



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO ENGENHARIA QUÍMICA

GRAZIELE RIBEIRO SANTOS

ESTUDO DE PERDA DE CARGA DE UM
DESGASEIFICADOR NA PRODUÇÃO DE H₂

JOÃO PESSOA

2021

GRAZIELE RIBEIRO SANTOS

**ESTUDO DE PERDA DE CARGA DE UM DESGASEIFICADOR NA
PRODUÇÃO DE H₂**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do curso de Engenharia Química, do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal da
Paraíba como parte dos requisitos para a obtenção do
Bacharelado em Engenharia Química.

Orientadora:

Prof^ª. Dra. Sharline Florentino de Melo Santos

Examinadora:

Prof^ª. Dra. Nataly Albuquerque dos Santos

Examinador:

Me. Romário Cardoso Leal

JOÃO PESSOA

2021

Catálogo na publicação
Seção de Catálogo e Classificação

S237e Santos, Grazielle Ribeiro.

ESTUDO DE PERDA DE CARGA DE UM DESGASEIFICADOR NA
PRODUÇÃO DE H₂ / Grazielle Ribeiro Santos. - João
Pessoa, 2021.
33 f. : il.

Orientação: Sharline Florentino de Melo Santos.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. hidrogênio, perda de carga, desgaseificador. I.
Santos, Sharline Florentino de Melo. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 691

GRAZIELE RIBEIRO SANTOS

ESTUDO DE PERDA DE CARGA DE UM DESGASEIFICADOR NA PRODUÇÃO DE H₂

Trabalho Final de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

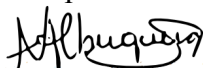
Trabalho aprovado em: 01/07/2021

BANCA EXAMINADORA



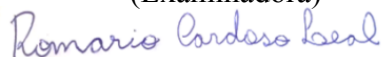
Prof. Dra. Sharline Florentino de Melo Santos- DEQ/ CT/ UFPB

(Orientadora e presidente da banca)



Prof. Dra. Nataly Albuquerque dos Santos- DTA/ CTDR/ UFPB

(Examinadora)



Me. Romario Cardoso Leal- DQ/ CCEN/ UFPB

(Examinador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela fonte de vida, saúde, força e graça.

A minha família pelo apoio e motivação, principalmente a minha mãe Lucineide Barbosa Ribeiro e meu pai Edmilson Joaquim dos Santos que sempre incentivaram meus estudos, apesar das dificuldades enfrentadas.

Aos meus orientadores durante a graduação pela orientação, paciência e por terem contribuído de modo inigualável para a minha formação, influenciando minhas escolhas e assim permitindo que eu alcançasse voos cada vez maiores.

A Capes por ter fomentado a bolsa de estudos de graduação sanduíche pelo programa BRAFITEC. Ao Institut National des Science Appliquées de Toulouse por ter me aceitado e contribuído para minha formação profissional, a Bertin Technologies por ter sido uma empresa que me acolheu como parte da família durante o estágio e desenvolvimento desse e outro projetos.

A Joana Angélica, pela parceria, auxílio e diversão durante esses anos de pesquisa e estudos. A David Dacharry, Dominique Goffe, e todos que contribuíram diretamente ou indiretamente no desenvolvimento e término deste trabalho.

RESUMO

O interesse de diversos países em utilizar as energias renováveis em suas matrizes energéticas aumentou. A população mundial vem crescendo e impulsionando o aumento na demanda por energia e o uso de combustíveis fósseis está impactando negativamente o meio ambiente. O hidrogênio é uma opção de fonte renovável e as pesquisas nesta área estão rapidamente sendo concentradas na geração de energia elétrica, térmica e de água pura através das células a combustível. O mercado ainda enfrenta diversos desafios tecnológicos para serem superados, principalmente para geração de energia descentralizada, visto que as soluções atuais de produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio permanecem complexas e dentro do processo de produção existem diversos riscos associados, como vazamento, corrosão e explosão que devem ser controlados. O objetivo deste trabalho foi estudar a perda de carga de um desgaseificador, que faz parte do sistema de ventilação de um piloto de produção de hidrogênio descentralizado, a fim de entender quais elementos estavam causando baixo fluxo de ventilação e consequentemente aumentando o risco de explosão do sistema. Os resultados mostraram elementos como filtros e persianas como os maiores responsáveis pela maior perda de carga. Por fim, foram sugeridos ventiladores capazes de melhorar a ventilação da unidade. Os resultados e cálculos foram parcialmente apresentados por questões de confidencialidade.

Palavras-chave: hidrogênio, perda de carga, desgaseificador.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	7
2.OBJETIVOS	12
2.1. Objetivo geral	12
2.2. Objetivos Específicos	12
3.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1 Produção de H ₂ em alta pressão por eletrólise da água	13
3.2 Sistema de Ventilação	14
3.2.1 Zonas de Atmosferas Explosivas (ATEX)	14
3.2.2 Desgaseificador	15
3.2.3 Perda de Carga	16
3.3 Principais tipos de ventiladores	17
6.METODOLOGIA	20
4.1 Modelagem da perda de carga	20
4.1.1 Entrada de ar	22
4.1.2 Zona úmida	23
4.1.3 Zona seca	23
5.RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
5.1 Entrada de ar	25
5.2 Zona úmida	25
5.3 Zona seca	26
6. CONCLUSÃO	30
7. REFERÊNCIAS	31

1. INTRODUÇÃO

O interesse de diversos países em utilizar as energias renováveis em suas matrizes energéticas aumentou. A população mundial vem crescendo e impulsionando o aumento na demanda por energia e o uso de combustíveis fósseis está impactando negativamente o meio ambiente. Assim, reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e investir em fontes renováveis é imprescindível para a preservação ambiental.

Tendo em vista que as reservas de combustíveis fósseis são limitadas, na posse apenas de alguns países, provocando assim oscilações de preços, diferentes pesquisas são desenvolvidas a fim de obter combustíveis alternativos que tenham potencial de escala para que seu uso seja incentivado a nível mundial, como é o caso da biomassa, energia eólica, geotérmica e solar.

O hidrogênio é uma opção de fonte renovável e as pesquisas nesta área estão rapidamente sendo concentradas na geração de energia elétrica, térmica e de água pura através das células a combustível. O hidrogênio pode ser produzido de diferentes formas, sendo as principais: processamento de hidrocarbonetos que é método mais empregado e por eletrólise da água, sendo a última a solução mais limpa para sua produção (SOUZA, et al. 2008).

