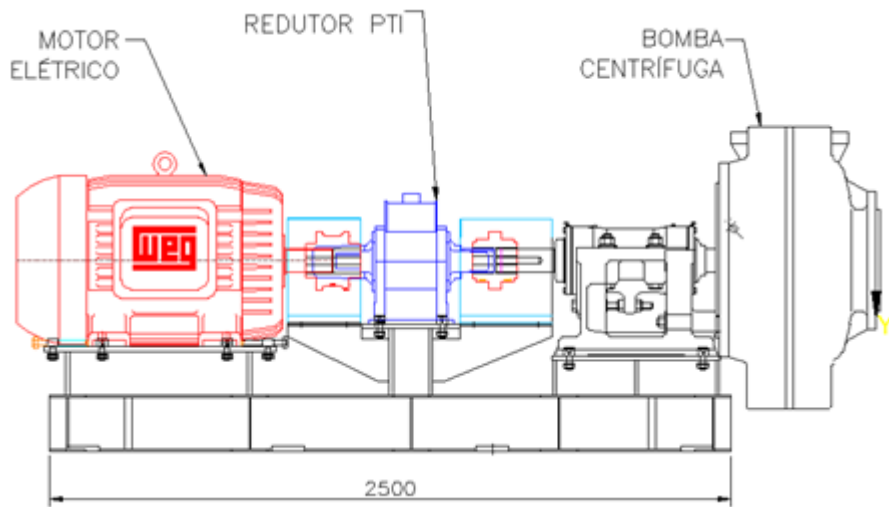
Abaixo seguem figuras para melhor visualizar a economia de espaço e eliminação de componentes mecânicos que necessitam manutenções constantes.

FIGURA 25 - Conjunto de acionamento com regulador de velocidade hidrodinâmica.



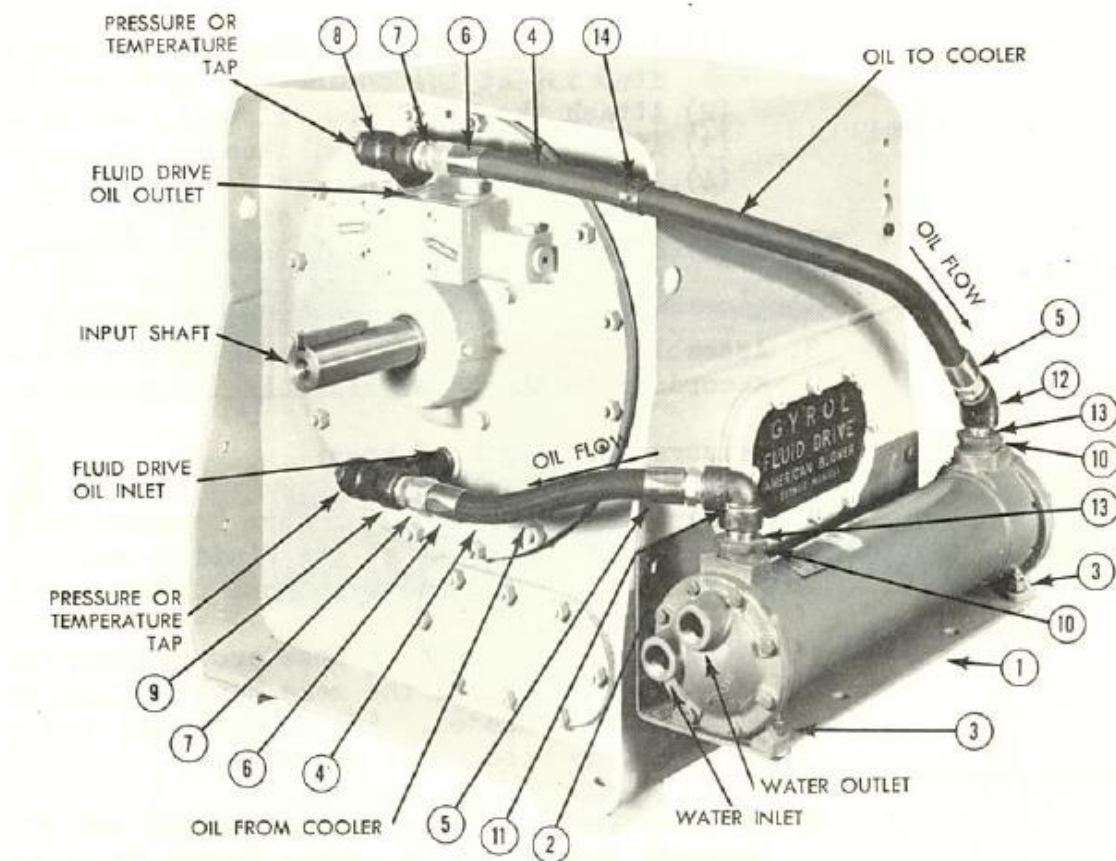
Fonte: Autoria própria.

