

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUCAS CAPUCHO SANDERS

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA EM UMA ORDENHA MECÂNICA

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2019**

LUCAS CAPUCHO SANDERS

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA EM UMA ORDENHA MECÂNICA

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Tarcísio Resende.
Co-orientador: Prof. Ms Erick Matheus da Silveira Brito.

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2019**

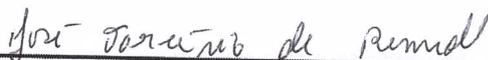
LUCAS CAPUCHO SANDERS

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA EM UMA ORDENHA
MECÂNICA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 05 de agosto de 2019.

COMISSÃO EXAMINADORA



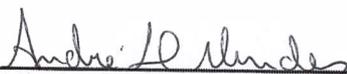
Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Orientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. M.Sc. Erick Matheus da Silveira Brito - Coorientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Membro
Universidade Federal de Viçosa



M.Sc. André Luis Carvalho Mendes - Membro
Universidade Federal de Viçosa

“As coisas que um dia eu imaginei como minhas maiores conquistas foram apenas o primeiro passo rumo a um futuro que apenas comecei a visualizar.”

(Jace Berelen)

À minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por permitir essa conquista.

Agradeço a minha família por todo apoio dado durante toda a graduação e principalmente durante a produção desse material. Agradeço também a Gregor e ao todo Laticínios Davaca pela maleabilidade oferecida a mim. Agradeço o meu co-orientador Erick que desde o primeiro dia se mostrou sempre muito solícito e compreensivo, além de apresentar domínio sobre o conteúdo. Agradeço aos meus amigos, em especial ao Victor e Patrícia que ajudaram diretamente na escrita desse trabalho. Agradeço aos funcionários da Fazenda Turmalina pela paciência durante a instalação e realização dos testes. Por fim agradeço ao meu pai, Márcio, que foi imprescindível para a elaboração desse projeto, desde a concepção até o resultado final.

RESUMO

A ordenha mecânica é um equipamento que utiliza um sistema de pressão negativa (vácuo) para realizar a ordenha de animais. Já consolidada na produção de leite, a ordenha mecânica é imprescindível para qualquer produtor que queira produzir com mais qualidade e praticidade. A criação de vácuo é feita através de uma bomba de vácuo acoplada à um motor elétrico. Atualmente, a maioria destes equipamentos utilizam reguladores de vácuo mecânico para manter o nível de pressão ideal no sistema. Entretanto essa forma de controle gera perdas e aumenta o consumo de energia do motor. Esse trabalho propõe a substituição do regulador de vácuo e do motor monofásico pelo uso de um inversor de frequência e motor trifásico para realizar um controle PID da pressão de vácuo através da modulação da velocidade do motor. Isso elimina o desperdício gerado pelo regulador de vácuo e faz com que o motor trabalhe em velocidade menor sem prejudicar a produção de vácuo. A simples instalação desse sistema resultou numa redução de 67% do consumo de energia elétrica e os seus custos foram superados pela economia em 18 meses em serviço.

Palavras-chave: Ordenha mecânica, inversor de frequência, controle PID, motor de indução trifásico, tecnificação do campo.

ABSTRACT

A milking machine is an equipment needed to milk animals by applying a negative pressure (vacuum) on the animal. Very common on milking farms, this machine is a must-buy equipment for all farmer who want a faster and efficient production. The vacuum is created by a vacuum pump powered by an electric motor. Nowadays, the vacuum level control is made by a vacuum regulator. However, this type of control is very inefficient and increase the electric motor consumption. This work makes vacuum control by controlling the motor speed through a PID control managed by a variable speed driver and exchange the single-phase motor to a three phases motor for more efficiency. It is expected to eliminate the energy wasted by the vacuum regulator and make the electric motor operates at the lowest power. The results were 67% less electric power consumption and the initial costs was overcome in 18 months.

Keywords: Milking Machine, Variable Speed Driver, PID Control, 3 phase induction motor, agriculture's modernization.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	14
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVOS.....	20
1.1.1 OBJETIVOS GERAIS	20
2 ESTADO DA ARTE DE ORDENHAS MECÂNICAS.....	22
2.1 ORDENHA MECÂNICA	22
2.2 SISTEMAS DE VÁCUO	26
2.2.1 BOMBAS DE VÁCUO ROTATIVAS	28
2.3 MOTORES DE INDUÇÃO	31
3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	42
3.1 CARACTERÍSTICAS DA ORDENHA MECÂNICA.....	42
3.2 SISTEMA DE VÁCUO	44
3.3 MOTORES	46
3.4 INVERSOR DE FREQUÊNCIA	49
3.5 DISPOSITIVO DE MEDIDA	52
3.6 SINTONIZAÇÃO DO CONTROLE PID.....	54
3.7 ROTINA DE TESTES	57
3.8 RELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS DO SISTEMA.....	59
4 RESULTADOS	62
4.1 MOTOR MONOFÁSICO	62
4.2 MOTOR TRIFÁSICO E CONTROLE EM MALHA FECHADA.....	64
4.3 SISTEMA SINTONIZADO	65
4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA	71
5 CONCLUSÃO	74
5.1 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	75

6. REFERÊNCIAS	77
RASHID, M. H. Power Electronics: Circuits, Devices and Applications. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.	78
Anexo A – Parâmetros importantes do inversor CFW500 para controle PID.....	79
Anexo B – Diagrama da Placa de Condicionamento de Sinal.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Acesso à rede elétrica em estabelecimentos agropecuários (IBGE - Censo Agropecuário).	15
Figura 2 - Evolução da produção brasileira de leite (Anuário leite – EMBRAPA 2018).	16
Figura 3 - Preço do leite ao produtor em diferentes países (Anuário leite – EMBRAPA 2018).	19
Figura 4 - Sistema MRT com transformador de aterramento (Oliveira, 2001).	19
Figura 5 - Ordenha Mecânica (Filho, 2013).	22
Figura 6 - Princípio de extração do leite por ordenha mecânica (Dairy Processing handbook, 1995).	23
Figura 7 - Esquemático de uma ordenha mecânica (Bramley, 1992).	24
Figura 8 - Taxa de vazão de leite máxima (kg/min) vs pressão de vácuo nas teteiras (kPa) (Dodd, 1959).	25
Figura 9 - Efeito limitante da pressão de vácuo no tempo total de ordenha (Mein, 1986).	26
Figura 10 - Tipos de bomba de vácuo dividida pela pressão máxima produzida. 1 torr = 133 Pa. (Varian Associates, 1989).	27
Figura 11 - Desenho esquemático de uma Bomba Rotativa (Instituto de Física da USP, 1992).	29
Figura 12 - Princípio de operação de uma bomba de anel líquido (Huang et al., 2017).	30
Figura 13 - Relação entre potência específica (N_{sp} , watts por metro cúbico de ar por minuto) e velocidade linear do rotor (m/s) para 11 modelos de bombas de vácuos com saídas entre 1,5 e 50 m ³ /min.a) Pressão = 40 kPa, b) 20 kPa e c) 10 kPa (Bodik e Tishchenko, 1988).	31
Figura 14 - Corte em um motor de indução gaiola de esquilo (Waard, 2011).	32
Figura 15 - Curva entre o conjugado do motor e a velocidade síncrona (Instituto de Física da USP, 1992).	33
Figura 16 - a) Vetor de campo magnético em um estator no tempo $\omega t = 0^\circ$. b) Vetor de campo magnético em um estator no tempo $\omega t = 90^\circ$ (Chapman, 2012).	34
Figura 17 - Diagrama do fluxo de potência de um motor de indução (Instituto de Física da USP, 1992).	35
Figura 18 - Característica de conjugado vs velocidade de um motor de indução monofásico (Chapman, 2012).	36

Figura 19 - Torque de partida de um motor de indução monofásico com diferentes métodos de Huang (Huang, 2017).....	37
Figura 20 - Topologia de um inversor de frequência trifásico (Fitzgerald, 2014).	39
Figura 21 - Regimes de operação de velocidade variável para um motor de indução (Fitzgerald, 2014).....	39
Figura 22 - Tipos de carga que influenciam o torque nos motores. a) Torque variável, b) Torque constante, c) Potência constante. (WEG Equipamentos Elétricos (2010).....	41
Figura 23 - Ordenha mecânica utilizada para o projeto.....	43
Figura 24 - Recipiente de coleta, bomba de leite, barreira sanitária (a direita) e manômetro (em cima).	43
Figura 25 - Bomba de vácuo e motor elétrico monofásico.....	44
Figura 26 - Bomba de vácuo da Forte Vácuo (Forte Vácuo Ind. e Com. LTDA).....	45
Figura 27 - Regulador de vácuo utilizado na ordenha (Eurolatte).	45
Figura 28 - Motor monofásico usado na ordenha (Catálogo de motores WEG).....	46
Figura 29 - Desempenho com carga do motor WEG monofásico (Catálogo de motores WEG).	47
Figura 30 - Motor trifásico com especificações similares (Catálogo de motores WEG).....	48
Figura 31 - Desempenho com carga do motor WEG trifásico (Catálogo de motores WEG). .	48
Figura 32 - Malha de controle fechada implantada no sistema de vácuo da ordenha (Roça, 2015).	52
Figura 33 - Malha de controle proposta no projeto.	52
Figura 34 - MPX5100.....	53
Figura 35 - Saída vs Pressão diferencial.....	53
Figura 36 - Design da placa de condicionamento de sinal.	54
Figura 37 - Método de Ziegler – Nichols (Ogata, 2010).	55
Figura 38 - Reação da pressão do sistema (azul) a um degrau na velocidade do motor (laranja).	56
Figura 39 - Análise de Ziegler-Nichols na planta.....	57
Figura 40 - Circuito eletrônico para medir a corrente do motor (Learn Open Energy Monitor)	58
Figura 41 - Transformador de corrente SCT-013 (Learn Open Energy Monitor).....	58

Figura 42 - Gráfico de potência entregue ao sistema em função da frequência do motor.	59
Figura 43 - Gráfico da corrente no motor em função da frequência do motor.....	60
Figura 44 - Gráfico da corrente do motor e da pressão do sistema em função da frequência do motor com diferentes quantidades de entradas de ar.	61
Figura 45 - Potência consumida durante teste com motor monofásico.	63
Figura 46 - Potência consumida durante teste com motor monofásico.....	63
Figura 47 - Frequência do motor com sistema de controle de vácuo.	64
Figura 48 – Potência consumida durante a ordenha com motor trifásico em malha fechada. .	65
Figura 49 - Resposta a entrada degrau em malha fechada com PID sintonizado.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados da produção de leite mundial (IFCN - Dairy Report, 2018).	17
Tabela 2 - Balança comercial de lácteos 2000/2017 (Anuário leite – EMBRAPA 2018)	18
Tabela 3 - Volume dos trechos da Ordenha.	42
Tabela 4 - Informações da bomba de vácuo utilizada na ordenha.....	44
Tabela 5 - Informações sobre o motor instalado na ordenha (Catálogo de motores WEG).....	46
Tabela 6 - Informações sobre o motor trifásico de mesmas especificações (Catálogo de motores WEG).	48
Tabela 7 - Dados do inversor de frequência utilizado no projeto (W.M.S.A.).....	50
Tabela 8 - Informações úteis do sensor MPX5100.....	53
Tabela 9 - Sintonização do PID por Ziegler-Nichols (Ogata, 2010).	56
Tabela 10 - Valores de Sintonia para PID.	56
Tabela 11 - Resultados do teste da ordenha com motor monofásico.	62
Tabela 12 - Resultados do teste da ordenha com motor trifásico	64
Tabela 13 - Resultados do teste da ordenha com controlador devidamente sintonizado.	69
Tabela 14 - Consumo Energético pelos sistemas.	72
Tabela 15 - Custo detalhado de cada sistema.	72
Tabela 16 - Custos de cada sistema de produção de vácuo para ordenha mecânica.	73

1 INTRODUÇÃO

A intensificação mecânica no campo é um caminho natural necessário para que a produção mundial de alimentos satisfaça a grande demanda atual gerada pelo crescimento populacional do último século. A partir da década de 1950, o Brasil começou um importante processo de modernização do sistema agrícola nacional. Desde então o país conseguiu se tornar o 3º maior exportador de produtos agrícolas do mundo em 2018, segundo dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. Entretanto, pela tamanha desigualdade existente no campo, apenas os grandes latifúndios são contemplados pela alta modernização, o que resulta numa realidade ainda muito retrógrada para a maioria dos produtores que habitam o campo brasileiro, segundo Martins (2018).

Ainda de acordo com este autor, para que o país possa alcançar patamares de modernidade no agronegócio próximos aos de países europeus ou americanos, precisará vencer alguns desafios ainda básicos. O principal deles, que será abordado nesse trabalho, é composto pelo acesso e pela qualidade da energia elétrica no campo. Segundo o IBGE, em 2017, 16,45% das propriedades rurais no Brasil ainda não possuíam acesso a rede elétrica, como na Figura 1. Entretanto, entre as que possuem, a qualidade da energia é questionável, visto que a demanda é muito pequena e o custo da transmissão para áreas distantes dos centros urbanos não são de interesse das concessionárias de energia elétrica. Isso acarreta em longas linhas monofilares que impedem o uso de motores trifásicos na área rural.

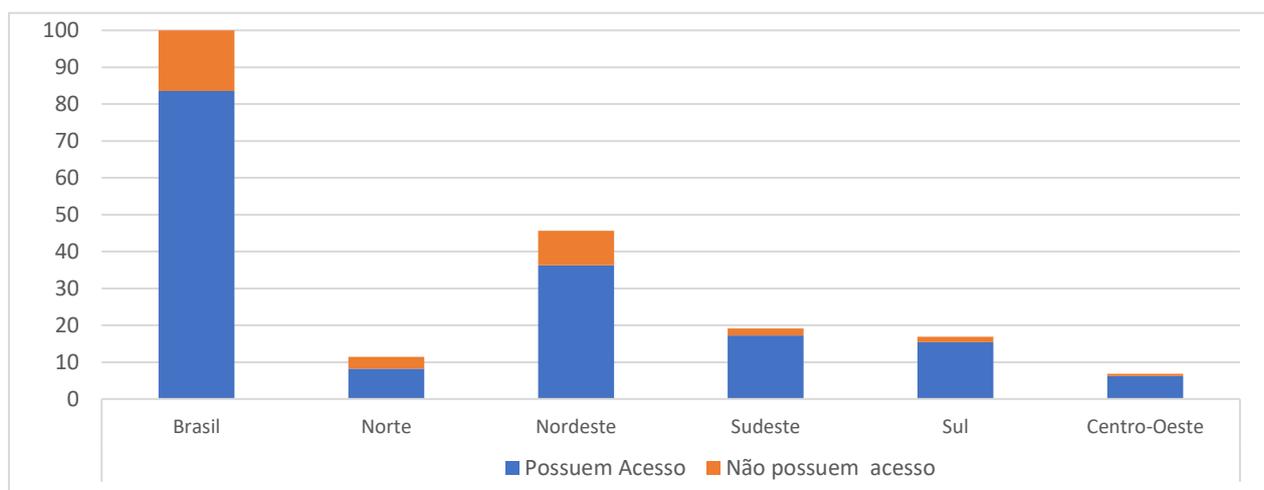


Figura 1- Acesso à rede elétrica em estabelecimentos agropecuários (IBGE - Censo Agropecuário).

Ilustrado pela Figura 2, a produção de leite vem em queda desde 2014 acompanhando a grave recessão que o país enfrenta, segundo Martins (2018). O ano de 2017 teve uma queda de 531 milhões de litros em comparação a 2016. Entretanto, devido à redução da taxa de queda no último ano, as expectativas para 2018 e 2019 são de retorno no crescimento do mercado. Mesmo assim, em 2016 a produção foi de 33,3 bilhões de litros de leite, custando a quarta posição entre os maiores produtores do mundo.

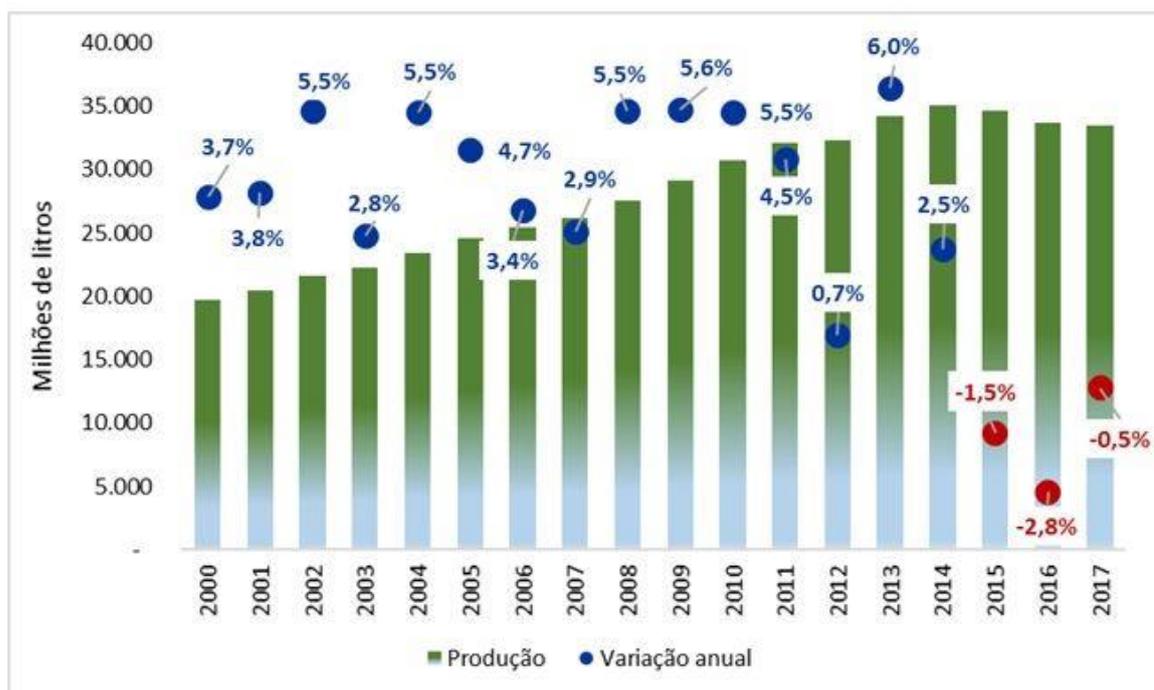


Figura 2 - Evolução da produção brasileira de leite (Anuário leite – EMBRAPA 2018).

Analisando os dados obtidos pelo International Fact-Checking Network (IFCN) em 2018, resumidos na Tabela 1, o Brasil ainda possui uma produção extensiva com baixa produtividade, o que demonstra a baixa modernidade do setor. Porém, o decréscimo do rebanho em 27%, ao mesmo tempo em que a produção subiu 10%, indica a melhora nesse quesito.

Tabela 1 - Dados da produção de leite mundial (IFCN - Dairy Report, 2018).

PRODUÇÃO, PRODUTIVIDADE E ESTRUTURA DE PRODUÇÃO DE LEITE NOS PRINCIPAIS PAÍSES, 2016								
País	Produção		Produtividade		Número fazendas		Vacas/fazenda	
	Mi t/ano	% ¹	t/vaca/ano	% ¹	unid/mi	% ¹	cab/mi	% ¹
Índia	17.089	44	13	21	73.083	-8	18	32
EUA	9.228	18	99	150	46	-47	203	54
Paquistão	4.584	20	21	27	6.984	-8	31	-
Brasil	3.423	10	16	27	1.100	-27	212	12
Alemanha	3.348	15	79	13	692	-45	61	49
China	3.208	-3	64	57	1.300	-100	38	46
Rússia	2.845	-10	34	4	3.091	-4	27	-10
França	2.516	2	69	3	63	-34	576	33
Nova Zelândia	2.421	20	48	-1	119	3	419	17

¹ Taxa anual de crescimento no período de 2011 a 2016

Apesar da alta produção, o país ainda não é autossustentável. A Tabela 2 mostra que ainda se importa mais leite do que se exporta, um grande indício do espaço que a produção ainda pode tomar e está tomando, visto que voltou a diminuir em 2016.

Tabela 2 - Balança comercial de lácteos 2000/2017 (Anuário leite – EMBRAPA 2018)

ANO	MIL TONELADAS/ANO		
	EXPORTAÇÃO	IMPORTAÇÃO	SALDO
2000	921	30.757	-29.836
2001	1.969	14.151	-12.182
2002	4.084	21.547	-17.463
2003	4.937	8.362	-3.424
2004	7.734	5.596	2.137
2005	8.587	7.290	1.297
2006	9.873	9.440	433
2007	10.355	6.417	3.938
2008	14.856	7.829	7.028
2009	6.906	13.311	-6.405
2010	5.824	11.312	-5.488
2011	4.181	16.669	-12.488
2012	4.298	18.061	-13.763
2013	4.247	15.912	-11.665
2014	8.604	10.857	-2.253
2015	7.681	13.716	-6.035
2016	5.510	24.528	-19.018
2017	3.851	16.915	-13.064
2018*	906	5.434	-4.529
Fonte:	MDIC/Aliceweb	* até maio	

Por outro lado, essa informação aponta outros problemas com a produção nacional. Uma delas é a alta do preço do leite cru em relação aos vizinhos Argentina e Uruguai, maiores exportadores para o Brasil, de acordo com a Figura 3. Isso mostra a urgência do aumento não só na produtividade da produção, mas também da redução dos custos para que o preço final seja mais competitivo internacionalmente. No entanto, pequenos e médios produtores, mesmo que possuem anseio em intensificar a produção, são sufocados pela falta de estrutura do sistema elétrico rural brasileiro.