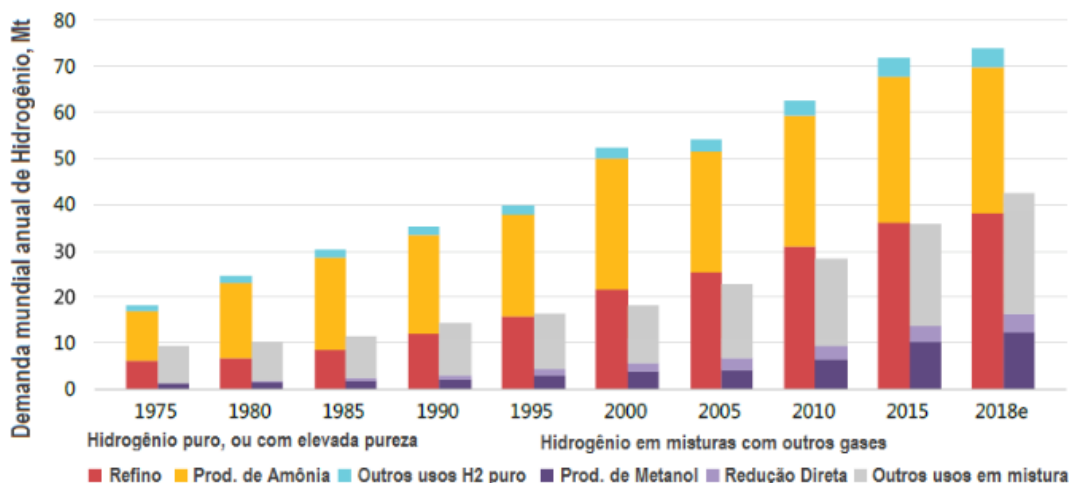
Em 2018, a demanda mundial por hidrogênio foi de 115 Mt, sendo 73 Mt de hidrogênio puro (IEA, 2019a). Já a demanda por hidrogênio em misturas com outros gases foi de 42 Mt. O mercado de hidrogênio atingiu um novo momento com anúncios por diversos governos de seus planos estratégicos para o aproveitamento desse recurso como elemento fundamental para a transição energética (EPE, 2020).

O hidrogênio (H_2) possui diversas vantagens como alta densidade energética, sua energia pode chegar aproximadamente a 2,5 vezes mais que o propano, gasolina e metano entre os demais, durante a combustão (CABRAL, et al 2014). Apresenta também versatilidade de uso, é um combustível sem carbono (carbon-free) e pode funcionar como vetor de armazenamento de energia.

De acordo com a figura 1, é possível identificar o crescimento da demanda mundial por hidrogênio de 1975 até 2018, visto que este é utilizado em diversos

processos, desde o hidrocraqueamento de corrente de petróleo para obtenção de maiores rendimentos em derivados leves, na produção de amônia, em uso puro ou em mistura com outros gases para fins industriais e hospitalares.

Figura 1 . Evolução da demanda mundial por hidrogênio



Fonte: IEA (2019a)

Em 2017, o comércio internacional de hidrogênio movimentou cerca de 11,75 bilhões de dólares, sendo os maiores exportadores os Estados Unidos, Alemanha e Coreia do Sul. O Brasil teve participação de 335 milhões de dólares (EPE, 2020).

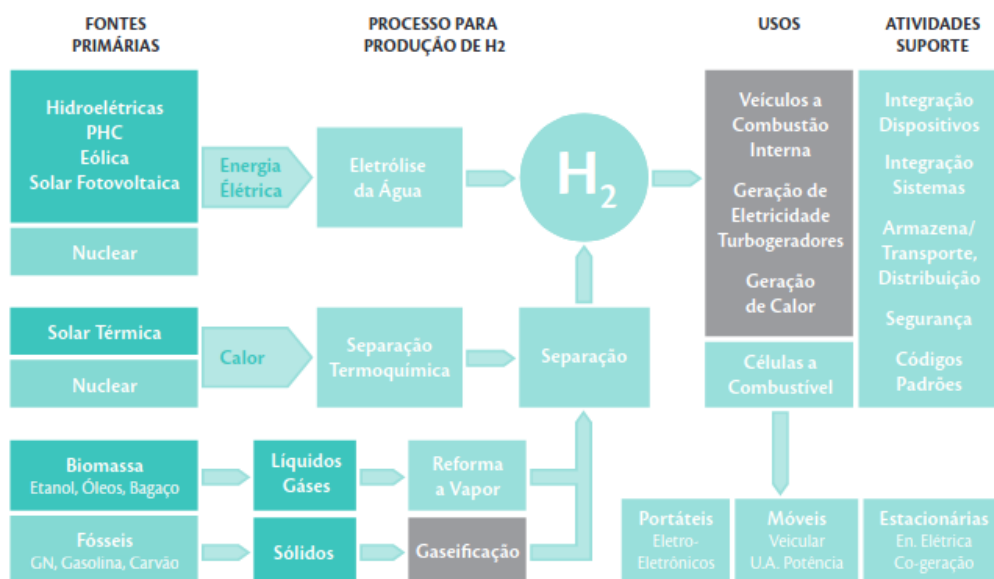
Com a perspectiva de crescimento do mercado de hidrogênio para fins energéticos, diversos países, principalmente os que fazem parte da União Europeia, estão aumentando os investimentos em pesquisas e testes em plantas pilotos.

O hidrogênio pode ser utilizado em células a combustível, que são dispositivos que convertem o hidrogênio, ou um combustível rico neste elemento e um oxidante, podendo ser oxigênio puro ou o oxigênio do ar, diretamente em eletricidade. Dentro das rotas disponíveis para sua produção, a reforma de vapor de metano é a tecnologia mais utilizada, com 73% da capacidade instalada mundialmente (PNLL, 2020a).

Conforme a figura 2, existem várias rotas de produção do hidrogênio, a rota da reforma a vapor do metano processa-se a altas temperaturas, requerendo grandes energias, além disso o metano não é um combustível de fonte renovável. É possível também ser obtido através de fontes renováveis como reforma a vapor do etanol, ou

conversão de biomassa através de gaseificação ou processos biológicos como a biodigestão.

Figura 2. Possíveis rotas para produção e utilização do hidrogênio como vetor energético.



Fonte: EPE (2020)

O processo que converte água em hidrogênio é a eletrólise, um processo químico não espontâneo no qual ocorre a decomposição eletroquímica de uma substância pela passagem da corrente elétrica, essa corrente pode ser de origem renovável seja eólica, solar ou hidráulico, e no fim é obtido hidrogênio com teor nulo de carbono (PALHARES, 2016).

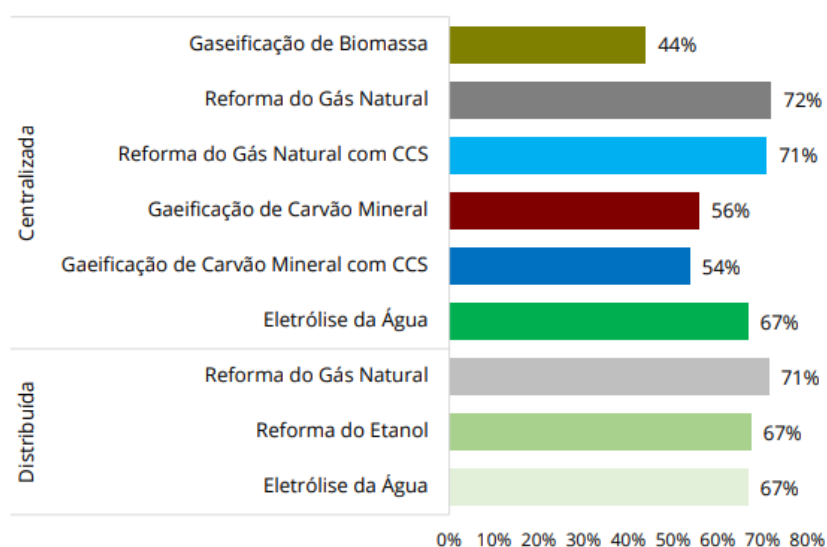
De acordo com a Agência Internacional de Energia (2019), atualmente, 99% do hidrogênio usado como combustível é produzido a partir de fontes não-renováveis, sendo 76% a partir do gás natural e 23% do carvão mineral. E menos de 0,1% é produzido por meio da eletrólise da água.

