unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LUCIANO LIZARDO DE SOUZA GUIMARÃES

Modelagem e simulação de um acionamento hidráulico direto para turbinas eólicas

Guaratinguetá - SP
2022

Luciano Lizardo de Souza Guimarães

Modelagem e simulação de um acionamento hidráulico direto para turbinas eólicas

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

Guaratinguetá - SP
2022

Guimarães, Luciano Lizardo de Souza
G963m Modelagem e simulação de um acionamento hidráulico direto para turbinas eólicas / Luciano Lizardo de Souza Guimarães – Guaratinguetá, 2022.
57 f : il.
Bibliografia: f. 54-57

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022.
Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

1. Turbinas. 2. Energia eólica. 3. Bombas hidráulicas. I. Título.

CDU 620.91(043)

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LUCIANO LIZARDO DE SOUZA GUIMARÃES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Coordenador

B A N C A E X A M I N A D O R A:

Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Orientador - UNESP
participou por videoconferência

Prof. Dr. NESTOR PROENZA PÉREZ
CEFET/RJ
participou por videoconferência

Prof. Dr. JOSE LUZ SILVEIRA
UNESP
participou por videoconferência

Junho *de 2022*

DADOS CURRICULARES

LUCIANO LIZARDO DE SOUZA GUIMARÃES

NASCIMENTO	31.01.1994 – Volta Redonda / RJ
FILIAÇÃO	Osvaldo da Silva Guimarães Lucia Maria de Souza Guimarães
2009/2011	Curso Técnico em Eletromecânica ETPC – Volta Redonda / RJ
2012/2017	Curso de Graduação - Bacharel em Engenharia de Mecânica UniFOA – Volta Redonda / RJ
2019/2022	Curso Pós-Graduação *Stricto Sensu* Mestrado em Engenharia Mecânica FEG/UNESP

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, meu pai Osvaldo, minha mãe Lucia, minha irmã Lucimar e minha namorada Thamyres, pelo incentivo e dedicação para me apoiar em todo o meu processo acadêmico, sem eles nada seria possível.

Ao meu orientador Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna, pela amizade, confiança e oportunidade para desenvolver este trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro concedido durante o curso.

À todos os professores e colegas das disciplinas que cursei durante o mestrado, todos contribuíram.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação no atendimento.

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) – número do processo 88882.433471/2019-01."

RESUMO

Em vista das barreiras para a produção de energia sem comprometer o meio ambiente, as fontes de energias renováveis estão cada vez mais em destaques nas pesquisas. As tecnologias de energia eólica, por exemplo, estão sendo desenvolvidas para reduzir os custos da eletricidade gerada e para aumentar o desempenho tecnológico. A fonte eólica tem como característica o uso de caixa de engrenagem, ou caixa multiplicadora, que devido a sua aplicação, faz a multiplicação da velocidade para condizer com a faixa de trabalho do gerador e é um dos principais fatores que causam o aumento do tempo de inatividade nas modernas turbinas eólicas. Considerando o desenvolvimento eficiente de projetos para a geração de energia renovável, este trabalho propõe um sistema de transmissão hidrostática aplicado em turbinas eólicas, que tem como vantagens a eliminação do conversor de frequência bem como da caixa de engrenagem; propõe também um sistema aplicável para o regime de trabalho analisado e a validação e análise de comportamento do sistema na correção da variação da velocidade do vento, possibilitando entregar uma velocidade de rotação fixa ao gerador elétrico. A metodologia aplicada aborda: uma revisão abrangente da literatura e o uso de um software de modelagem e simulação computacional, incluindo hidráulica, pneumática, elétrica, controles, interface homem-máquina e comunicações, para avaliar o sistema proposto. Como resultado tem-se eficiência significativa de um modo geral: a potência de entrada no eixo da bomba hidráulica analisado foi de 275 kW e uma potência de saída no eixo do motor hidráulico para o gerador elétrico de 246,9 kW, obtendo uma eficiência total do sistema hidráulico de 89,78%.

PALAVRAS-CHAVE: Turbina eólica. Transmissão hidrostática. Acionamento hidráulico direto. Sistema hidráulico.

ABSTRACT

In view of the barriers to energy production without compromising the environment, renewable energy sources are increasingly highlighted in research. Wind energy technologies, for example, are being developed to reduce the costs of generated electricity and to increase technological performance. The characteristic of the wind source is the use of a gear box, or gearbox, which, due to its application, makes the speed multiplication to match the generator's working range and is one of the main factors that cause the increase in the time of downtime in modern wind turbines. Considering the efficient development of projects for the generation of renewable energy, this work proposes a hydrostatic transmission system applied in wind turbines, which has the advantages of eliminating the frequency converter as well as the gearbox; also proposes an applicable system for the analyzed work regime and the validation and analysis of the system behavior in the correction of the wind speed variation, making it possible to deliver a fixed rotation speed to the electric generator. The applied methodology addresses: a comprehensive literature review and the use of computer modeling and simulation software, including hydraulics, pneumatics, electrical, controls, human-machine interface and communications, to evaluate the proposed system. As a result, there is significant efficiency in general: the input power on the analyzed hydraulic pump shaft was 275 kW and an output power on the hydraulic motor shaft for the electric generator of 246.9 kW, obtaining a total efficiency. of the hydraulic system of 89.78%.

KEYWORDS: Wind turbine. Hydrostatic transmission. Direct hydraulic drive. Hydraulic system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Publicações por ano. 17
Figura 2 - Turbinas de eixo horizontal (a) e eixo vertical (b). 18
Figura 3 - Forcas aerodinâmicas atuando sobre o rotor de uma turbina eólica. 19
Figura 4 - Sistema eólico convencional. 20
Figura 5 - Acionamento hidráulico direto. 24
Figura 6 - Detalhe motor de pistão axial – Placa oscilante. 25
Figura 7 - Operação HDD – Relação entre torque e velocidade. 26
Figura 8 - HDD – Visão geral. 27
Figura 9 - Bomba hidráulica de deslocamento fixo. 28
Figura 10 - Bomba de pistões radiais do tipo com curva de came. 29
Figura 11 - Bomba de pistões radiais do tipo com curva de came em corte. 29
Figura 12 - Motor de pistões axiais de deslocamento variável, usado em sistemas HDD. 31
Figura 13 - Capacidade de retenção de impurezas. 34
Figura 14 - Fluxograma para o método de pesquisa. 37
Figura 15 - a) Componentes do sistema durante a criação do sistema hidráulico; b) sistema hidráulico criado no Automation Studio. 39
Figura 16 - a) Representação do sistema de entrada de energia do aerogerador; b) Partes reais e virtuais do sistema de entrada de energia da bancada de teste. 43
Figura 17 - Acionamento proposto. 44
Figura 18 - Correção da variação da velocidade do vento. 48
Figura 19 - Eficiência do sistema hidráulico. 50
Figura 20 - Eficiência do sistema hidráulico na rotação mínima. 51
Figura 21 - Eficiência do sistema hidráulico na rotação máxima. 52

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Materiais contaminantes e seus efeitos. 33

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Dados de entrada 45

LISTA DE SÍMBOLOS

FA	Força axial	kN
FT	Força tangencial	kN
n	Velocidade de rotação	rpm
p	Pressão de trabalho	bar
P	Potência	kW
pc	Pressão de carga	bar
pi	Pressão de entrada	bar
po	Pressão de saída	bar
q	Vazão	l/min
ql	Perda volumétrica	l/min
T	Torque	kN x m
Te	Torque específico	kN x m/bar
Vg	Deslocamento geométrico	cm^3/ver
βx	Razão beta	-
Δp	Perda de pressão	bar
ηm	Eficiência mecânica	-
ηt	Eficiência total	-
ηv	Eficiência volumétrica	-

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

1.1 OBJETIVOS 15

1.2 DELIMITAÇÃO 15

1.3 JUSTIFICATIVA 16

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO 17

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 18

2.1 TURBINAS EÓLICAS E CAPTAÇÃO DA ENERGIA DO VENTO 18

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21

2.2.1 Exploração de energia e a piscicultura em águas profundas com estabilidade hidrostática 21

2.2.2 Projeto e simulação de bomba de pistão radial para transmissão de turbina eólica de alta potência 21

2.2.3 Resposta hidrodinâmica de uma plataforma semi-submersível para suportar uma turbina eólica 22

2.2.4 Otimização de sistemas dinâmicos de cabos para turbinas eólicas offshore flutuantes 22

2.2.5 Análise de uma transmissão hidrostática para turbinas eólicas 23

2.2.6 Projeto de transmissão hidrostática - aerogeradores de eixo horizontal 23

2.2.7 Transmissão hidrostática em turbinas eólicas - plataforma de teste 23

2.3 COMPONENTES E CARACTERÍSTICA DO SISTEMA HIDRÁULICO 24

2.3.1 Acionamento Hidráulico Direto (HDD) 24

2.3.2 Bomba hidráulica 27

2.3.3 Motor hidráulico 31

2.3.4 Reservatório hidráulico 32

2.3.5 Filtros e filtragem do sistema 32

2.3.6 Tubulações 35

3 MODELAGEM DOS COMPONENTES 36

3.1 INTRODUÇÃO 36
3.2 ETAPAS DA PESQUISA 36
3.3 FERRAMENTA EMPREGADA 38
3.3.1 Equações para base de cálculo da bomba 39
3.3.2 Equações para base de cálculo do motor 40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 42
4.1 PROPOSTAS DE ACIONAMENTO HIDRÁULICO 42
4.2 ACIONAMENTO PROSPOTO - CIRCUITO 43
4.3 MANUTENÇÃO 46
4.4 CORREÇÃO DA VARIAÇÃO VELOCIDADE 47
4.5 EFICIÊNCIA DO SISTEMA HIDRÁULICO 49
5 CONCLUSÃO 52
REFERÊNCIAS 54

1 INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais é percebido uma demanda por consumo de energia cada vez maior. Em vista das barreiras para a produção sem comprometer o meio ambiente, as fontes de energia renovável estão cada vez mais em destaque nas pesquisas. A energia eólica, que tem sua geração através dos ventos, oferece uma opção que contribui para o desenvolvimento sustentável e a segurança energética em um momento em que a diminuição das reservas globais de combustíveis fósseis ameaça a sustentabilidade a longo prazo (JOSELIN HERBERT et al., 2007).

O desenvolvimento eficiente de projetos de geração de energia renovável é complexo que é influenciado ou dificultado por vários fatores. O foco da pesquisa futura em relação a fonte eólica deve ser dado ao desenvolvimento de novas metodologias e/ou modalidades para revelar técnicas de preferências para a avaliação da fonte considerando os aspectos econômico, tecnológico e ambiental (NAZIR et al., 2019).

As tecnologias de energia eólica estão sendo desenvolvidas para reduzir os custos da eletricidade gerada e para aumentar o desempenho tecnológico. Portanto, entender os caminhos do desenvolvimento tecnológico é relevante para o desenvolvimento de pesquisas (MADVAR, et al., 2019). Em vista disso, tem-se aplicado a transmissão hidrostática que tem como vantagens a eliminação do conversor de frequência bem como da caixa redutora. A fonte eólica tem como característica o uso de caixa redutora, ou caixa multiplicadora devido a aplicação na fonte eólica, que faz a multiplicação da velocidade para condizer com a faixa de trabalho do gerador, e é um dos principais fatores que causam o aumento do tempo de inatividade nas modernas turbinas eólicas. Isso aumenta o custo de manutenção da turbina e, portanto, o custo de energia produzida pela turbina. Uma transmissão hidrostática não apenas melhora a confiabilidade da turbina através de sua transmissão "suave", mas também elimina o uso dos componentes comentados através de sua função de transmissão variável contínua (WANG et al., 2019).

Entre os tipos de acionamentos disponíveis para aplicações sistemas de turbinas eólicas, a grande maioria apresenta o uso de caixa multiplicadora de velocidade – ou, em outras palavras, um conjunto de engrenamento – para que possa transformar baixa velocidade e alto torque da hélice em altas velocidades e baixo torque no gerador de energia elétrica.

O uso caixa multiplicadora, por sua vez, dá origem a consequências de ordem operacional, que devem ser levadas em consideração. As comparações e considerações que se fazem entre acionamentos com caixa multiplicadora e o sistema de um HDD (Acionamento Hidráulico Direto) trazem em pauta diversos fatores, indo desde características técnicas de

operação ao espaço físico ocupado.

Nesse sentido, este trabalho apresenta uma abordagem de um sistema hidrostático que não faz uso da caixa redutora objetivando a correção de velocidade do vento que entra nas hélices das turbinas. A metodologia aplicada aborda: uma revisão abrangente da literatura e o uso de um software de modelagem para avaliar o sistema proposto.

1.1 OBJETIVOS

- O objetivo geral deste trabalho é propor um sistema de trasmissão hidrostática, sem o uso de caixa redutora, aplicado em turbinas eólicas.

Como objetivos específicos têm-se:

- Identificar e analisar todos os componentes do sistema e sua variação de comportamento;
- Propor um sistema aplicável para o regime de trabalho analisado;
- Analisar de comportamento do sistema na correção da variação da velocidade do vento;
- Identificar a eficiência energética obtida com o sistema proposto;

1.2 DELIMITAÇÃO

O projeto tem como finalidade propor um acionamento hidráulico direto por meio de uma transmissão hidrostática, com foco entre o acoplamento do rotor eólico com o eixo da bomba hidráulica e o acoplamento do motor hidráulico com o gerador síncrono, visando a eliminação completa do uso de qualquer tipo de caixa de engrenamento e a correção da variação da velocidade do vento.

A eliminação da caixa de engrenagens por completo necessita de uma seleção específica dos componentes e o design do sistema hidráulico como um todo, devido as caracteristicas de trabalho, como rotação baixíssima e altíssimo torque para a bomba, e um motor hidráulico de deslocamento variável para a trabalhar com vazão variável e mantendo rotação de saída fixa.

A capacidade do sistema hidráulico de corrigir as ocilações na velocidade do vento tem como foco permitir a ultilização de um gerador síncrono ligado diretamente a rede de transmissão elétrica, eliminando com isso a necessidade também da utilização de um conversor

de frequência. Os controles eletrônicos do sistema não são abordados neste estudo, permitindo esta abordagem em estudos futuros.

1.3 JUSTIFICATIVA

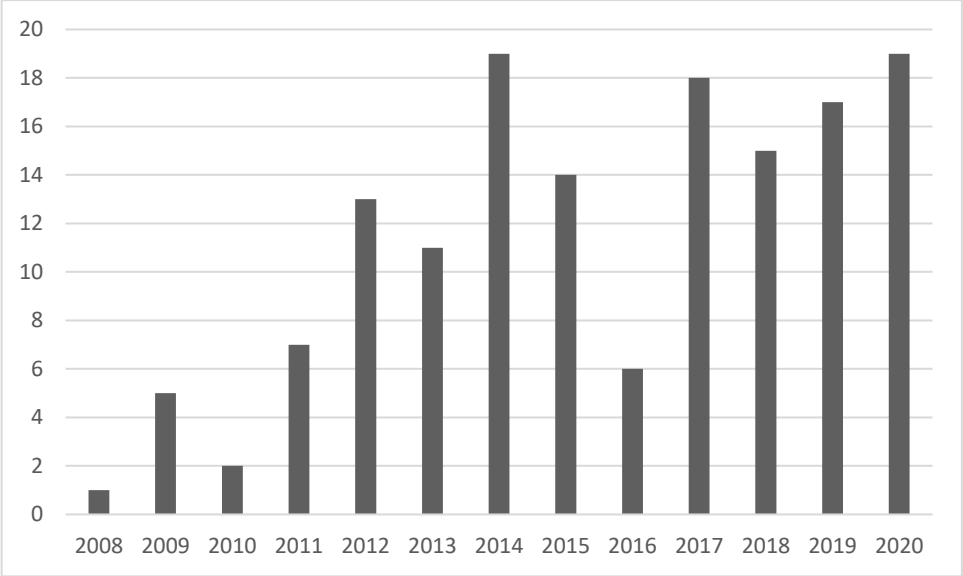
Com a necessidade da busca pela eficiência energética se tornar de grande relevância, melhores métodos de produção de energia vêm cada vez mais sendo abordados (BOCKEN et al., 2014; DAVID, et al., 2020). A tecnologia hidráulica teve desde sua geração até sua concepção um período relativamente longo, o que pode ser parcialmente atribuído à falta de tecnologia de fabricação, mesmo grande parte do equipamento deste setor e muitos dos componentes necessários para a transmissão de energia hidráulica terem sido inventados ou conhecidos há algum tempo (SKINNER, 2014).