PREÇO DO LEITE AO PRODUTOR EM PAÍSES SELECIONADOS: DESVIO DA MÉDIA DE PREÇO INTERNACIONAL (%) NO PERÍODO DE 2010 A 2015

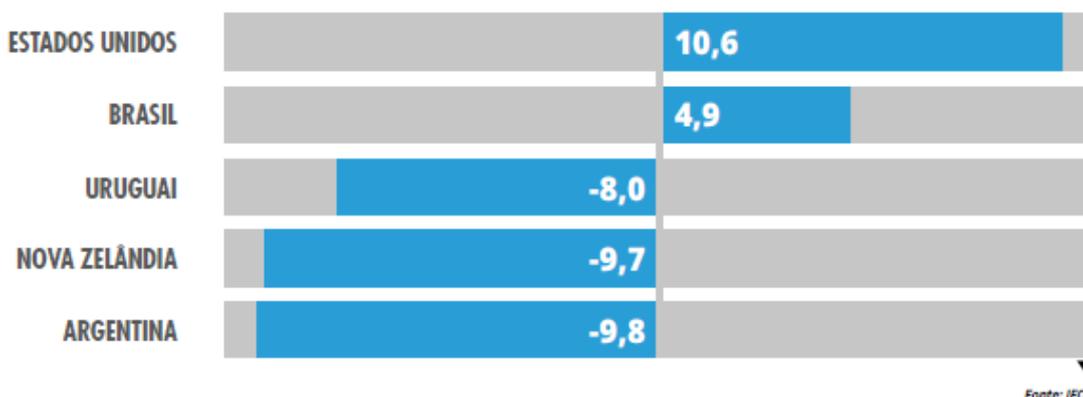


Figura 3 - Preço do leite ao produtor em diferentes países (Anuário leite – EMBRAPA 2018).

O sistema elétrico rural possui duas características que o definem: baixa demanda e longas linhas de transmissão. É frequente encontrar consumidores situados, um a cada 1,5 Km com demanda média de apenas de 2 KVA. São esses motivos, aliados às políticas sociais, que justificam o fato de as concessionárias de energia investirem em redes de distribuição de baixo custo para fornecer eletricidade à região rural. Pelo fato de as cargas das zonas rurais serem tão pequenas, raramente são necessários três condutores para atender a capacidade da região. O sistema monofilar com retorno por terra (MRT) é uma das maneiras mais utilizadas por diversas concessionárias, tais como COPEL, CEEE, CEMAT, COSERN, COELBA, CELPE, etc. Como mostra a Figura 4, com apenas um fio é possível transmitir energia elétrica tendo como referência um aterramento feito no local. Sua principal vantagem é o custo ser cerca de 20 a 30% mais barato que os convencionais. Nesse sistema é apenas necessário um filamento de alta tensão, pois o retorno da corrente é efetuado através da terra, segundo Oliveira (2001) e Ribeiro (2003).

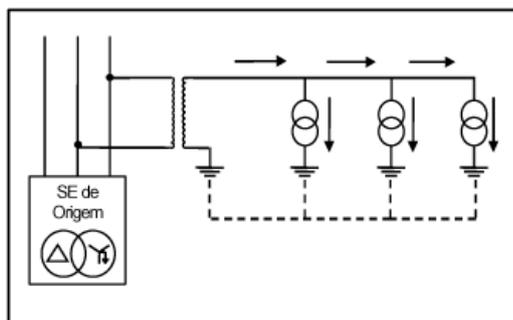


Figura 4 - Sistema MRT com transformador de aterramento (Oliveira, 2001).

Uma forma de mecanizar a produção de leite e aumentar a quantidade de vacas ordenhadas por dia é a ordenha mecânica. Esse sistema é fundamental para que a produção ultrapasse os 500 litros diários. Já muito difundido no mercado, a ordenha mecânica é um clássico exemplo do uso de motores na produção de leite. Entretanto, devido a situação da energia elétrica rural, os motores utilizados nesse sistema são pouco eficientes e sempre superdimensionados para as condições nominais, além do alto ruído sonoro gerado. Isso acarreta num aumento desnecessário dos custos de produção e gera estresse no rebanho que diminui a produção de leite.

Inversores de frequência são largamente utilizados na indústria para o controle de velocidade em motores de indução trifásico. Além disso, o fato de existirem modelos de inversores de baixa potência que podem ser alimentados por uma rede monofásica permite o uso dessa tecnologia em áreas rurais. Com esse equipamento, é possível não só trazer os benefícios de um motor trifásico, como também criar uma malha de controle PID para controlar o vácuo do sistema através da velocidade do motor. Isso garantirá mais economia de energia, já que o motor monofásico é propositalmente superdimensionado para que não haja queda do vácuo caso ocorra alguma entrada de ar no sistema. Através do controle de velocidade, o motor poderá entregar apenas a potência necessária para o sistema, mantendo a pressão de vácuo constante, mas sem desperdícios.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVOS GERAIS

Esse trabalho tem como finalidade aumentar a eficiência energética numa ordenha de leite mecânica. A proposta é realizar a substituição de um motor de indução monofásico por um motor de indução trifásico com as mesmas características para alimentar o sistema de vácuo da ordenha. Para gerar a alimentação trifásica ao motor, será utilizado um inversor de frequência da WEG® que pode ser conectado a uma rede monofásica. Graças ao controle PID disponível no inversor, também será realizado o controle em malha fechada do nível de pressão no sistema. Dessa forma o motor irá sempre fornecer a mínima energia necessária para que a ordenha trabalhe. Também será desenvolvido um circuito eletrônico para que o sensor MPX5100 possa fornecer feedback na malha de controle feita pelo inversor. Por fim, serão feitos testes de eficiência e cálculo de viabilidade econômica do projeto.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Instalação de inversor de frequência ligado à rede elétrica monofásica para alimentação e controle de velocidade do motor trifásico.
- Troca do motor monofásico utilizado pela ordenha mecânica por um motor trifásico de mesma potência.
- Projeto e instalação de transmissor de pressão para controle PID.
- Programação e sintonização de controlador PID pelo método Ziegler-Nichols.
- Análise de rendimento energético comparando o sistema original com o proposto.
- Análise da estabilidade da variável de controle (pressão de vácuo) comparando o sistema original com o proposto pelo trabalho.
- Análise de viabilidade econômica do projeto.

2 ESTADO DA ARTE DE ORDENHAS MECÂNICAS

2.1 ORDENHA MECÂNICA

A ordenha mecânica é provavelmente o equipamento mais importante no dia a dia da produção leiteira. De acordo com Bramley (1992), a primeira a ser comercializada foi produzida em 1889 por um encanador escocês chamado William Murch. Desde então, diversos avanços e melhorias foram adicionados, mas o seu conceito fundamental não mudou. Um modelo de ordenha mecânica muito encontrado no país está disponível na Figura 5. O seu funcionamento consiste numa linha de pressão negativa que é conectada às tetas da vaca por um conjunto pulsante que realiza o processo de extração do leite. Enquanto o processo manual de ordenha é feito aplicando pressão à teta através dos dedos, a forma mecanizada reduz a pressão ao redor da glândula mamária enquanto um outro mecanismo cria uma pulsação fazendo o músculo dilatar e contrair estimulando a circulação sanguínea no local e forçando a saída do leite do animal. Ipema (1992) afirma que o principal objetivo da ordenha mecânica é retirar o leite disponível no úbere de cada vaca o mais rápido e completo possível com o maior conforto e o mínimo de dano à teta do animal.



Figura 5 - Ordenha Mecânica (Filho, 2013).

O componente da ordenha mecânica que merece maior atenção é o conjunto de teteiras, pois é o único que entra em contato com o animal. O modelo convencional de duas câmaras consiste num invólucro externo rígido normalmente de aço (6) e uma interna flexível (4) como na Figura 6. Uma pressão negativa é aplicada na câmara interna pressionando a teta do animal

contra as paredes (2). Enquanto a câmara interna, chamada de câmara de vácuo, possui uma pressão negativa, a câmara externa, chamada de câmara de pulsação, possui uma válvula (pulsador) capaz de alternar entre a pressão de vácuo e a pressão atmosférica. Quando o pulsador conecta a câmara de pulsação à atmosfera (5), a câmara interna pressiona a teta do animal contra suas paredes. Já quando a câmara externa é conectada à mesma pressão da câmara interna, a glândula mamária do animal expelle o leite já que a pressão interna do animal é maior que a do vácuo (7). O pulsador normalmente tem um ciclo entre de 50 a 60 vezes por segundo criando um processo de massagem na teta do animal. Essa pulsação é necessária não só para manter uma vazão maior, mas também prevenir o fechamento do canal interno da teta por conta de congestionamento de sangue e fluidos corporais na extremidade da teta (Dodd, 1992). Essa pulsação gera uma carga oscilante ao sistema de vácuo da ordenha, já que ocorre entrada proposital de ar.

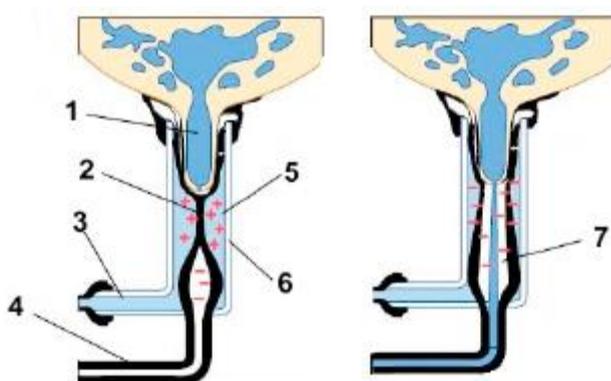


Figura 6 - Princípio de extração do leite por ordenha mecânica (Dairy Processing handbook, 1995).

Existem três modelos básicos de ordenha mecânica, mas os componentes utilizados por eles são praticamente os mesmos. A Figura 7 apresenta o esquema típico de uma ordenha mecânica tal como estabelecida pela Organização Internacional de Padronização (ISO em inglês) (2010). O sistema possui uma bomba de vácuo (2) movida por um motor elétrico (1). Vácuo é então criado dentro da tubulação (7), cuja função é tanto extrair o leite quanto gerar a pulsação na teteira. O nível de vácuo é monitorado por um medidor de pressão (6) e controlado por um regulador mecânico (4) colocado logo após o tanque interceptador (3). Este além de criar um reservatório de vácuo, impede de líquido chegar à bomba de vácuo. As teteiras (10) são conectadas a uma garra (11), que, por sua vez, é conectada ao pulsador (9). O leite extraído é arrastado para a tubulação de leite (8) e então para um recipiente de coleta (14). Por fim, uma bomba de leite (15) é encarregada de transportar o produto a um tanque para ser resfriado. Esse

motor é controlado por uma boia eletrônica instalada no recipiente de coleta, de acordo com Bramley (1992).

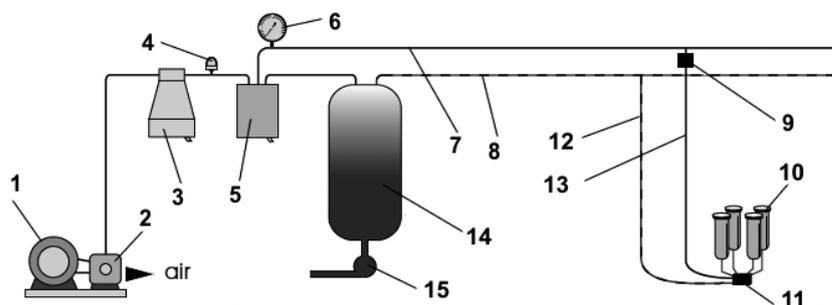


Figura 7 - Esquemático de uma ordenha mecânica (Bramley, 1992).

Um fator primordial para o bom funcionamento de uma ordenha é o valor médio de vácuo em cada teteira. É este quem define a velocidade e a maciez da ordenha e por isso tem um papel fundamental em todo o processo. É sabido que a taxa de vazão de leite máxima durante a ordenha aumenta com o aumento da pressão de vácuo. Meien (1986) demonstrou que a vazão de leite em uma teta sob vácuo respeita as leis de Bernoulli para fluidos.

$$\frac{v^2}{2} + gh + \frac{\rho}{p} = constante \quad (1)$$

Isso significa que para dada pulsação e tipo de teteira, os principais fatores que influenciam na vazão do leite são o diâmetro do orifício da teta e a diferença de pressão entre a teteira e o interior do animal. Se a seção transversal do orifício permanecer constante, a vazão, tal como prediz a equação de Bernoulli, será proporcional à raiz quadrada da diferença de pressões mencionadas. No experimento feito pelos autores, uma redução do vácuo de 50 kPa para 40 kPa (20%) resultou numa redução da vazão mássica em 15%. Desse valor, 11% devido à diferença de pressão enquanto o outros 4% à redução do tamanho do orifício.

A Figura 8 mostra um experimento feito por Dodd (1959). Esse gráfico mostra que é necessária uma pressão por volta de 5 kPa para que comece a sair leite e para que a vazão cresça vertiginosamente até os 40 kPa e depois cresça a uma taxa cada vez menor. Isso acontece pois, nessa pressão, os tecidos da mama do animal já estão quase totalmente desdobrados e a partir daí começam a esticar, dificultando o aumento do diâmetro do orifício e sendo influenciado apenas pela diferença de pressões (Mattick, 1959).

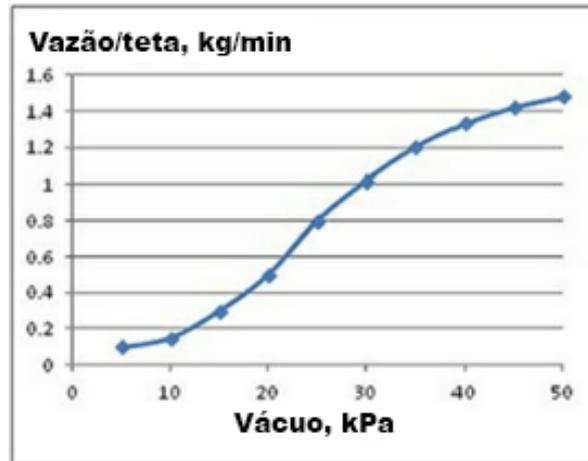


Figura 8 - Taxa de vazão de leite máxima (kg/min) vs pressão de vácuo nas teteiras (kPa) (Dodd, 1959).

O aumento da taxa de vazão máxima, no entanto, não influencia diretamente no tempo total de ordenha. Como mostra a figura 9, a velocidade da ordenha em relação à pressão de vácuo possui um ponto mínimo em que, a partir daí, aumentar a pressão acarretará no aumento do tempo de ordenha. O motivo é que, caso o valor do vácuo seja muito grande ou caso dure por longo tempo, fluidos como sangue e tecidos acumulam na extremidade da teta causando um congestionamento da vazão de leite principalmente nos períodos iniciais e finais da ordenha, reduzindo vazão média de leite durante a produção (Mein, 1986).

A pressão na teta do animal não deve variar mais do que ± 2 kPa durante a ordenha para que não aumente riscos de mastite. Isso inclui os momentos de retirada do conjunto ou mesmo quedas acidentais de uma das teteiras. Para isso, ordenhas mais modernas possuem sistemas de fechamento automático do vácuo em teteiras que não estão em contato com o animal. Entretanto, a grande maioria das ordenhas instaladas no país não respeitam esse limite. Na realidade, para que a pressão não caia durante a ordenha, uma bomba de vácuo superdimensionada é instalada e utiliza-se o regulador de vácuo permitindo a entrada de ar durante todo o procedimento padrão de ordenha. Por isso a importância de o regulador de vácuo estar sempre bem calibrado (Mein, 1994).

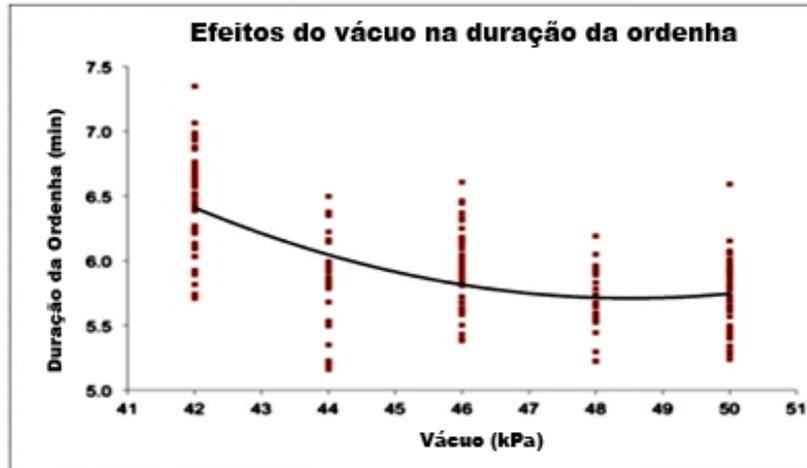


Figura 9 - Efeito limitante da pressão de vácuo no tempo total de ordenha (Mein, 1986).

A pressão na teteira também é uma das responsáveis por definir a suavidade com que ocorre a ordenha. No momento em que a câmara interna pressiona a teta do animal, essa não deve receber uma pressão maior que 13 kPa para que não ocorra injúrias e aumente os casos de mastites. Portanto, definir a pressão de vácuo que se irá trabalhar é de suma importância para o bom funcionamento do equipamento. Em suma, pressões de vácuo acima da média não só tornarão o processo de ordenha mais rápido, como também menos completa e mais agressiva ao animal. Enquanto pressões de vácuo menores farão a ordenha mais suave e completa, apesar de levar mais tempo. Grandes fazendas normalmente fazem várias ordenhas por dia (entre 3 e 4) e priorizam a taxa de vacas ordenhadas por hora enquanto pequenos fazendeiros optariam em extrair o máximo de leite por animal. A pressão recomendada na câmara interna da teteira pela ISO (2010) é entre 32 kPa e 42 kPa durante o período de maior vazão de leite. Essa faixa é considerada boa por permitir que o rebanho seja ordenhado suavemente, de forma completa e relativamente rápida (Mein, 1986).

2.2 SISTEMAS DE VÁCUO

A palavra vácuo vem do latim *vacua* que significa vazio. No vácuo, uma parte do ar é removido de um volume fechado. Uma definição mais prática é dizer que um ambiente fechado possui vácuo quando este possuir menos gases do que na atmosfera ao seu redor. Uma boa forma de quantificar esse vácuo é medindo a pressão dentro do sistema. Esta pressão ocorre pela força aplicada pelas partículas de ar nas paredes da câmara. Quando se remove uma certa

quantidade de ar do sistema, menos partículas exercerão força sobre a câmara e, portanto, aplicará uma pressão menor a ela. Essa pressão normalmente é medida de forma diferencial à pressão atmosférica, pois essa irá influenciar na quantidade inicial de gases dentro do sistema (Varian Associates, 1989).

O vácuo é criado removendo ar e outros gases do sistema. Para isso, utiliza-se um equipamento conhecido como bomba de vácuo. Existem diversos tipos de bomba de vácuo. Algumas realmente removem os gases do sistema. Outras apenas prendem ou mudam a forma dos gases. Cada bomba é catalogada segundo o nível de vácuo máximo capaz de produzir. Existem três níveis de vácuo que são divididos de acordo com a pressão diferencial em que o sistema se encontra: pré-vácuo, alto-vácuo e ultra-alto-vácuo (O'Halon, 2003).

Para um sistema de vácuo utilizado em ordenhas mecânicas, a pressão diferencial pode ir até 50kPa (375 torrs). Dessa forma, as bombas de pré-vácuo rotativas na Figura 10, cuja ordem de trabalho varia de 101,3 kPa (1 atm) até 0,1 Pa são as únicas utilizadas em ordenhas e serão abordadas por esse trabalho.

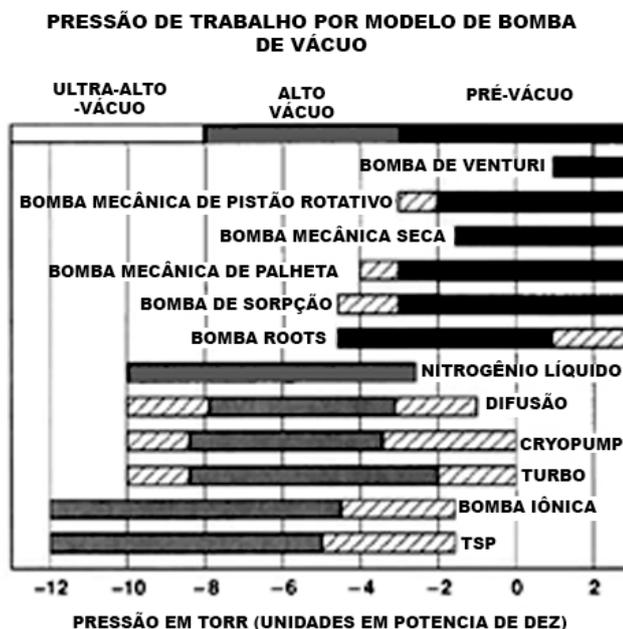


Figura 10 - Tipos de bomba de vácuo dividida pela pressão máxima produzida. 1 torr = 133 Pa. (Varian Associates, 1989).

Além do nível máximo de vácuo, existem mais duas informações que dizem muito sobre a bomba de vácuo. A vazão da bomba em l/s diz sobre a velocidade com que o ar é expelido do

sistema. No entanto, a vazão sozinha não informa muito. A pressão do sistema cai conforme retira-se as moléculas dos gases dentro do sistema. Mas à medida que a pressão cai, a quantidade de moléculas por litro de ar também diminui. Com esse comportamento, há sempre um limite em que a pressão consegue atingir.