Cada rota possui eficiência de conversão diferente, para geração pode ser feita em 2 modalidades, geração de energia centralizada ou distribuída. Na geração centralizada, as grandes usinas concentram uma alta potência de geração, e distribuem para uma quantidade alta de pessoas através de cabos de transmissão maiores, mais altos e com alta tensão, até as redes de distribuição, enquanto que na geração

distribuída, unidades menores geram em vários locais diferentes, na maioria dos casos se conectam diretamente com as linhas de distribuição (INSOL, 2021).

As rotas que possuem maior eficiência na produção de hidrogênio, são reformadas a vapor com cerca de 71%. A eletrólise da água, por sua vez, também apresenta eficiência alta, cerca de 67%, ambas independente do tipo de geração, conforme pode ser observado na figura 3.

Figura 3. Eficiências típicas de conversão em processos de produção de hidrogênio



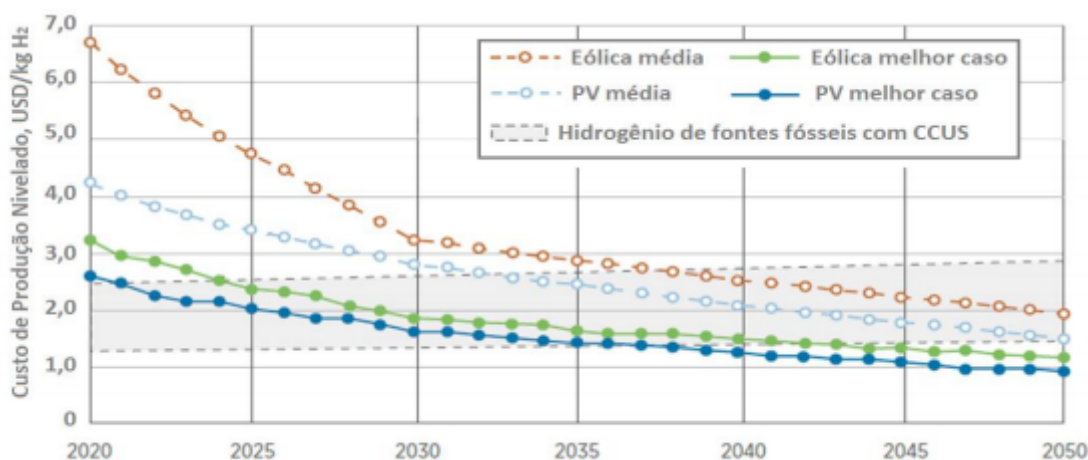
Fonte: PNNL (2020b)

A gaseificação é a rota que apresenta menor eficiência dentre as apresentadas, seja de biomassa, do carvão mineral ou carvão com CCS (Carbon capture and sequestration) apresentam 44%, 56% e 54% respectivamente.

Dentro das rotas apresentadas, as que são baseadas em fósseis são as mais baratas no âmbito de custo na faixa de 0,9 a 3,2 US\$/kg, a eletrólise da água com energia fotovoltaica (PV) mais cara na faixa de 5,78 a 23,27 US\$/kg (EPE,2020).

Os projetos atuais apontam por expectativas na redução dos custos, tornando-se competitiva em 2030, ampliando sua vantagem sobre o H₂ de combustíveis fósseis até 2050 (BNEF, 2020). Outros estudos apontam uma redução dos custos em 60% até 2030(HYDROGEN COUNCIL, 2020)

Figura 4. Projeção dos custos na produção de hidrogênio.



Fonte: Irena (2019)

Irena (2019), em seu estudo, mostra que os custos podem ser reduzidos antes de 2025, devido à expectativa de se tornar competitivo no mercado. Entre 2030 e 2040 os custos médios equivalerão aos do hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis, conforme pode ser observado na figura 4.

Além dos custos, o mercado ainda enfrenta desafios tecnológicos para serem superados, principalmente para geração de energia descentralizada, visto que as soluções atuais de produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio permanecem complexas e dentro do processo de produção existem riscos associados, como vazamento, corrosão e explosão que devem ser controlados.

Diversas plantas pilotos usam um sistema de produção com compressão mecânica e armazenamentos que são difíceis para escala e que não atendem as expectativas. Durante a produção do H_2 é necessário que haja controle rigoroso, em termos de fluxo, temperatura e pressão, além de um sistema de ventilação eficiente, de modo que reduza os riscos de acidentes, principalmente em zonas de atmosferas explosivas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Este trabalho objetivou estudar o sistema de ventilação de um desgaseificador na produção de hidrogênio em alta pressão, definindo um perfil de perda de carga do sistema.

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar a modelagem da perda de carga do desgaseificador e dos filtros anti-névoa/anti-poeira, utilizando as correlações de momento de perda de carga EI. Idel'cik.
- Identificar os elementos de maior contribuição que geram a perda de carga no sistema.
- Encontrar um modelo de ventilador que atenda às exigências técnicas em termos da pressão estática e em zona de atmosfera explosiva (ATEX).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Produção de H₂ em alta pressão por eletrólise da água

O hidrogênio verde é produzido a partir de eletrólise da água, associado com outras fontes de energia renovável, visando a geração de energia e descarbonização na transição energética.

A eletrólise da água consiste na separação de suas moléculas nos gases hidrogênio e oxigênio pela passagem de corrente elétrica contínua. A corrente flui entre dois eletrodos separados e imersos em um eletrólito, o qual tem a função de aumentar a condutividade iônica do meio (URSÚA *et al*, 2012).

Para melhorar a eficiência do sistema eletrolítico: pode-se reduzir termodinamicamente a energia necessária para a reação, aumentando a temperatura ou a pressão; ou minimizando as perdas de energia na célula eletrolítica, o que pode ser feito reduzindo as resistências dominantes (ZENG; ZHANG, 2010).

Diante da corrida tecnológica que vem ocorrendo na Europa principalmente, onde utilização do hidrogênio como vetor energético é uma realidade, a produção de hidrogênio é feita geralmente por eletrólise da água junto com outra energia renovável, utilizando armazenamento pressurizado e compressão mecânica.

O presente trabalho, visou estudar o sistema de ventilação de uma planta piloto de H₂ de uma startup que possui uma solução inovadora para o abastecimento descentralizado de hidrogênio, integrando, além da função de produção, armazenamento adicional (sem hidrogênio pressurizado), compressão (eletroquímica) e retorno de energia. Utilizando tecnologia de eletrólise, vencedora da competição mundial de inovação, que se distingue por um desacoplamento ao longo do tempo da liberação de gás oxigênio e hidrogênio.

Este sistema é baseado em um processo de eletroquímica do zinco, funciona por lote e atinge hidrogênio de alta pureza em altas pressões. Na figura 5, mostra o protótipo do equipamento, em armário, dividido em 3 partes: uma parte líquida contendo o reator, uma parte gasosa contendo o armazenamento e a linha de gás e a parte elétrica alimentado por painel fotovoltaico, responsável pelo controle do piloto. Uma sub parte do compartimento de líquido, chamado de degaseificador, tem ventilação independente.