Nos últimos anos foram desenvolvidas muitas pesquisas na busca da eficiência energética nesta área. Stepanov e Stepanova (2007) propuseram um método universal de eficiência energética da produção de petróleo e sistemas de transporte de tubulação por meio da determinação das eficiências aplicáveis à estimativa da efetividade dos diferentes tipos de processos de uso de energia. Em outros estudos na temática que abordam cilindros hidráulicos desenvolvidos por Huova et al (2014) e Xia et al (2018), os autores propuseram um sistema integrado de recuperação de energia e acionamento baseado em um cilindro hidráulico de três câmaras e um modelo de simulação para investigar de forma mais eficaz a capacidade de economia de energia do sistema.

Os dados obtidos na base de dados Scopus, como apresentado na Figura 1, mostra o número de publicações sobre o tema em um período de treze anos. As palavras chaves utilizadas para a coleta de dados incluem "*hydrostatic system", "wind turbine" e "hydrostatic*". Uma tendência identificada foi o número baixo de artigos obtidos, foram retornados somente 145 artigos para a análise. Mesmo tendo um número baixo de artigos obtidos, percebe-se uma tendência de crescimento de publicações ao longo dos anos.

Entre os anos de 1983 e 2008 percebe-se um número extremamente baixo de publicações, somente nove estudos foram abordados. A partir de 2009 é percebido um crescimento no tema e que se segue até 2019. A alta de publicações neste período pode ser justificada pela relevância atribuída nos parques eólicos offshore, que diferentemente do tradicionalismo em ser instalados em terra, a modalidade apresenta parques eólicos localizados ao longo da costa marinha.

Figura 1 - Publicações por ano.



Fonte: Scopus (2021).

Com base na literatura científica de estudos mais recentes que abordam o tema do trabalho, alguns autores propõem tendências futuras de pesquisa que corroboram com o presente trabalho como a melhoria do modelo global por meio da incorporação de novos componentes ao sistema, como um acumulador de modo a verificar a capacidade deste em mitigar os picos de pressão que ocorrem no sistema; e a avaliação de uma transmissão hidrostática em aerogeradores com diferentes características operacionais (FLESCH, 2012). Diante disso, tomando-se como lacuna de pesquisa, pretende-se desenvolver uma metodologia visando a redução do consumo específico de energia de sistemas hidrostático aplicado em turbina abordando fatores diferenciais de artigos e trabalhos publicados.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

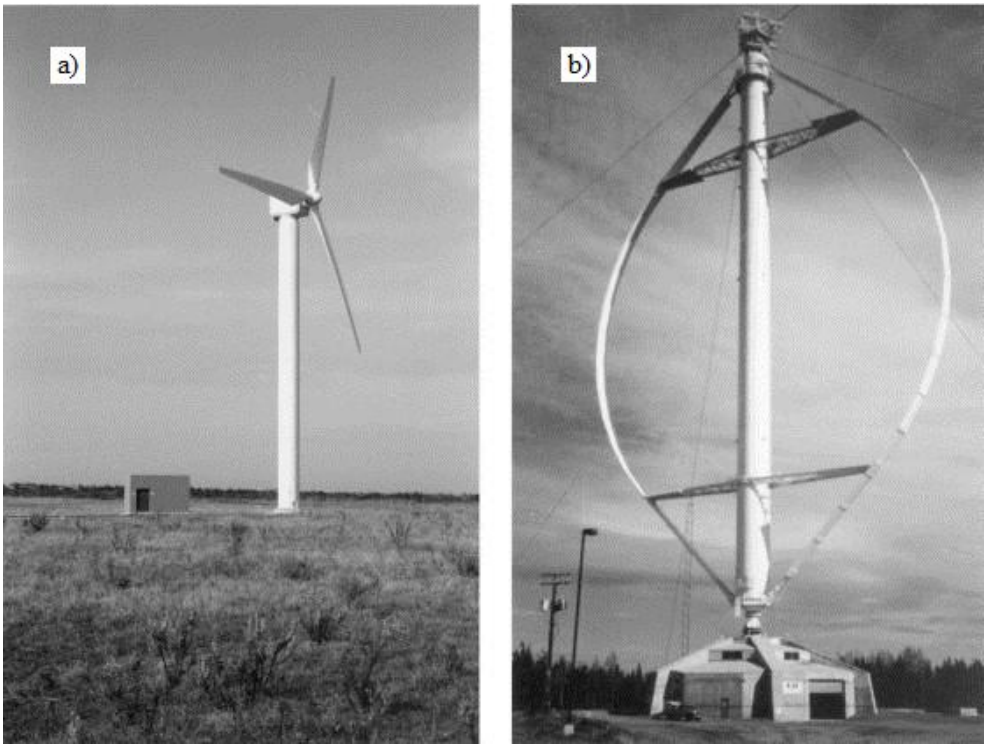
Este trabalho é composto por cinco seções, dentre as quais a primeira apresenta a introdução juntamente com os objetivos gerais e específicos, a delimitação da pesquisa e a justificativa. Na segunda seção evidencia-se o referencial teórico utilizado no trabalho por meio da explicação de elementos essenciais à esta pesquisa como trabalhos que embasaram para a revisão de literatura. A terceira seção apresenta o método utilizado no trabalho, assim como as fases de execução. Na quarta seção observa-se os resultados da pesquisa, das simulações do sistema proposto e discussão do trabalho. Por fim, na última seção as considerações finais do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TURBINAS EÓLICAS E CAPTAÇÃO DA ENERGIA DO VENTO

Uma turbina eólica é um dispositivo capaz de extrair parte da energia do vento e usá-lo para acionamentos mecânicos. As turbinas eólicas convertem a energia cinética do vento em energia elétrica através de geradores que são acionados mecanicamente pelo giro das hélices. Existem dois tipos de turbinas, a de eixo horizontal e eixo vertical (Figura 2) (SESTO; CASALE, 1998).

Figura 2 - Turbinas de eixo horizontal (a) e eixo vertical (b).

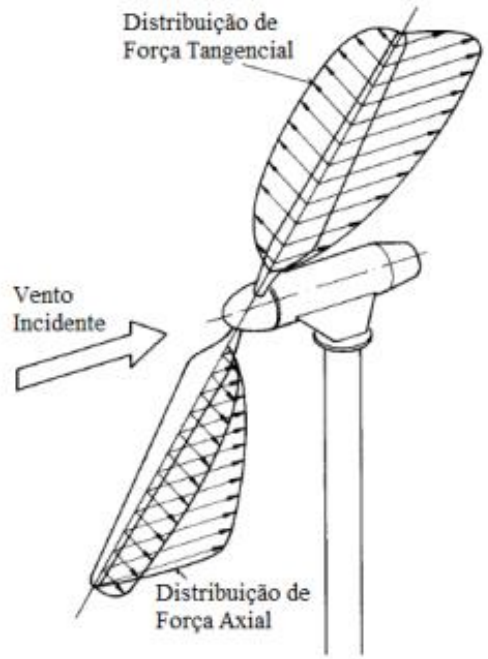


Fonte: Sesto; Casale (1998).

Em relação a sua capacidade instalada as usinas: tiveram uma relevante evolução ao longo dos anos, no início e em meados da década de 1980, a capacidade instalada típica da turbina eólica era inferior a 100 kW. No final dos anos 1980 e no início dos anos 1990, as turbinas aumentaram de 100 para 500 kW. Além disso, em meados da década de 1990, o tamanho típico variava de 750 a 1000 kW. E no final da década de 1990, o tamanho da turbina havia subido para 2.500 kW. Em comparação, em 2019 e só no Brasil, a Energia eólica atingiu 15 GW de capacidade instalada (HERBERT, et al 2007; CANAL ENERGIA, 2019).

Em relação a captação da energia do vento, a extração de potência do vento por um rotor pode se dar por meio dos princípios aerodinâmicos de sustentação ou de arraste. Em turbinas de arraste, o vento incidente (Figura 3) provoca uma força de arraste que empurra as pás que são em formato de aerofólio para gerar uma força de empuxo, que deve ser direcionada adequadamente no sentido de rotação da turbina, fazendo com que esta gere um trabalho (FLESH, 2012; CUSTÓDIO 2009).

Figura 3 - Forcas aerodinâmicas atuando sobre o rotor de uma turbina eólica.



Fonte: Adaptado de Hau (2005).

A força de empuxo pode ser descomposta nas direções tangencial e axial, da qual resultam a força tangencial F_T e a força axial F_A. A força tangencial contribui com o torque da turbina, enquanto a força axial tende a empurrar as pás para fora do plano de rotação do rotor (FLESH, 2012; CUSTÓDIO 2009).

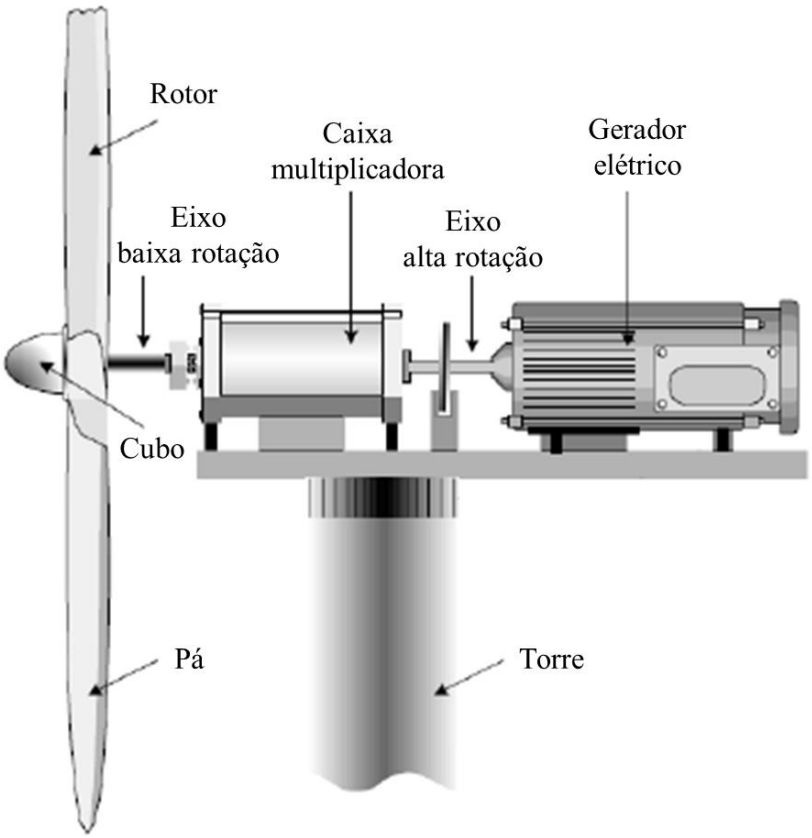
Após a energia do vento ser captada pelas hélices da turbina eólica, esta energia é transformada em energia elétrica por um gerador e é disponibilizada para a rede de transmissão e enviada para o consumidor.

A turbina eólica tem uma baixa rotação e esta rotação deve ser transmitida para acionar um gerador que funciona a altas rotações (normalmente na faixa de 1800 rpm) por conta disso a hélice da turbina não pode ser acoplada diretamente no gerador, sendo assim necessário um componente intermediário neste acionamento, com a função de fazer a ligação dos dois

acionamentos adequando as faixas de rotação de trabalho de ambos.

Nos sistemas eólicos convencionais o acoplamento entre os dois acionamentos é feito através de um sistema eletromecânico. A grande maioria apresenta o uso de caixa multiplicadora de velocidade – ou, em outras palavras, um conjunto de engrenamento – para que possa transformar baixa velocidade e alto torque da hélice em altas velocidades e baixo torque no gerador de energia elétrica (Figura 4).

Figura 4 - Sistema eólico convencional.



Fonte: Adaptado de Munteanu (2008).

O uso caixa multiplicadora, por sua vez, dá origem a consequências de ordem operacional, que devem ser levadas em consideração. As comparações e considerações que se fazem entre acionamentos com caixa multiplicadora e o sistema de um HDD (Acionamento Hidráulico Direto) trazem em pauta diversos fatores, indo desde características técnicas de operação ao espaço físico ocupado.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os trabalhos discutidos nesta seção foram inseridos dentro de um conjunto de ideias norteadoras da pesquisa, separadas por subitens e identificadas a partir de sua leitura crítica, com vistas a embasar a pesquisa.

2.2.1 Exploração de energia e a piscicultura em águas profundas com estabilidade hidrostática

Zheng and Lei (2018) abordaram como tema o uso de turbinas eólicas flutuantes, devido ao custo considerado inferior em comparação as turbinas fixadas no fundo do mar. Os autores apresentaram uma estrutura inovadora que integra uma turbina eólica offshore flutuante com uma gaiola de piscicultura em aço, sendo a parte superior do sistema uma turbina eólica de vários megawatts e a parte inferior do sistema é uma gaiola de aço que atua como base flutuante da turbina eólica para o uso da pesca.

O projeto combina a exploração de energia e a piscicultura em águas profundas com estabilidade hidrostática. Como tendências futuras de pesquisa os autores enfatizam na investigação o amortecimento viscoso não linear de redes de liga de cobre e a identificação dos coeficientes de arrasto das forças das ondas em redes de liga de cobre usando testes em modelos em bacias oceânicas e fluidos computacionais de simulações de dinâmicas. Além disso, como os movimentos do projeto são de baixas frequências, é necessário um estudo aprofundado do efeito de ondas aleatórias de segunda ordem e cargas de ondas com diferença de frequência.

2.2.2 Projeto e simulação de bomba de pistão radial para transmissão de turbina eólica de alta potência

Tao et. al. (2019) apresentaram um projeto de bomba de pistão radial para sistemas de transmissão de turbinas eólicas em larga escala com a combinação de modelagem paramétrica, projeto generativo baseado em algoritmos e modelo acoplado mecânico-hidráulico desenvolvido para avaliação de desempenho baseada em simulação do projeto da bomba.

Para os autores, a falta de componentes hidráulicos disponíveis restringe o desenvolvimento de turbinas eólicas offshore em grande escala. Para projetar uma bomba de pistão radial de baixa velocidade e alta torque, adequada para turbinas eólicas com alta potência, é fundamental entender seus princípios de trabalho, requisitos funcionais e restrições de projeto, bem como índices de desempenho e métodos de avaliação.

Os resultados sugeriram que a bomba proposta possui eficiência um pouco menor em relação a com transmissão hidrostática devido a mais pistões e maior perda de vazamento, porém estrutura mais compacta, maior densidade de potência e potencialmente melhor controlabilidade e confiabilidade, que são preferidas para aplicação de turbinas eólicas. Como tendência futura de pesquisa, é comentado do esquema de controle de carga variável, que não foi abordado no estudo, sendo essencial para um projeto a implementação de esquemas de controle aprimorados.

2.2.3 Resposta hidrodinâmica de uma plataforma semi-submersível para suportar uma turbina eólica

Shokouhian et. al. (2019) realizaram uma investigação numérica sobre a resposta de uma plataforma semi-submersível por meio de análises hidrostáticas e hidrodinâmicas, em que várias linhas de ancoragem são examinadas com especial atenção aos polímeros e materiais sintéticos para determinar qual é a mais adequada para esta plataforma.