Para entender o comportamento do sistema, é necessário conhecer o seu *throughput*. O *throughput* está ligado ao trabalho aplicado pela bomba às moléculas de ar sob uma taxa de tempo. Ele é encontrado pelo produto da vazão da bomba pela pressão atual do sistema, em quilopascal-litros por segundo, ou simplesmente Watts, já *throughput* também descreve a potência consumida pelo sistema de vácuo. Por esse motivo ele também é conhecido como a carga de gases do sistema e está relacionado com a quantidade de ar que continua entrando no sistema (Varian Associates, 1989).

2.2.1 BOMBAS DE VÁCUO ROTATIVAS

Há vários tipos de bombas rotativas, mas o princípio é o mesmo. Um rotor cilíndrico varre o gás da câmara de vácuo para fora do sistema à pressão atmosférica. O rotor é acoplado a um motor elétrico por meio de polias e gira bem justo ao estator na parte superior, com uma folga pequena da ordem de 0.01 mm. Aliado ao óleo que circula no interior do estator, a entrada e saída da bomba são separadas, forçando o ar a percorrer o caminho maior. Na linha diametral do rotor, estão acopladas palhetas separadas por uma mola exercendo pressão às paredes do estator. Como na Figura 11, enquanto o rotor gira no sentido horário, o volume V_b atrás da palheta aumenta gradativamente diminuindo a pressão na entrada da bomba. Ao mesmo tempo, o volume da sua saída é comprimido pela outra palheta aumentando a pressão da saída até que a válvula Y abra liberando o ar do sistema (Instituto de Física da USP, 1992).

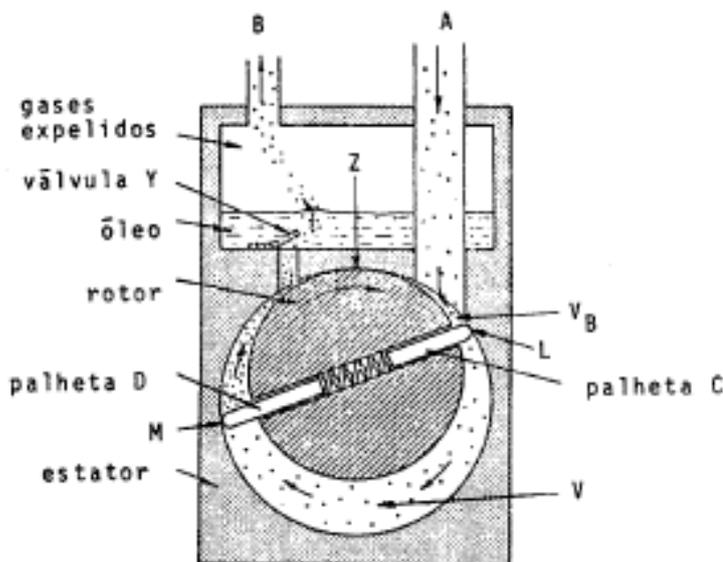


Figura 11 - Desenho esquemático de uma Bomba Rotativa (Instituto de Física da USP, 1992).

Dessa forma, a cada rotação, por existir duas palhetas, a válvula Y abre duas vezes por rotação e expelle um volume igual a 2 vezes valor de V . Esse modelo de bomba portanto possui uma vazão $S = 2nV$ l/min sendo n a rotação da bomba em RPM e V o volume da câmara do estator tal como na Figura 11. Essa afirmação feita pelo Instituto de Física da USP (1992) leva a crer que a vazão S de uma bomba de vácuo é independente da pressão no sistema. Essa é uma boa aproximação até uma pressão de 10 torr (1,33 kPa). Para pressões mais baixas, vários efeitos secundários como vazamento de ar pela folga entre o rotor e o estator e a pressão de vapor do óleo começam a afetar a performance da máquina. Mesmo assim, no sistema de vácuo parcial como em ordenhas mecânicas, a aproximação é válida e diz que a potência Q entregue ao sistema é diretamente proporcional a velocidade do rotor N (Instituto de Física da USP).

De fato, um estudo feito em 1988 por Bodik e Tishchenko mostraram a relação entre a potência e a velocidade angular em bombas de anel líquido, mas não conseguiram encontrar o valor dos parâmetros. Em 2017, Huang e outros autores aprimoraram o estudo e propuseram um modelo teórico capaz de relacionar a vazão e velocidade do rotor à potência entregue pelo eixo da bomba de anel líquido. Essas bombas seguem o mesmo princípio que as mecânicas seladas por óleo, mas utilizam água para melhorar a sua eficiência e criar melhor vácuo e também são muito utilizadas em sistemas de ordenha com mais conjuntos.

Bombas de vácuo com anel líquido são muito utilizadas na indústria pela sua estrutura simples e baixa manutenção. No entanto elas ainda sofrem com um baixo rendimento e um grau menor de sucção de ar se comparadas às outras bombas. Seu princípio de funcionamento é mostrado pela Figura 12. A bomba possui duas entradas separadas: uma para entrada do líquido e outra para o ar de processo. Com a aceleração do rotor, o líquido, forçado contra as paredes devido à força centrífuga, cria um anel isolando o interior da bomba. Graças à excentricidade do eixo, à medida que o rotor gira, o volume entre as suas palhetas na entrada aumenta, reduzindo a pressão e sugando o ar pela entrada. Em seguida, o volume começa a diminuir novamente, comprimindo o ar e expelindo para fora da câmara. Esse ciclo, análogo às bombas seladas a óleo, é conhecido como “sucção-compressão-descarga-expansão” e é utilizado para a criação de modelos teóricos para a bombas de vácuo (Huang et al., 2017).

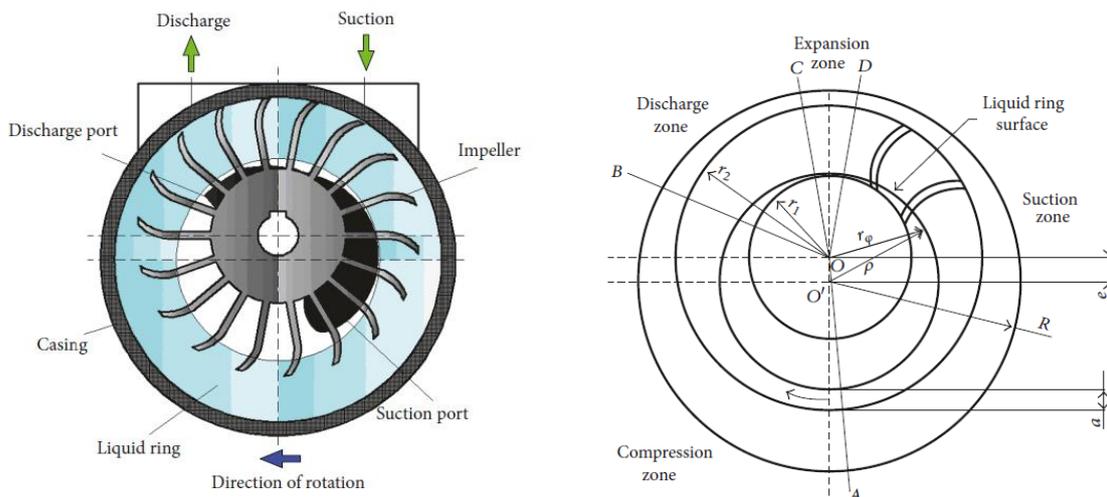


Figura 12 - Princípio de operação de uma bomba de anel líquido (Huang et al., 2017).

Segundo Bodik e Tishchenko (1988), a potência do eixo de uma bomba de vácuo pode ser escrita como

$$P = P_c + P_g + P_{mech} = 1.02(P_c + P_g) = 1.02(a + \alpha)u_2^3 + 1.02 cu_2 \quad (2)$$

sendo P_c , P_g e P_{mech} respectivamente a potência pela compressão do ar, as perdas hidrodinâmicas e as perdas mecânicas por atrito e calor e a , α e c são constantes que independem da velocidade linear do rotor u_2 .

Já a vazão de ar removida pela bomba SI é escrita pela equação

$$S_l = Vn\lambda = \lambda\pi r_2^2 b_0 \psi (1 - v^2) \left(\frac{u_2}{120\pi r_2} \right) = \lambda r_2 b_0 \psi (1 - v^2) \left(\frac{u_2}{120} \right) \quad (3)$$

em que V é o volume do interior da bomba; λ o coeficiente de rendimento; r_2 o raio e b_0 a largura do rotor; ψ um coeficiente que leva em conta a grossura da lâmina do rotor e $v = r_1/r_2$, uma relação entre o raio do rotor e o raio do rotor até a ponta de suas lâminas (melhor representado pela Figura 13). Dividindo Q por S_l encontrará a relação da potência entregue no eixo com a vazão e poder-se-ia encontrar a velocidade u_2 que resultaria no ponto de mínimo da relação aumentando o rendimento. Entretanto λ também depende da velocidade e não é possível encontrá-lo analiticamente.

A relação foi encontrada empiricamente realizando teste com mais de 11 modelos de bomba de vácuo. Esse estudo mostra que para uma pressão constante, a velocidade do rotor influencia no rendimento da bomba e a criação de um controle em cima dessa variável reduziria perdas desnecessárias no gasto de energia (Bodik e Tishchenko, 1988).

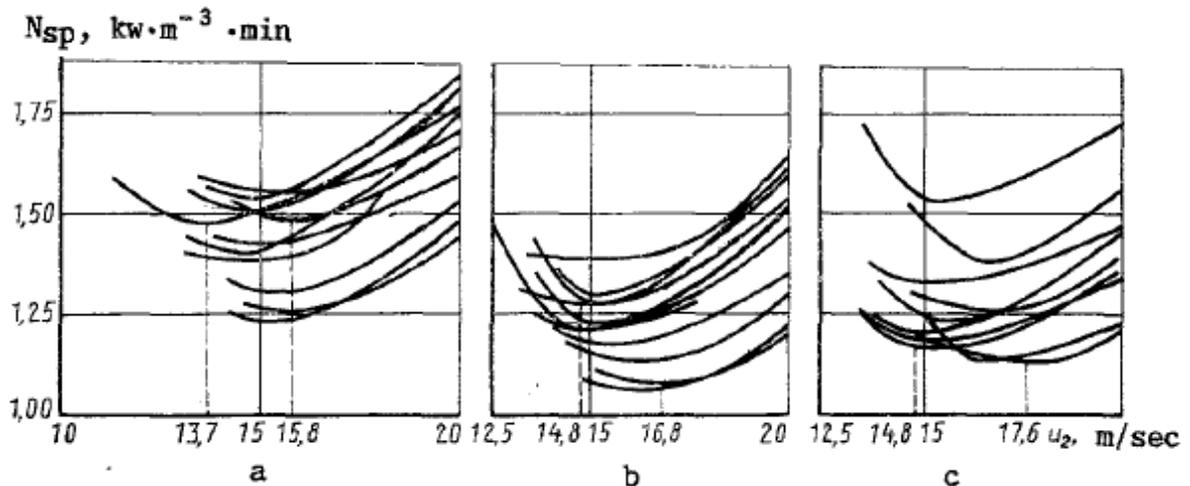


Figura 13 - Relação entre potência específica (N_{sp} , watts por metro cúbico de ar por minuto) e velocidade linear do rotor (m/s) para 11 modelos de bombas de vácuos com saídas entre 1,5 e 50 m³/min. a) Pressão = 40 kPa, b) 20 kPa e c) 10 kPa (Bodik e Tishchenko, 1988).

2.3 MOTORES DE INDUÇÃO

Toda a energia entregue ao sistema vem da transformação de energia elétrica em energia mecânica realizada pelo motor elétrico. Motores de indução são o tipo de motor mais utilizado na indústria mundial, sendo responsáveis por 30% do consumo total de energia elétrica do país.

Eles são recomendados para diversas aplicações por serem confiáveis, baratos e conseguirem partir sem auxílios externos (Governo do Brasil, 2015).

O motor de indução é constituído de duas partes. A parte estática do motor, chamada estator, possui bobinas instaladas por dentro do cilindro, e é por onde a energia elétrica da rede circula. Já a parte rotativa é chamada de rotor. Existem motores de rotor bobinado, e do tipo gaiola de esquilo. Para uma melhor visualização, a Figura 14 mostra um corte feito no motor do tipo gaiola de esquilo. Em rotores bobinados, o rotor é composto por três bobinas que podem ser ligadas a resistores externos para que haja um controle da corrente do rotor e facilitar na partida e no controle do conjugado. Devido a sua dificuldade construtiva, rotores bobinados caíram em desuso e raramente se encontram em motores de baixas potências. Mesmo sem possuir nenhum tipo de controle sob a corrente no rotor de um motor gaiola de esquilo, esses são os mais utilizados por não necessitarem de escovas. Dessa forma o rotor gira livremente sem qualquer contato com a parte estática. Nesses motores, várias barras condutoras são conectadas entre si por um anel, de maneira semelhante àquelas rodas de exercício em gaiola de roedores (Instituto de Física da USP, 1992).



Figura 14 - Corte em um motor de indução gaiola de esquilo (Waard, 2011).

O princípio de funcionamento de um motor de indução é baseado no fenômeno físico descrito pela lei de Faraday-Neumann-Lenzz. Ela afirma que a variação de fluxo magnético em função do tempo sob um circuito elétrico fechado gera uma força eletromotriz de mesma intensidade com sentido oposto (Instituto de Física da USP, 1992).

$$\varepsilon = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (4)$$

Em motores de indução trifásicos, as bobinas são enroladas no estator de tal forma que são capazes gerar um campo magnético girante a uma velocidade sincronizada com a frequência da rede elétrica descrita pela equação (5), em que p é o número de polos do motor e f_{rede} a frequência de rede elétrica. O campo magnético que passa através das barras do rotor induz uma diferença de tensão que gera um movimento de cargas elétricas por estarem curto-circuitadas. Como descrito por Faraday, uma força eletromotriz é criada pela interação entre a variação de fluxo magnético, pelo fato de o campo estar girando, e os elétrons circulando entre as barras. Essa força é a responsável por colocar o rotor em movimento Chapman (2012).

$$n_{sinc} = \frac{120f_{rede}}{p} \quad (5)$$

Entretanto, à medida que o rotor aproxima da velocidade de rotação do campo, o movimento relativo entre ambos se aproxima de zero, anulando o torque criado e desacelerando o rotor. Essa diferença entre a velocidade do campo e a velocidade do rotor é chamada de escorregamento e é parte intrínseca da natureza de um motor de indução. Como a Figura 15 mostra, o motor de indução apresenta seu conjugado nominal ligeiramente antes de atingir a velocidade síncrona (Instituto de Física da USP, 1992).

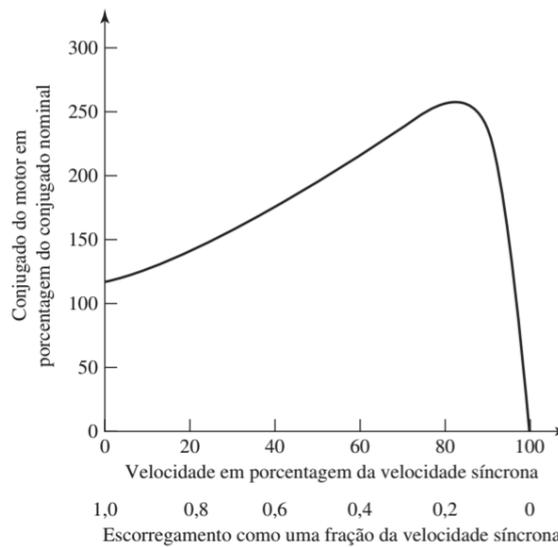


Figura 15 - Curva entre o conjugado do motor e a velocidade síncrona (Instituto de Física da USP, 1992).

Quando existem três fases como em uma rede trifásica, cada bobina é defasada em 120° dentro do estator, de forma que a soma dos vetores do campo magnético criado entre as três fases seja um vetor que gire em torno do eixo do motor à medida que a intensidade da tensão

naturalmente oscila em função do tempo. Caso um eixo ortogonal seja definido no centro do rotor tal como na Figura 16, através de cálculos trigonométricos é possível encontrar que o módulo do campo magnético resultante é constante.

$$B_{liq}(t) = (1,5B_m \text{sen}\omega t)\hat{x} - (1,5B_m \text{cos}\omega t)\hat{y} \quad (6)$$

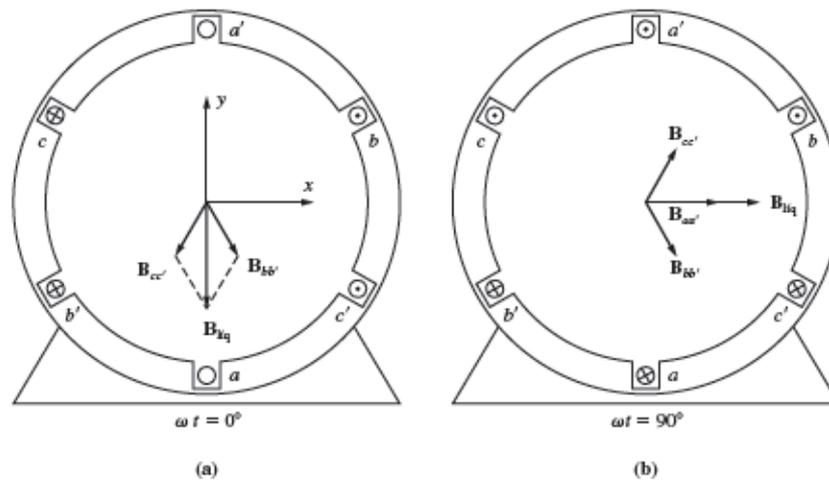


Figura 16 - a) Vetor de campo magnético em um estator no tempo $\omega t = 0^\circ$. b) Vetor de campo magnético em um estator no tempo $\omega t = 90^\circ$ (Chapman, 2012).

Um motor de indução funciona tal como um transformador. A potência de entrada tem a forma de tensões e correntes trifásicas que induzem uma tensão de saída no secundário. Mas ao contrário dos transformadores, a potência de saída em motores de indução é essencialmente na forma mecânica e perdas. A potência mecânica de um motor pode ser descrita como $P_{mec} = \tau\omega_n$. Enquanto a velocidade depende da frequência da rede e do escorregamento, o torque disponível na ponta do eixo segue a equação:

$$\tau = k * \phi_m * I_2 \quad (7)$$

Sendo I_2 a corrente no rotor, a qual depende da carga, k uma constante que depende do material e projeto da máquina e ϕ_m o fluxo de magnetização (Wb). O fluxo magnetizante, se desprezadas as perdas, pode ser escrito como na equação (8), onde V_{rede} é a tensão da rede e k uma constante.

$$\phi_m = k \cdot \frac{V_{rede}}{f_{rede}} \quad (8)$$

As perdas de uma máquina elétrica de indução têm diversas origens. Apesar do cobre possuir uma baixa resistência, é ela a responsável por boa parte das perdas energéticas de um

motor, pois são proporcionais ao quadrado tanto da corrente de entrada quanto a corrente no rotor: $P_{PCE} = I_e^2 R_e$ e $P_{PCR} = I_r^2 R_r$. Além de perdas por cobre, existem as perdas por histerese e correntes parasitas no núcleo, bem como perdas mecânicas na forma de atrito e ventilação. Uma boa esquematização do fluxo de potência é vista na Figura 17.

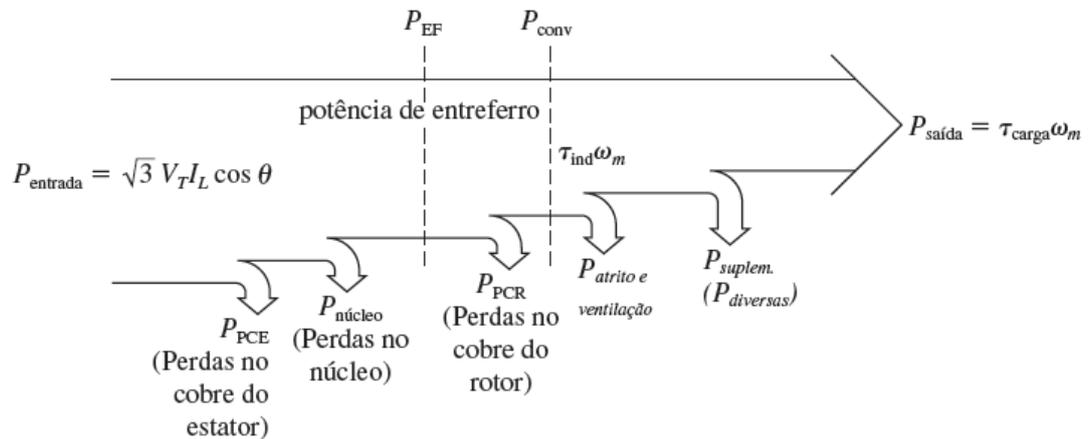


Figura 17 - Diagrama do fluxo de potência de um motor de indução (Instituto de Física da USP, 1992).

Ao ligar apenas uma fase de um motor de indução trifásico, nota-se apenas uma vibração ocorrendo. Isso é devido ao fato do campo magnético criado por apenas uma fase apenas pulsar em função do tempo. Esse campo pode ser decomposto em dois campos magnéticos girantes com sentidos opostos. Dessa forma, o vetor do campo apenas aparece oscilando em um eixo e não há, portanto, um conjugado de partida. Caso uma pequena força externa seja exercida, em qualquer dos sentidos, a força magnetomotriz começa a exercer um conjugado no motor colocando-o em movimento no mesmo sentido da força aplicada. O valor do conjugado gerado por apenas uma fase em função da velocidade do motor está na Figura 18. Perceba que embora tenha-se conjugado na velocidade nominal, durante a partida o motor apresenta conjugado zero.