Figura 5. Protótipo do piloto de hidrogênio.



Fonte: Arquivo Pessoal

3.2 Sistema de Ventilação

3.2.1 Zonas de Atmosferas Explosivas (ATEX)

Uma atmosfera explosiva é uma mistura de ar, sob condições atmosféricas, com substâncias inflamáveis na forma de gás, vapor ou poeira, as quais, depois da ignição, permitem a auto-sustentação da propagação (WEG, 2020).

Dentro de um planta deve haver classificações em zonas, que indicam a quantidade de mistura explosiva no local. Segundo a norma IEC60079, a zona 0 é o local onde a formação de uma mistura explosiva é contínua ou existe por longos períodos. Zona 1 é a área onde a formação de uma mistura explosiva é provável de acontecer em condições normais de operação do equipamento de processo. Zona 2: área na qual uma atmosfera explosiva de gás é pouco provável de acontecer.

A fim de reduzir os acidentes industriais, é necessário seguir os requisitos de segurança. Nos ambientes classificados, é exigido o uso de equipamentos certificados que sejam compatíveis para funcionamento em zonas ATEX.

No caso da eletrólise, o risco de explosão é alto, pois o H_2 e o O_2 são produzidos simultaneamente. Embora as células sejam separadas por membranas, uma vedação perfeita nunca é alcançada e, portanto, há um risco significativo de formação de uma mistura explosiva H_2 e o O_2 . Este tipo de risco já é conhecido para eletrolisadores convencionais. No entanto, é mais difícil de ser controlado no caso de eletrólise de alta temperatura ou alta pressão (TIGREAT, 2008).

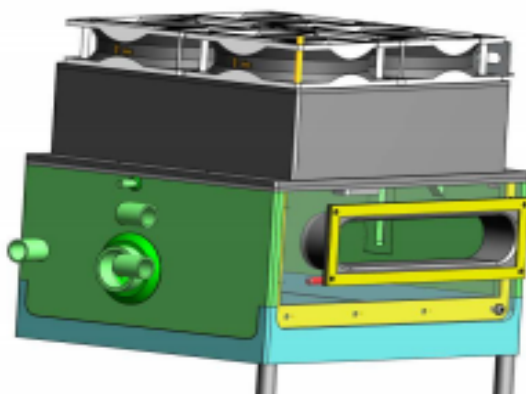
3.2.2 Desgaseificador

Um desgaseificador ou desaerador é um equipamento utilizado para remover os gases dissolvidos na água. É um equipamento bastante utilizado na indústria, na indústria de refino e alimentícia, geralmente são acoplados em caldeiras.

A solubilidade dos gases na água é afetada diretamente pela pressão parcial que esses mesmos gases fazem no líquido na atmosfera que o circunda. Se a pressão parcial causada por esses gases for diminuída ao redor do líquido, automaticamente, a capacidade desses gases de se dissolver nele também diminuirá. O resultado, será a eliminação desses gases para o ar e saem do aparelho (TSA, 2018).

Durante a eletrólise da água, o oxigênio é liberado e sai através do desgaseificador do processo. Na figura 6 é possível ver o modelo 3D do equipamento.

Figura 6. Desgaseificador 3D.



Fonte: Arquivo pessoal

O desgaseificador é instalado na cabeça do compartimento de líquido e permite a diluição dos gases produzidos durante a operação do sistema. Acima do equipamento são acoplados ventiladores para auxiliar na evacuação dos gases.

A operação desta instalação está exposta ao risco de explosão, este caso pode ser encontrado quando o hidrogênio é misturado com um oxidante em proporções entre os limites de inflamabilidade inferior e superior. Esta mistura deve em seguida, encontrar uma fonte de ignição, como uma faísca, uma chama, uma superfície quente. No entanto, o hidrogênio é um gás particular, uma vez que risco de iniciação espontânea é possível sob certas condições. Por essas razões, um fluxo mínimo de ventilação deve ser garantido pelo desgaseificador.

3.2.3 Perda de Carga

Existem dois aspectos das perdas de pressão: as perdas por atrito ΔH_t e as perdas singulares ΔH_m . As perdas por atrito são causadas pela viscosidade de líquidos e gases reais, surgem quando há movimento e resultam de uma troca de momento entre as moléculas (fluxo laminar) ou entre as várias partículas (fluxo turbulento) das camadas adjacentes de líquido ou gás, que se movem com velocidades diferentes (IDEL'CIK, 1969).

As perdas de carga singulares ocorrem quando há uma perturbação do fluxo normal, aderência da parede e a formação de vórtices em locais onde há uma mudança de seção ou direção do tubo ou a presença de obstáculos (entrada no tubo, alargamento, estreitamento, curvatura e ramificação, fluxo através de aberturas, telas, dispositivos de obturação ou estrangulamento, filtra o através de um corpo poroso, fluxo em torno de vários obstáculos, etc.) (IDEL'CIK, 1969).

Todas as formas de perdas de pressão singulares, com exce o das quedas de pressão dinâmicas na saída do sistema, ocorrem em um comprimento maior ou menor do tubo e não podem ser separadas das perdas por atrito. Porém, para conveniência do cáculo, concorda-se em consider -los concentrados em um trecho e não incluindo as perdas por atrito. O somatório   realizado de acordo com o princípio da sobreposi o de perdas, da qual tomamos a soma aritmética das perdas por atrito e as perdas singulares (IDEL'CIK, 1969).

Nos c culos hidráulicos, um coeficiente adimensional   convenientemente usado porque, em fluxos dinamicamente semelhantes (semelhança geométrica das se o es, identidade dos números Reynolds, bem como dos outros cr terios de semelhança

se seu papel for essencial), tem o mesmo valor, seja qual for a natureza do líquido, a velocidade do fluxo e as dimensões das seções consideradas.

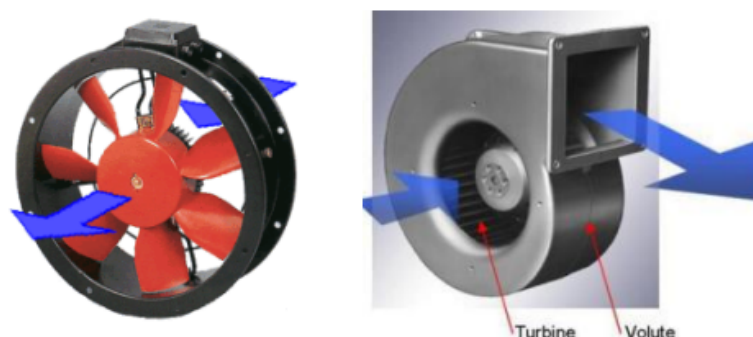
3.3 Principais tipos de ventiladores

Um ventilador essencialmente é um equipamento que opera com gás. São considerados turbomáquinas geratrizes de fluido que se destinam a produzir deslocamento de gases. Podem ser classificados, segundo seu nível energético, de baixa a altíssima pressão, segundo o fluxo radial, axial, tangencial, forma das pás, número de rotores, entre outros (ANDRADE, 2015).