Os resultados revelam que o uso das linhas de amarração sintéticas oferece melhor desempenho para a plataforma em comparação com outros materiais investigados no artigo. Como forma de estender o estudo proposto, os autores comentam que são necessárias mais pesquisas para determinar a melhoria dos movimentos da plataforma flutuante na produção geral de geração eólica da turbina e o efeito de diferentes sistemas de ancoragem na estabilização da plataforma.

2.2.4 Otimização de sistemas dinâmicos de cabos para turbinas eólicas offshore flutuantes

Rentschler et al. (2019) comentam em relação a tecnologia eólica flutuante (offshore) sobre seu enorme potencial, mas que ainda não atingiu a maturidade comercial constatando que há muitos problemas a serem tratados e que existe uma grande lacuna de conhecimento em relação ao comportamento dinâmico dos cabos entre matrizes em movimento livre, que ligam as turbinas flutuantes. Nesse sentido desenvolveram uma ferramenta de projeto para investigar e otimizar o comportamento dinâmico desses cabos, incluindo análise de fadiga, além de condições climáticas extremas, componentes auxiliares de cabos e detalhes econômicos apresentando uma abordagem de design baseada em um algoritmo genético. O ponto de partida para a análise dinâmica foram configurações de cabos da otimização hidrostática.

Com base nessa otimização hidrostática, uma regra geral de projeto para cabos de ondas

suaves pode ser deduzida na faixa de profundidade de 70 a 200 m, sendo classificada uma recomendação de design generalizada única na literatura. Como tendência de pesquisa futura do artigo, os autores comentam que os próximos estudos devem envolver modelagem climática mais realista, especialmente com relação à mudança de direção das ondas e do vento como também a influência das correntes.

2.2.5 Análise de uma transmissão hidrostática para turbinas eólicas

Raduenz (2018) comenta que existe uma tendência em pesquisar e desenvolver transmissões hidrostáticas para uso em turbinas eólicas. Apesar de transmissões hidrostáticas, usando bomba e motor, serem uma tecnologia bastante desenvolvida, a aplicação em turbinas eólicas ainda possui desafios. No estudo o autor analisou o comportamento de parâmetros em função de propriedades do vento e da turbina. Como resultados da dissertação foi mostrado que é possível usar uma transmissão hidrostática para transferir a energia do topo da hélice para acionar um gerador no solo e conectado diretamente à rede. O autor ressalta que com a previsão da velocidade do vento de curto prazo, pode ser possível antecipar a ação de controle da turbina e aumentar a geração de energia.

2.2.6 Projeto de transmissão hidrostática - aerogeradores de eixo horizontal

Flesch (2012) apresenta um estudo acerca do projeto e análise do comportamento de uma transmissão hidrostática a ser incorporada a um aerogerador de eixo horizontal. O aumento na eficiência global do aerogerador constitui um dos requisitos mais importantes para o desenvolvimento destas máquinas. O autor ressalta que uma transmissão hidrostática se mostra como uma alternativa promissora para a transmissão da potência extraída pelo rotor da turbina até o gerador elétrico e para a regulação da velocidade do rotor.

2.2.7 Transmissão hidrostática em turbinas eólicas - plataforma de teste

Rapp e Turesson (2015) apresentam como objetivo a tentativa de desenvolvimento de uma transmissão, utilizando uma transmissão hidrostática hidráulica, para turbinas eólicas de médio porte de eixo horizontal. A escolha e dimensionamento dos componentes e os resultados do modelo mostraram que é possível realizar uma transmissão usando componentes hidráulicos padrão existentes para uma turbina eólica e também que as perdas de energia nas linhas

hidráulicas são bastante pequenas. Os autores ressaltam que uma transmissão hidrostática é capaz de substituir um conversor de frequência e pode ser construída a partir de componentes hidráulicos padrão existentes e tem uma boa eficiência total na potência nominal, no entanto isso deve ser validado na bancada de teste.

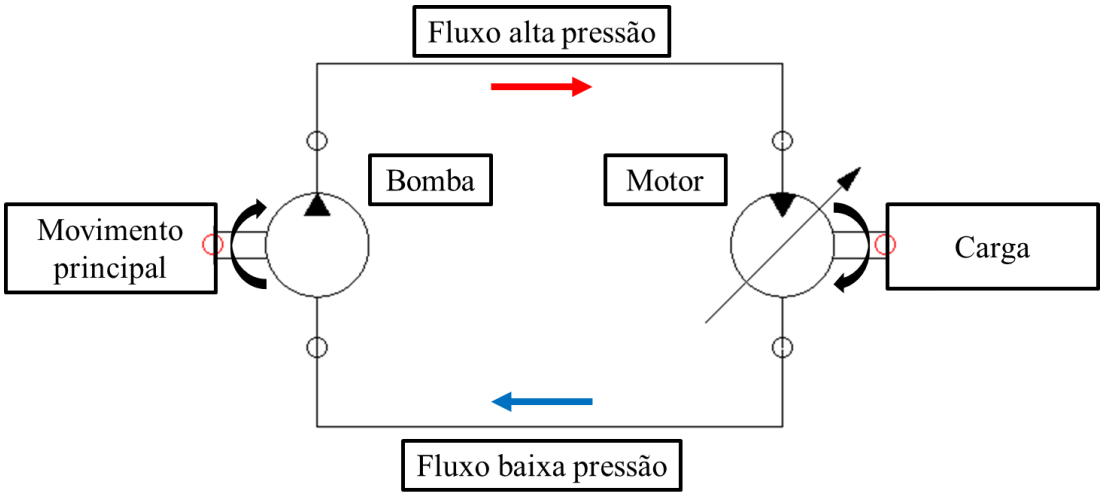
2.3 COMPONENTES E CARACTERÍSTICA DO SISTEMA HIDRÁULICO

2.3.1 Acionamento Hidráulico Direto (HDD)

Um sistema de acionamento hidráulico direto consiste em uma ligação direta de ponta a ponta do acionamento ao atuador por meio de um circuito hidráulico, sem necessidade de adicionar uma caixa de engrenagem ou qualquer outro componente. Sendo assim, é possível Direto) trazem em pauta diversos fatores, indo desde características técnicas de operação ao operar com velocidade de rotor variável utilizando um gerador síncrono acoplado diretamente à rede, reduzindo ou até eliminando a necessidade de eletrônica de potência (DIEPEVEEN et al., 2011; SCHMITZ et al., 2010; DOLAN et al., 2012).

O Acionamento Hidráulico Direto é particularmente eficaz em ambientes agressivos e situações de operação difíceis ou exigentes. A Figura 5 apresenta uma visualização básica do HDD e que se pode observar a uma quantidade mínima de componentes, um acionamento mais simplificado.

Figura 5 - Acionamento hidráulico direto.

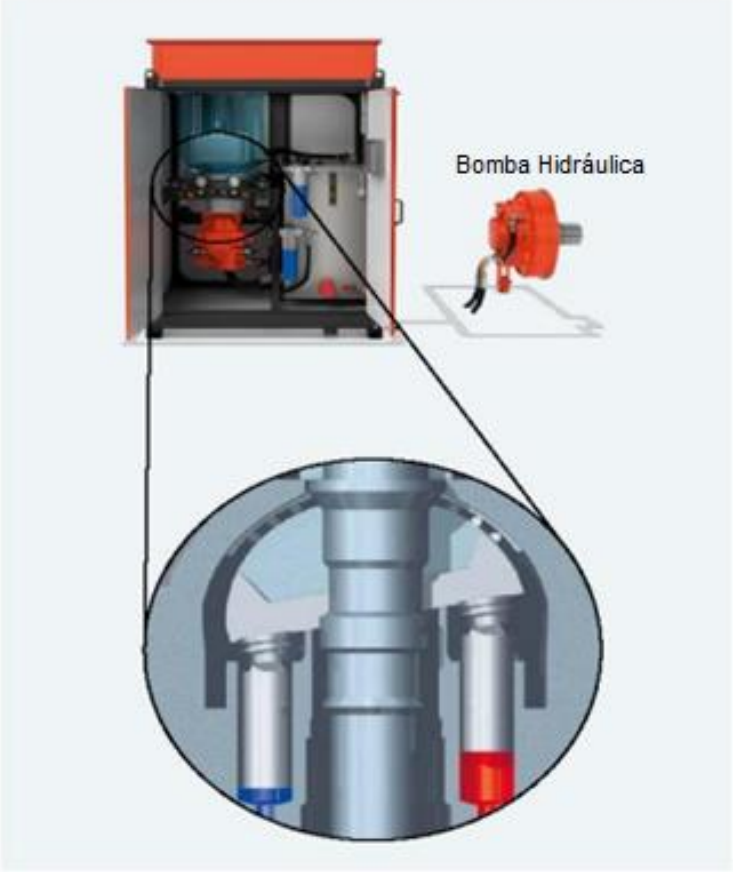


Fonte: Produção do próprio autor (2020).

O princípio de funcionamento de um HDD é descrito como a alimentação que é fornecida

ao motor hidráulico por uma unidade de acionamento separada, que pode ser posicionada quase em qualquer lugar em relação à instalação. A unidade de acionamento é composta de uma bomba hidráulica de deslocamento fixo acionada por uma fonte de potência rotativa, gerando uma vazão de óleo de acordo com a velocidade aplicada. O fluxo de óleo variável é conduzido por meio de tubulações e mangueiras hidráulicas ao motor hidráulico de pistão axial de deslocamento variável. Como resultado, a velocidade de rotação entregue ao gerador elétrico não é comprometida pelas limitações de fluxo variável. A rotação é controlada ajustando o ângulo da placa oscilante contra a qual os pistões atuam (Figura 6). Devido ao baixo momento de inércia do motor hidráulico, a resposta é quase instantânea (BOSCH REXROTH, 2014).

Figura 6 - Detalhe motor de pistão axial – Placa oscilante.

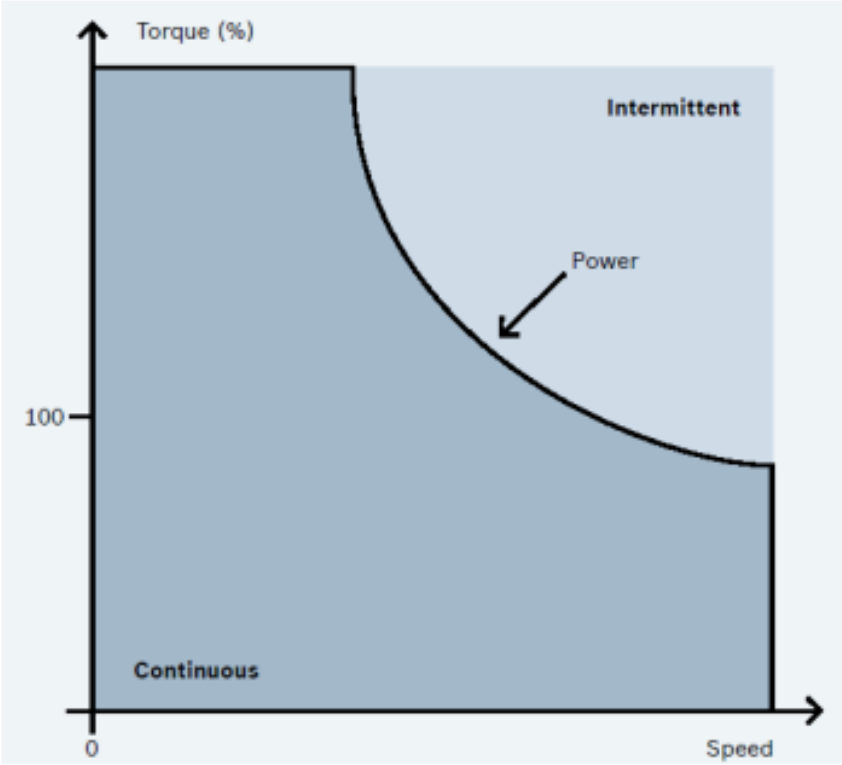


Fonte: Bosch rexroth (2019).

O sistema HDD pode operar continuamente em toda a sua faixa de potência até o seu torque nominal, de zero a plena velocidade. Pode também manter o torque total do eixo continuamente em zero ou baixa velocidade. A Figura 7 exibe o gráfico que representa o

funcionamento do HDD pela relação entre torque e velocidade.

Figura 7 - Operação HDD – Relação entre torque e velocidade.



Fonte: Bosch rexroth (2019).

Um HDD pode operar intermitentemente acima da sua potência instalada com as mesmas limitações que se aplicam a qualquer motor elétrico de velocidade fixa com um fator de serviço equivalente. O torque de operação e a vida útil desejada que determinam o tamanho da bomba e do motor hidráulico. Outra característica é a praticidade de montagem da bomba hidráulica ser direta ao eixo de acionamento por meio de acoplamento integral ou, opcionalmente, por meio de ranhuras, sem necessidade de bases, acoplamentos ou redutores (BOSCH REXROTH, 2014) (Figura 8).

Figura 8 - HDD – Visão geral.

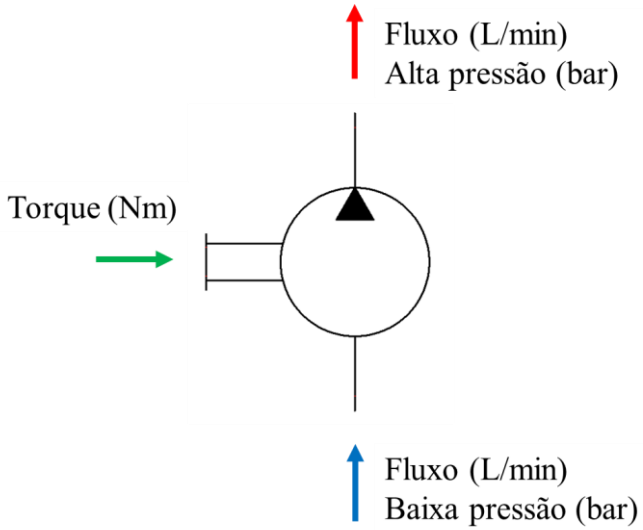
Fonte: Bosch rexroth (2019).

O HDD é basicamente constituído pelos seguintes componentes: bomba hidráulica de alto torque para montagem direta; motor hidráulico acoplado direto com o componente a ser acionado; tubulações e acessórios. Outro grande benefício do acionamento em questão é o pequeno espaço necessário para instalação, possuindo uma alta potência por volume ocupado, em que a bomba hidráulica é instalada diretamente no acionamento e a potência hidráulica é transportada por tubulações para uma outra região mais adequada para a instalação, em que todos os componentes restantes são acondicionados em um armário hidráulico compacto. Na Figuras 8 é exemplificado a interligação destes componentes.

2.3.2 Bomba hidráulica

A bomba hidráulica converte a energia mecânica de entrada em energia hidráulica, gerando um fluxo de óleo no sistema (PANZER, 1965). A energia mecânica aciona a bomba através de um torque aplicado no seu eixo, que transporta um fluxo hidráulico de uma região de baixa pressão para uma região de alta pressão, adicionando assim energia hidráulica ao circuito (Figura 9). Este fluxo de óleo e pressão, ou energia, impulsiona o motor hidráulico.