FIGURA 26 - Conjunto de acionamento sem regulador de velocidade hidrodinâmica.



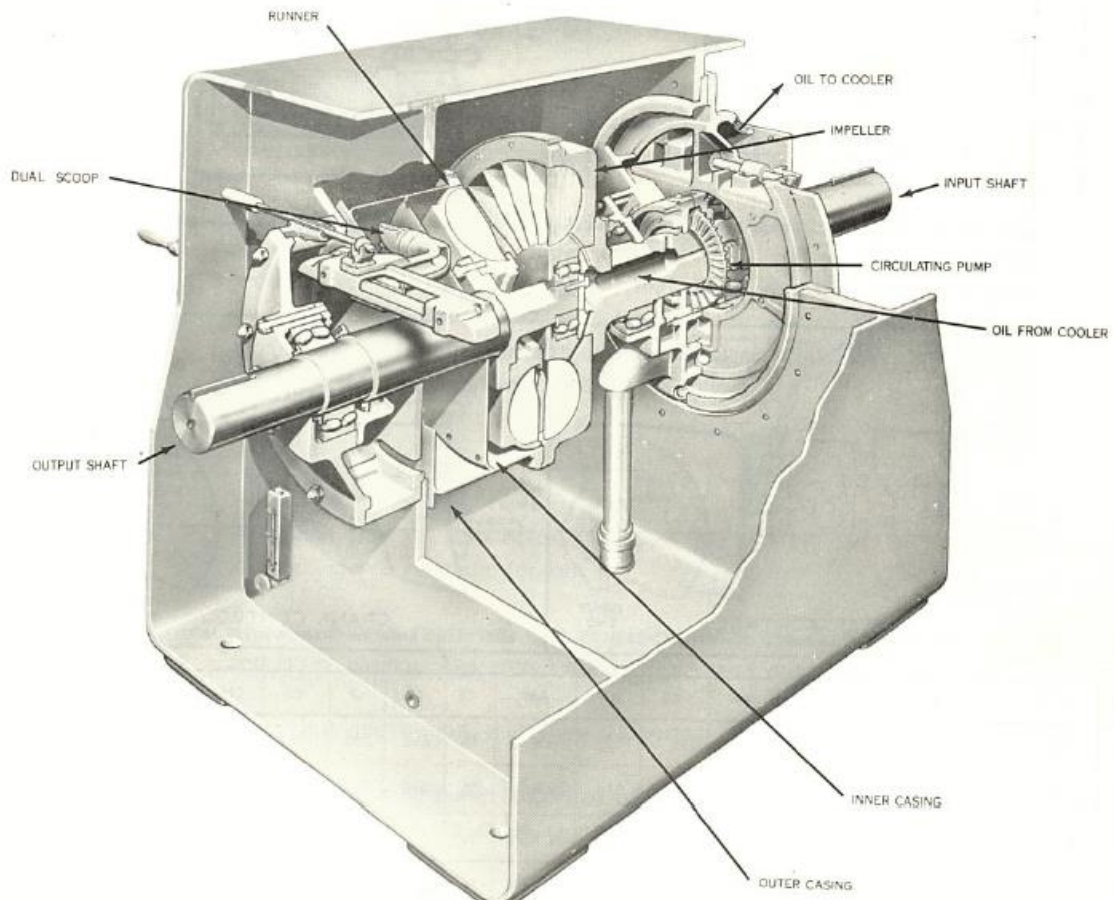
Fonte: Autoria própria.

FIGURA 27 - Ilustração do regulador hidrodinâmico tipo Gyrol Fluid Drive.



Fonte: Gyrol Fluid Drive Instruction Book, 1969, p. 31.

FIGURA 28 - Vista interna mostrando os detalhes mecânicos do regulador hidrodinâmico Gyrol Fluid Drive.



Fonte: Gyrol Fluid Drive Instruction Book, 1969, p. 33.

3.4 Estudo de caso na Mosaic CMT

O complexo de mineração localizado no município de Tapira no estado de Minas Gerais possui uma área de 78403000 m² e tem consumo total de energia elétrica de 284290 MWh/ano. O consumo específico de energia elétrica é de 165,64 kWh/t conc.