O ventilador centrífugo ou radial: o ar é sugado em paralelo ao eixo de rotação e impulsionado por força centrífuga perpendicular ao mesmo eixo. Os ventiladores centrífugos têm uma capacidade de fluxo menor do que ventiladores axiais, mas permitem diferenças de pressão significativamente maiores (ENERGIE PLUS, 2019).

Ventiladores axiais: o ar é sugado e impulsionado paralelamente ao eixo de rotação do ventilador, serve para renovar uma determinada quantidade de ar de um ambiente em função da temperatura e de CO gerado nele, eles permitem altas taxas de fluxo, são frequentemente barulhentos (CORBARI,2021). Alguns progressos recentes, no entanto, permitem que alguns fabricantes obtenham características semelhantes a ventiladores centrífugos, com níveis de ruído apenas ligeiramente mais elevados. Esses ventiladores também são muito fáceis de instalar e baratos. A figura 6 apresenta ventiladores tipo radial e axial.

Figura 6. Ventilador axial e radial.



Fonte: Energie plus (2019)

Ventiladores tangenciais: são ventiladores cuja eficiência não excede 60%. No entanto, é normalmente usado em dispositivos onde o espaço disponível é muito limitado, como: condicionadores de ar e cortinas de ar. (EBMPAPST, 2021).

Figura 7. Ventilador tangencial.



Fonte: EBMPAPST (2021)

Exaustor de teto: são projetados para caber facilmente na parte superior dos dutos. Eles são projetados para a extração de ar viciado, permitindo que o ar novo entre naturalmente renovando o ar. Podem ser radial ou axial e, portanto, têm as mesmas características dessas duas grandes famílias. Em termos de ruído, a rejeição vertical é sempre preferível à rejeição horizontal, porque as ondas sonoras são mais facilmente dispersas na atmosfera.

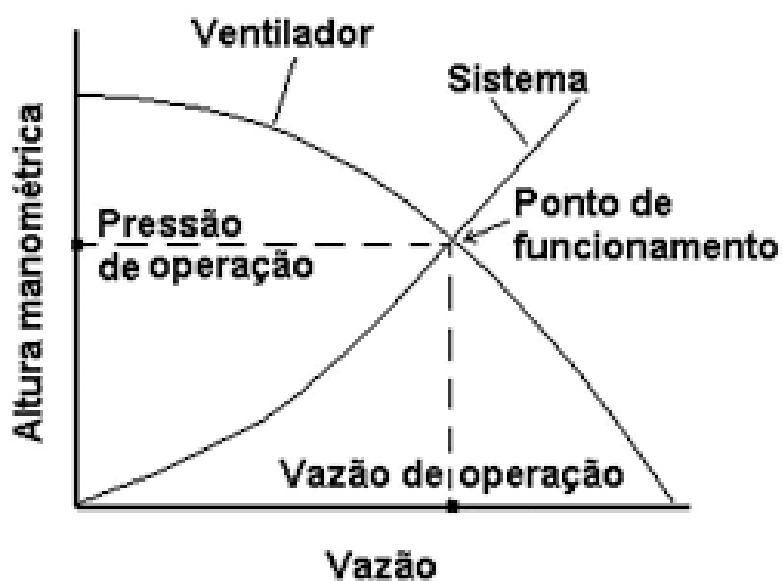
Figura 8. Exaustor de teto



. Fonte: EBMPAPST (2021)

Cada tipo de ventilador possui características próprias em relação à pressão total, vazão e potência absorvida. Para escolher o que se adequa ao sistema, é necessário traçar a curva de perda de carga do circuito na curva do ventilador e assim encontrar o ponto de operação do ventilador de acordo com a figura 9.

Figura 9. Ponto de funcionamento de um ventilador.



Fonte: Embrapa (2013)

4. METODOLOGIA

Para criar um modelo paramétrico de perda de carga foram utilizadas as correlações da literatura de Momento de Perda de Carga do I.E. Idel'cik (1969) em uma planilha de cálculo em arquivo Excel e uma macro com funções de interpolação em 1D e 2D com código programado em VBA.

O objetivo da planilha é definir a pressão estática do circuito em função da vazão. O usuário pode escolher tanto o fluxo mínimo quanto o fluxo máximo do estudo. As características do ar são usadas nas diferentes correlações do momento de perda de carga, são calculadas automaticamente de acordo com a temperatura especificada.

Os resultados deste estudo, não foram detalhados por razões de confidencialidade, visto que foram realizados em conjunto com duas empresas privadas estrangeiras.

4.1 Modelagem da perda de carga

Perdas de carga singulares ocorrem quando há distúrbio de fluxo. Tendo em vista as dimensões do desgaseificador, as perdas por atrito são consideradas insignificantes.

A perda de carga total do circuito é igual à soma das perdas dos elementos identificados.

Para um circuito com n acidentes, temos:

$$\Delta P_{\text{circuito}} = \sum_{i=1}^n \Delta P_i$$

A perda de carga do elemento é calculada por:

$$\Delta P_i = \zeta_i \times \frac{\gamma_i}{2g} \times \omega^2$$

com,

ζ_i coeficiente de perda de carga do acidente identificado;

γ_i peso específico do fluido,

ω velocidade média do fluxo em m / s.

O termo do peso específico, pode ser substituído por ρ - densidade do fluido em kg / m^3 .

De acordo com os dados de entrada segundo geometria do desgaseificador, é possível realizar cálculos intermediários, como número de Reynolds e diâmetro hidráulico.

$$Re = \frac{w_o D_h}{\nu}$$

w_o velocidade média do fluxo na seção, m / s .

D_h diâmetro hidráulico;

ν viscosidade cinemática do fluido;

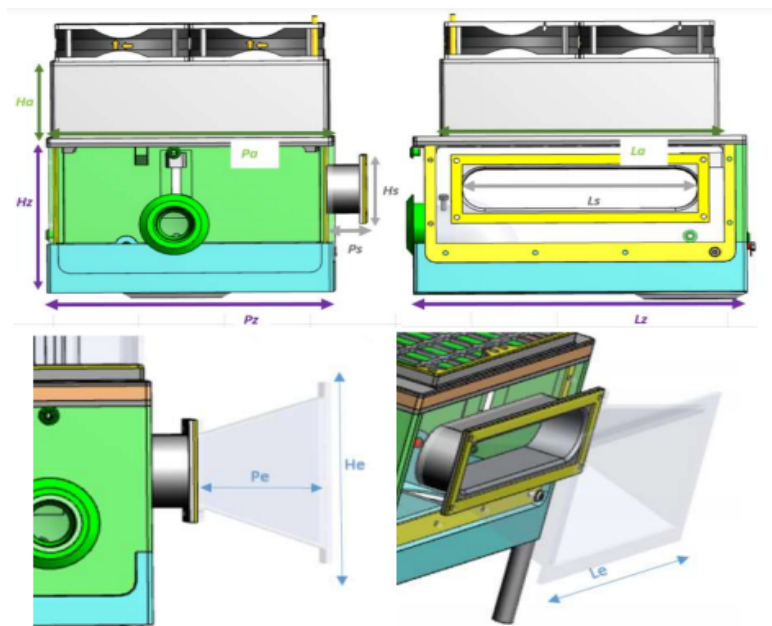
$$D_h = \frac{4F_o}{\Pi_o}$$

F_o área de um seção de tubo ou canal, m^2 ;

Π_o Perímetro da seção de tubo ou canal, m .