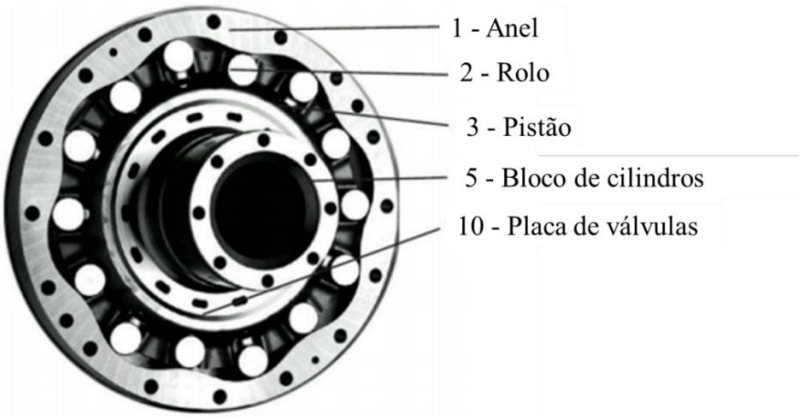
Figura 9 - Bomba hidráulica de deslocamento fixo.



Fonte: Adaptado de ISO 1219-1 (2006).

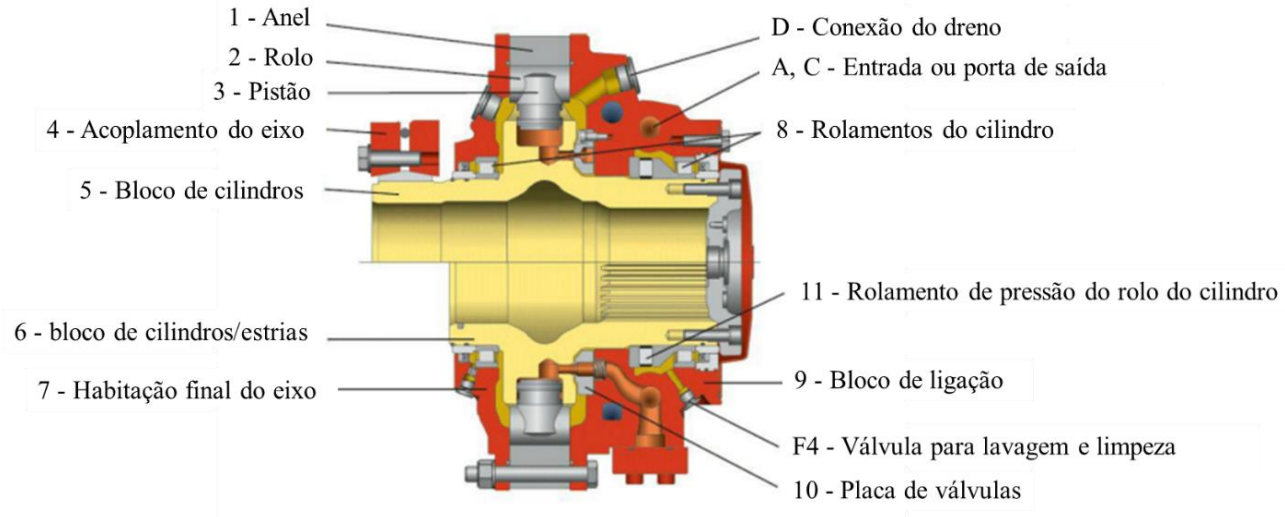
A bomba aplicada para o sistema HDD é do tipo pistão radial com curva de came, possuindo um bloco com vários cilindros hidraulicamente balanceados, eixo oco rotativo e um invólucro estacionário. O bloco de cilindros é montado em rolamentos fixados na caixa do aparelho. Um número par de pistões é radialmente localizado em furos no interior do bloco de cilindros, e a placa de válvula dirige o óleo de entrada e saída para os êmbolos de trabalho. Cada pistão trabalha contra um rolete. Quando um torque é aplicado no eixo, o anel excêntrico que está rigidamente ligado ao invólucro é empurrado contra os roletes, que são pressionados contra o óleo, gerando fluxo do fluido hidráulico. A configuração simétrica permite que as forças sejam balanceadas – as forças radiais se opõem umas às outras, e os rolos transferem a força de reação para os êmbolos, que são guiados no bloco de cilindros. Por conseguinte, ocorre o fluxo do fluido hidráulico sendo expulso pelo pórtico de saída da bomba, e a pressão disponível é decorrente da resistência imposta pelo motor hidráulico e proporcional ao torque imposto pelo rotor eólico (BOSCH REXROTH. HAGGLUNDS CB, 2015). A Figura 10 exibe um modelo de bomba hidráulica e a Figura 11 um modelo de bomba hidráulica com seção em corte.

Figura 10 - Bomba de pistões radiais do tipo com curva de came.



Fonte: Bosch rexroth hagglunds cb (2015).

Figura 11 - Bomba de pistões radiais do tipo com curva de came em corte.



Fonte: Bosch rexroth hagglunds cb (2015).

Para uma explicação das Figuras 10 e 11, os índices são: 1 – Anel; 2 – Rolo; 3 – Pistão; 4 – Acoplamento do eixo; 5 – Bloco de cilindros / eixo oco; 6 – Bloco de cilindros / estrias; 7 – Habitação final do eixo; 8 – Rolamentos do cilindro; 9 – Bloco de ligação; 10 – Placa da válvula; 11 – Rolamento de pressão do rolo do cilindro; A – Entrada ou porta de saída (duas cada); C – Entrada ou porta de saída; D – Conexão do dreno (três cada); F4 – Válvula para lavagem e limpeza.

A bomba hidráulica está ligada ao eixo da máquina acionada por meio do eixo oco do bloco de cilindros. O torque é transmitido por meio de um disco de aperto mecânico. O desenho

simétrico da bomba tornou possível concebê-la como uma bomba de dois deslocamentos. Algumas variáveis, inerentes a bomba, devem ser calculadas no momento da seleção. A bomba é selecionada com base no torque específico disponível, dado pela Equação (1).

$$T_e = \frac{T}{(p - \Delta p - pc)\eta_m} \tag{1}$$

Onde:

Te = Torque específico, dado em kN x m/bar;

T = Torque recebido no eixo da bomba, dado em kN x m;

p = Pressão de trabalho, dada em bar;

Δp = Perda de pressão ou perda de carga na bomba, dada em bar;

pc = Pressão de carga da bomba do sistema, dada em bar;

η_m = eficiência mecânica.

O torque específico expressa o quanto de torque é adicionado por unidade de elevação de pressão do sistema hidráulico. A Equação (1) também é usada para o estabelecimento da pressão durante a partida da transmissão e durante a operação. Para isso, basta entrar com o valor do torque de partida e com o valor do torque recebido durante a operação contínua, respectivamente. Outra variável a ser calculada é a vazão gerada pela bomba (Equação 2).

$$q = \frac{n.V_g}{1000} - q_l \tag{2}$$

Onde:

q = Vazão gerada pela bomba, dada em l/min;

n = Velocidade de rotação, dada em RPM;

V_g = Deslocamento geométrico da bomba, dado em cm³/revolução;

ql = Perda volumétrica da bomba, dada em l/min.

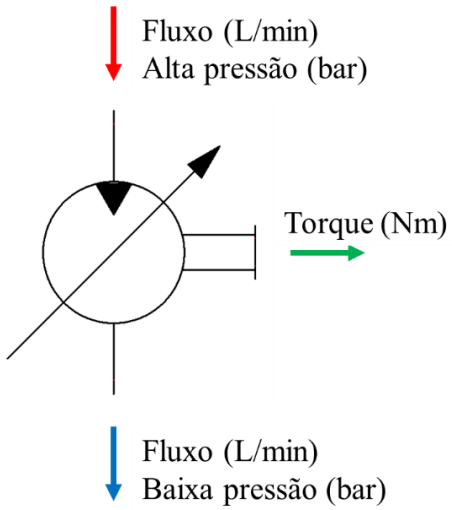
O deslocamento geométrico é entendido como o volume de fluido deslocado ou usado a cada rotação completa da bomba. A perda volumétrica é tida como pequenos vazamentos internos, pois, apesar de os componentes serem selados, ainda assim, em alta pressão, pode-se verificar pequenos escapes de fluido.

2.3.3 Motor hidráulico

Segundo Fialho (2004), o motor hidráulico converte a energia hidráulica em energia mecânica por meio do fluxo de óleo e pressão. O fluxo deste sistema é fixo pelo fato da bomba hidráulica ser de deslocamento fixo, sendo assim a rotação e pressão são normalmente controladas pela unidade de controle do motor hidráulico (ou outros componentes embutidos) aplicado para o acionamento.

No HDD, o mesmo é do tipo pistão axial, de deslocamento variável e compensador de pressão, o controle do motor permite que mesmo recebendo fluxo variável, a rotação do eixo de saída seja regulada facilmente – isto se correlaciona com o controle de velocidade e torque da máquina movida. O controle do motor também permite proteção contra sobrecarga e pode ser baseado em uma combinação de comandos manuais, hidráulicos, eletrônicos ou PLC. A Figura 12 mostra um motor hidráulico neste sistema HDD de geração de energia.

Figura 12 - Motor de pistões axiais de deslocamento variável, usado em sistemas HDD.



Fonte: Adaptado de ISO 1219-1 (2006).

O deslocamento geométrico do motor tem o mesmo significado do deslocamento geométrico da bomba, ou seja, exprime o volume de fluido recebido pelo motor a cada rotação completa. O cálculo, por sua vez, é dependente da vazão de entrada no motor, como mostra a Equação (3).

$$V_g = \frac{q}{n} \tag{3}$$

Onde:

V_g = Deslocamento geométrico do motor, dado em l/revolução;

q = Vazão de entrada no motor, dada em l/min;

n = Velocidade de rotação do eixo do motor, dada em rpm.

2.3.4 Reservatório hidráulico

Segundo Fialho (2004), o reservatório hidráulico ou tanque de óleo fornece armazenamento do fluido hidráulico, com funções secundárias importantes sendo desaeração, assentamento de impurezas e resfriamento do fluido.

De acordo com Faatz (1988), tanques de óleo despressurizados, embora quase sempre contenham outros fluidos de operação, são normalmente usados em sistemas hidráulicos. Devem ser de um tamanho suficiente para acomodar todo o fluido no sistema quando não há dispositivos no circuito, tais como válvulas de retenção automáticas, que previnem o contra fluxo do fluido para o tanque. O volume do tanque deve ser pelo menos igual ou maior que três vezes a capacidade de distribuição/minuto das bombas hidráulicas, ou seja, a vazão da linha. Isso se aplica a sistemas operados com fluidos a base de óleo mineral. Se um tipo diferente de fluido está sendo usado, tal como um fluido resistente ao fogo, o volume do tanque deve ser de 5 a 8 vezes o fluxo/minuto da bomba hidráulica, dependendo das características de separação de ar e de assentamento de impurezas.

De uma regra geral, os conceitos supracitados são aplicados na grande maioria dos casos de sistemas hidráulicos e a geometria do reservatório é projetada de forma a ser a menor possível, suficientemente apenas para suprir as condições básicas de funcionamento de circuito fechado, não exercendo função térmica no sistema, ficando este apenas a cargo do trocador de calor ou de troca de calor ocorrida nas próprias tubulações ou componentes do sistema.

2.3.5 Filtros e filtragem do sistema

Segundo Reik (1988), a filtração eficiente e eficaz em sistemas hidráulicos é absolutamente essencial a fim de prevenir o mau funcionamento e, ao mesmo tempo, aumentar a vida de serviço de componentes importantes e dispendiosos. Qualquer análise das causas de uma falha de sistema hidráulico mostrará que a maior parte delas está relacionada com a contaminação do fluido por partículas sólidas. Essa contaminação é resultado de uma filtração

inadequada. A constante busca por melhor performance de componentes hidráulicos significa que ajustagens e tolerâncias estão se tornando ainda mais apertadas. Enquanto que, no passado, uma classificação de filtração absoluta de entre 80 e 100 μm era normal em sistemas hidráulicos. Hoje em dia, o valor mínimo exigido é em torno de 20 μm. Quando servo válvulas são usadas em um sistema, esse número pode ser baixo, de até 3 μm (REIK, 1988).

Ao selecionar a classe de filtração, o componente com as tolerâncias mais apertadas é que regula o número de classificação para todo o sistema. Classes de filtração devem ser selecionadas para esses componentes.

Além de contribuir com a vida e funcionamento do sistema, Reik (1988) aponta que partículas sólidas são quase sempre produzidas por altas tensões mecânicas e hidráulicas e, quando são deixadas circulando desimpedidas no sistema, causam severo desgaste. Naturalmente, isso por sua vez produz mais partículas sólidas. A contaminação de fora penetrando no sistema às vezes pode iniciar ou acelerar a condição e a reação em cadeia de produção de partícula sólida e sua acumulação podem ser minimizadas pelo uso de um bom filtro. O Quadro 1 seguinte relaciona diversos materiais com o devido efeito que causa.

Quadro 1 - Materiais contaminantes e seus efeitos.

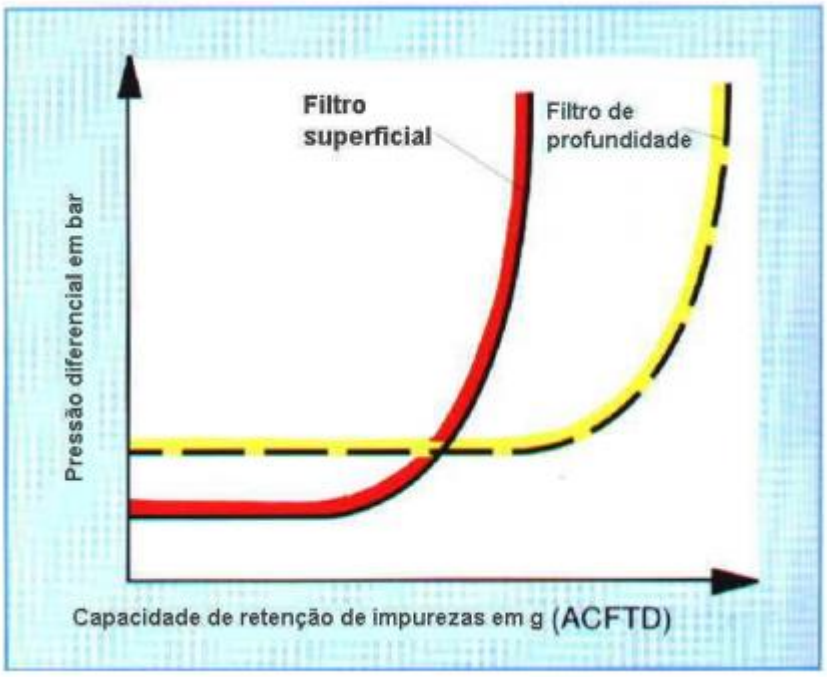
Material	**Efeito**
Carborundo Carepa, Partículas de ferrugem	Danos muito severos
Aço Ferro Latão Bronze Alumínio	Danos Severos
Tecidos laminados Fibras Resíduos de selos Partículas de borracha de mangueiras Partículas de tintas Produtos da oxidação de fluido	Danos mais leves

Fonte: Reik (1988).

De maneira geral, todas as partículas sólidas causam desgaste em componentes hidráulicos. Contudo, a quantidade real de desgaste depende de parâmetros como o material e tamanho das partículas sólidas, da relação de tamanho de partícula para folga de trabalho, do formato das partículas, da pressão de trabalho, da velocidade de fluxo, etc. Com relação aos filtros, sua eficácia é regulada pelo tipo de malha empregada. Os tipos de materiais usados para

a malha do filtro permitem que os elementos de filtro sejam divididos em dois amplos grupos: filtros superficiais e filtros de profundidade (Figura 13).

Figura 13 - Capacidade de retenção de impurezas.



Fonte: Reik (1988).

Os filtros superficiais e de profundidade variam em termos de capacidade de retenção de impurezas e capacidade de filtração, de acordo com suas diferentes construções. O diagrama da Figuras 13 mostra a diferença entre esses dois tipos de filtros.