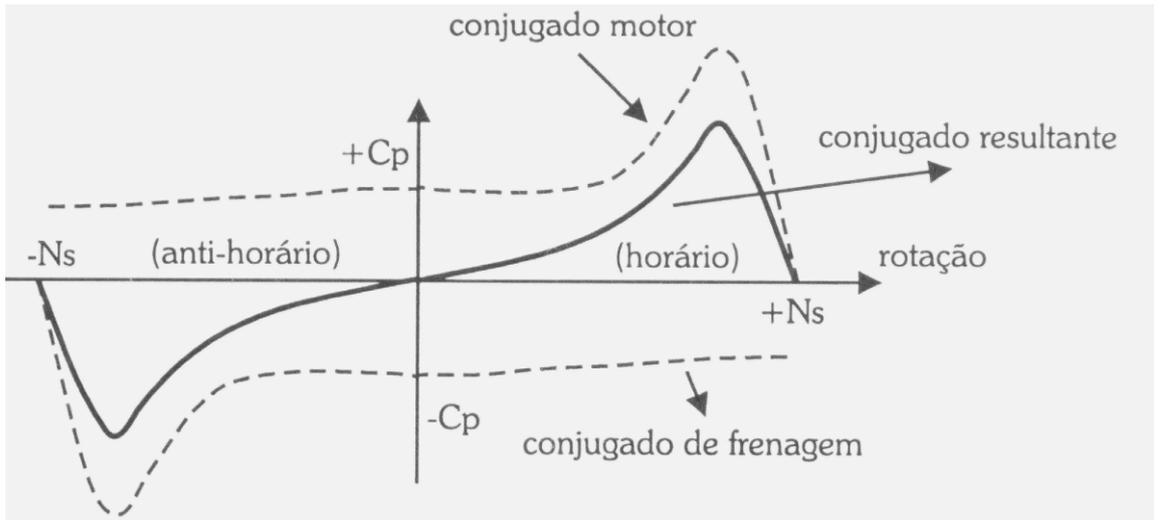


Figura 18 - Característica de conjugado vs velocidade de um motor de indução monofásico (Chapman, 2012).

O funcionamento de um motor monofásico é idêntico ao caso descrito e se baseia em criar uma forma de gerar um conjugado de partida por si próprio. Motores de indução trifásicos são mais eficientes e resilientes que motores de indução monofásicos, mas há muitas aplicações que necessitam de motores mesmo sem ter acesso a redes polifásicas. Motores monofásicos são largamente utilizados em baixa potência para aplicações domésticas e comerciais, incluindo ventiladores, refrigeradores, compressores de ar, bombas e máquinas de lavar. O rendimento de um motor monofásico é normalmente menor que um motor trifásico, principalmente pelo fato da corrente ser maior. Isso causa uma maior perda no cobre do estator.

Em suma, os métodos desenvolvidos para gerar conjugado de partida em motores monofásicos propõe o uso de um enrolamento secundário defasado em 90° do enrolamento principal. Mas para ser efetivo, o campo magnético gerado também precisa ser defasado e, por isso, a impedância do enrolamento secundário deve ser diferente do enrolamento principal.

O método mais simples, conhecido como fases divididas, utiliza um fio de cobre mais fino no enrolamento de partida para que a resistência seja maior. Apesar de aumentar as perdas, isso não é relativamente um problema, pois esse enrolamento é utilizado apenas para a partida e removido do circuito quando o motor chega próximo à velocidade nominal por meio de uma chave centrífuga. No entanto, o ideal para a partida de um motor monofásico seria ter um campo magnético do enrolamento de partida defasado a 90° tal como as bobinas. Para isso, o uso de um capacitor é uma opção bastante utilizada. A maioria dos motores encontrados possuem um capacitor de partida. De fato, o motor monofásico funciona tão melhor com um capacitor no enrolamento secundário, que existem versões com capacitor permanente sem a chave centrífuga

para removê-lo do circuito ou com capacitores de partida e permanente. A Figura 19 mostra a relação do torque do motor em função da velocidade (Chapman, 2012).

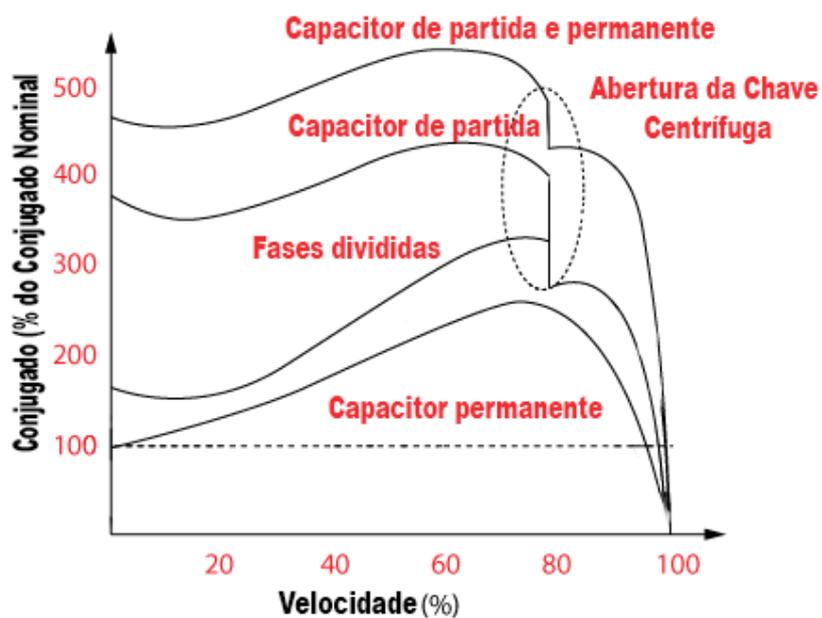


Figura 19 - Torque de partida de um motor de indução monofásico com diferentes métodos de Huang (Huang, 2017)

2.4 INVERSORES DE FREQUÊNCIA

O acionamento de motores elétricos de indução por inversores de frequência é uma solução criada a pouco tempo, porém já amplamente utilizada na indústria, aplicado a bombas, refrigeração, ventiladores, esteiras e muitos outros lugares. Os avanços da eletrônica de potência criaram um dispositivo que supre todas as necessidades de um motor de indução. As vantagens incluem economia de energia, partida suave do motor, redução dos estresses mecânicos do motor, maior fator de potência para rede e sem deixar de mencionar a principal vantagem, que é o controle de velocidade do motor (C Corporation, 2005).

Inversores de frequência, da Figura 20, transformam a tensão de rede, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Variando-se a frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e consequentemente a velocidade mecânica de rotação da máquina. O bloco de retificação produz a tensão contínua VCC no capacitor do “link CC” e, controlando as chaves do bloco inversor, é possível produzir formas de onda de tensão de amplitude e frequência variável através da modulação por largura de pulso (PWM). A tensão VCC do link CC pode ela própria ser variada, por exemplo, usando controle de fase no bloco retificador.

Existem, basicamente, três arranjos de circuitos para obtenção de tensão e frequência variáveis. O mais simples e mais encontrado em uso, utiliza retificador a diodos que gera tensão CC constante e as técnicas PWM na ponte de transistores são responsáveis por variar tanto a frequência quanto a tensão do inversor. Dessa forma, não há um controle das tensões de entrada e há uma injeção moderada de harmônicos à rede. Ao inserir um conversor CC-CC no barramento, é possível controlar a tensão entregue ao bloco inversor que controlará apenas a frequência. Assim diminui-se consideravelmente a injeção de harmônicos. Por fim, como mostra a Figura 20, é possível fazer o controle da tensão no próprio bloco retificador, ao substituir os diodos por tiristores. Essa forma, porém, torna o fator de potência normalmente mais baixo, especialmente com um ângulo de disparo elevado (Rashid, 2014).

O controle de tensão no inversor é tão importante quanto a frequência, quando se deseja controlar a velocidade de um motor. Como a equação (8) mostra, a densidade de fluxo no motor é inversamente proporcional à frequência. Dessa forma, como os motores de indução típicos trabalham saturados em tensão e frequência nominais, caso a frequência seja reduzida, a máquina pode ser danificada por causa do aumento das perdas no núcleo e da corrente. Portanto,

para evitar esse problema, a tensão na máquina é reduzida proporcional a frequência afim de manter a relação $d = \frac{V}{f}$ constante (Fitzgerald, 2014).

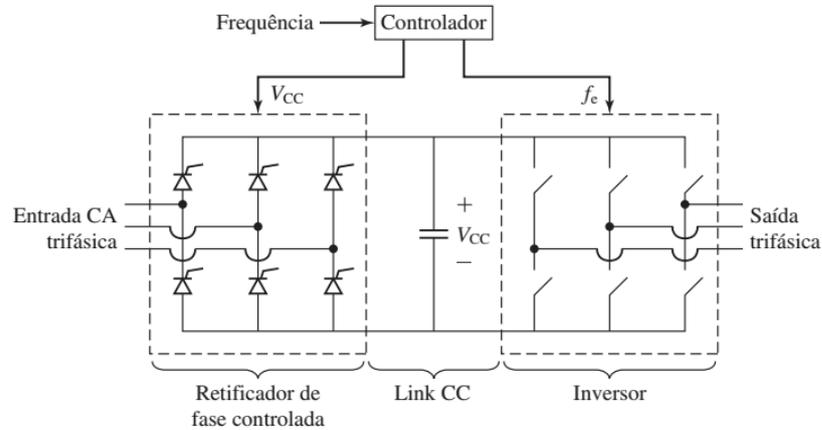


Figura 20 - Topologia de um inversor de frequência trifásico (Fitzgerald, 2014).

Em geral, a corrente de terminal da máquina é limitada por restrições térmicas. Assim, desde que a refrigeração da máquina não seja afetada pela velocidade do rotor, a corrente de terminal máxima permitida permanecerá constante com seu valor I_n , independentemente da frequência aplicada. Dessa forma, ao reduzir a frequência e tensão linearmente, a potência de entrada também diminui proporcional à tensão, enquanto o conjugado no eixo permanece constante. Já para frequências acima da nominal, é comum limitar a tensão ao seu valor nominal para evitar danos ao isolamento, diminuindo a densidade de fluxo, reduzindo o conjugado entregue e entregando potência nominal. A Figura 21 mostra essa relação (Fitzgerald, 2014).

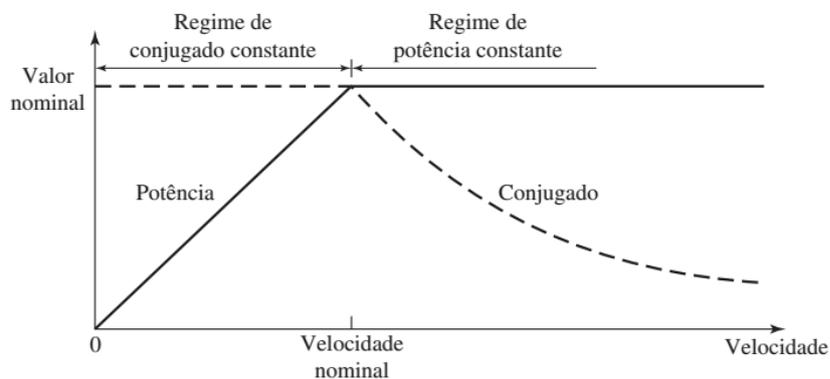
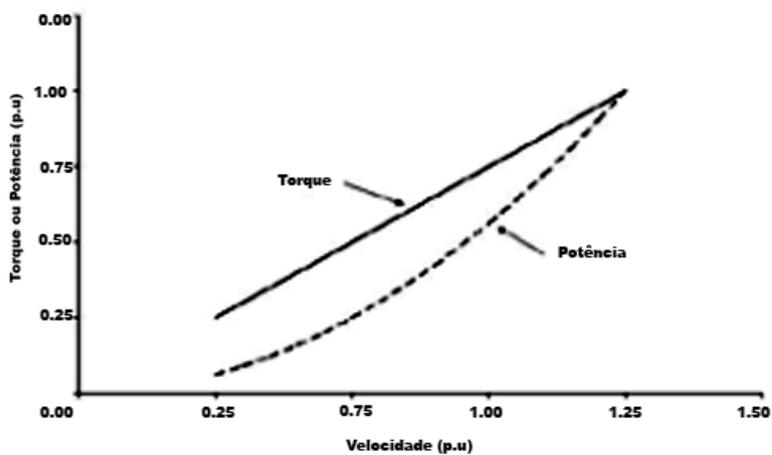


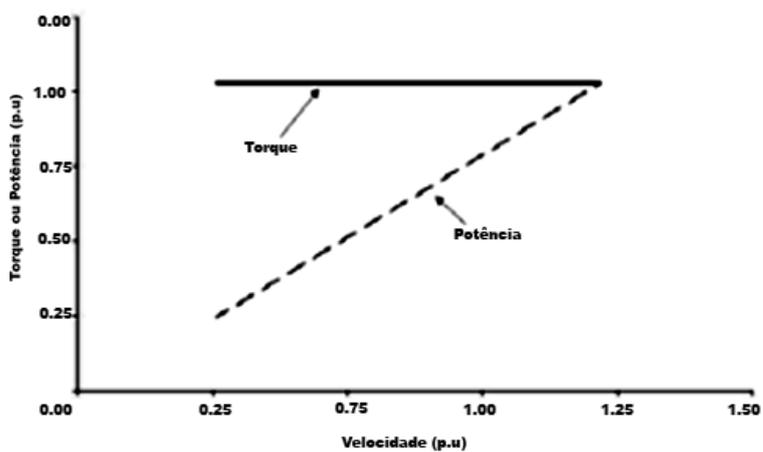
Figura 21 - Regimes de operação de velocidade variável para um motor de indução (Fitzgerald, 2014).

Embora o controle V/F constante do inversor mantenha o fluxo constante no motor, o conjugado na ponta do eixo é controlado pela carga que está acoplada a ele. Para o correto dimensionamento do sistema de velocidade variável é necessário conhecer qual carga estará sendo aplicada no eixo. As cargas são classificadas de acordo como aplicam torque ao motor. Elas podem ter torque variável, torque constante ou potência constante (WEG Equipamentos Elétricos, 2010).

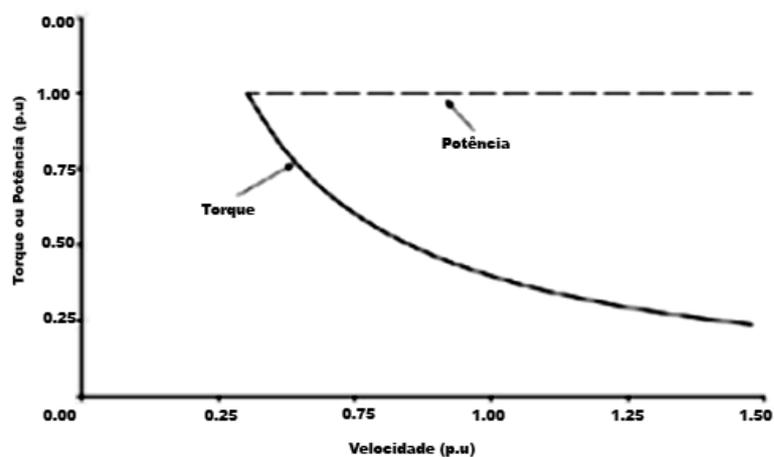
Demonstrado na Figura 22, bombas, exatores e compressores centrífugos são exemplos de torque variável em relação à velocidade do motor. O torque pode variar linearmente ou quadrático. Assim a potência irá variar ao quadrado ou ao cubo em função da velocidade. Já em compressores alternados, compressores helicoidais ou bombas positivas, o torque permanece constante ao variar a velocidade. (WEG Equipamentos Elétricos, 2010).



a)



b)



c)

Figura 22 - Tipos de carga que influenciam o torque nos motores. a) Torque variável, b) Torque constante, c) Potência constante. (WEG Equipamentos Elétricos (2010))

3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Todo o sistema foi pensado e desenvolvido para ser utilizado na fazenda Turmalina, localizada na cidade de Nanuque, Minas Gerais. Tanto a ordenha, como os motores monofásico, trifásico e o inversor utilizados no projeto foram disponibilizados pelo proprietário. Além desse aparato, foram projetados circuitos eletrônicos para condicionamento do sinal de sensores e desenvolvidos métodos para monitoramento e estudo da eficiência do projeto.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA ORDENHA MECÂNICA

A ordenha mecânica instalada na fazenda é canalizada em fosso e é dotada com 6 conjuntos de teteiras. Ela possui uma linha de vácuo alta, mais dois conjuntos do tipo balde ao pé e pulsadores programados para ciclos de 1 Hz, mas não possui extratores automáticos de teteiras. Sem eles, é normal que haja entrada de ar no sistema durante o encaixe e retirada das teteiras. Os elementos da ordenha instalada são os mesmos encontrados na Figura 7. A ordenha conta com um recipiente de coleta de 50 litros e uma bomba centrífuga de 1 cv para enviar o produto para um dos tanques de resfriamento, próximo à ordenha. A bomba é acionada sempre que o tanque enche e é controlada por uma boia eletrônica conectada a um circuito eletrônico. O vácuo é criado por uma bomba de vácuo e um motor monofásico instalados em um quarto a 5m do fosso. O nível de vácuo é controlado por um regulador mecânico instalado na linha. Por fim, o volume total do sistema é de aproximadamente 347 litros e foi calculado com base nas dimensões medidas e estão dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 - Volume dos trechos da Ordenha.

Componente	Raio (m)	Comprimento (m)	Volume (m ³)
Tubulação 1	0.085	10	0.227
Tubulação 1	0.05	9	0,07
Tanque p/ reserva de vácuo	-	-	0.05

A ordenha dos animais é feita duas vezes ao dia durante toda a semana. A primeira é feita na parte da manhã e começa por volta das 6h. Sua duração é de, em média, 3 horas e 30 minutos. Já a segunda ordenha do dia começa às 13h e dura, em média, 2 horas. O tamanho do rebanho é o mesmo, o que difere é a quantidade de leite produzido pelos animais, já que o tempo entre as ordenhas são diferentes. A rotina ainda consiste com 30 minutos de limpeza antes do início de cada ordenha e mais 1 hora de limpeza após a ordenha. Logo, o tempo total de funcionamento do equipamento é de 7 horas em média.

As Figuras 23, 24 e 25 são fotos da ordenha utilizada no projeto.



Figura 23 - Ordenha mecânica utilizada para o projeto.



Figura 24 - Recipiente de coleta, bomba de leite, barreira sanitária (a direita) e manômetro (em cima).



Figura 25 - Bomba de vácuo e motor elétrico monofásico.

3.2 SISTEMA DE VÁCUO

O sistema de vácuo utilizado na ordenha tem seu cerne na bomba de vácuo. A utilizada, própria para ordenhas mecânicas, é do tipo palhetas rotativas selada a óleo e é fabricada pela Forte Vácuo. A figura 26 mostra esse modelo de bomba disponível no catálogo do fabricante. Esse modelo possui capacidade para 900 L/min com pressão nominal de 50 KPa. Sua velocidade nominal é de 1190 RPM e é projetada para ser acoplada a um motor de 3 cv de alta rotação (2 polos), por duas polias. A eficiência da bomba não é especificada pelo fabricante. Mais informações estão disponíveis na Tabela 4.

Tabela 4 - Informações da bomba de vácuo utilizada na ordenha.

Fabricante	Forte Vácuo
Modelo	FBV 900
Peso	32,5 kg
Velocidade Angular	1190 RPM
Motor necessário	3 cv
Polia do motor	90 A2
Polia da bomba	130 A2
Capacidade mínima a 50 kPa	900L/min

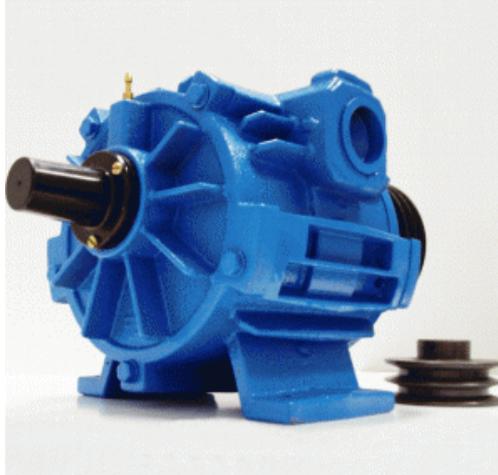


Figura 26 - Bomba de vácuo da Forte Vácuo (Forte Vácuo Ind. e Com. LTDA).

A energia do sistema vem da rede elétrica e é entregue através do motor de indução para a bomba de vácuo. Essa energia é convertida em trabalho aplicado aos gases contidos nos tubos da ordenha que causa uma redução da pressão no sistema. A carga (ou *throughput*) de um sistema de vácuo é descrita pelo produto entre a pressão do sistema e a taxa de ar que é removido por segundo no sistema. Se a vazão da bomba de vácuo for constante, a pressão será relacionada com a quantidade de ar que entra no sistema. Como entradas de ar são corriqueiras, sejam pelos pulsadores, ou por uma abertura de uma teteira, é necessário que haja uma forma de torná-la constante. O regulador de vácuo, da Figura 27, faz esse papel mantendo um fluxo de ar constante para o sistema que será reduzido caso ocorra outra entrada de ar em alguma parte da ordenha. A pressão do sistema é de 41 kPa.



Figura 27 - Regulador de vácuo utilizado na ordenha (Eurolatte).

3.3 MOTORES

Como dito no capítulo anterior, o sistema de vácuo é movido por um motor de indução. O atual motor, Figura 28, é monofásico de alta rotação e de 3 cv conforme a bomba de vácuo requer. Os dados de placa desse motor estão disponíveis na Tabela 5. A Figura 29 mostra as curvas desse motor com carga fornecido pelo fabricante.