O desgaseificador possui diversas geometrias e dados de entrada para cada zona conforme figura 10.

Figura 10. Modelagem do desgaseificador com parâmetros de entrada.



Fonte: Arquivo pessoal

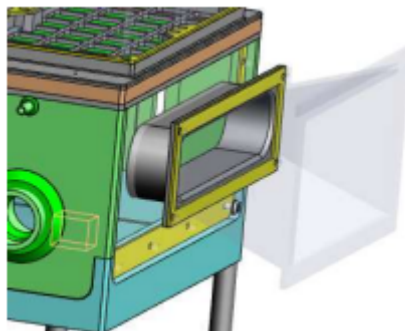
4.1.1 Entrada de ar

A função da entrada do desgaseificador é permitir que o ar entre com fluxo suficiente livre de poeira, insetos ou água. Para isso, esta área é fornecida com persianas, um filtro para insetos, bem como um filtro anti-poeira.

Os filtros anti-névoa e anti-poeira foram testados. Esses elementos causam uma queda significativa de pressão no circuito. Os filtros são então colocados a montante dos ventiladores. As medições de fluxo permitem determinar a pressão estática do circuito e, portanto, calcular a contribuição do filtro.

Um convergente é colocado entre a entrada localizada na fachada da instalação e o desgaseificador. Ele permite o fluxo de ar para a área úmida. A zona de entrada termina com um trecho reduzido em direção à zona úmida. Este alargamento entre a entrada de ar e a zona húmida é um elemento considerado no cálculo de perda de carga.

Figura 11. Entrada de ar e parte convergente do desgaseificador (cinza claro)



. Fonte: Arquivo pessoal

A partir do livro Momento de Perda de Carga Idel'cik (1969), foi possível calcular os coeficientes ζ_i de cada seção com as correlações e diagramas disponíveis na literatura. No total, foram utilizados 13 diagramas, segundo a geometria do desgaseificador.

- Entrada de ar: capítulo 3 - diagrama 3.11| Geometria: Entrada com parede frontal

- Persianas: capítulo 3 - diagrama 3.22| Geometria: Entrada em um canal reto através de grades elaboradas formadas a partir de uma placa perfurada ou fundida, com aberturas de qualquer formato.
- Filtro anti-inseto: capítulo 8 - diagrama 8.6| Geometria: Grelhas com grades de ferro.
- Filtro anti-poeira: modelo específico tópico 4.1.2
- Convergente: capítulo 3 - diagrama 3.7| Geometria: Entrada com redução progressiva (convergente) $Re > 10^4$

4.1.2 Zona úmida

A zona úmida está conectada ao núcleo eletroquímico e deve possibilitar recuperação de qualquer liberação de H_2 , e evacuar o ar sempre que necessário. Foi calculada a taxa de ventilação mínima necessária para alcançar o limite inferior de explosão a partir de dados experimentais. Na zona úmida, encontram-se as seguintes seções e correlações:

- Alargamento repentino: capítulo 4 - diagrama 4.1| Geometria: Alargamento repentino para um fluxo com divisão uniforme de velocidades
- Cotovelo 90° : capítulo 6 - diagrama 6.6| Geometria: cotovelo com $0,5 < R/Dh < 1,5$ e ângulo de 180° .
- Encolhimento abrupto: capítulo 3 - diagrama 3.10| Geometria: Entrada com Encolhimento abrupto, seção de entrada na parede frontal com $Re < 10^4$
- Grade de suporte: capítulo 8 - diagrama 8.4| Geometria: grade espessa (chapa de metal perfurada ou grade de ripas).

4.1.3 Zona seca

A zona seca está localizada entre os filtros e os ventiladores. Estes são instalados na exaustão e permitem a evacuação dos gases. Dependendo da geometria do volume de recuperação e do tamanho do ventilador, esta zona pode ser uma seção reta, convergente ou divergente. Na zona seca, encontram-se as seguintes seções:

- Convergente: capítulo 3 - diagrama 3.7| Geometria: Entrada com redução progressiva (convergente) $Re > 10^4$
- Divergente: capítulo 5 - diagrama 5.3| Geometria: Difusor de seção retangular em uma rede.

Os dados de vazão para o cálculo dos coeficientes da perda de carga, foram utilizados a partir dos testes experimentais realizados na primeira versão do piloto, nesta versão, existem 4 ventiladores instalados no topo do desgaseificador. Entretanto, os ventiladores instalados na primeira unidade fabricada não permitiam que o fluxo desejado fosse alcançado. Os testes foram realizados sem e com filtros.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Entrada de ar

A zona de entrada de ar corresponde à área com maior contribuição em termos de perdas de carga. Os elementos mais impactantes são:

- Filtro anti- poeira,
- Persianas,
- Filtro anti-inseto

Os parâmetros modificáveis relativos a esta zona são as dimensões da entrada de ar. A altura (H_e) e a largura (L_e) da seção de entrada têm uma contribuição importante. A fim de reduzir a pressão estática do circuito, é aconselhável aumentar a superfície de entrada e, em particular, a altura para a qual existem menos restrições em termos de tamanho ou limite máximo.

5.2 Zona úmida

A zona úmida tem uma contribuição menor para a pressão estática do circuito, mas não insignificante. Os elementos mais importantes são:

- Ampliação abrupta,
- O filtro anti-névoa,
- O cotovelo de 90 °.

A altura H_s e a largura L_s da seção de entrada podem ser facilmente alteradas e têm uma contribuição importante para a pressão estática do circuito.

A fim de reduzir a pressão estática do circuito, é recomendado aumentar a seção de entrada. Em relação ao impacto das dimensões do volume de recuperação, a altura H_z não tem um impacto significativo. Mesmo aumentando consideravelmente H_z , altura do volume de recuperação do degaseificador, não impactou de uma forma significativa.

Em relação ao impacto da superfície zona úmida, vários casos foram simulados, modificando os parâmetros de largura, altura, comprimento, para diferentes configurações de zona de recuperação considerando diferentes níveis de vazão em m^3/h . Com as modificações foi possível perceber que quanto maior a superfície do filtro,

menor é a perda de carga. No total 5 casos foram estudados, percebeu-se então que a partir de um certo ponto no caso 3, o ganho na queda de pressão não era mais relevante.

5.3 Zona seca

Devido à geometria da zona seca, definiu-se como perda de carga nula sem os ventiladores. Ao acoplar os ventiladores, posteriormente pode ser considerado como um convergente ou divergente. Na folha de cálculo estão disponíveis duas possibilidades.

As persianas, os filtros e a entrada de ar, respectivamente, são responsáveis pelo aumento da perda de carga. Logo para diminuir deve-se aumentar as seções de abertura das persianas, e para o filtro aumentar a seção.

5.4 Escolha do ventilador adequado

O ventilador foi escolhido para fornecer um determinado volume de ar sob uma determinada pressão, considerando a queda de pressão máxima que pode existir na instalação.

Cada tipo de ventilador possui suas características em relação à pressão total, vazão e potência absorvida, portanto para a escolha é necessário traçar a curva de queda de pressão do circuito na curva do ventilador e assim encontrar o ponto de operação.