De acordo com Reik (1988), o número de partículas de impurezas maiores que um tamanho específico de partícula x, contado a montante do elemento do filtro, é dividido pelo número de partículas de impurezas contado a jusante do elemento do filtro (mesmo tamanho de partícula x, mesma queda de pressão e no mesmo ponto no tempo). O número adimensional resultante representa o grau de separação βx.

Os dados antigos sobre classificação de filtração eram baseados em uma variedade de ensaios internos executados por diferentes fabricantes de filtro. Somente com a introdução do grau de separação βx, levando em conta a queda de pressão resultante, tornou-se possível comparar dados de classificação de filtração de diferentes fabricantes (REIK, 1988).

2.3.6 Tubulações

A tubulação hidráulica é o caminho percorrido pelo óleo para que o sistema hidráulico exerça sua função, e quanto menor for a distância da bomba até o atuador melhor será o rendimento do sistema hidráulico. (PANZER, 1965) Para a aplicação HDD, o sistema de tubulações aplicado é flangeado e não necessita de solda para a união da tubulação. Esse sistema é recomendado devido à limpeza durante a montagem e à facilidade de manter o sistema limpo. Nesse sentido, os parâmetros de operação que mais influenciam no conjunto de tubulação são: Diâmetro interno do tubo; Espessura de parede do tubo; Material do tubo.

3 MODELAGEM DOS COMPONENTES

3.1 INTRODUÇÃO

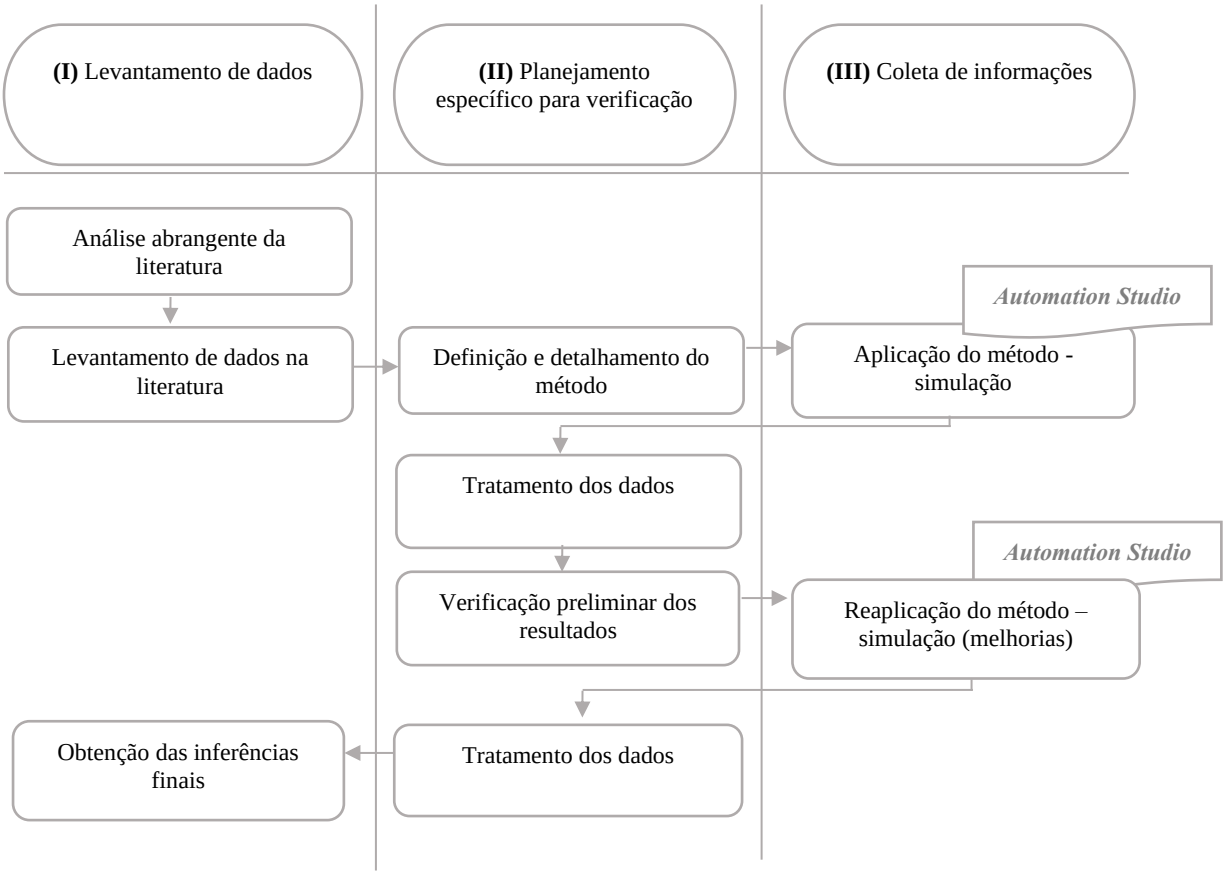
O estudo para eficiência energética de sistemas de acionamento hidrostático aplicado em turbinas eólicas iniciou-se num profundo levantamento bibliográfico e seguiu até a busca de fatores que influenciam cada componente de um sistema hidrostático. O estudo usa como base dois trabalhos: o primeiro trabalho objetivou o desenvolvimento de um sistema de transmissão (com transmissão hidrostática) para turbinas eólicas de tamanho médio de eixo horizontal e usou duas vertentes como metodologia, um modelo matemático do rotor aerodinâmico para entender melhor o comportamento dinâmico e influência no sistema e estudos teóricos para entender os conceitos básicos de turbinas eólicas e transmissões hidrostáticas (TURESSON, 2015); e o segundo trabalho usado como base objetivou a prova de um conceito de transmissão hidrostática para turbinas eólicas e por meio também de estudos em bancada (RADUENZ, 2018). Os dois trabalhos tiveram base e objetivos que se correlacionavam e também uma característica em comum: o uso da caixa de engrenagem no sistema hidrostático.

O presente trabalho é baseado nos conceitos e objetivos destes dois estudos, porém difere em relação a caixa de engrenagem que para este trabalho não foi considerada. Em um acionamento hidráulico direto não é usado uma caixa multiplicadora, sendo um grande diferencial para contribuir com a eficiência energética do sistema. Como forma de limitar o estudo, foi delimitado para a pesquisa a análise somente da correção da variação da velocidade do vento que é feita pelo uso do acionamento hidráulico. Esta vertente comentada se caracteriza pela lacuna de pesquisa do estudo. Nos subitens a seguir é comentado sobre as etapas do método de pesquisa, os componentes principais para o sistema analisado bem como as equações utilizadas e a ferramenta empregada.

3.2 ETAPAS DA PESQUISA

Para especificar cada etapa da pesquisa, foi elaborado o fluxograma exibido na Figura 14 proposto para o método desta pesquisa. Nele é proposto alguns aspectos importantes por meio da teoria pesquisada. Para ilustrar da melhor forma, o fluxograma apresenta as etapas da pesquisa desde a realização da análise abrangente da literatura até a obtenção das conclusões finais.

Figura 14 - Fluxograma para o método de pesquisa.



Fonte: Produção do próprio autor (2020).

O fluxograma usado como suporte para o método de pesquisa foi divido em três partes: (I) Levantamento de dados; (II) Planejamento específico para verificação e (III) Coleta de informações. Em seguida é exposto um breve resumo das atividades desenvolvidas em cada parte.

A primeira parte é composta pelas atividades teóricas como a análise abrangente da literatura e pesquisa bibliométrica. No estudo bibliométrico foram feitas buscas no banco de dados Scopus para obter um conjunto de dados para todos os estudos publicados relacionados ao tema. O intervalo da análise foi entre os anos de 2011 a 2019. As palavras chaves utilizadas para a coleta de dados incluem “hydrostatic system”, “wind turbine” e “hydrostatic". Foram utilizadas duas combinações destas palavras-chave com os operadores booleanos para combinar os termos de pesquisa da seguinte forma: (i) “hydrostatic system” and “wind turbine”; (ii) “hydrostatic” and “wind turbine”.

Na segunda parte é feita a verificação dos dados obtidos com as simulações realizadas

com o software *Automation Studio*^{TM} e o tratamento dos dados, nesta parte se fez necessário a verificação dos dados em duas etapas (primeiro o método foi aplicado no software, os dados foram verificados e em seguida foi necessária uma segunda rodada a fim de obter melhorias no sistema). E por fim, na terceira parte, é composta pela aplicação do método no software.

3.3 FERRAMENTA EMPREGADA

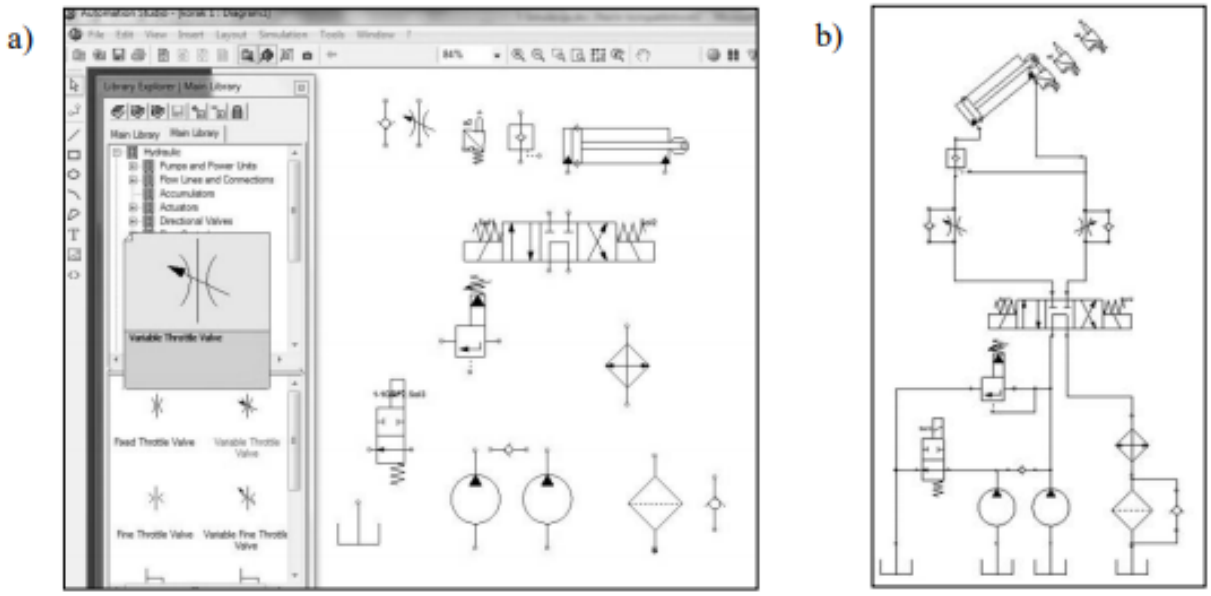
A fim de possibilitar a elaboração deste estudo foi utilizada uma ferramenta: o software *Automation Studio*^{TM}. As simulações computacionais realizadas com o software proporcionam soluções de design que abrange tecnologias de projeto/máquina, incluindo hidráulica, pneumática, elétrica, controles, interface homem-máquina (IHM) e comunicações (EKINOVIĆ; HODŽIĆ; REDŽIĆ, 2014).

O software consiste em uma série de módulos, projetados para atender a requisitos específicos como: criar gráficos, sejam circuitos hidráulicos, pneumáticos, elétricos ou outros circuitos funcionais; simulação de trabalho; a impressão resulta em uma forma adequada; formação de diferentes relatórios sobre o sistema, bem como especificação dos componentes utilizados. Uma das funções principais é a geração de diagrama, o editor tem como objetivo gerar diagramas e simular a operação do sistema representado (YUEHUA; YANJUN; QINGQUAN, 2008; EKINOVIĆ; HODŽIĆ; REDŽIĆ, 2014.). Um exemplo do sistema hidráulico no *Automation Studio*^{TM} é mostrado na Figura 15.

Neste trabalho, o *Automation Studio*^{TM} é usado para executar cenários de teste, a fim de entender melhor o comportamento do sistema proposto e avaliar o conjunto de parâmetros de design determinados pela otimização. Para minimizar a complexidade do modelo simulado, o atrito do fluido e a variação de temperatura não foram consideradas no software.

Como forma de expor a base de cálculo dos componentes principais do circuito proposto (bomba e motor), que influenciam na simulação e nos valores plotados nos gráficos, são mostradas as equações nos itens 4.3.1 e 4.3.2 como a de diferencial de pressão, eficiência total e fluxo de saída.

Figura 15 - a) Componentes do sistema durante a criação do sistema hidráulico; b) sistema hidráulico criado no Automation Studio.



Fonte: Ekinović; Hodžić; Redžić (2014).

3.3.1 Equações para base de cálculo da bomba

A fim de determinar a pressão real produzida pela bomba é usada a Equação 4 sobre diferencial de pressão, sendo o Δp diferencial de pressão, p_o a pressão de saída e o p_i a pressão de entrada. Esta equação é usada para determinar a pressão real produzida pela bomba. O torque e a potência serão calculados usando este diferencial de pressão (FAMIC TECHNOLOGIES,2020).

$$\Delta p = p_o - p_i \tag{4}$$

No que diz respeito a eficiência total da bomba, é usada a Equação 5 para relacionar os diferentes tipos de efeitos na transferência de torque para pressão. A eficiência volumétrica afetará o fluxo de saída da bomba. A eficiência geral afetará a potência de entrada. Sendo η_t a eficiência total da bomba, η_m a eficiência mecânica e η_v a eficiência volumétrica (FAMIC TECHNOLOGIES,2020).

$$\eta_t = \eta_m . \eta_v \tag{5}$$

A equação usada para determinar o fluxo de saída real da bomba é determinada pela Equação 6, sendo q o fluxo de saída, V_g o deslocamento, n a velocidade de rotação e η_v a eficiência volumétrica. Vale ressaltar que o fluxo de saída cairá se qualquer um dos parâmetros for diminuído (FAMIC TECHNOLOGIES,2020).

$$q = V_g.n.\eta_v \tag{6}$$

Para determinar a força real aplicada no eixo para produzir o diferencial de pressão é usada a Equação 7, sendo T o torque, Δp diferencial de pressão, V_g deslocamento e η_m a eficiência mecânica. Neste aspecto, se a eficiência mecânica diminuir, o torque necessário aumentará (FAMIC TECHNOLOGIES,2020).

$$T = \frac{\Delta p.V_g}{\eta_m} \tag{7}$$

E por fim, a Equação 8 é usada para determinar a potência real exigida pela bomba para produzir um fluxo e um diferencial de pressão, sendo P a potência, T o torque, n a velocidade de rotação e ηt a eficiência total. Para a potência total, ambos os tipos de eficiência são levados em consideração, pois a eficiência total é usada nesta equação (FAMIC TECHNOLOGIES,2020).

$$P = T.n.\eta_t \tag{8}$$

3.3.2 Equações para base de cálculo do motor

A fim de determinar a pressão real consumida pelo motor é usada a Equação 9 sobre diferencial de pressão, sendo o Δp diferencial de pressão, p_i a pressão de entrada e p_o a pressão de saída. Esta equação é usada para determinar a pressão real consumida no motor. O torque e a potência serão calculados usando este diferencial de pressão (FAMIC TECHNOLOGIES,2020).

$$\Delta p = p_i - p_o \tag{9}$$

No que diz respeito a eficiência total do motor, é usada a Equação 10 para relacionar os diferentes tipos de efeitos na transferência de pressão para torque. A eficiência volumétrica afetará a velocidade de rotação do motor. A eficiência total afetará a potência de saída. Sendo η_t a eficiência total do motor, η_m a eficiência mecânica e η_v a eficiência volumétrica (FAMIC TECHNOLOGIES,2020).

$$\eta_t = \eta_m . \eta_v \tag{10}$$

A equação usada para determinar a velocidade de rotação real do motor é determinada pela Equação 11, sendo n a velocidade de rotação, q o fluxo de saída, η_v a eficiência volumétrica e V_g o deslocamento. Vale ressaltar que a velocidade diminuirá se o fluxo diminuir (FAMIC TECHNOLOGIES,2020).

$$n = \frac{q . \eta_v}{V_g} \tag{11}$$

Para determinar a força real produzida no eixo para um certo diferencial de pressão é usada a Equação 12, sendo T o torque, Δp diferencial de pressão, V_g deslocamento e η_m a eficiência mecânica. Neste aspecto, se a eficiência mecânica diminuir, o torque produzido diminuirá (FAMIC TECHNOLOGIES,2020).

$$T = \Delta p . V_g . \eta_m \tag{12}$$

E por fim, a Equação 13 é usada para determinar a potência real produzida pelo motor em um determinado fluxo e diferencial de pressão, sendo P a potência, T o torque, n a velocidade de rotação e η_t a eficiência total. Para a potência total, ambos os tipos de eficiência são levados em consideração, pois a eficiência total é usada nesta equação (FAMIC TECHNOLOGIES,2020).

$$P = T . n . \eta_t \tag{13}$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados os dados obtidos com as simulações. A pesquisa teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema hidráulico com acionamento hidrostático sem o uso da caixa de engrenagem e gerador síncrono por meio do software *Automation Studio*^{TM}, com o objetivo de obter uma correção na rotação da velocidade do vento pelo próprio sistema de transmissão hidrostática, através do controle do motor hidráulico.