O sistema elétrico do complexo de mineração da Tapira possui uma tensão de entrada de 138 kV e uma tensão de saída de 13,8 kV. O complexo conta com três transformadores de potência 20/26 MVA resultando em uma potência total de 60/78 MVA. São treze alimentadores de saída na unidade e uma demanda contratada HP de 35000 kW e uma demanda contratada HFP de 37100 kW.

O sistema de distribuição do CMT ocorre da seguinte maneira, existe uma alimentação proveniente da CEMIG de 138 KW que é distribuída para os

transformadores e depois de transformada é distribuída para os alimentadores, motores e também é utilizada para iluminação e serviços auxiliares necessários no complexo.

Antes de iniciar a utilização de inversores no CMT passou por uma consultoria para a análise do sistema. Nessa consultoria verificou-se que haviam perdas nos acionamentos, motores superestimados, variações de velocidades desnecessárias e incrustações nas tubulações de água. As medidas tomadas para buscar uma melhoria foram a substituição de variadores de velocidade hidrodinâmicos por inversores de frequência, redução de potências instaladas, eliminação da variação de velocidade e limpeza nas tubulações.

O CMT possui 38 inversores, sendo 26 bombas de polpa, 5 transportadores de correia, 4 máquinas móveis, 2 britadores e um filtro.

Para o dimensionamento e especificação dos inversores foi feita uma verificação de ruídos na rede causados pelos inversores, antes e após a instalação, avaliou-se a estrutura pós venda do fabricante, a confiabilidade de usuários do equipamento no mercado, a disponibilidade de treinamento, a potência nominal do inversor acima da nominal do motor, o atendimento a necessidade de entrada e de saída analógicas e digitais de comando, o custo. Considerou-se a altitude do local de instalação com a tabela de redução do fabricante, definiu-se o motor com velocidade nominal próxima a velocidade de operação, os inversores estão instalados em CCM's onde não existem capacitores para a correção de Fator de Potência e o cabo do inversor e motor foram instalados conforme a orientação do fabricante.

Foram analisados problemas existentes e trabalhou-se na busca da solução para cada um deles. No caso, de motor sem ventilação forçada deve-se limitar a velocidade inferior de funcionamento do inversor em 30 % da velocidade nominal do motor. Nos motores com sensores de temperatura do tipo PT100, é necessária a aquisição de um controlador/monitor de temperatura.

Para prevenir uma grande diferença de fluxo de corrente nos cabos da mesma fase, é feita a utilização de dois cabos por fase de saída do inversor, sendo o fechamento é realizado no próprio motor. Para otimizar a parametrização é feito o travamento do motor após desligamento em operação e posterior energização.

A manutenção dos inversores é feita através do plano de manutenção preventiva

3.5 Programa de uso racional de energia da Tapira - MG

O CMT ainda conta com o programa Rebate da CEMIG, o programa foi instituído pela Lei nº 9.991, de 24 de Julho de 2000 e regulamentado pela Resolução Nº394 de 17 de setembro de 2001. As propostas do programa são o uso racional de energia elétrica buscando a preservação do meio ambiente.

Para a participação desse programa, é necessária a assinatura do termo de adesão, a confecção do relatório técnico e a comprovação de uma economia de energia elétrica no valor de 15%.

4 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Na medição de resultados, para facilitar a compreensão, foi escolhido um caso particular, a bomba centrífuga 142375, uma bomba de polpa utilizada na classificação do processo produtivo de concentrado fosfático. Os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas abaixo:

TABELA 1 - Tempo de Trabalho X Potência.

Tempo de trabalho	Carga	Potência sem Inversor (kW)	Potência com Inversor(kW)
33%	80%	176,64	147,49
33%	90%	198,72	165,93
33%	98%	216,38	180,68

Fonte: Aatoria Própria.

TABELA 2 - Consumo sem inversor X Consumo com inversor.

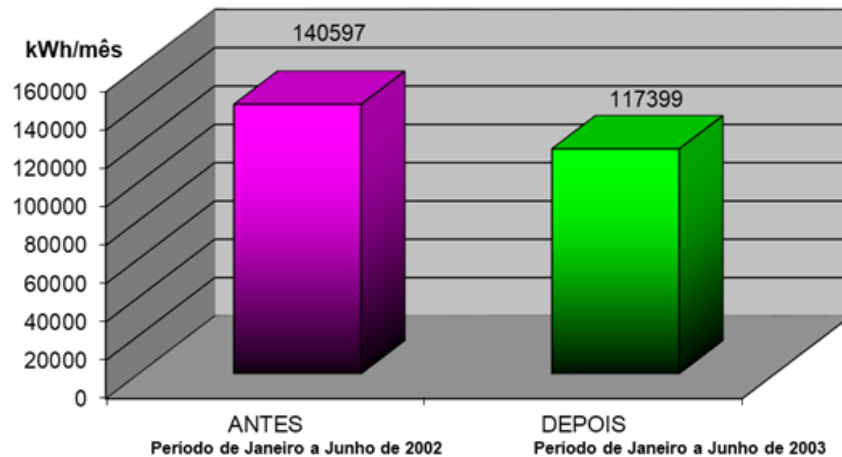
Tempo de trabalho	Consumo sem inversor (kwh mês)	Consumo com inversor (kwh mês)
33%	41969	35044
33%	47215	39425
33%	51411	42928
100%	140597	117399
Redução	16,5 %	

Fonte: Aatoria Própria.