Considerando as dimensões do desgaseificador, vazão mínima e máxima e perda de carga calculada, encontrou-se uma vazão mínima necessária para ventilação do desgaseificador, no entanto, por questões de segurança, foi considerada uma vazão superior, 400 m³/h o que corresponde a um perda de carga de 125 Pa, para garantir o pleno funcionamento do piloto com redução de riscos de acidentes.

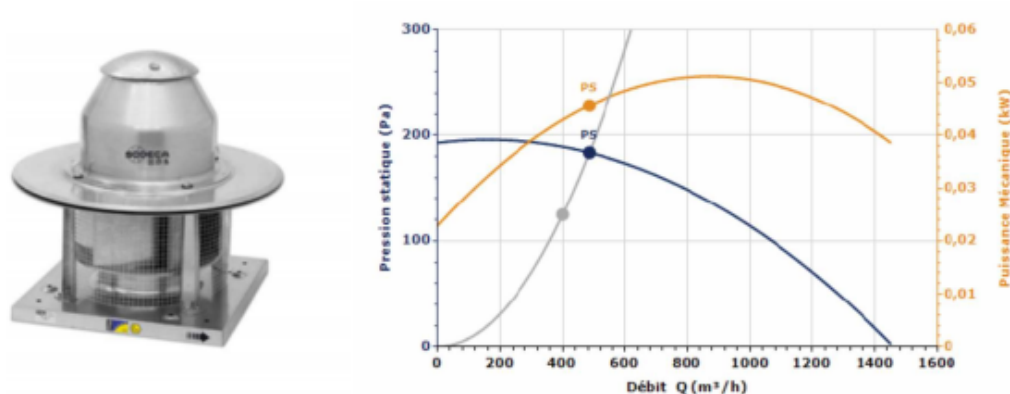
Por encontrar o ventilador adequado, foram consultados 14 fornecedores que possuem equipamentos certificados para zona de atmosfera explosiva, no entanto, alguns fornecedores não possuem ventiladores de baixa e média vazão de ventilação. Então afunilou-se os estudos para 5 fornecedores.

Dos tipos de ventiladores industriais disponíveis no mercado, apenas dois tipos são propostos: ventilador centrífugo ou exaustor de teto. Ventiladores axiais não atendem aos requisitos em termos de pressão estática e vazão.

Os seguintes ventiladores podem ser utilizados:

Na figura 12 mostra uma solução interessante adaptada às necessidades em termos de integração mecânica, o ponto de funcionamento está um pouco acima do escolhido.

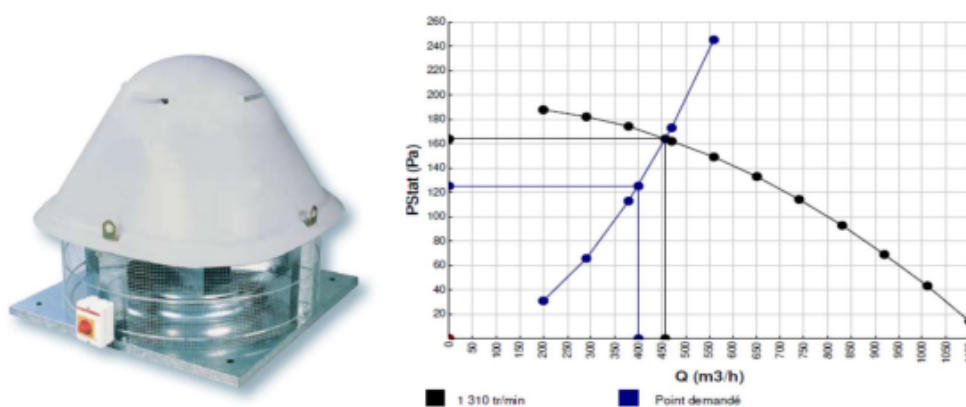
Figura 12. Ventilador exaustor de teto e curva característica



. Fonte: Sodeca (2019)

Na figura 13 mostra a solução proposta pela VIM, que é equivalente à da SODECA. A integração de um exaustor de teto. A instalação também é interessante e fácil integração.

Figura 13. Ventilador e curva característica.

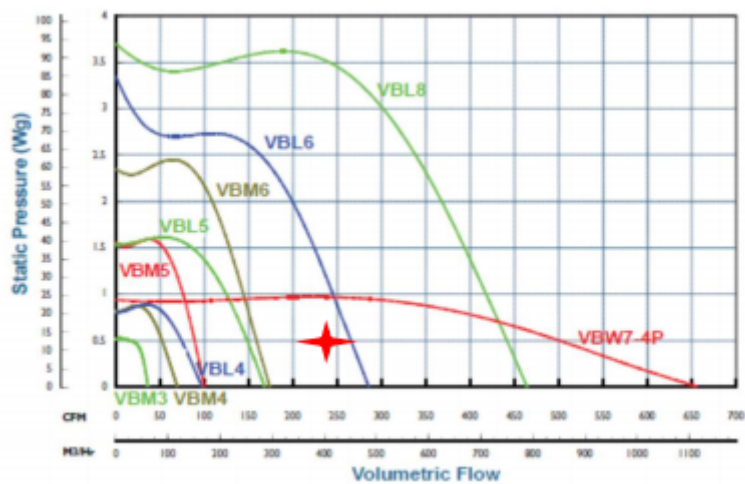


Fonte: VIM (2019)

Na figura 14 mostra a solução da ALMECO, na curva característica, é possível identificar faixa de pressão e vazão para diferentes modelos. Para os parâmetros deste

estudo, o modelo de ventilador VBL6 se adequa em termos de vazão mínima de ventilação.

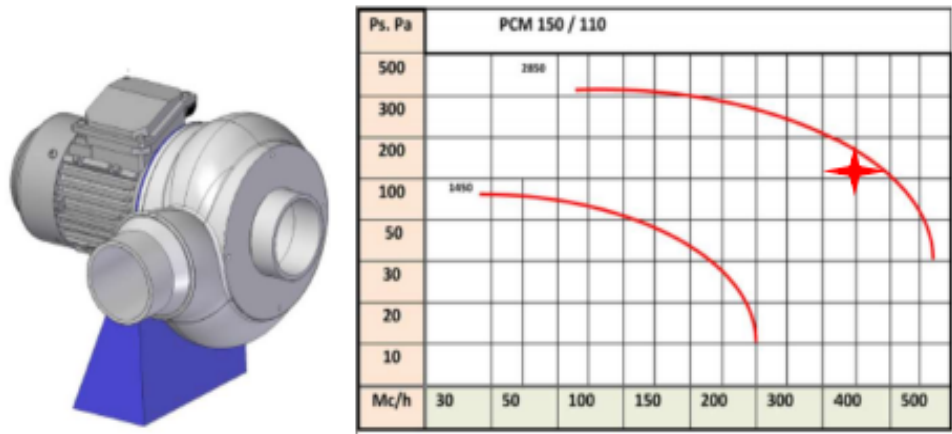
Figura 14. Curva característica.



Fonte: ALMECO (2019)

O ventilador da figura 15 do fornecedor Rosenberg, permite o bom funcionamento do piloto desde que tenha uma adaptação por ser um ventilador centrífugo.