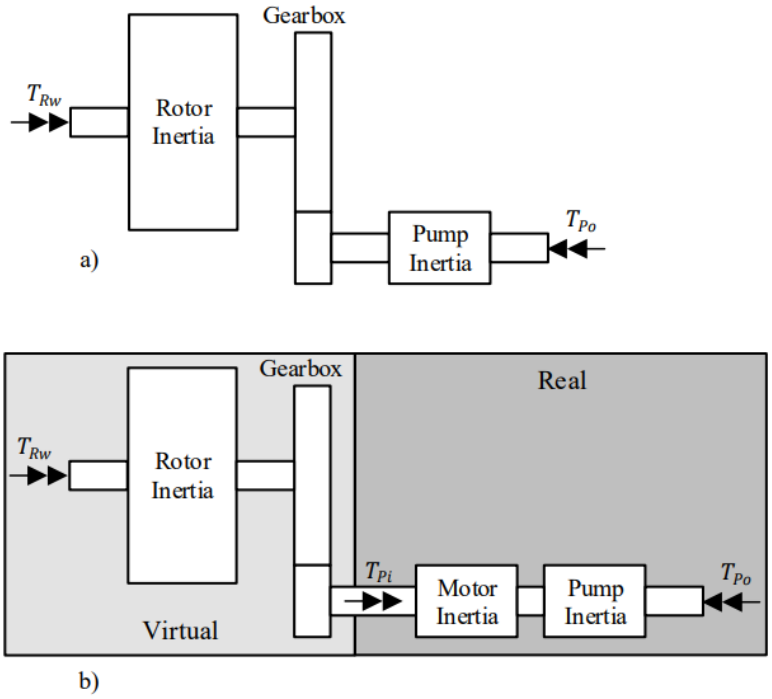
4.1 PROPOSTAS DE ACIONAMENTO HIDRÁULICO

Antes de expor os resultados, é válido comentar a nível de comparação, como são os sistemas hidrostático tratados nos trabalhos base desta dissertação, que contempla a caixa de engrenagem no seu sistema. No primeiro estudo de Raduenz (2015), o sistema foi desenvolvido para provar um conceito de transmissão hidrostática para turbinas eólicas por meio de estudos em bancada. No trabalho mencionado é demonstrado ser possível usar uma transmissão hidrostática para transferir a energia do topo da nacele para acionar um gerador no chão e diretamente conectado à rede. Esse processo pode ser alcançado ao controlar o rotor com o objetivo da respectiva região de operação da turbina, que é o desempenho aerodinâmico máximo. Na Figura 16 é representado o sistema de entrada de energia de turbinas eólicas proposto em a) e as partes reais e virtuais do sistema de entrada de energia da bancada de testes em b).

De forma a complementar o que é apresentado na Figura 16, o estudo propôs um sistema de transmissão hidrostática com bomba e motor de pistões axiais que trabalham em regime de alta velocidade e baixo torque, para isto foi necessário a utilização de uma caixa de engrenagem como multiplicadora de velocidade entre o rotor eólico e o sistema hidráulico. Na bancada de testes foi utilizado apenas um sistema hidrostático e um motor elétrico simulou o rotor de inércia e a caixa multiplicadora por meio de uma programação computacional.

No segundo estudo, Rapp e Turesson (2015) desenvolveram de um sistema com transmissão hidrostática para turbinas eólicas de tamanho médio de eixo horizontal e usou duas vertentes como metodologia, um modelo matemático do rotor aerodinâmico para entender melhor o comportamento dinâmico e influência no sistema e estudos teóricos para entender os conceitos básicos de turbinas eólicas e transmissões hidrostáticas.

Figura 16 - a) Representação do sistema de entrada de energia do aerogerador; b) Partes reais e virtuais do sistema de entrada de energia da bancada de teste.



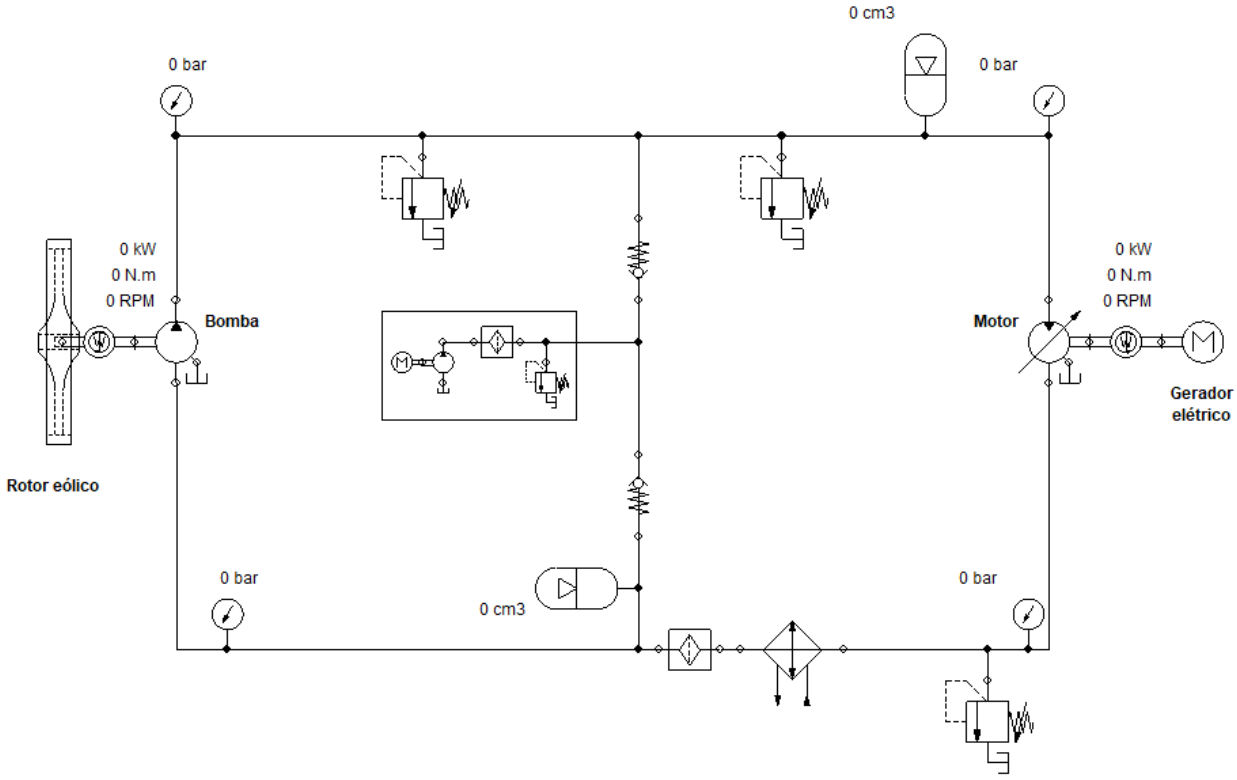
Fonte: Raduenz (2015).

Este estudo também propôs um sistema de transmissão hidrostática com bomba e motor de pistões axiais que possuem limitações para trabalhar em regimes de baixas rotações, assim também se faz necessário a utilização de uma caixa de engrenagem como multiplicadora de velocidade para que a bomba hidráulica, que trabalha de um regime entre 600 a 1800 rpm, consiga trabalhar com rotor entre 50 e 120 rpm. Neste estudo não foi utilizado um teste de bancada e sim o software *AMESim*.

4.2 ACIONAMENTO PROSPOTO - CIRCUITO

Em vista disso e com base nos dados levantados e nas características de operação das turbinas eólicas, considerações foram feitas acerca das exigências para que o acionamento escolhido pudesse oferecer as melhores condições. Como primeiro resultado da simulação tem-se a Figura 17. Nela é possível perceber um circuito que contempla os componentes que foram necessários.

Figura 17 - Acionamento proposto.



Fonte: Produção do próprio autor (2020).

Com base na Figura 17, o circuito tem como característica uma bomba de pistões radiais do tipo com curva de came *Hagglunds* CA210/180 (especificada de acordo com as Equações 1 e 2) e a sua característica de trabalho ser compatível com o regime de trabalho do rotor eólico - uma bomba específica para trabalhos com baixa velocidade e alto torque. Vale mencionar que uso específico desta bomba, do tipo com curva de came, elimina o uso de caixas multiplicadoras. Nos trabalhos de base deste estudo (TURESSON, 2015; RADUENZ, 2018) bomba utilizada em seus circuitos se fez necessário o uso de caixas multiplicadora devido a bomba não trabalhar nos regimes de baixa velocidade e alto torque requeridos pelo rotor eólico. Com essa especificação da bomba, os dados que foram inseridos no software estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados de entrada da bomba

Deslocamento volumétrico	11324 cm^3/rev
Pressão máxima	350 bar
Rotação	horária
Rotação máxima:	135 rev/min
Rotação mínima	60 rev/min

Fonte: Bosch rexroth hagglunds cb (2015).

Outro componente selecionado para o circuito, e de grande importância para o funcionamento, é um motor de deslocamento variável de pistões axiais *Hagglunds* A4VSG 500. O motor escolhido tem uma grande importância na correção da variação da velocidade do vento devido ele ser de deslocamento variável, isto é, a vazão oriunda da bomba sofre variações por conta da constante variação natural do vento. O motor altera a inclinação do prato oscilante interno e assim varia o seu deslocamento volumétrico, adaptando-se a variação da vazão a fim de que a rotação de saída para o gerador seja sempre constante. Permitindo, assim, a utilização de um gerador síncrono, evitando a necessidade de usar um transformador.

Em relação a acumuladores, foram utilizados dois de dois litros cada: um instalado na linha de alta pressão (210 bar) e outro na linha de baixa pressão (15 bar). Estes acumuladores são de grande relevância para amortecer as pulsações no fluido geradas pela bomba e principalmente pelo comportamento do vento no rotor eólico.

Para as válvulas limitadoras de pressão foram utilizados dois tipos: válvula de alívio e válvula de segurança. A válvula de alívio foi utilizada uma para cada linha de pressão do sistema (linha de alta pressão e linha de baixa pressão) e a válvula de segurança para linha de alta pressão. As válvulas de alívio têm como objetivo limitar/determinar a pressão de trabalho em cada linha do sistema e a válvula de segurança são aplicadas para atenuar picos de pressão.

A unidade de recirculação do sistema é utilizada para preencher o sistema com fluido devido as perdas que ocorrem, principalmente devido aos vazamentos internos, resultado da vazão dos drenos da bomba e do motor. Outra finalidade relevante deste sistema é recircular o óleo por meio do filtro hidráulico e do trocador de calor, mantendo, assim, o óleo limpo e frio. A unidade de recirculação conta com uma bomba de engrenagem, um motor elétrico, um filtro hidráulico e uma válvula de alívio.

Os métodos mais comuns de conversão de energia são baseados nos sistemas de tomada de força hidráulica (sistema de acionamento direto), em que é aplicado onde há resposta rápida e grande potência transmitida e controle automatizado, além de possuir ampla gama de aplicações em tecnologia moderna (BERTRAM et al., 2020; Larchikov et al., 2014).

Como listado no item 3 (métodos), o acionamento hidráulico direto proporciona vários benefícios como a geração de 50% a mais de torque e utilização de um motor menor para acionar uma determinada carga, pois não precisam sustentar as cargas extras como usadas em outros tipos de acionamentos (JONES et al., 2008).

O acionamento hidráulico proposto com o circuito, por não contemplar a caixa multiplicadora, não cria perdas mecânicas que reduzem o torque de saída (BOSCH REXROTH, 2014). Toda correção do sistema é feita pelo sistema hidráulico, gerando menos custos e manutenção mínima.

As caixas redutoras de turbinas eólicas têm sofrido com falhas prematuras e raramente cumprem sua vida útil projetada. Falhas precoces e inesperadas da caixa redutora podem resultar em despesas adicionais devido à perda de produção, bem como custos de manutenção corretiva associados. As falhas podem estar relacionadas a falhas de engrenagens, rolamentos ou eixos e pela atribuição à natureza de rajadas aleatórias do vento. Mesmo a menor rajada de vento criará uma carga desigual nas pás do rotor, o que iria gerar um torque no eixo do rotor que poderia carregar os rolamentos de maneira desigual e desalinhar os dentes das engrenagens (JANTARA JUNIOR; BASOALTO; PAPAELIAS, 2020; KAA et al., 2020).

As características básicas de torque de um acoplamento mecânico são semelhantes às de um acionamento hidráulico direto, com exceção da adição de um redutor – usualmente do tipo planetário. Isto porque o motor hidráulico de um acoplamento mecânico não está diretamente conectado ao eixo movido.

4.3 MANUTENÇÃO

O sistema HDD proposto possui um acesso mais fácil a manutenção, grande parte dos componentes do sistema são instalados dentro de um armário localizado no solo, sem criar nenhuma restrição ao acesso para manutenção, ficando apenas um componente (bomba hidráulica) no topo da turbina eólica. Os cuidados principais na manutenção de um sistema hidráulico são: manter o fluido limpo, seco e frio. Para isto não se faz necessário o acesso a bomba hidráulica, sendo necessário apenas troca de filtros hidráulicos, filtros desumidificadores, filtros de respiro e inspeção do trocador de calor. Com esta manutenção a bomba, motor e demais componentes hidráulicos possuem vida útil de cerca de 11 anos, sendo necessário apenas um reparo feito pelo fabricante a cada período de 11 anos, onde são trocados todos os componentes internos que sofrem desgaste, na bomba e motor.