Tabela 5 - Informações sobre o motor instalado na ordenha (Catálogo de motores WEG)

Marca	WEG
Modelo	W22
Carcaça	90S blindado
Potência	3 cv / 2.2kW
Rotação	3525 Rpm
Tensão	220 V
Corrente	13,7 A
a vazio	8,5 A
Frequência	60 Hz
cos θ	0.87
IP/IN	9.6
Rendimento	72,5%



Figura 28 - Motor monofásico usado na ordenha (Catálogo de motores WEG).

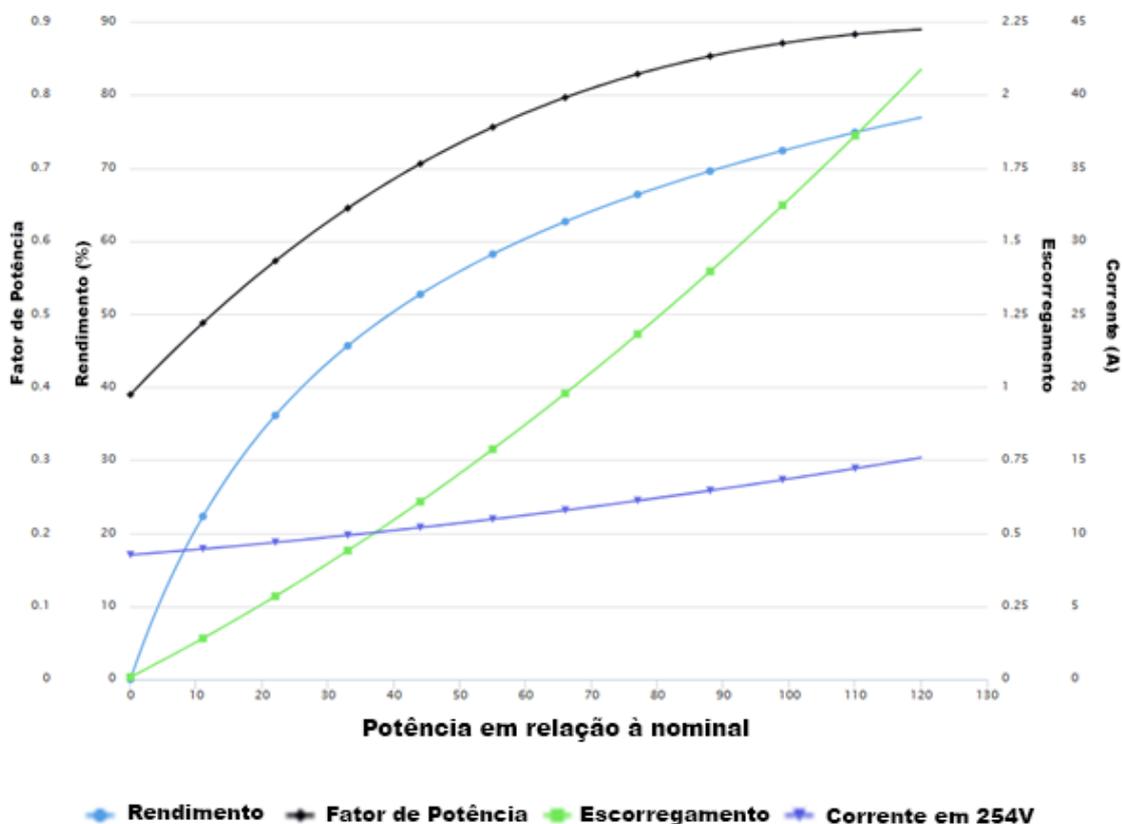


Figura 29 - Desempenho com carga do motor WEG monofásico (Catálogo de motores WEG).

Um motor com os mesmos requisitos para a bomba de vácuo é o da Figura 30. A ficha técnica e as curvas estão disponíveis na Tabela 6 e na Figura 31. Este motor trifásico, também da WEG, pode muito bem ser utilizado na ordenha de vácuo. Sua grande vantagem se comparado ao motor monofásico é o rendimento 13% maior, gerando economia na conta de energia elétrica.

Tabela 6 - Informações sobre o motor trifásico de mesmas especificações (Catálogo de motores WEG).

Marca	WEG
Modelo	W22
Carcaça	90S blindado
Potência	3 cv / 2.2kW
Rotação	3450 Rpm
Tensão	220 V
Corrente	4.65 A
a vazio	2,32 A
Frequência	60 Hz
cos θ	0.84
IP/IN	7,4
Rendimento	85,5%



Figura 30 - Motor trifásico com especificações similares (Catálogo de motores WEG).

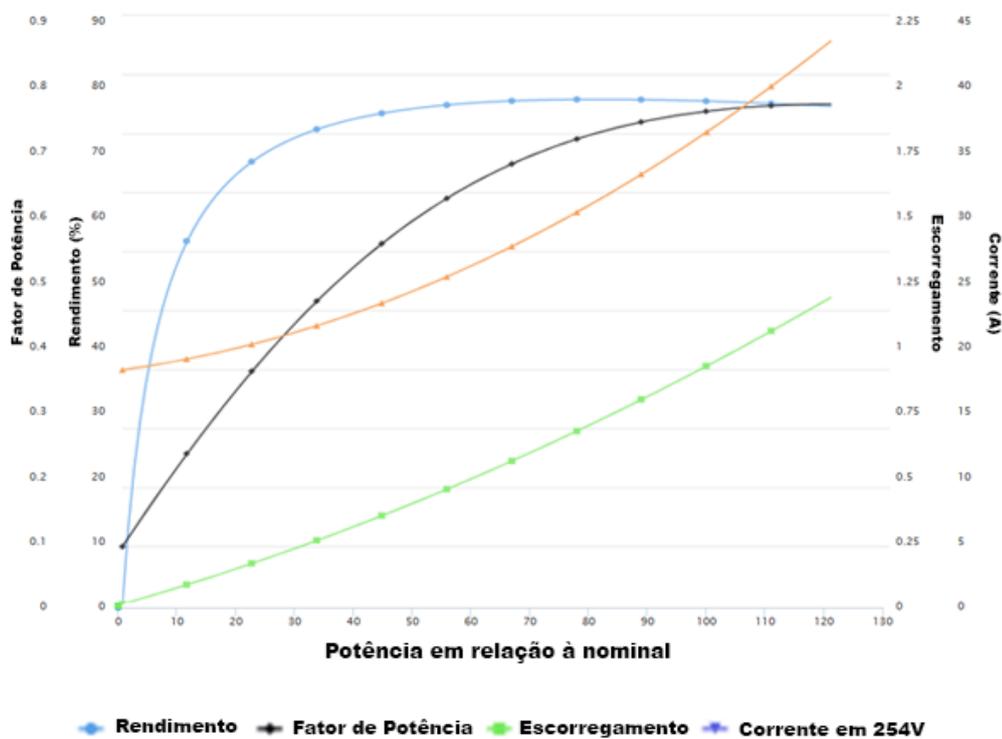


Figura 31 - Desempenho com carga do motor WEG trifásico (Catálogo de motores WEG).

Além da economia no consumo, motores trifásicos não possuem capacitores de partida, tampouco chaves centrífugas. Isso aumenta bastante a vida útil do equipamento e reduz o seu custo. O preço cotado pela loja Eletro Sandro localizada na cidade de Teixeira de Freitas – BA no dia 20/06 foi de R\$ 2.089 para o motor monofásico e R\$ 1.339 para o trifásico. Economia de 36%. Outra vantagem é o ruído menor. Segundo a fabricante, enquanto o motor monofásico produz um ruído de 72 dB, o motor trifásico produz 68 dB. Esse é um ponto importante em aplicações que lidam com pessoas e animais. O conforto animal é diretamente associado à produção de leite. A principal desvantagem, entretanto, é óbvia: é necessária uma rede trifásica. Para solucionar esse problema, esse trabalho propõe o uso de inversores de frequência.

3.4 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

A fabricante de motores WEG[®] também conta com uma grande gama de linhas de inversores de frequência. Felizmente, todas as linhas de inversores com potência de até 3 cv podem ser conectadas à rede elétrica monofásica. O modelo CFW 500 foi o escolhido por ser o mais simples a possuir as funções necessárias para o trabalho. As informações retiradas da folha de dados disponibilizada pelo fabricante estão na Tabela 7. O equipamento conta ainda com controle vetorial *sensorless*, vetorial com Encoder, escalar ou PID, SoftPLC, que agrega funções de CLP (Controlador Lógico Programável), tudo com filosofia *Plug and Play*. Esse equipamento pode ser encontrado pelo valor de R\$ 1.033.

Tabela 7 - Dados do inversor de frequência utilizado no projeto (W.M.S.A.).

Marca	WEG
Modelo	CFW500B10P0B2DB20
Potência máxima aplicável	3 cv / 2.2kW
Tensão nominal de entrada	200-240 V
Corrente nominal de entrada monofásica	24.9 A
Corrente nominal de entrada trifásica	12.2 A
Fator de potência com entrada monofásica	0.7
Fator de potência com entrada trifásica	0.83
Fator de deslocamento típico	0.98
Rendimento típico na condição nominal	>97%
Frequência de rede	48-62 Hz
Frequência de chaveamento	2,5 a 15 kHz (padrão 5kHz)
Frequência de saída	0-500Hz
Tensões transientes e sobretensões	Categoria III
Métodos de Controle	V/f, VVW, Sensor less

Fonte: W.M.S.A.

Com rendimento acima de 97%, o inversor praticamente não irá interferir no consumo da energia. A realidade é que esse modelo de inversor possui tantas funções aplicáveis ao sistema de vácuo, que seria um desperdício não as utilizar no projeto. Como já dito, o controle

da pressão é feito através do regulador de vácuo que mantém a potência do sistema constante. No entanto, esse método é bastante ineficiente, já que para manter a pressão constante ele mantém o consumo de energia no nível mais alto, visto na Equação (9). Esse trabalho também propõe compensar a variação da potência com o controle da vazão da bomba de vácuo. Como a vazão é diretamente proporcional à velocidade angular da bomba, controlando a velocidade do motor é possível controlar a pressão do sistema, como mostra a Equação (10). Dessa forma, o motor entregará o mínimo de energia necessária para manter a pressão do sistema igual ao ponto predefinido.

$$Q_{cte} = N_{cte} p_{cte} \quad (9)$$

$$Q \downarrow = N \uparrow p_{cte} \quad (10)$$

O CFW 500 possui várias formas de controle da velocidade do motor, uma delas é incorporando um controlador PID para ser utilizado numa malha de controle fechada. Utilizando um sensor de pressão conectado à planta e enviando sinal na entrada analógica do inversor, é possível fechar a malha de controle de pressão. É muito importante que o controle seja rápido e eficiente, pois a norma do Ministério da Agricultura não permite variações no vácuo maiores que 2 kPa durante a ordenha. O nível de vácuo será configurado em 41 kPa, pois é um valor mais baixo que maximiza a quantidade de leite extraído e a minimiza os casos de mastite. As Figuras 32 e 33 mostram como o controle na planta da ordenha foi planejado. Um sensor de pressão foi instalado próximo a manômetro, logo após o recipiente de leite. Uma placa eletrônica foi projetada para condicionar o sinal do sensor para a entrada analógica do inversor e este será programado conforme os parâmetros indicados no Anexo A.

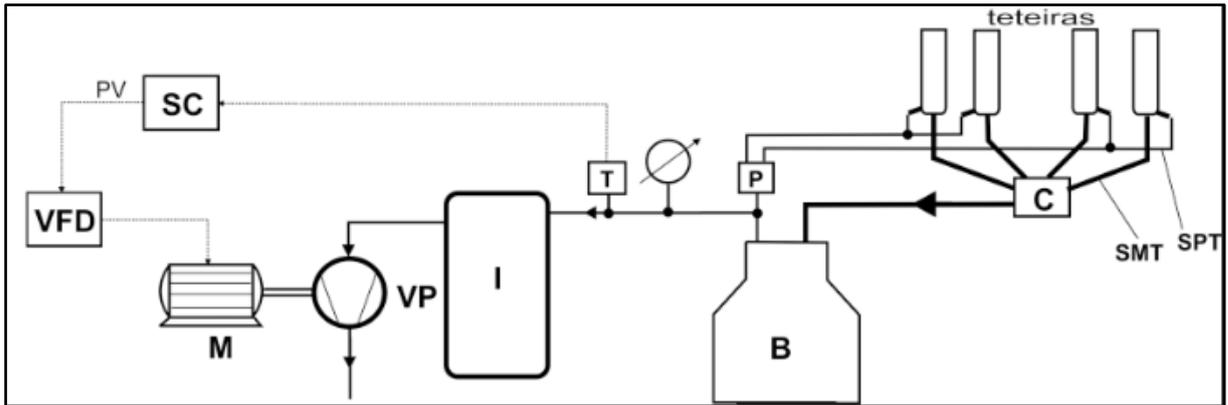


Figura 32 - Malha de controle fechada implantada no sistema de vácuo da ordenha (Roça, 2015).

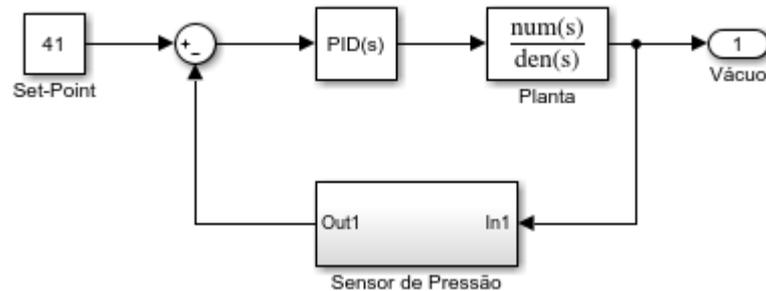


Figura 33 - Malha de controle proposta no projeto.

3.5 DISPOSITIVO DE MEDIDA

Afim de criar um loop de feedback para o controlador PID, foi projetada uma placa eletrônica baseada no sensor MPX5100 da NXP *Semiconductors*, figura 34. Esse dispositivo é um transdutor piezoresistivo capaz de gerar um sinal de tensão proporcional a diferença de pressão entre suas duas saídas. Trabalhando com uma pressão diferencial de 0 a 100 kPa, o MPX5100 tem um excelente alcance para esse projeto, já que a pressão de trabalho será 41 kPa e será quase impossível o sistema atingir pressões maiores que o dobro dessa pressão. A tabela 8 e a figura 35 trazem boas informações sobre o dispositivo. A função de saída do sensor, especificado pelo fabricante é como mostrado na equação 11. Mais informações estão disponíveis na Tabela 8 e na Figura 35. Pela sua tensão de trabalho ser de 5V, é necessária uma placa de condicionamento de sinal para ser utilizada com o inversor CFW 500, no qual possui uma saída de 10V e conversores analógicos de 0 a 10V.

$$V_{out} = V_s(0.009 * P + 0.04) \pm (Erro_{pressão} * Fator_{temperatura} * 0.009 * V_s) \quad (11)$$

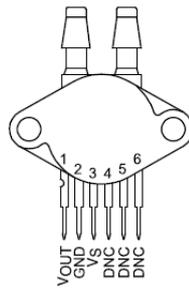


Figura 34 - MPX5100.

A placa de condicionamento possui um regulador de tensão de 5V para alimentar o sensor e dois amplificadores operacionais. Enquanto um gera um ganho de 2 vezes, o outro é apenas um seguidor para ser lido por microcontroladores. Para fins de calibração, um microcontrolador Atmel Attiny85 foi implementado para medir o sinal do sensor e enviar a um display de 7 segmentos. A placa foi projetada seguindo as recomendações do fabricante do sensor e possui capacitores estrategicamente implementados para redução de ruído como mostra a figura 36. Já o esquemático está disponível no Anexo B (Reodique; Schultz, 2005).

Tabela 8 - Informações úteis do sensor MPX5100

Alcance da Pressão	0-100 kPa
Pressão máxima	400 kPa
Temperatura de operação	-40 a 125 °C
Tensão de alimentação	4,75-5,25 V
Repetibilidade	±2,5 %
Precisão	45 mV/kPa
Tempo de resposta	1 ms

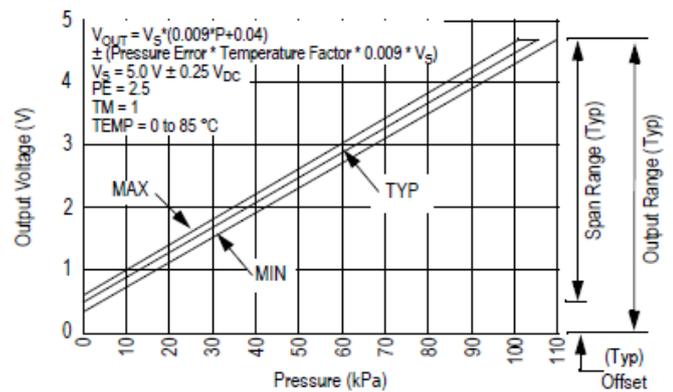


Figura 35 - Saída vs Pressão diferencial.

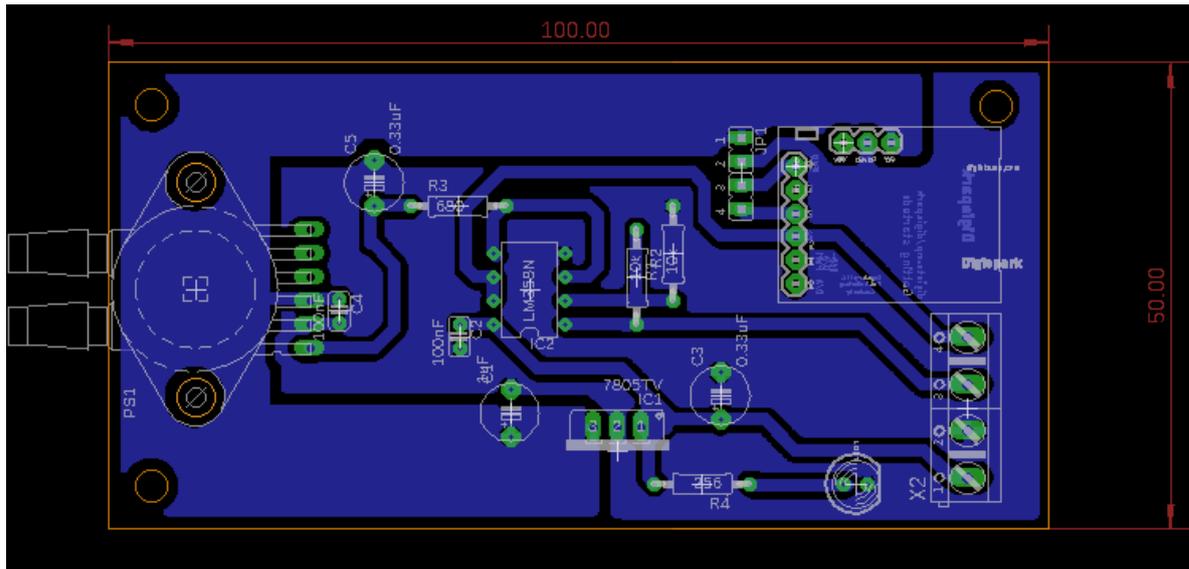


Figura 36 - Design da placa de condicionamento de sinal.

3.6 SINTONIZAÇÃO DO CONTROLE PID

É interessante notar que o controlador PID é a forma de controle mais utilizada na indústria. O motivo é a sua praticidade e ampla aplicação em sistemas diversos. Quando o modelo da planta não é conhecido, métodos analíticos não podem ser aplicados, diferentemente do controle PID, que podem ser calibrados em campo através de experimentos simples em malha aberta.

O controle PID tem a proposta de gerar a melhor alteração na variável de controle (frequência do motor) a fim de tornar a diferença (erro) entre a variável de controle (pressão na ordenha) e o setpoint (o valor escolhido para a pressão, no caso 41 kPa) a mais próxima de zero possível. O seu nome vem das três partes do controle que trabalham em conjunto: o controlador proporcional, integrativo e o derivativo. Cada um deles tem um papel fundamental e distinto. As equações em função do tempo e sua transformada de Laplace estão abaixo.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (12)$$

$$L(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (13)$$

O controle proporcional tem o papel de produzir um sinal de saída proporcional ao erro. Esse sinal gera uma alteração na variável de controle e dá o sentido correto para que a planta consiga minimizar o erro entre o *setpoint* e a pressão. No entanto, se for utilizado sozinho, o

erro nunca realmente zerará. Isso acontece porque à medida que o erro aproxima de zero, o estímulo proporcional também diminui até um ponto que não exerce mais interferência na planta. Para que o controle seja eficiente em zerar o erro, é necessário a aplicação controladora integrativa em paralelo ao proporcional. No controle integral, o sinal de controle em qualquer instante é a área sob a curva do sinal do erro. Dessa forma, o controlador continuará atuando mesmo se o erro for zero, garantindo que ele fique nessa posição. Por fim, existe o controle derivativo que tem como proposta tornar o controle mais rápido e dinâmico. Enquanto o integrativo analisa a área sob a curva até o instante atual de tempo, o derivativo analisa a derivada do sinal de erro no instante atual e gera uma resposta que direciona a próxima derivada. Assim o caminho para zerar o erro se torna curto. Uma boa forma de sumarizar o controle PID é dizendo que o controle proporcional atua com base no erro atual, enquanto o integrativo analisa o passado do erro e o derivativo realiza uma projeção futura. A associação perfeita dos três é o que torna o controle rápido, eficiente e preciso (Ogata, 2010).

Existem vários métodos para a sintonia do PID, ou seja, da escolha dos valores de ganho de K_p , K_i e K_d . O mais conhecido é o chamado método de Ziegler-Nichols e é utilizado para sistemas de primeira ordem que, em malha aberta, reagem a uma entrada degrau de maneira similar à Figura 37. De fato, o sistema de vácuo em uma ordenha reagiu dessa maneira quando foi aplicado um degrau de 40 Hz no motor.