Após a análise das tabelas é possível concluir que nessa bomba houve uma redução de 16,5% do consumo de energia elétrica. A média de redução do consumo de energia elétrica em todo CMT foi de 15,8%.

O gráfico a seguir apresenta o consumo mensal de energia elétrica da bomba 142375 antes e depois do uso de inversores de frequência no sistema.

GRÁFICO 2 - Consumo mensal de energia médio.



Fonte: Autoria Própria.

Além da redução no consumo de energia elétrica outros resultados foram obtidos, como a redução no tempo de resposta dos comandos, obteve-se uma maior precisão da velocidade da bomba acionada, houve uma redução da carga de trabalho dos operadores e uma maior estabilidade no processo produtivo.

As tabelas abaixo apresentam a análise econômica da instalação de inversores na bomba 142375.

TABELA 3 - Ganhos.

Ganhos			
Descrição	Redução	Valor Unitário	Valor Total
Consumo de Energia	278376 kWh/ano	0,13 R\$/kWh	R\$ 36.188,00
Consumo de Água	31104 m ³ /ano	0,04 R\$/m ³	R\$ 1.244,00
Manutenção	54,4 horas/ano	9,15 R\$/hora	R\$ 498,00
Redução Total por Ano			R\$ 37.930,00

Fonte: Autoria Própria.

TABELA 4 - Custos.

Custos	
Descrição	Valor Total
Inversor/Motor	R\$ 64.523,00
Transformador	R\$ 10.290,00
Materiais	R\$ 12.580,00
Mão de Obra	R\$ 1.549,00
Total	R\$ 88.942,00

Fonte: Autoria Própria.

Após a análise das tabelas, entende-se que o retorno do investimento feito será no prazo de 2 anos e 4 meses.

Dessa forma, é possível chegar à conclusão de que a instalação dos inversores de frequência no Complexo de Mineração de Tapira trouxe os seguintes benefícios: economia energética; aumento da disponibilidade de equipamentos; maior estabilidade no processo; uso racional dos recursos energéticos; e um desenvolvimento sustentável.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos com o presente trabalho possibilitou fazer uma breve análise comparativa entre a utilização de variadores de velocidade hidrodinâmicos e inversores de frequência para acionamentos de bombas de polpas de processo mineral, sendo para isso necessário entender as necessidades de controle de processo de forma a obter o melhor resultado no momento da substituição de um dispositivo de controle de velocidade convencional por um dispositivo de controle eletrônico no caso do presente trabalho o inversor de frequência, sendo ainda necessário o conhecimento aprofundado do funcionamento de cada malha de controle e as características de cada dispositivo aplicado ao seu respectivo sistema seja para controle de nível, vazão, pressão, velocidade entre outros.

Antes da instalação dos inversores de frequência no Complexo Mineração de Tapira, ficou evidente a necessidade de se realizar um estudo aprofundado de todo o sistema elétrico, assim como compreender o funcionamento dos motores elétricos e as características necessárias de partida e parada de acordo que a fase do processo ao qual o mesmo estava aplicado. Para tal o presente trabalho apresentou as características fundamentais de cada forma de controle de velocidade convencional utilizado no complexo. De forma a esclarecer ao leitor como o controle era realizado antes e como passou a ser após a implantação dos inversores de frequência.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho ficou evidente que a características inerentes nos inversores de frequência se bem utilizadas contribuem de forma significativa para redução de custos relacionados a eficiência energética, mão de obra para realizar manutenção em variadores hidrodinâmicos se comparado com inversores, tempo de parada para manutenção, estabilidade de processo, controle de fator de potência dentre outros. O trabalho tornou claro que é possível alcançar grandes resultados com a utilização deste recurso, porém ficou evidente que por mais simples que seja a aplicação é necessário conhecer as necessidades do processo e dos equipamentos nele aplicado de forma a realizar a escolha adequada e com os recursos disponíveis e necessários para garantir os ganhos desejados.