4.4 CORREÇÃO DA VARIAÇÃO VELOCIDADE

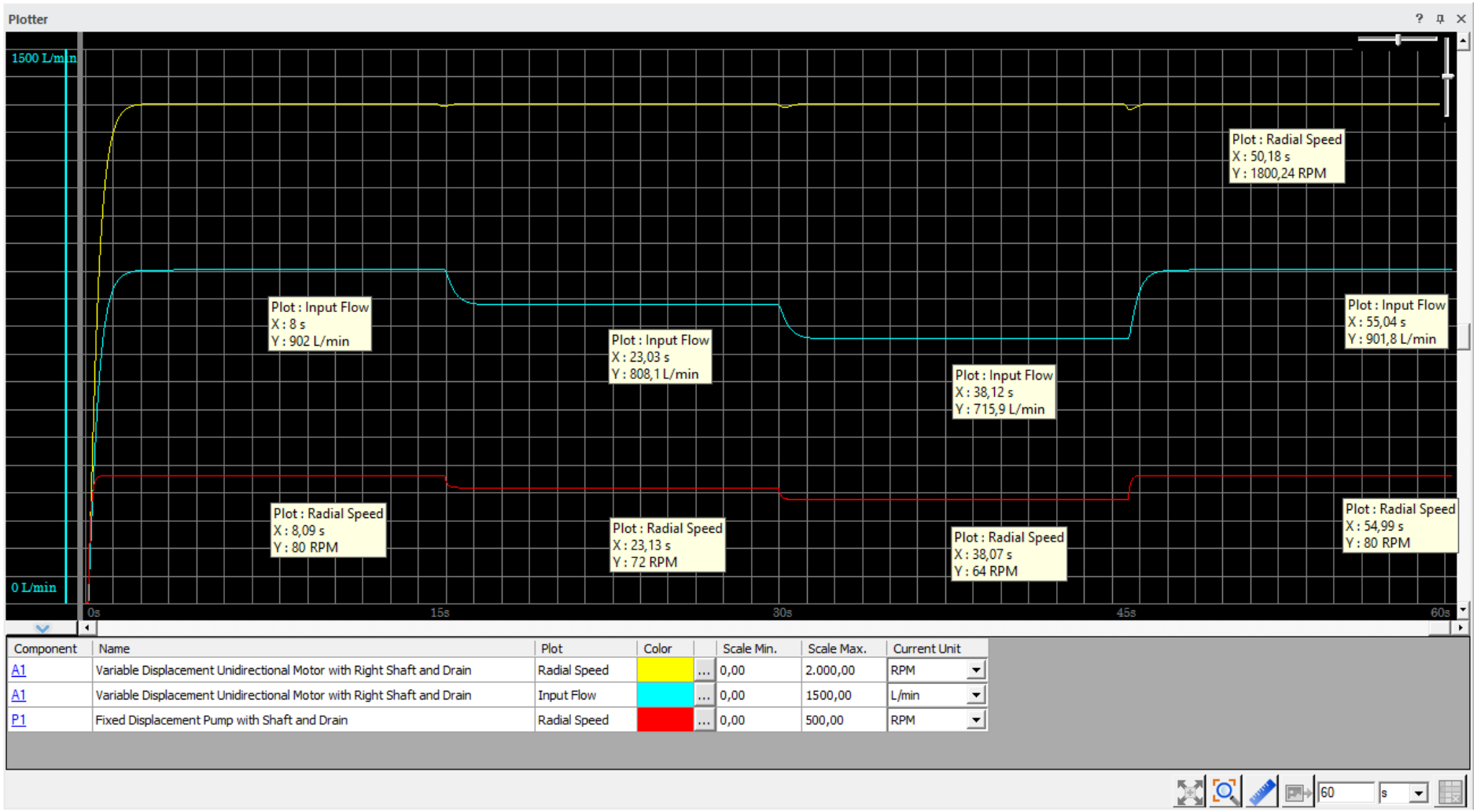
Em aerogeradores tradicionais, a variação na velocidade do vento ocasiona ineficiência no sistema por completo. Um sistema hidrostático pode ainda apresentar ineficiência com esta variação na velocidade do vento, porém tem como característica a transferência na curva de potência elétrica ser mais suave comparado a aerogeradores tradicionais (Williams et al., 2010). Como um resultado deste trabalho, o sistema proposto tem como característica corrigir por completo esta variação contribuindo para o circuito ser mais eficiente. Na revisão de literatura é comprovada a capacidade de correção das variações na velocidade do vento, com isso foi feita a simulação baseado no circuito proposto para validar a aplicação (Figura 18).

No gráfico gerado pelo software *Automation Studio*^{TM} (Figura 18) foi simulado o comportamento do sistema hidráulico com a variação na velocidade do vento, para isto foi aplicado variações na rotação do eixo de entrada da bomba, as variações foram de 4 patamares, gerando 3 degraus de mudança na rotação (levando em consideração variações de 10%, tomando como rotação inicial de 80 rpm), no segundo patamar de velocidade uma redução na rotação para 72 rpm, no terceiro patamar novamente uma redução, indo para 64 rpm, e em um quarto patamar um aumento na velocidade elevando a rotação novamente para 80 rpm.

No gráfico da Figura 18 foi possível comprovar a atuação do motor hidráulico de deslocamento variável no sistema proposto, mesmo ocorrendo variação na velocidade do vendo e consequentemente variação na rotação da bomba e na vazão na linha de entrada no motor hidráulico. O motor varia o ângulo do prato basculante internamente, ajustando assim o deslocamento volumétrico para atender a demanda da rotação de saída para o gerador, (mantendo a rotação fixa de 1800 rpm).

Devido ao sistema ser composto de uma bomba hidráulica de deslocamento fixo (conforme item 3.2.2) a vazão entregue pela bomba ao sistema varia proporcionalmente a variação da rotação da bomba. Por se tratar de um circuito fechado, a vazão da bomba hidráulica é integralmente enviada ao motor hidráulico, que ajusta o deslocamento volumétrico interno e entrega uma rotação fixa no eixo de saída, sofrendo pouca interferência nos degraus de variação de vazão devido a um tempo de resposta de 15 ms (A4VSG - *Product Manual – Bosch Rexroth*, 2018) para variar de deslocamento volumétrico máximo para mínimo.

Figura 18 - Correção da variação da velocidade do vento.



Fonte: Produção do próprio autor (2020).

4.5 EFICIÊNCIA DO SISTEMA HIDRÁULICO

A metodologia abordada no estudo proposto, contemplando os componentes do sistema e suas especificações, é validado inicialmente pela literatura. Com as devidas aplicações no software usado como ferramenta e com base nas equações necessárias (para torques, cálculo de vazão, pressão e potência), obteve-se eficiência significativa de um modo geral. A Figura 19 detalha em forma de gráfico a eficiência comentada.

Na simulação para a análise da eficiência obtida foi extraído o gráfico (Figura 19) em que foi desprezado a variação na velocidade do vento, simulando uma velocidade de vento constante de 10,7m/s, que proporciona uma rotação de 80 rpm no rotor eólico (FLESH, 2012). Como resultado desta simulação, a potência de entrada no eixo da bomba hidráulica foi constante de 275 kW e a potência de saída no eixo do motor hidráulico para o gerador elétrico de 246,9 kW, obtendo uma eficiência total do sistema hidráulico de 89,78%.

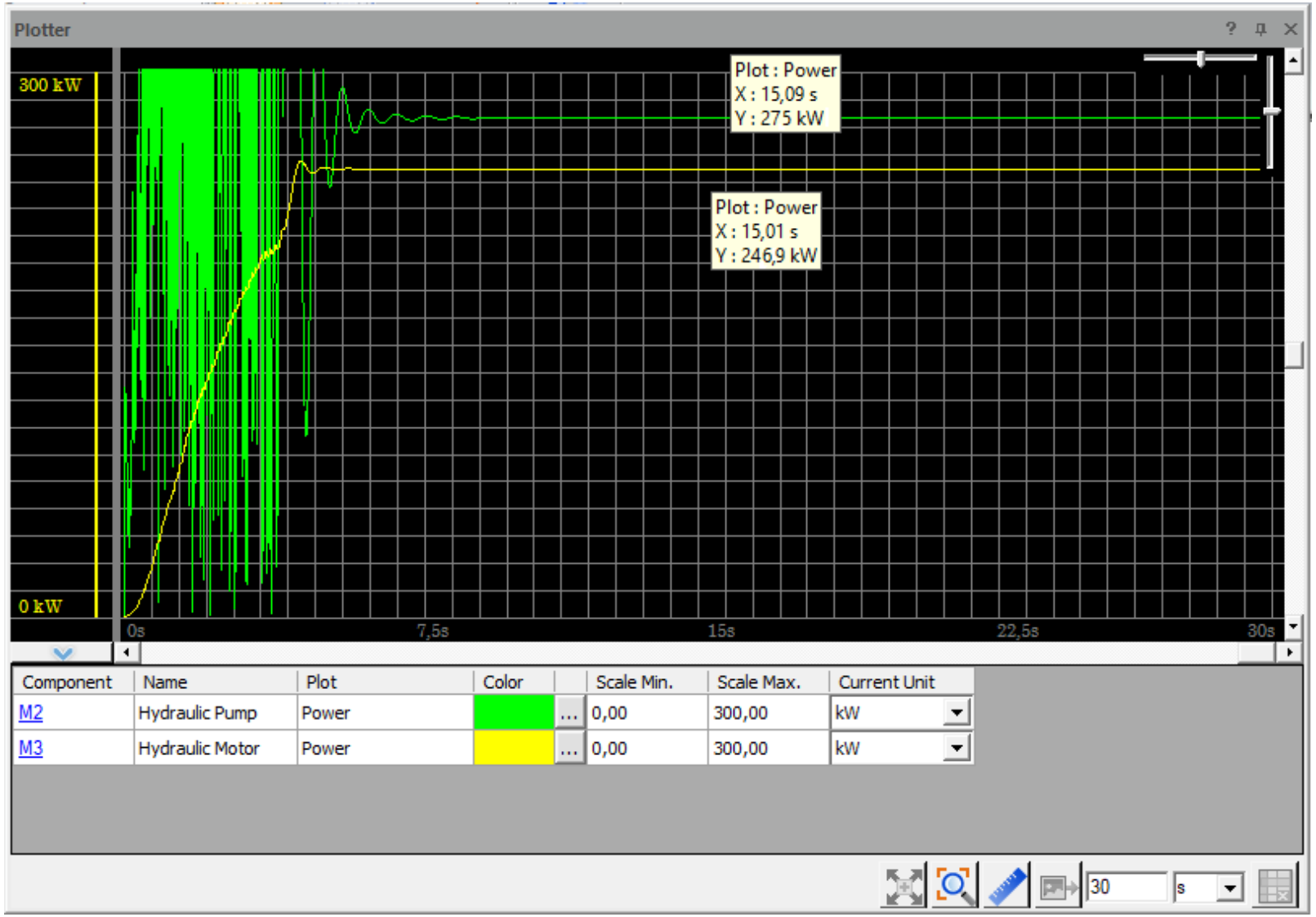
Para uma análise de sensibilidade do equipamento foram realizadas mais duas simulações, a bomba proposta no projeto hidráulico tem sua faixa de rotação de trabalho limitada entre 60 rpm a 135 rpm, e próximo desses limites de rotação é esperada uma eficiência menor, então a fim de analisar a sensibilidade do projeto em questão, foram feitas simulações de eficiência com o sistema trabalhando nas rotações limites de funcionamento.

Na Figura 20 pode-se observar o gráfico de simulação de eficiência do sistema hidráulico funcionando na rotação mínima de 60 rpm, onde é alcançada com uma velocidade de vento aproximada de 8m/s. É possível observar também uma potência de entrada na bomba hidráulica de 206,2 kW e uma potência de saída do motor hidráulico para o gerador de 181,3 kW, proporcionando uma eficiência de 87,92%.

Na Figura 21 observa-se o gráfico de simulação de eficiência do sistema hidráulico funcionando na rotação máxima de 135 rpm que é atingida com uma velocidade do vento aproximada de 18m/s, atingindo uma potência de entrada no sistema hidráulico de 464 kW e de saída de 396,7, proporcionando uma eficiência de 85,5%.

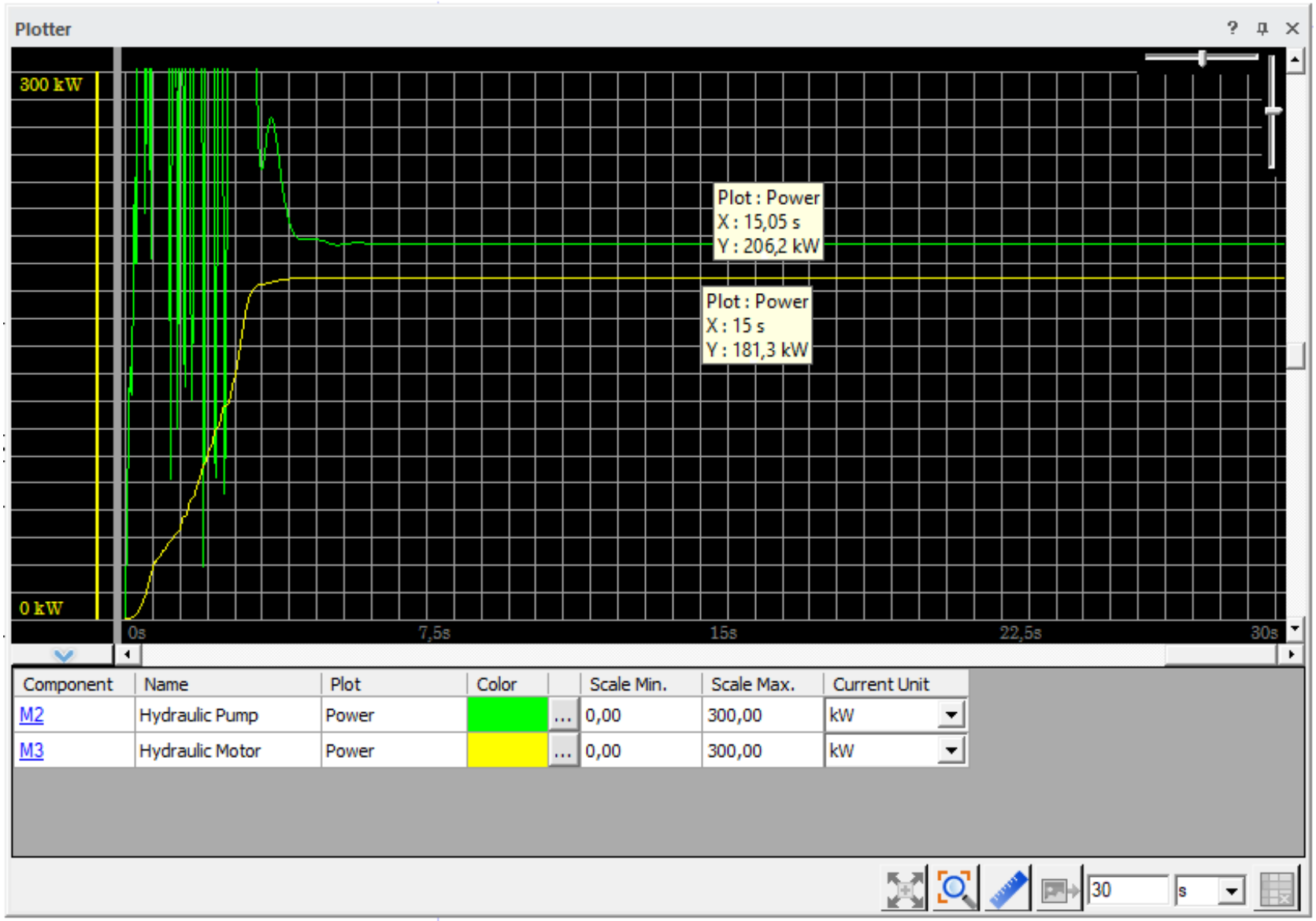
Em vista disso, podemos observar com as Figuras 20 e 21 que o sistema hidráulico se manteve com uma eficiência total alta, com uma pequena alteração da eficiência, sendo mais afetada na rotação máxima, assim o sistema demonstrou manter sua eficiência alta e com poucas alterações mesmo nas faixas de trabalho mais críticas.

Figura 19 - Eficiência do sistema hidráulico.