Figura 15. Curva característica



Fonte: ROSENBERG (2019)

Dentre as opções acima, todos se adequam em termos de vazão e pressão estática, alguns com vazão um pouco maior, uma solução para isso seria adicionar um acessório, a fim de aumentar a queda de pressão estática e diminuir a taxa de fluxo do

ventilador, todos são equipamentos certificados para zona de atmosfera explosiva (ATEX), outro diferencial dentre os modelos acima, é o custo unitário, que varia entre 853 euros a 1509 euros que foram orçados em março de 2019.

6. CONCLUSÃO

Diante do modelo de desgaseificador, foi possível estudar sua geometria utilizando as correções da obra de referência para cálculos de perda de carga. O modelo paramétrico identificou os elementos tais como persianas, filtros e entrada de ar como os maiores responsáveis pela perda de carga, os quais estavam diminuindo a taxa de ventilação da primeira unidade fabricada.

Então para diminuir os impactos no sistema, é necessário aumentar o tamanho da entrada de ar de forma geral dentro do limite suportado pelo armário do piloto, aumentando também superfícies de abertura das persianas e sessões do filtro.

Foi proposto então quatro modelos de ventiladores certificados para zona de atmosfera explosiva que podem ser utilizados no topo do desgaseificador para garantir que o piloto mantenha um bom funcionamento, diminuindo assim os riscos de explosão visto que esse sistema é operado em altas pressões.

Os modelos dos fabricantes Vim e Sodeca são mais fáceis no quesito integração mecânica, pois são exaustores de teto, no entanto a solução do fabricante Vim, é mais alta em termos de preço, dentro das opções apresentadas.

7. REFERÊNCIAS

ALMECO. Industriële Ventilatoren. Disponível em: <<https://almeco.eu/nl/producten-diensten/industriële-ventilatoren>> Acesso em 15 de junho de 2021.

ANDRADE, A. S. Máquinas hidráulicas - ventiladores. Universidade Federal do Paraná. 2015.

BNEF – Bloomberg New Energy Finance (2020). Hydrogen Economy Outlook Key messages. Disponível em: <<https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-EconomyOutlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>>. Acesso em 15 de junho de 2021.

CABRAL, A.C. et al. HIDROGÊNIO UMA FONTE DE ENERGIA PARA O FUTURO. Revista Brasileira de Energias Renováveis, 2014.

CORBARI. Ventilador axial. Disponível em: <<https://www.corbari.com.br/ventilador-axial>> Acesso em 15 de junho de 2021.

DAUBECH, J. et al. Avis sur la gestion de la sécurité hydrogène au CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux en situations normale et accidentelle. França, 2014.

EBMPAPST. VENTILADORES. Disponível em: <https://www.ebmpapst.com.br/pt_br/products/overview.html>. Acesso em 15 de junho de 2021.

EMBRAPA. Comunicado Técnico - Construção de Ventiladores Centrífugos para Uso Agrícola. ISSN 2179-7757 Maio, 2013 Brasília, DF

ENERGIE PLUS. Ventilateurs Industriels. <<https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10869>>. Acesso em 15 de junho de 2021.

EPE. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. Nº EPE-DEA-NT-003/2021. Fevereiro, 2021.

HAMANN, C. H.; HAMNETT, A.; VIELSTICH, W. Electrochemistry. 2. ed. Weinheim; New York: Wiley-VCH, 2007. 531 p.

HYDROGEN COUNCIL (2020). Path to hydrogen competitiveness - A cost perspective. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wpcontent/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf>. Acesso em 13 de junho de 2021.

HYDROGEN COUNCIL (2021). Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. Disponível em: <<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights2021-Report.pdf>>. Acesso em 13 de junho de 2021.

IDEL'CIK. MEMENTO DES PERTES DE CHARGES. 1^a Édition - ISSN 03994198 . Éditeur Paris, Eyrolles - 1969

IEA – International Energy Agency (2019a). The Future of Hydrogen. Seizing today 's opportunities. Report prepared by the IEA for the G20, Japan. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/download/direct/2803>>. Acesso em 15 de junho de 2021.

IEA – International Energy Agency (2019b). Tracking Energy Integration 2019. IEA, Paris.<<https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration-2019>>. Acesso em 15 de junho de 2021.

IEA – International Energy Agency (2020a). Hydrogen production costs by production source, 2018, IEA, Paris <<https://www.iea.org/data-andstatistics/charts/hydrogen-production-costs-by-production-source-2018>>. Acesso em 15 de junho de 2021.

INSOL. Geração Centralizada x Geração Distribuída. Disponível em: <<https://insolenergia.com.br/blog/geracao-centralizada-x-geracao-distribuida->>. Acesso em 15 de junho de 2021.

IRENA – International Renewable Energy Agency (2019). Hydrogen: A renewable energy perspective. (Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, Japan). Abu Dhabi.

KNOB, D. Geração de hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica. 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo. 2013

MALOUINES, P. Prévention de risques physiques, directive équipements sous pression. Abril, 2008. Acesso em 15 de junho de 2021.

MH ASPIRATIONS. Climatiseurs adiabatiques et extracteurs en toiture . <<https://mhaspirations.com/galerie/climatiseurs-adiabatiques-extracteurs-toiture/>>. Acesso em 15 de junho de 2021.

PALHARES, D. D. de F. Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar - 2016. 101 f. : il.

PNNL - The Pacific Northwest National Laboratory (2020a). Hydrogen Production. (Planilhas: Merchant Hydrogen Plant Capacities in Asia, Merchant Hydrogen Plant Capacities in Europe, Merchant Hydrogen Plant Capacities in North America e Merchant Hydrogen Plant Capacities in the Rest of the World). The Hydrogen Analysis Resource Center (HyARC). Disponível em: <<https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-production>>. Acesso em 13 de junho de 2021.

PNNL - The Pacific Northwest National Laboratory (2020b). Hydrogen Production. (Planilha: Hydrogen Production Energy Conversion Efficiencies). The Hydrogen Analysis Resource Center (HyARC). Disponível em: <<https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-production>>. Acesso em 13 de junho de 2021

ROSENBERG. Ventilators. Disponível em: <<https://www.rosenberg-gmbh.com/en/applications/industrial-applications/explosion-protection>> Acesso em 13 de junho de 2021

SODECA. Soluções em ventilação. Disponível em: <<https://www.sodeca.com/pt/productos>> Acesso em 16 de junho de 2021

TIGREAT, D. Les techniques de production de l'hydrogène et les risques associés. Verneuil en Halatte Oise - 2008.

TS AMBIENTAL. In Desaeração. Disponível em: <<http://www.tsambientali.com.br/o-que-e-des aeracao-e-como-funciona-um-des aerador/>>. Acesso em 15 de junho de 2021.

URSÚA, A.; GANDÍA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. Proceedings of the IEEE, v. 100, n. 2, p. 410-426, 2012.

VIM. Ventilateurs. Disponível em: <<https://www.vim.fr/fr/12-ventilation>> Acesso em 15 de junho de 2021.

WEG. Atmosferas Explosivas Segurança e confiabilidade. Jaraguá do Sul - SC, 2020.

ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. Progress in Energy and Combustion Science, v. 36, n. 3, p. 307-326, 2010.