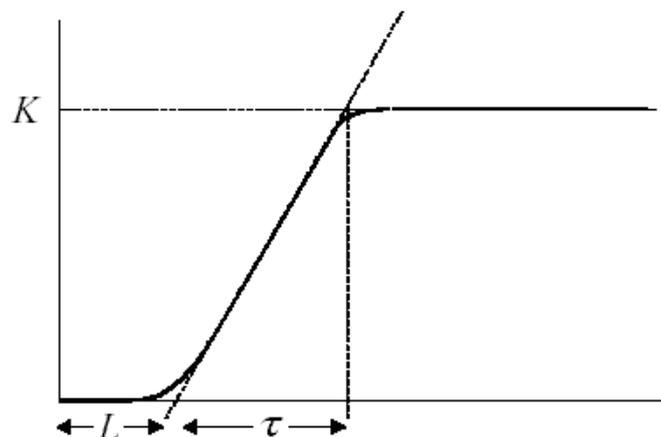


Figura 37 - Método de Ziegler – Nichols (Ogata, 2010).

Ziegler-Nichols propôs que os ganhos do PID fossem baseados com base nas características da curva. Lineariza-se a curva de subida do sistema e mede-se o tempo entre o início da aplicação do degrau e o instante que a reta cruza o valor inicial L , bem como o tempo entre o L e o instante de tempo em que a reta atinge o mesmo valor da curva em regime

permanente T. Com base nesses dados encontrados através da Figura 38, os valores de K_p , K_i e K_d são facilmente calculados como mostra a tabela 9 (Ogata, 2010).

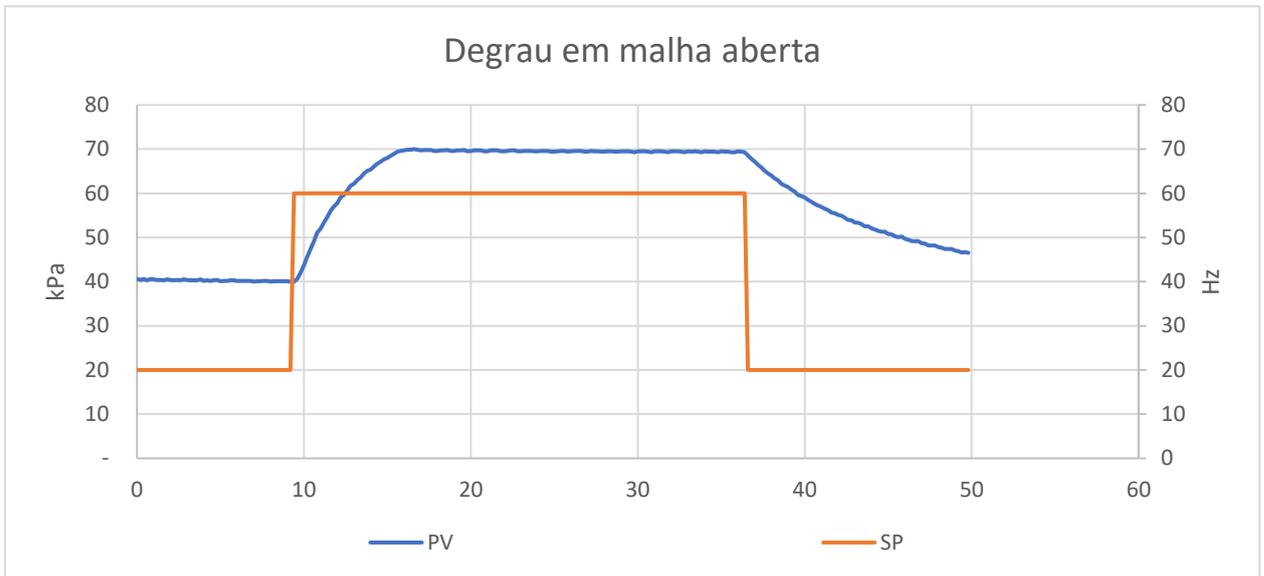


Figura 38 - Reação da pressão do sistema (azul) a um degrau na velocidade do motor (laranja).

Tabela 9 - Sintonização do PID por Ziegler-Nichols (Ogata, 2010).

	K_p	K_i	K_d
P	T/L	0	0
PI	0,9 T/L	0,3/L	0
PID	1,2 T/L	0,5/L	0,5/L

Dado o degrau de 40 Hz na frequência do motor, obteve a resposta mostrada na Figura 39. Uma análise feita pelo programa Excel, como na Figura 39, gerou os valores disponíveis na Tabela 10 para os ganhos do controlador:

Tabela 10 - Valores de Sintonia para PID.

K_p	K_i	K_d
10.04	0.2	0.2

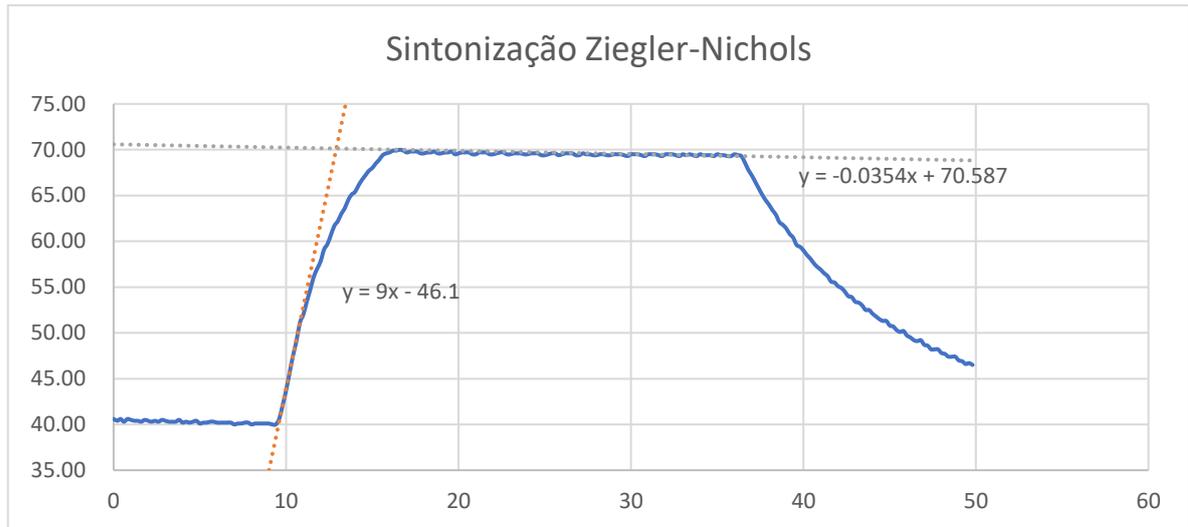


Figura 39 - Análise de Ziegler-Nichols na planta.

Além da sintonia dos parâmetros do PID, o inversor de frequência da WEG® ainda possui outros parâmetros que influenciam na resposta gerada pelo controle. Esses parâmetros são responsáveis por respeitar os limites físicos do motor. Os utilizados no projeto foram a definição para velocidade mínima, velocidade máxima, tempo de aceleração e tempo de desaceleração.

3.7 ROTINA DE TESTES

Para comprovar a real eficiência do projeto, uma série de testes foi realizados na planta. Primeiro, foi necessário medir o consumo de energia elétrica durante a ordenha sem nenhuma alteração, ou seja, utilizando o motor monofásico. Além do consumo, o comportamento do vácuo deve ser registrado para ser comparado posteriormente. Para isso, outra placa eletrônica baseada em microcontrolador foi projetada para monitorar tanto a potência rms do motor, quanto o nível de vácuo no sistema.

A potência rms foi calculada através dos valores medidos de tensão e corrente rms. Como a tensão é relativamente constante durante o experimento, ela foi monitorada através de um multímetro e registrada a cada 5 minutos. Já a corrente foi medida através de um transformador de corrente, como o da Figura 41, acoplado a uma das entradas do motor. Para medir esse sinal, um circuito eletrônico converteu o valor de corrente para tensão e adicionou uma componente contínua, de forma que o valor mínimo da corrente ainda seja maior que zero

e capaz de ser medido pelo microcontrolador. O esquema do circuito utilizado está disposto na Figura 40. A pressão foi adquirida da outra placa eletrônica.

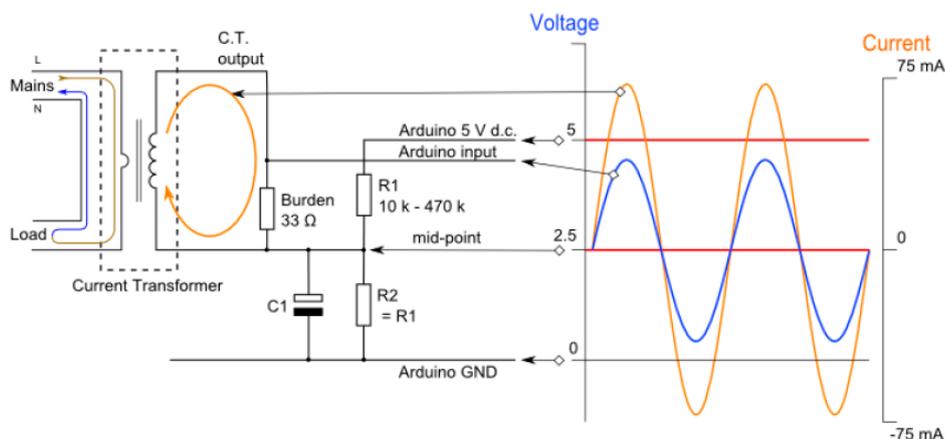


Figura 40 - Circuito eletrônico para medir a corrente do motor (Learn Open Energy Monitor)



Figura 41 - Transformador de corrente SCT-013 (Learn Open Energy Monitor)

Após a instalação do motor trifásico e do inversor, o mesmo teste de consumo energético e pressão será feito e comparado. Espera-se que o consumo seja menor enquanto a pressão de vácuo na ordenha não oscile mais do que 2 kPa. A análise será feita pelo software do inversor CFW 500 que disponibiliza a monitoração das variáveis.

Para comprovar a eficiência e robustez do controle, serão feitos testes de estabilidade. O sistema deve continuar estável sob uma perturbação externa, gerando uma resposta rápida sem desprezar os limites do motor.

3.8 RELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS DO SISTEMA

A fim de obter resultados empíricos que embasarão o estudo teórico desse trabalho, foram realizados experimentos para avaliar o impacto de variar uma única variável em função de outra, mantendo todo o restante constante. As variáveis analisadas foram a corrente e tensão de entrada e a frequência do motor trifásico, a potência entregue ao inversor, bem como a pressão no sistema de vácuo.

Como este é um trabalho de minimização, é importante reconhecer a relação entre a variável de controle (frequência do motor) e variável a ser minimizada (energia consumida) para que se possa estabelecer as diretrizes. Para isso, a frequência do motor foi gradativamente alterada enquanto monitorava-se a potência entregue ao inversor. Todas as entradas de ar do sistema foram fechadas para que houvesse o mínimo de entrada de ar possível. Como não foi possível avaliar o escorregamento do motor, assume-se que a velocidade do motor é diretamente proporcional à frequência do campo magnético girante.

Como dito pelo Instituto de Física da USP, o resultado encontrado foi uma curva levemente quadrática que pode ser aproximada a uma reta com $R^2 = 0.99$, como a Figura 42 mostra. É esperado que a carga gerada por uma bomba de vácuo varie linearmente à velocidade do motor, logo a potência mecânica do motor terá um comportamento quadrático em relação à velocidade, como as Equações 14 e 15 mostram, sendo P_{mec} , T , N a potência, torque e velocidade no eixo do motor e P_{inv} , V , I e $\cos\theta$, a potência de entrada no inversor e a tensão, corrente e fator de potência na saída do inversor.

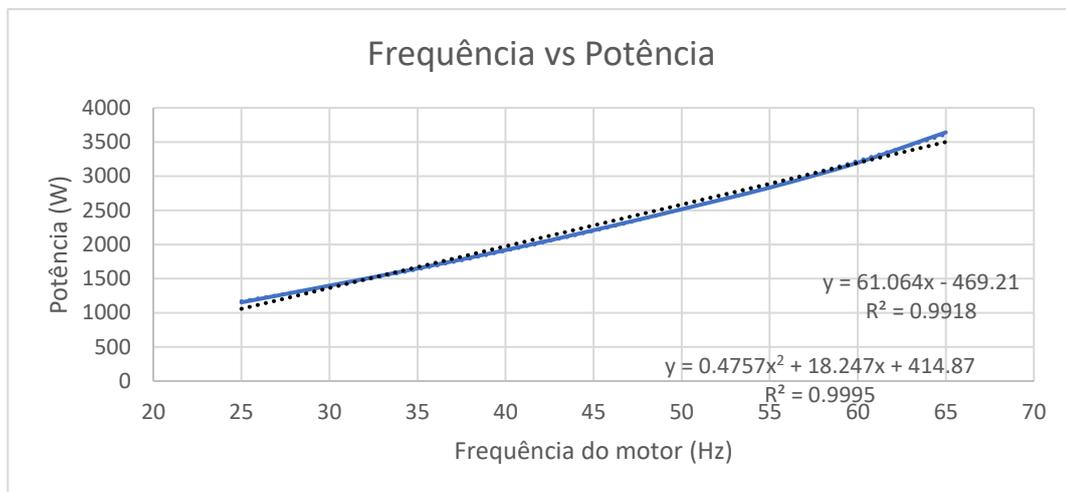


Figura 42 - Gráfico de potência entregue ao sistema em função da frequência do motor.

$$P_{mec} = T \times N \Rightarrow P_{mec} \approx N^2 \quad (14)$$

$$P_{inv} = VI \cos \theta \Rightarrow P_{inv} \approx P_{mec} \Rightarrow I \approx N^2 \quad (15)$$

Para melhorar o estudo sobre o assunto, a corrente no motor foi monitorada enquanto a frequência era incrementada. Como o inversor mantém a densidade de fluxo constante no motor, então qualquer incremento na corrente do estator do motor é referente ao torque na ponta do eixo.

$$I_2 = \frac{\tau}{k \cdot \phi_m} \quad (16)$$

Como demonstrado na Figura 43, a corrente no motor aumenta linearmente com a frequência com $R^2 = 0.96$. No entanto a variação é muito pequena se comparada com o aumento da velocidade, o que permite que essa variação seja desprezada e que a potência também seja considerada linear à velocidade. De toda forma, o controle da velocidade do motor tem relação direta com a potência consumida pelo sistema. Dessa maneira, para minimizar o consumo, deve-se reduzir a velocidade do motor sem que isso cause grandes perturbações à variável de processo.

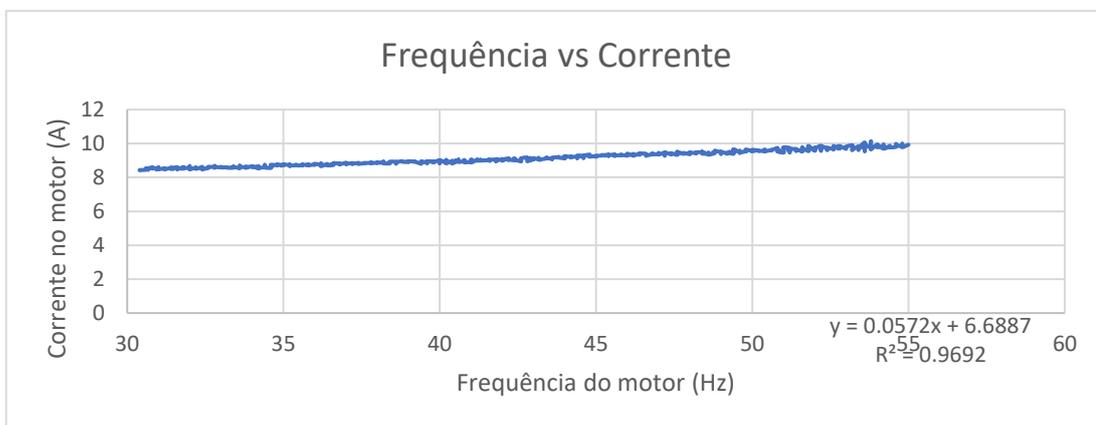


Figura 43 - Gráfico da corrente no motor em função da frequência do motor.

Quanto ao sistema de vácuo, é interessante conhecer a relação entre a quantidade de ar que entra no sistema e a carga que este gerará ao motor. Como o *throughput* é associado a quantidade de ar que entra no sistema, quanto mais ar é admitido, maior será a carga entregue ao motor para uma determinada pressão. Para avaliar essa relação, foi monitorado o valor de corrente do motor e de pressão do sistema enquanto variava-se a frequência do motor em duas

situações distintas. Num primeiro momento, todas as entradas de ar foram fechadas e o teste foi realizado, depois todas foram abertas para refazer o experimento com carga de ar máxima.

É interessante notar pelas informações da Figura 44 que, para uma mesma frequência, a carga no motor é menor quanto maior for a quantidade de ar entrando no sistema, mas isso acontece pelo fato da pressão no sistema com poucas entradas de ar estar saturada e pouco variar com a velocidade do motor. O mesmo não acontece quando existe mais ar entrando no sistema, o que torna a pressão muito menor para a mesma frequência no motor. Eventualmente, com o aumento da frequência, a pressão no sistema com maior entrada de ar também saturará, mas a potência entregue para o sistema será muito maior. Pode-se notar que, embora não tenha sido possível comparar valores de corrente no motor para a mesma frequência, a corrente será maior caso haja uma maior quantidade de ar entrando no sistema sob essa condição.

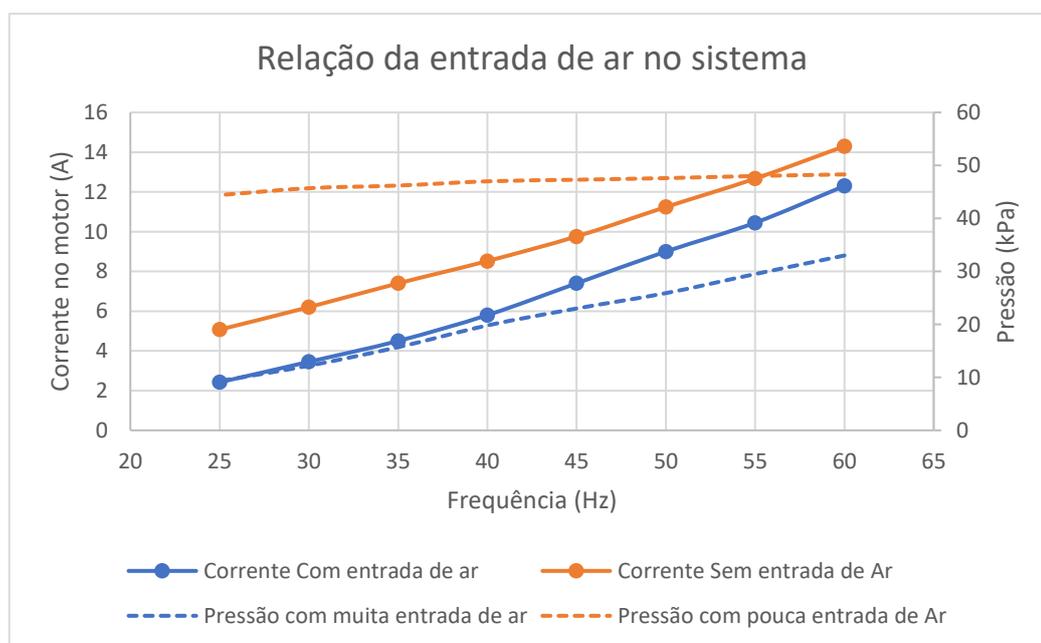


Figura 44 - Gráfico da corrente do motor e da pressão do sistema em função da frequência do motor com diferentes quantidades de entradas de ar.

Para minimizar a carga do sistema é de extrema importância minimizar a quantidade de ar que entra para ele. Não é de interesse desse trabalho realizar alterações construtivas em uma ordenha, mas o regulador de vácuo oferece um controle de péssimo rendimento, visto que esse torna a carga do sistema a maior possível. Com o controle da velocidade do motor, é possível controlar a vazão de ar removida do sistema e, através de uma malha de controle fechada, torná-la proporcional à taxa de ar que entra a fim de manter a pressão constante e o *throughput* sempre o menor possível.

4 RESULTADOS

Os testes em produção foram realizados cerca de três meses depois que o sistema foi instalado para mostrar que o sistema realmente funciona. Respeitando toda a rotina de ordenha, por três dias seguidos, a ordenha da tarde teve o vácuo e a corrente elétrica entregues ao sistema registrada a cada 5 segundos através do sistema de aquisição de dados. A tensão da rede também foi acompanhada através de um multímetro. No primeiro dia, a ordenha utilizou o motor monofásico que era utilizado antes da instalação do sistema. No segundo dia, foi o dia de monitorar os mesmos valores, com a vantagem de também ser possível monitorar os dados do inversor como corrente, tensão e fator de potência no motor, bem como a frequência de rotação. Quanto a sintonização do PID, nesse teste foram utilizados os valores de KP, KD e KI aconselhados pelo fabricante do inversor. O teste para avaliar os resultados da sintonização pelo método de Ziegler-Nichols foi realizado no terceiro dia. Durante todos os dias, foi utilizado o mesmo rebanho e realizados os procedimentos padrões da produção de leite.