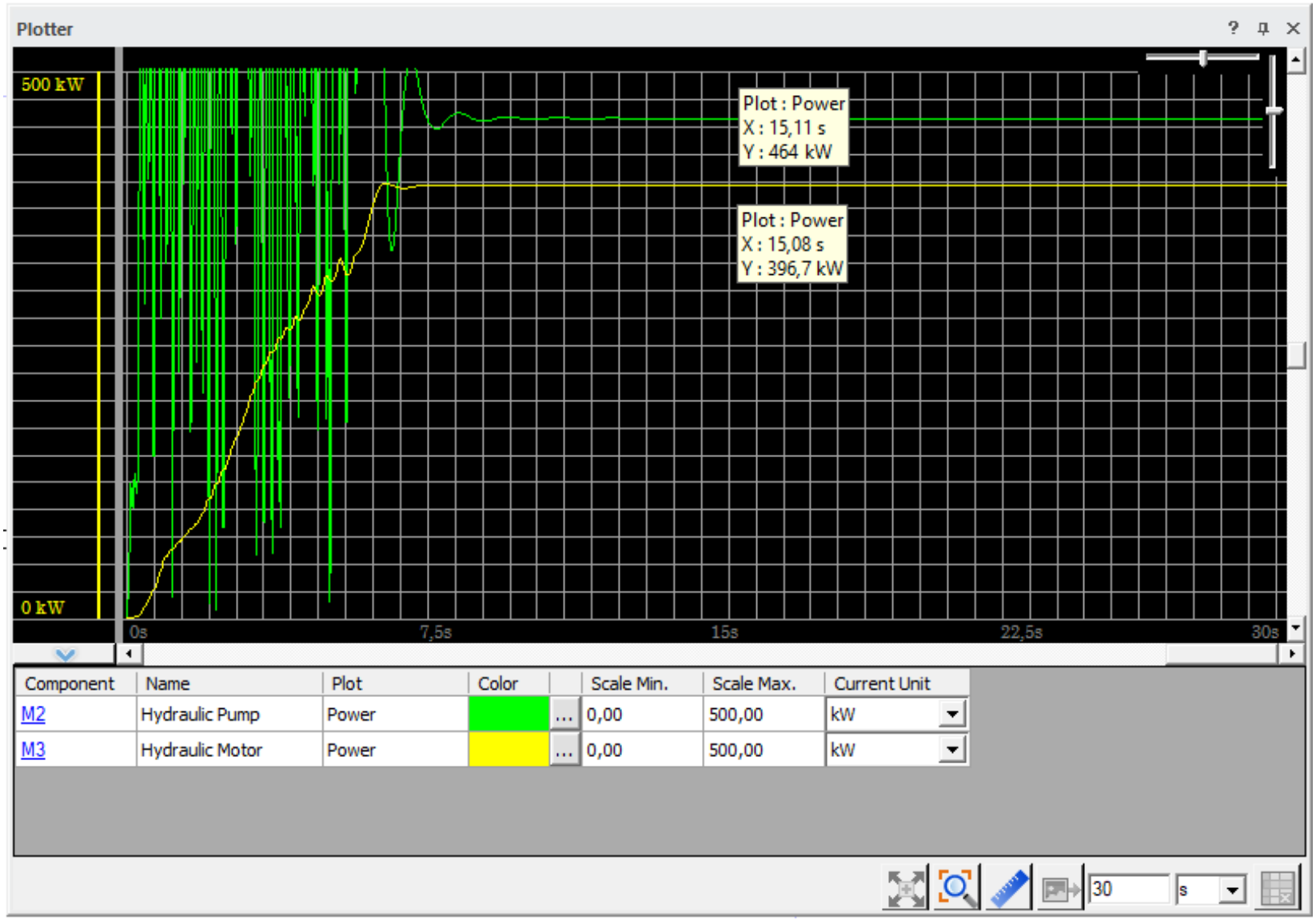
Fonte: Produção do próprio autor (2020).

Figura 20 - Eficiência do sistema hidráulico na rotação mínima.



Fonte: Produção do próprio autor (2021).

Figura 21 - Eficiência do sistema hidráulico na rotação máxima.



Fonte: Produção do próprio autor (2021).

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho contribui para validar um sistema de transmissão hidrostática, sem o uso de caixa redutora, aplicado em turbinas eólicas. Com base nos resultados obtidos com a pesquisa é possível concluir que os objetivos originalmente formulados foram atingidos. Com relação ao primeiro e segundo objetivo – identificar e analisar todos os componentes do sistema e sua variação de comportamento e propor um sistema aplicável para o regime de trabalho analisado – foi efetuado com o detalhamento e especificação de todos os componentes que seriam necessários para o circuito proposto.

No que concerne o terceiro objetivo - validar a análise de comportamento do sistema na correção da variação da velocidade do vento – obtém-se com a simulação pelo software *Automation Studio*^{TM}, em que foi analisado o comportamento do sistema hidráulico com a variação na velocidade do vento realizado com variações na rotação do eixo de entrada da bomba em 4 patamares, gerando 3 degraus de mudança na rotação (levando em consideração variações de 10%, tomando como rotação inicial de 80 rpm), no segundo patamar de velocidade uma redução na rotação para 72 rpm, no terceiro patamar novamente uma redução, indo para 64 rpm, e em um quarto patamar um aumento na velocidade elevando a rotação novamente para 80 rpm. Infere-se que por se tratar de um circuito fechado, a vazão da bomba hidráulica é integralmente enviada ao motor hidráulico, que ajusta o deslocamento volumétrico interno e entrega uma rotação fixa no eixo de saída, sofrendo pouca interferência nos degraus de variação de vazão devido a um tempo de resposta altíssimo, de 15 ms para variar do deslocamento volumétrico máximo para o mínimo.

No quarto objetivo - Identificar a eficiência energética obtida com o sistema proposto - foi efetuado com as devidas aplicações no software usado como ferramenta e com base nas equações necessárias. Em relação a este aspecto, obtém-se eficiência significativa de um modo global: a potência de entrada no eixo da bomba hidráulica foi constante de 275 kW e uma potência de saída no eixo do motor hidráulico para o gerador elétrico de 246,9 kW, alcançando uma eficiência total do sistema hidráulico de 89,78%. Para uma análise de sensibilidade do equipamento foram realizadas mais duas simulações com o sistema trabalhando nas rotações limites de funcionamento, com a análise pode-se observar que o sistema hidráulico se manteve com uma eficiência total alta, com uma pequena alteração da eficiência, sendo mais afetada na rotação máxima, assim o sistema demonstrou manter sua eficiência alta e com poucas alterações mesmo nas faixas de trabalho mais críticas.

REFERÊNCIAS

BERTRAM, D.V.; TARIGHALESLAMI, A.H.; WALMSLEY, M.R.W.; ATKINS, M.J.; GLASGOW, G.D.E. A systematic approach for selecting suitable wave energy converters for potential wave energy farm sites, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, New Zealand, v. 132, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110011. Acesso em: 12 out. 2020.

BOCKEN, M.P.; SHORT, S.W.; RANA, P.; EVANS, S. A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes**. Journal of Clean Production**, United Kingdom, v. 65, p. 42–56, 2014.

BOSCH REXROTH. The drive and control company. **Driving factors**. Alemanha, 2014.

BOSCH REXROTH HAGGLUNDS CB. **Radial piston hydraulic motor:** installation and maintenance manual. RE15302-WA, Alemanha, 2015.

CANAL ENERGIA. **Geração eólica**. Disponível em: https://www.canalenergia.com.br/noticias/53096013/energia-eolica-atinge-15-gw-em-capacidade-instalada-no-brasil. Acesso em: 15 out. 2020.

CUSTÓDIO, R. D. S. **Energia eólica para produção de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.

DAVID, T. M.; RIZOL, P. M.S.R.; MACHADO, M.A.G.; BUCCIERI, G.P. Future research tendencies for solar energy management using a bibliometric analysis, 2000–2019, **Heliyon**, v. 6, ed. 7, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04452. Acesso em: 22 july 2020.

DIEPEVEEN, N. F. B.; LAGUNA, A. J. Dynamic modelling of fluid power transmissions for wind turbines. **Journal of Systems and Control Engineering:** part I, v. 224, n. 6, p. 619-621, 2011.

DOLAN, D. S. L.; LEHN, P. W. Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 21, n. 3, 2006.

DOLAN, B.; ASCHEMANN, H. Control of a wind turbine with a hydrostatic transmission: an extended linearisation approach. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON METHODS AND MODELS IN AUTOMATION AND ROBOTICS, 17., 2012, Poland. **Proceedings** [...]. Poland, 2012.

EKINOVIĆ, E; HODŽIĆ, N; REDŽIĆ, M. The application of software automation studio in design and work simulation of hydraulic systems. *In:* INTERNATIONAL RESEARCH/EXPERT CONFERENCE, 18., 2014, Budapest, Hungary. **Proceedings** [...]. Budapest, 2014.

FAATZ, H.H. Projeto de estruturas de aço para unidades de força. **Planejamento e projeto de sistemas de força hidráulica:** um manual de treinamento para o planejamento e projeto de sistemas de força hidráulica. Lohr am Main, Alemanha: Bosch Rexroth, 1988. v. 3.

FAMIC TECHNOLOGIES. **Software automation studio**. 2020.

FIALHO, A.B. **Automação hidráulica:** projetos, dimensionamento e análise de circuitos. 2. ed. São Paulo: Erica, 2004.

FLESCH, E. A. **Projeto de transmissão hidrostática para aerogeradores de eixo horizontal**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2012.

HAU, E. **Wind turbines**: fundamentals, technologies, application, economics. 2. ed. Krailing, Germany: Springer, 2005.

HERBERT, G.M. J.; INIYAN, S., SREEVALSAN, E.; RAJAPANDIAN, S. A review of wind energy technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, India, v. 11, n. 6, p. 1117-1145, 2007.

HUOVA, M; LAAMANEN, A; LINJAMA, M. Energy efficiency of three-chamber cylinder with digital valve system. **International Journal of Fluid Power**. Tampere, Finland, v. 11, p. 15-22, 2014.

JANTARA JUNIOR, V. L.; BASOALTO, H.; PAPAELIAS, M. A damage mechanics approach for lifetime estimation of wind turbine gearbox materials, **International Journal of Fatigue**, v. 137, 2020.

JONES, G.M.; SCHETTLER, J.W.; DAFFER, R. A.; DEVINE, M.A.; HONG, S. S.; HUFF, P.A.; MALESICH, R. A.; NOVACEK, L. D.; WILLIAMS, T.O. Engines. *In:* Garr M. Jones, Robert L. Sanks, George Tchobanoglous, Bayard E. Bosserman**, Pumping Station Design**. 3.ed. Oxônia, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2008. Cap. 14, p. 14.1-14.22. Disponível em: https://doi.org/10.1016/B978-185617513-5.50021-4. Acesso em: 20 out. 2020.

JOSELIN HERBERT, G.M.; INIYAN, S.; SREEVALSAN, E.; RAJAPANDIAN, S. A review of wind energy technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, p. 1117-1145, 2007.

LARCHIKOV, I.; YUROV, A.; STAZHKOV, S.; GRIGORIEVA, A.; PROTSUK, A. Power analysis of an axial piston hydraulic machine of power-intensive hydraulic drive system**, Procedia Engineering**, v. 69, p. 512-517, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.020. Acesso em: 08 set. 2020.

MADVAR, M.D.; AHMADI, F.; HIRMOHAMMADI, R.; ASLANI, A. Forecasting of wind energy technology domains based on the technology life cycle approach. **Energy Reports**. v. 5, p. 1236-1248, 2019.

MAHA FLUID POWER RESEARCH CENTER - MAHA. **Home**. Indiana [2019]. Disponível em: https://engineering.purdue.edu/Maha/. Acesso em: 07 abr. 2019.

NAZIR, M.S.; MAHDI, A.J.; BILAL, M.; SOHAIL, H.M.; ALI, N.; IQBAL, H.M.N. Environmental impact and pollution-related challenges of renewable wind energy paradigm: a review. **Science of the Total Environment,** v. 683, p. 436-444, 2019.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO. ISO 1219-1: **Sistemas e componentes hidráulicos e pneumáticos - Símbolos gráficos e diagramas de circuitos**, 2006.

PANZER, P. **Livro de projeto da óleo hidráulica.** Barcelona: Blume, 1965.

RADUENZ, H. **Desenvolvimento de protótipo de transmissão hidrostática para aerogeradores**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2015.

RAPP, J.; TURESSON, J. **Hydrostatic Transmission in wind turbines**: development of test platform. 2015. Dissertation (Master Thesis in Fluid Power) – Department of Manegement and Engineering, Division of Fluid Power and Mechatronic Systems, Linköping University, Linköping, 2015.

REIK, M. Filtração em sistemas hidráulicos. **Planejamento e projeto de sistemas de força hidráulica:** um manual de treinamento para o planejamento e projeto de sistemas de força hidráulica. Lohr am Main, Alemanha: Bosch Rexroth, 1988. v. 3.

RENTSCHLER, M.U.T.; ADAM, F.; CHAINHO, P. Design optimization of dynamic inter-array cable systems for floating offshore wind turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, p. 622- 635. 2019.

SCHMITZ, J.; VATHEUER, N.; MURRENHOFF, H. Development of a hydrostatic transmission for wind turbines. *In:* INTERNATIONAL FLUID POWER CONFERENCE, 7., 2010, Aachen, Germany. **Proceedings** [...]. Aachen, 2010.

SCOPUS. **Base de dados Elsevier**. Disponível em: https://www.scopus.com/home.uri. Acesso em: 4 de out. 2021.

SESTO, E.; CASALE, C. Exploitation of wind as an energy source to meet the world's electricity demand. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, p. 375-387, 1998.

SHOKOUHIAN, M.; HEAD, M.; SEO, J.; SCHAFFER, W.; ADAMS, G. Hydrodynamic response of a semi-submersible platform to support a wind turbine. **Journal of Marine Engineering & Technology**, v. 20, p. 170-185, 2019.

SKINNER, S. **Hydraulic fluid power**: a historical timeline. United Kingdom: Lulu.com, 2014.

STEPANOV, V. S; STEPANOVA, T. B. Estimation of the energy efficiency of oil

production and pipe-line transportation systems. **Energy sources, Part A:** recovery, utilization, and environmental effects, v. 29, p. 1215-1220, 2007.

TAO, J.; WANG, H.; LIAO, H.; YU, S. Mechanical design and numerical simulation of digital-displacement radial piston pump for multi-megawatt wind turbine drivetrain. **Renewable Energy**, v. 143, p. 995-1009. 2019.

VAN DE KAA, G.; VAN EK, M.; KAMP, L. M.; REZAEI, J. Wind turbine technology battles: Gearbox versus direct drive - opening up the black box of technology characteristics, **Technological Forecasting and Social Change**, v. 153, 2020.

WANG, F.; CHEN, J. XU B.; STELSON, K.A. Improving the reliability and energy production of large wind turbine with a digital hydrostatic drivetrain. **Applied Energy**, v. 251. 2019.

WANG, F.; STELSON, K.A. Model predictive control for power optimization in a hydrostatic wind turbine. **The 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power**, Linköping, Sweden, p. 155–160. 2013.

WILLIAMS, R.; SMITH, P.; EATON CORP. **Hydraulic wind turbines?** machine design. 2010. Disponível em http://machinedesign.com/article/hydraulic-wind-turbines-0420. Acesso em: 16 nov. 2019.

XIA, L.; QUAN, L.; GE, L.; HAO, Y. Energy efficiency analysis of integrated drive and energy recuperation system for hydraulic excavator boom. **Energy Conversion and Management**, v. 156, p. 680-687, 2018.

YUEHUA, S.; YANJUN, ZHANG.; QINGQUAN, H. Hydraulic comprehensive experiment **Heilongjiang Science and Technology Press**, China, p. 47-48, 2008.

ZHENG, X.Y.; LEI, Y. Stochastic response analysis for a floating offshore wind turbine integrated with a steel fish farming cage. **Applied Sciences**, v. 8, 2018.