Conforme os resultados apresentados o presente trabalho mostrou de forma simples os possíveis as vantagens e desvantagens e benefícios de cada forma de controle de velocidade, destacando os resultados alcançados com redução de consumo elétrico de um equipamento selecionado por amostragem, assim como contribuição do trabalho na redução do consumo elétrico de todo o complexo.

Espera se que o presente trabalho mostre a importância e a possibilidade de ganhos ao substituir formas de controle convencionais por modelos eletrônicos mais atuais e disponíveis comercialmente, contribuindo assim para melhorar o conhecimento teórico, e deixando a oportunidade de utilizar as informações contidas neste trabalho como base para novos estudos envolvendo formas de controle e acionamentos eletrônicos que podem gerar grande redução no número de horas paradas de plantas assim como redução nos gastos com manutenção.

REFERÊNCIAS

MARTINEWSKI, Alexandre. **Máquinas Elétricas: Geradores, Motores e Partidas**. São Paulo: Érica, 2016.

FRANCHI, C. M. **Inversores de frequência: Teoria e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2013.

Inversor de frequência o que é e onde utilizar. Disponível em: www.blog.ageon.com.br/inversor-de-frequencia-o-que-e-e-onde-utilizar. Acesso em: 13 set. 2017.

MASCHERONI, J. M. **Guia de Aplicação de Inversores de Frequência**. 2. ed. Editado pela WEG.

O que é e como funciona o inversor de frequência. Disponível em: www.sabereletrica.com.br/inversores-de-frequencia/. Acesso em 13 set. 2017.

Motores De Indução Alimentados Por Inversores De Frequência PWM
Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-50029351-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acesso em: 13 set. 2017.

WEG. **Módulo 2 Variação de Velocidade**. Jaraguá do Sul, SC, s.d.

HANSON, B.; WEIGAND, C.; ORLOFF, S. **Performance of electric irrigation pumping plants using variable frequency drives**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, v.122, n.3, 1996.

CAMORIANO, R; DELLAPIANE, G. **Variable frequency drives for MSF desalination plant and associated pumping stations**. Desalination, Amsterdam, v.182, n.1, 2005.

Manutenção de inversores de frequências. Disponível em: <http://www.servicedrive.com.br/manutencao-de-inversores-de-frequencia/>. Acesso em: 20 jun. 2018.

ILINSKI, N. **Frequency Converters in Water Supply Systems for Energy Saving**. *Energy Engineering*. n. 5, Vol. 97, 2000.

WU, Z. A Benchmark **Study for Minimizing Energy cost of Constant and Variable Speed pump Operation**. World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat, 2007.

RODRIGUES, W. **Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água**. 2007. p. 234, Tese de doutorado em engenharia civil, Faculdade de engenharia civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

BRAGHIROLI, M. A. **Setor Santana: Um Caso de Sucesso na Redução de Perdas de Água e Consumo de Energia Elétrica**. Revista Saneas, São Paulo, nº 20, 2005.

Unidade Estratégica de Desenvolvimento Educacional – UEDE/Núcleo de Educação a Distância – NEAD, do SENAI do Rio Grande do Sul. **Técnicas de Controle Soft-Starters e Inversores**. Rio Grande do Sul, 2012.

IRVINE, G.; GIBSON, I. H.; **VF Drives as Final Control Elements in the Petroleum Industry** - IEEE Industry Applications Magazine, 2002.

CAPELLI, A.; **Inversores de Frequência**. Revista Mecatrônica Atual nº 2, 2002.

WILK, M.; **Emprego de Variador de Velocidade na Economia de Energia em uma Bomba Centrífuga Radial** - Anais do III Concurso WEG - Conservação de Energia Elétrica, 2000.

MORANTE, F. **Conversores de frequência em sistemas de bombeamento fotovoltaico**. O Setor Elétrico, n.114 - Jul. de 2015

DIRECT INDUSTRY. **Sandvik Mining and Rock Technology**. Disponível em: <http://www.directindustry.com/pt/prod/sandvik-mining-and-rock-technology/product-40142-646957.html>. Acesso em: 20 jun. 2018.

METSO. **Alimentador de Sapatas**. Sorocaba, SP, s.d.

METSO. **Britador de Mandíbulas Série C - Terminologias**. Sorocaba, SP, 2010.

POWER & CONTROLS GROUP. **Gýrol Fluid Drive Instruction Book**, Lihographed, USA, 1969.

Honda, F. **Motores de Corrente Contínua: Guia Rápido para uma especificação precisa**. Siemens, Edição 1, 2006.

França, A. L. M. **Motores Elétricos de Corrente Contínua e Universal**. Cap. 11. Campinas, 2001.