4.1 MOTOR MONOFÁSICO

Como o motor monofásico não possui controle de velocidade, o regulador de vácuo foi utilizado para estabilizar o nível de vácuo em 42 kPa. A ordenha da tarde, no dia, durou 3h e 01 minuto. Durante a produção, o sistema de aquisição de dados coletou o valor da potência consumida e da pressão de vácuo da ordenha a cada 5 segundos. Os resultados encontrados estão na Tabela 11 e nas Figuras 45 e 46.

Tabela 11 - Resultados do teste da ordenha com motor monofásico.

	Pressão (kPa)	Potência (W)
Média	41.32	3352.08
Desv. Padrão	0.68	51.07
Máximo	44.46	3506.70
Mínimo	37.99	3153.00

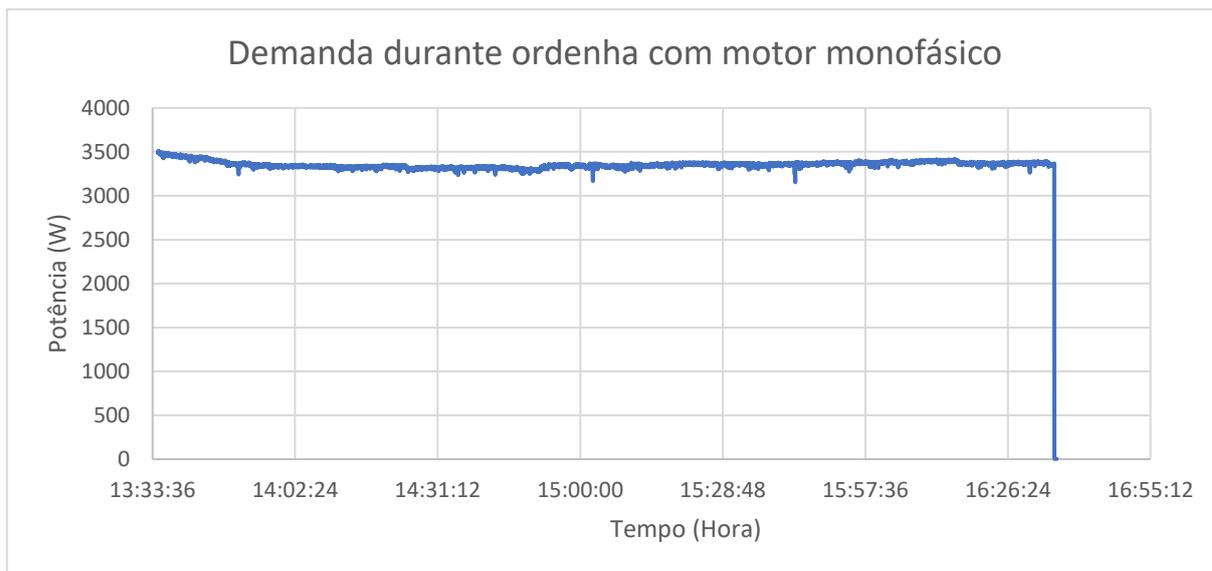


Figura 45 - Potência consumida durante teste com motor monofásico.

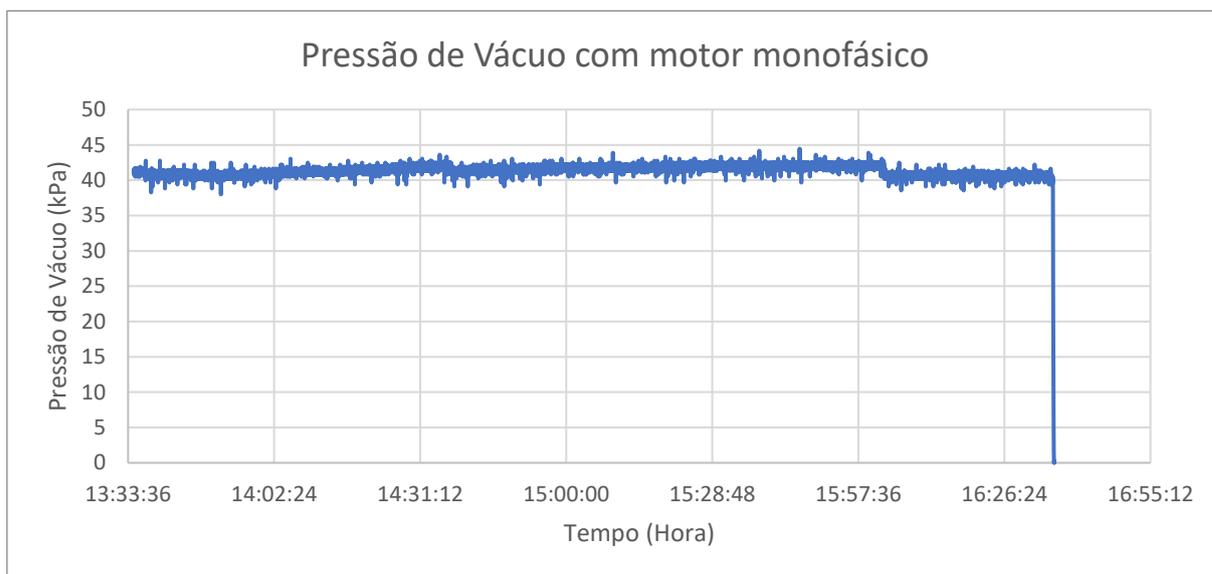


Figura 46 - Potência consumida durante teste com motor monofásico.

O valor da potência média consumida de 3343 W foi cerca de 14% maior do que a potência nominal definida pelos dados de placa do motor. Isso mostra que nessa forma de trabalho, o motor funciona com capacidade acima da nominal. O consumo total de energia elétrica, tendo base o tempo de duração, foi de 10,11 KWh.

O rendimento quanto ao controle da pressão foi bastante satisfatório, mantendo o desvio padrão menor que o recomendado pela norma, com raros momentos de quedas. O erro médio de 0,73 kPa da pressão em relação ao *setpoint* também é pequeno para o processo. Isso mostra

que, embora ineficiente energeticamente, o regulador de vácuo realiza muito bem a sua função de manter a pressão de vácuo no sistema constante e igual a um determinado valor.

4.2 MOTOR TRIFÁSICO E CONTROLE EM MALHA FECHADA

Após a instalação do inversor de frequência e do motor trifásico no lugar do motor monofásico, o novo sistema de controle de pressão de vácuo foi colocado à prova utilizando os parâmetros de controle PID sugeridos pelo fabricante. O Setpoint foi ajustado para 42 kPa e o regulador de vácuo regulado para 46 kPa para evitar que influenciasse o controle, sem deixar que o vácuo excedesse valores preocupantes. Os resultados encontrados estão resumidos na Tabela 12 e representados nos gráficos das Figuras 47, 48 e 49. Os picos de potência e velocidade do motor encontrados durante a produção são devido à resposta do sistema às entradas de ar que ocorrem durante a troca dos animais na ordenha, ou por um escorregamento de uma das teteiras.

Tabela 12 - Resultados do teste da ordenha com motor trifásico

	Pressão (kPa)	Frequência (Hz)	Potência (W)
Média	41.93	28.00	1092.06
Desv. Padrão	1.02	5.20	208.12
Máximo	46.50	67.80	2468.27
Mínimo	30.90	23.70	957.34
Moda	41.9	25.6	983.14



Figura 47 - Frequência do motor com sistema de controle de vácuo.

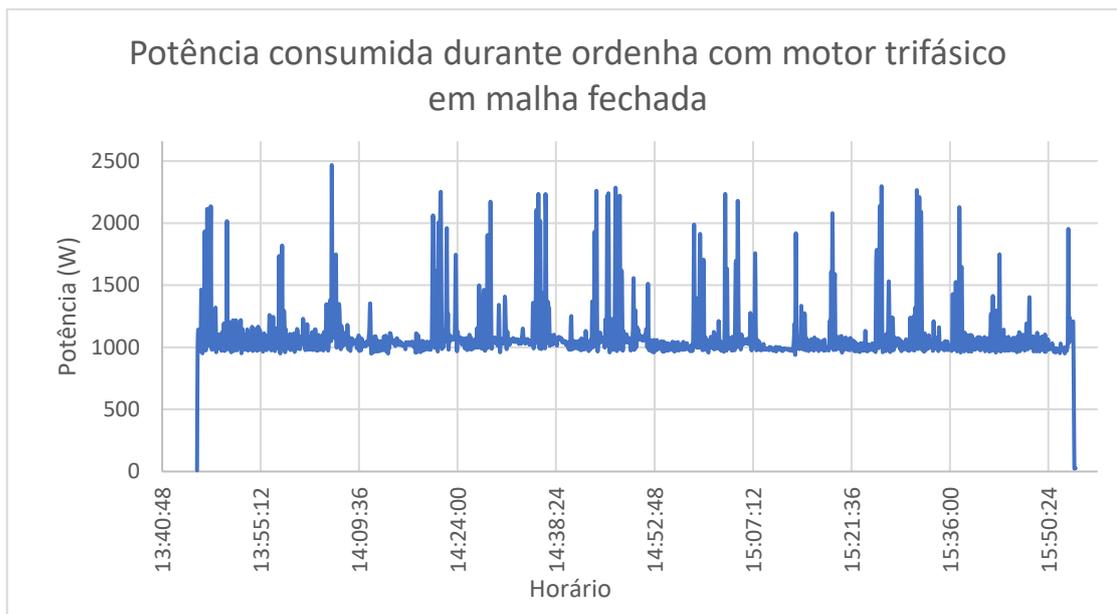


Figura 48 – Potência consumida durante a ordenha com motor trifásico em malha fechada.

A ordenha nesse dia durou 02h e 08 minutos. Apesar da aceleração no tempo de ordenha, a produção de leite se manteve constante, garantindo uma redução de aproximadamente 1/3 dos custos como mão de obra e energia elétrica. Já a potência média utilizando o controle de velocidade foi também reduzida em 1/3 quando comparada com a consumida pelo método anterior, garantindo uma economia de 67,5% .

Nessa forma de controle de vácuo, o motor trabalhou na maior parte do tempo com frequência menor que a metade da nominal. Isso demonstra que mais da metade da energia consumida pelo sistema com o motor monofásico é oriunda do regulador de vácuo. Entretanto, sem a devida sintonização do PID, o motor foi lento para responder às perturbações causando quedas bruscas de pressão seguidas por altas, já que no momento que entradas de ar indevidas sessam, o motor ainda está acelerado.

4.3 SISTEMA SINTONIZADO

Os valores para K_p , K_d e K_i obtidos através do método de Ziegler-Nichols foram colocados a prova e o resultado foi bastante satisfatório.

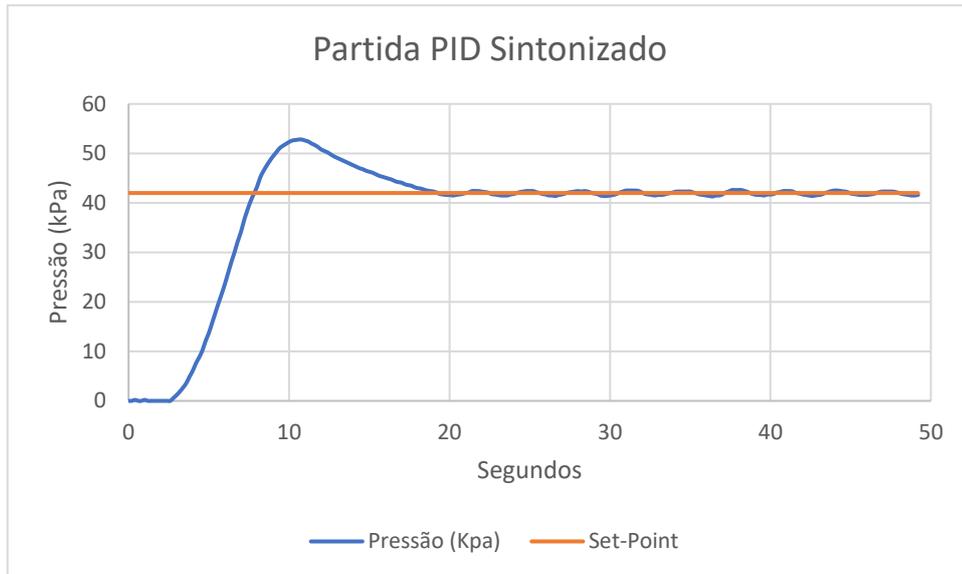


Figura 49 - Resposta a entrada degrau em malha fechada com PID sintonizado.

Como a Figura 49 mostra, a resposta a um degrau no *setpoint* gerou uma resposta com *overshoot* de 25.75% com tempo de acomodação de 16,5s. O erro em regime permanente ficou oscilando com erro máximo de 0.8%. Valores satisfatórios para o projeto, mas ainda era necessário configurar os parâmetros de aceleração, velocidade máxima e mínima.

As velocidades máximas e mínimas do motor foram definidas seguindo critérios intrínsecos ao sistema. A bomba de vácuo não funciona bem com o motor em rotações menores que 20 Hz, pois aumenta-se muito a vibração gerada por ela. Dessa forma essa foi a frequência mínima de trabalho. Já a velocidade máxima foi escolhida 60 Hz para evitar sobreaquecimento no motor e picos maiores de vácuo após o fim de uma entrada de ar.

O controle, no entanto, sofreu por conta das rampas de aceleração e desaceleração pré-definidas em 5s. Como visto na Figura 50, o controle não atingia estabilidade na presença de uma carga oscilante no sistema.

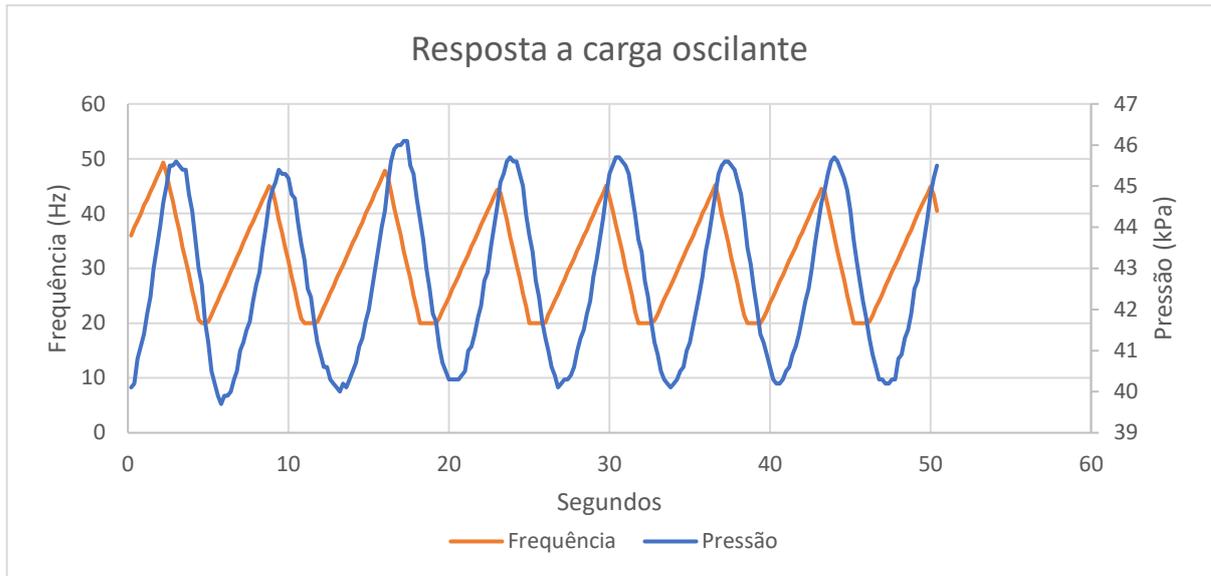


Figura 50 - Resposta do controle PID a uma carga oscilante.

Os pulsadores em cada teteira produzem entradas de ar periódicas no sistema, mesmo assim, a pressão de vácuo precisa se manter constante. Portanto o controle precisa ser imune a esse tipo de perturbação. A redução das rampas para 1 segundo foi suficiente para permitir que o controle fosse rápido o suficiente para atingir estabilidade, como a Figura 51 mostra. Para que partida do motor continuasse suave, foi criada uma segunda rampa de aceleração com 10 segundos, para gerir a aceleração durante a partida e desligamento do motor.

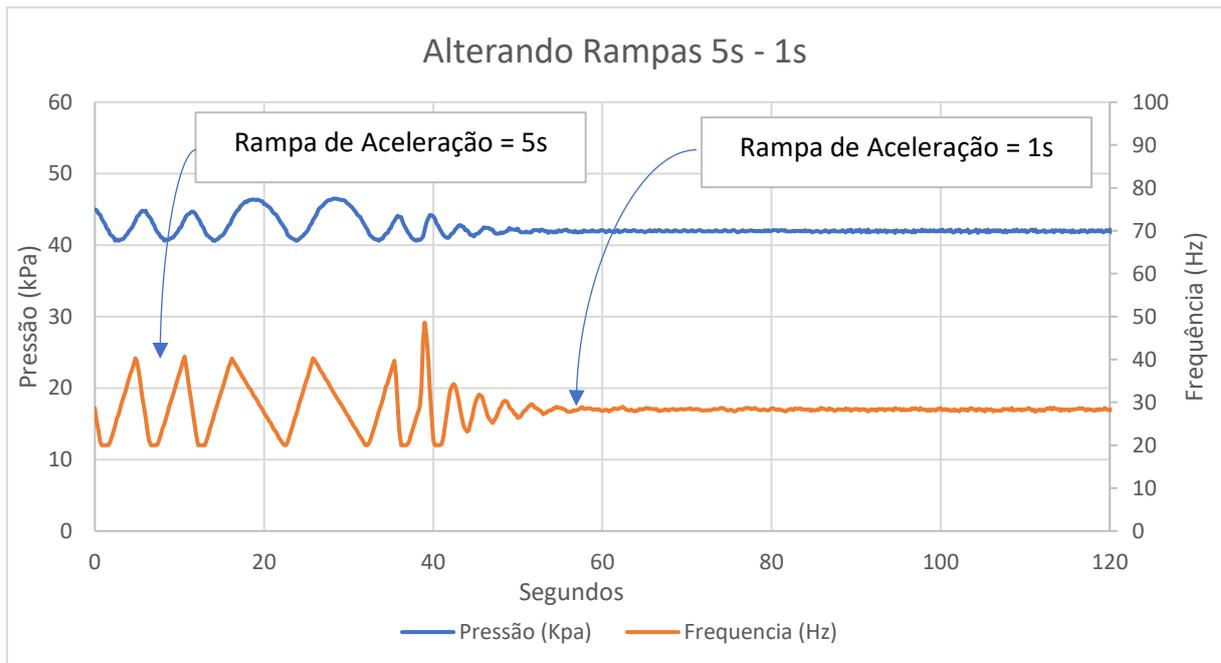


Figura 51 - Alteração da rampa de aceleração.

Foi realizado um teste de estabilidade do controle, abrindo uma teteira para variar a entrada de ar no sistema. Esta é uma perturbação corriqueira que ocorre quando se retira o conjunto do animal ou mesmo durante a ordenha. O resultado na Figura 52 mostrou que o sistema apresentou uma rápida resposta e estabilidade.

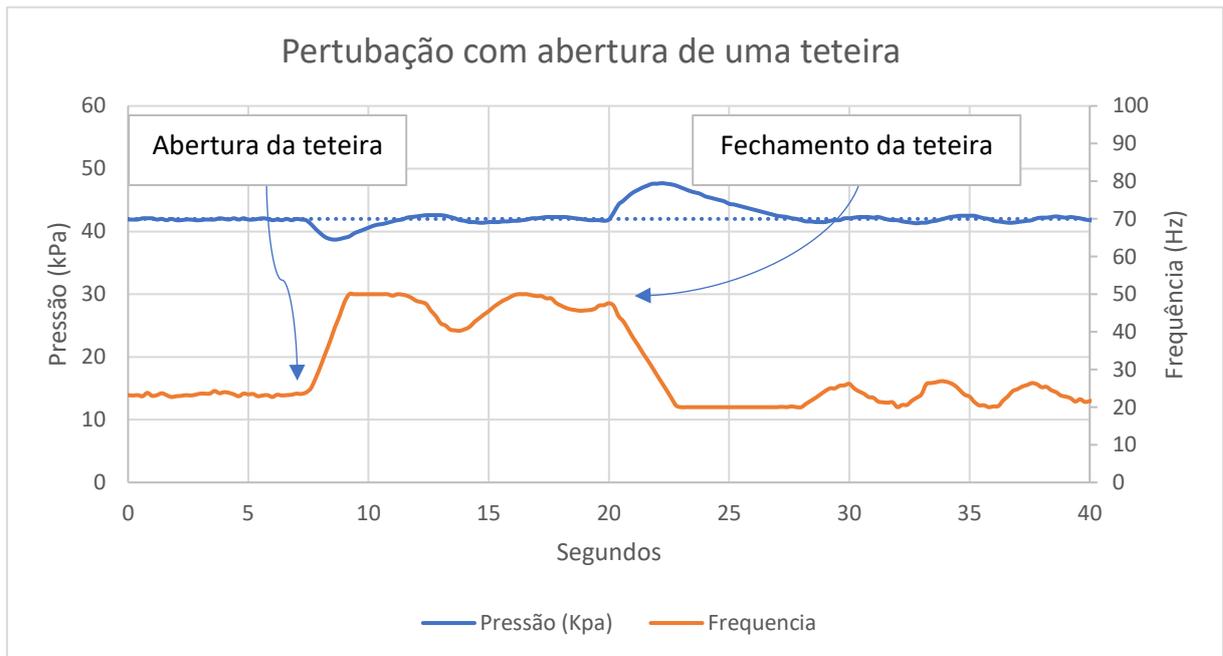


Figura 52 - Resposta do controle a uma perturbação externa.

Apesar do controle funcionar muito bem durante o processo, ele não é eficiente quando há alterações do setpoint e pode começar a divergir como mostra a Figura 53. Essa situação nunca vai acontecer durante o processo, e por esse motivo não foi visto como um problema para esse trabalho. Os limites inferiores ou superiores para a velocidade do motor também foram eficientes para contornar essa situação. Para uma melhor sintonização do controlador é interessante que haja primeiramente a modelagem do sistema.

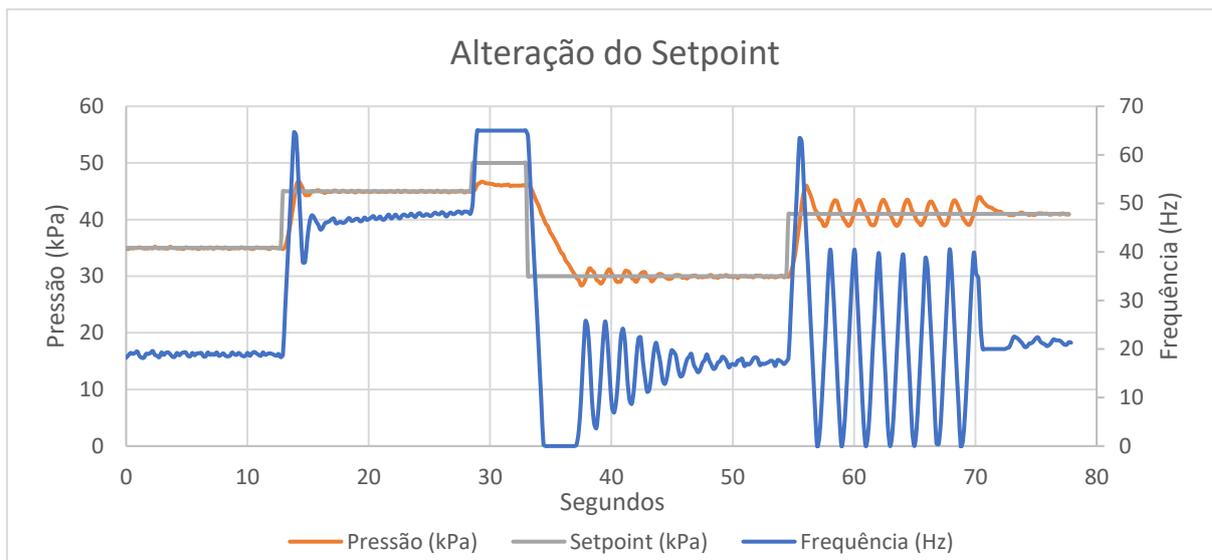


Figura 53 - Alterações no Setpoint para teste de estabilidade.

Durante o último dia de testes, o sistema devidamente sintonizado foi posto à prova. Como mostra a Tabela 13, a grande vantagem da sintonização foi tornar o controle rápido o suficiente para manter o vácuo mais próximo de como já funcionava com o regulador de vácuo sem perder o melhor rendimento energético, cujo valor ainda foi 66,4% menor do que o sistema com motor monofásico. As Figuras 54, 55 e 56 mostram como o controle melhorou a velocidade de resposta a perturbações, embora tenha aumentando os picos de velocidade do motor.

Tabela 13 - Resultados do teste da ordenha com controlador devidamente sintonizado.

	Pressão (kPa)	Frequência (Hz)	Potência (W)
Média	41.0	23.0	1125.2
Desv. Padrão	0.5	4.1	231.9
Máximo	45.1	59.7	3503.5
Mínimo	38.0	20.0	722.4
Moda	41.0	21.3	1063.5



Figura 54 - Potência durante ordenha com controlador devidamente sintonizado.

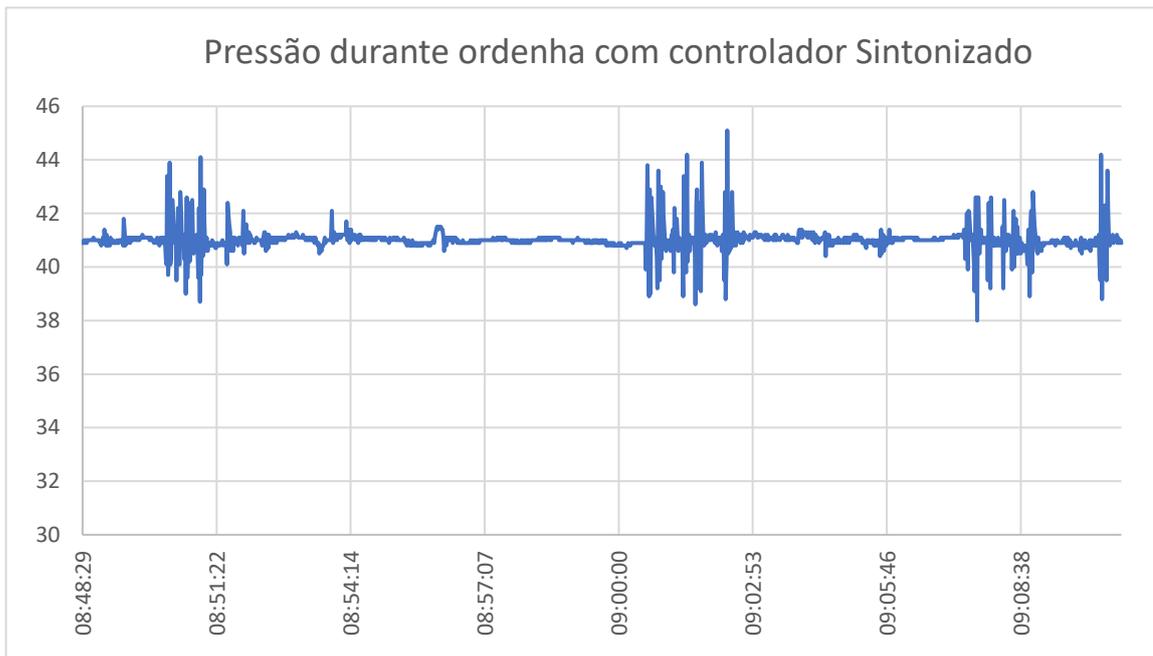


Figura 55 - Pressão durante ordenha com controlador devidamente sintonizado

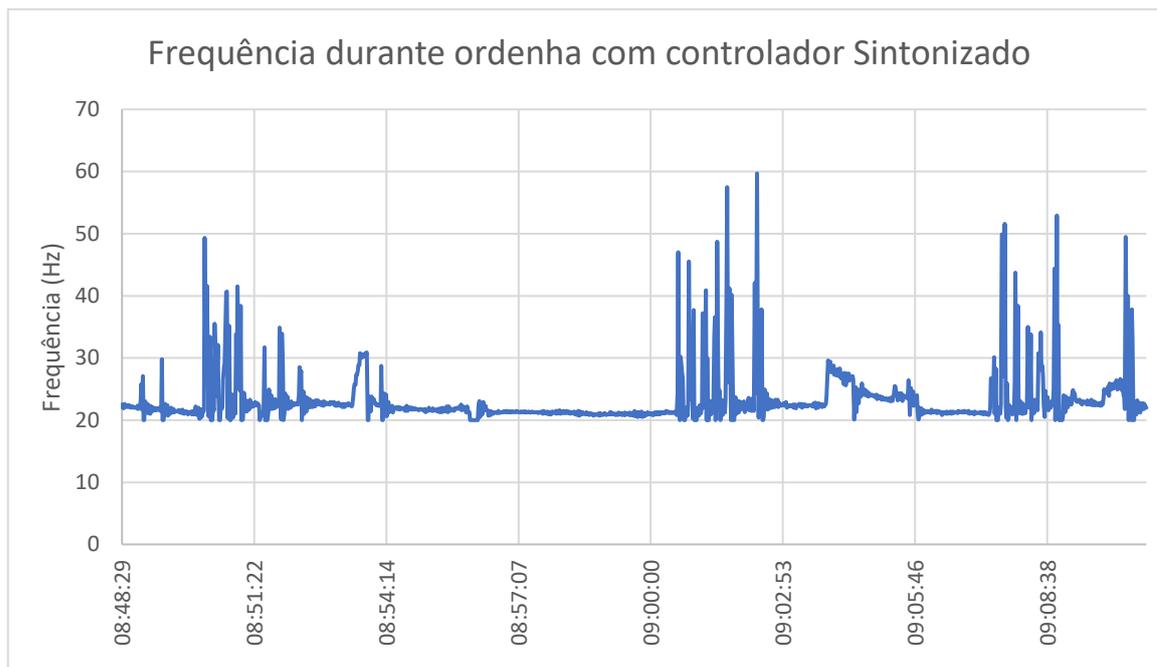


Figura 56 - Frequência durante ordenha com controlador devidamente sintonizado.

4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA

Esse projeto tem a intenção de reduzir o gasto energético de uma ordenha mecânica sem que haja efeitos colaterais para o processo. Mas para que a economia na conta de energia elétrica seja vantajosa, é preciso que o gasto da instalação do novo sistema se pague em pouco tempo. Dessa forma, é necessária a análise da viabilidade econômica da instalação desse projeto.

O preço do quilowatt/hora para a região rural em Minas Gerais para o mês de julho de 2019 foi de R\$ 0,4775. Analisando os dados resumidos na Tabela 14, a instalação do novo sistema frente ao tradicional gerou uma economia em média de 2.226 KWh. Pelo sistema antigo, o motor da ordenha ficava ligado cerca de 8,5 horas por dia, 7 dias por semana, sendo 4 horas para ordenha de manhã, 3 horas para a ordenha da tarde e mais 1,5 horas para a limpeza. Com a redução de 1/3 do tempo de produção com o novo sistema, a ordenha passou a trabalhar apenas 6,2 horas. Dessa forma, utilizando o novo sistema de controle de vácuo, economizou-se R\$ 10,29 por dia e R\$ 308,69 por mês.

Tabela 14 - Consumo Energético pelos sistemas.

	Sistema Tradicional	Sistema Proposto
Energia consumida por hora	3,352 KWh	1,125 KWh
Energia consumida em 1 dia	28,485 KWh	6,9375 KWh
Energia consumida em 30 dias	854,57 KWh	208,125 KWh
Gasto mensal	R\$ 408,06	R\$ 99,37

O motor monofásico que era utilizado na ordenha pode ser encontrado na internet por aproximadamente R\$2.089 enquanto o trifásico R\$1.339. Já o inversor de frequência está por volta de R\$ 1.033. O transdutor de pressão, juntamente com a placa condicionamento de sinal foram adquiridos por R\$ 224,30. Os custos com cabeamento, painel elétrico, disjuntor e botoeiras foram de R\$ 393,00.

Além dos custos com o material, foi considerado um valor de 50% do gasto para o projeto, mais 25% pela mão de obra e outros 12% por eventuais manutenções necessárias, totalizando um valor total pelo equipamento de R\$ 5.589,99. As Tabelas 15 e 16 mostram esses valores em comparação.

Tabela 15 - Custo detalhado de cada sistema.

	Sistema Proposto
Motor	R\$ 1.339,00
Inversor de Frequência	R\$ 1.033,00
Placa Eletrônica	R\$ 224,30
Equipamentos Adicionais	R\$ 393,00
Projeto	R\$ 1.494,65
Mão de Obra	R\$ 747,32
Manutenção	R\$ 358,72

Tabela 16 - Custos de cada sistema de produção de vácuo para ordenha mecânica.

Custo do sistema tradicional	Custo do sistema proposto	Preço final do sistema proposto
R\$ 2.089,00	R\$ 2.989,30	R\$ 5.589,99

O preço final do sistema é um investimento bastante interessante ao produtor. A economia gerada nos testes mostrou que o valor gasto pode ser recuperado em até 18 meses, ou menos de 10 meses se forem considerados apenas os custos em material. Números bem interessantes visto que se trata de um projeto robusto com baixa manutenção. Além da economia direta na conta de energia elétrica, ainda é esperado outros ganhos como redução da mão de obra com a aceleração da ordenha, aumento do conforto do rebanho com a redução do barulho, e até mesmo a possibilidade de adição de mais conjuntos, pois com esse sistema há potência no motor disponível manter para manter a pressão constante mesmo com adição de mais carga.

5 CONCLUSÃO

O preço do leite produzido no Brasil é maior do que os de vizinhos como Argentina e Uruguai. Isso é indício de que a produção local sofre com maiores custos de produção e desperdícios que tiram a competitividade do país frente ao mercado internacional. É urgente a necessidade de modernização do campo brasileiro. No entanto, é necessário fornecer insumos às qualidades de produção, como a energia elétrica.

Sem acesso à energia trifásica, a produção de leite precisa encontrar novas soluções para a modernidade. Além disso, as ordenhas mecânicas encontradas no país ainda utilizam uma tecnologia antiquada, que não se preocupa com eficiência energética. É o caso dos reguladores de vácuo que, apesar de cumprirem bem sua função, são extremamente ineficientes, que além de gerar desperdícios, superdimensionam os componentes de geração de vácuo.

A superioridade de motores trifásicos frente aos monofásicos também é inquestionável. A simples substituição entre os equipamentos já gerou redução do desperdício energético, por se tratar de um equipamento naturalmente mais eficiente. Além disso, motores trifásicos possuem menores preços, são mais robustos por não possuírem capacitores ou enrolamentos de partida, e ainda geram menos ruídos sonoros.

Existem muitos processos de produção que estão engessados às tecnologias ultrapassadas e que não acompanharam a evolução de eletrônica e eletrônica de potência. A ordenha mecânica é um desses casos. A versatilidade encontrada em um inversor de frequência gera benefícios a muitas áreas e também pode ser aplicada ao meio rural. Nesse meio, como esse trabalho propôs, o inversor de frequência pode ser utilizado para gerar energia elétrica trifásica para o uso de motores trifásicos, mas não apenas isso.

Mesmo pouco encontrado em aplicações para ordenha mecânica, o controlador PID para controle de pressão em processos já é uma tecnologia bastante consolidada na indústria em geral. Graças ao inversor de frequência, foi possível aplicá-lo ao equipamento de maneira simples e prática. O trabalho também destacou a importância da boa sintonização do controlador para que o resultado final fosse compatível às normas vigentes.

O controle PID se mostrou bastante eficaz no controle da pressão do sistema, mantendo-a próxima do *setpoint* de 41 kPa com um desvio padrão de apenas 0.5 kPa. No entanto, a

alteração do *setpoint* em trabalho desestabilizava o controle, o que mostra que ainda é necessário um aprimoramento da sintonização do sistema. Mesmo assim, a economia de energia foi de cerca de 67%, além da redução do tempo de ordenha em 1/3. Isso mostra o quão ineficiente era o controle antigo e como a tecnologia é eficaz para o controle de processos. A economia no consumo de energia elétrica por mês, baseado nos testes feitos, é de R\$ 308,69. Com essa economia, após 18 meses o sistema se paga e começa a gerar valor ao produtor.

Já as barreiras de entrada desse projeto podem ser consideradas pequenas, dada a simplicidade da sua instalação, que não requer nenhuma alteração adicional senão a troca dos motores e a instalação do inversor de frequência e do circuito de aquisição de dados. Como o sistema está diretamente ligado a economia financeira, é simples convencer o produtor do investimento inicial para a instalação.

A expectativa é que esse projeto possa ser reproduzido em escala e que possa ajudar a levar tecnologia de ponta ao setor rural brasileiro. Para isso, é um desafio futuro o uso em motores maiores, visto que não foram encontrados inversores de frequência maiores que 3 CV que aceitem alimentação monofásica, embora, teoricamente, serem viáveis. Outro ponto interessante, é realizar um estudo para modelagem matemática do sistema de vácuo de ordenha, para que assim possam ser utilizados controladores mais eficientes.

5.1 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

- Simulação e modelagem matemática do sistema de vácuo em ordenhas mecânicas.
- Uso de um controlador ainda mais eficiente.
- Desenvolvimento do projeto para utilizar motores maiores que 3 cv.
- Uso do sistema SoftPLC disponível no inversor para automação de parte do processo.
- Projeto de transmissor de pressão mais robusto para resistir melhor a ambiente de trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- BODIK, I. S.; TISHCHENKO, A. B. **Effect of impeller circumferential velocity on the specific power demand of water-ring vacuum pumps**. Chemical and Petroleum Engineering, v. 24, n. 6, p. 289-290, 1988.
- BRAMLEY, A. John et al. **Machine milking and lactation**. Insight Books, 1992.
- Catálogo de motores WEG. WEG S.A. [Online]. Disponível em: www.weg.net. Acesso em: 09 mai. 2019.
- CHAPMAN, S. **Electric machinery fundamentals**. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2012.
- Dairy Processing handbook. Lund, Sweden: Tetra Pak, 1995.
- DRIVE, Variable Frequency. **Operation And Application of Variable Frequency Drive (VFD) Technology**. Carrier Corporation, Syracuse, New York, 2005.
- DODD, F. **Machine Milking and Lactation**. Vermont, USA: Insight Books, 1992.
- Eurolatte. Regulador de Vácuo. Disponível em: <http://www.eurolatte.com.br/index.php> Acesso em: 22 mai 2019.
- FILHO, A. O. **Procedimento de colocação da unidade de ordenha (teteiras), durante ordenha mecânica**. Juiz de Fora: Embrapa Dairy Cattle, 2013.
- FITZGERALD, Arthur Eugene et al. **Electric machinery**. New York: McGraw-Hill, 2003.
- Forte Vácuo Ind. e Com. LTDA. Forte Vácuo Ind. e Com. LTDA. Disponível em: <http://www.fortevacu.com.br/produtos.php?id=35>. Acesso em 22 mai. 2019.
- Governo do Brasil. **Aneel estimula troca de motores elétricos para promover eficiência energética**. 03 11 2015.[Online]. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/noticias/infraestrutura/2015/11/aneel-estimula-troca-de-motores-eletricos-para-promover-eficiencia-energetica>. Acesso em: 02 jun. 2019.
- HUANG, Si et al. **Theoretical Model for the Performance of Liquid Ring Pump Based on the Actual Operating Cycle**. International Journal of Rotating Machinery, v. 2017, 2017.
- IPEMA, A. H. Prospects for automatic milking. Wageningen : Pudoc, 1992. 575 p.
- International Fact-Checking Network (IFCN), Dairy Report, 2018.
- International Organization for Standardization, ISO 3918:2007 - Milking machine installations - Vocabulary, 2010.
- International Organization for Standardization, ISO 5707:2007 - Milking machine installations - Construction and performance, 2010.
- Instituto de Física da Universidade de São Paulo. **Curso de tecnologia do vácuo**. São Paulo: Gráfica do Instituto de Física da USP, 1992.
- Learn Open Energy Monitor [Online]. Disponível em: learn.openenergymonitor.org. Acesso em: 24 jun. 2019.
- MARTINS, P. et al. **Anuário Leite**. Juiz de Fora: Embrapa, 2018.
- MATTICK, A. T. R. et al. **Machine milking**. Bull. 177. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. 1959.
- MEIN, G. A. et al. **Effects on mastitis of overmilking in conjunction with pulsation failure**. Journal of Dairy Research, v. 53, n. 1, p. 17-22, 1986.

MEIN, G. A. ; REINEMANN, D. J. **Machine Milking**. 2014.

MEIN, G. A. et al. Sizing vacuum pumps for milking. In: **Annual meeting (USA)**. 1994.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, INSTRUÇÃO NORMATIVA SDA Nº 48, 2011.

Nash Vacuum Pump Operation. 24 07 2017. [Online]. Disponível em: <http://vacuumpumpsenman.blogspot.com/2017/07/nash-vacuum-pump-operation.html>. Acesso em 22 mai. 2019.

O'HANLON, John F. **A user's guide to vacuum technology**. Arizona: Wiley Interscience, 2003.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OLIVEIRA, L.C. **Perspectivas Para a Eletrificação Rural no Novo Cenário**. Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2001.

RASHID, M. H. **Power Electronics: Circuits, Devices and Applications**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

REINEMANN, D. J. et al. **Effects of milking vacuum on milking performance and teat condition**. In: Proceedings of the AABP-National Mastitis Council Symposium, International Symposium on Mastitis and Milk Quality, Vancouver, BC, Canada. 2001. p. 13-15.

REODIQUE, A.; SCHULTZ, W. **Noise considerations for integrated pressure sensors**. Application Note AN1646, Freescale Semiconductor, 2005.

RIBEIRO, E. S. et al. **O método dos elementos finitos na análise do aterramento do sistema monofilar com retorno por terra**. GEPEA-USP, Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, São Paulo, 2003.

ROȘCA, R. et al. Vacuum regulation with a VFD controller: Preliminary tests and modeling of the vacuum system. In: **Proceedings of the 7th International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture, Food and Environment**. 2015.

SA, WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**. Jaraguá do Sul, SC, 2016.

Varian Associates. **Basic Vacuum Practice**. Lexington, MA: Varian Associates, Inc., 1989.

WAARD, S. D. **Opengewerkte elektromotor**. Own work, Netherlands, 2011.

W. M. S.A. **Folha de Dados Inversores de Frequência**. 2019.

Anexo A – Parâmetros importantes do inversor CFW500 para controle PID

Parâmetro	Descrição	Valor
P0040	Variável de Processo	Visualização
P0041	Set-Point	Visualização
P0133	Velocidade Mínima	20
P0134	Velocidade Máxima	60
P0203	Variável de Processo	1
P0263	Seleção Man/Auto PID	22
P0520	Ganho Proporcional	1
P0521	Ganho Integrativo	0.43
P0522	Ganho Derivativo	0
P0525	Set-Point	42
P0526	Filtro do Set-point	50
P0527	Tipo de ação PID	0
P0528	Fator de Escala	1
P0529	Forma de indicação	2

