FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

Caio Felippe Cardozo Lima

Caíque Campagnaro Santana

Rodrigo Alpoin Piol

Renan Ferreira

CÁLCULO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE UMA TURBINA A GÁS UTILIZANDO HIDROGÊNIO

ARACRUZ

2019

Caio Felippe Cardozo Lima

Caíque Campagnaro Santana

Rodrigo Alpoin Piol

Renan Ferreira

CÁLCULO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE UMA TURBINA A GÁS UTILIZANDO HIDROGÊNIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do curso de Engenharia Mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Harerton Oliveira Dourado

ARACRUZ

2019

CAIO FELIPPE CARDOZO
LIMA CAÍQUE CAMPAGNARO
SANTANA RODRIGO ALPOIN
PIOL

RENAN FERREIRA

CÁLCULO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE UMA TURBINA A GÁS UTILIZANDO HIDROGÊNIO

Trabalho de conclusáo de curso apresentado à coordenadoria do curso de Engenharia Mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz, como re- quisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 29 de janeiro de 2020

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Haberton Oliveira Dourado
Faculdades Integradas de Aracruz
(Orientador)

Prof. Dr. Marcos Roberto Teixeira Halasz
Faculdades Integradas de Aracruz
(Examinador interno)

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que, de alguma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão dessa importante jornada em nossas vidas.

MUITO OBRIGADO.

RESUMO

O hidrogênio é um importante vetor energético, por possuir uma elevada densidade energética (quantidade de energia disponível por unidade de massa) e por seu uso energético direto não gerar nenhum outro efluente além de água. Assim, o hidrogênio pode desempenhar um importante papel em um sistema de energia limpo e sustentável. No entanto, o hidrogênio não é encontrado na natureza em sua forma molecular e precisa ser sintetizado industrialmente. As rotas tecnológicas mais comuns para a síntese do hidrogênio envolvem a reforma de hidrocarbonetos, situação na qual perde-se a sustentabilidade de seu ciclo produtivo. Uma outra possibilidade para a geração de hidrogênio são os ciclos termoquímicos industriais, nos quais o hidrogênio é um subproduto. Nesse caso, o aproveitamento energético do hidrogênio volta a ter características sustentáveis. Esse trabalho realizou o cálculo do potencial energético de uma turbina a gás movida a hidrogênio em um ambiente industrial. A quantidade de hidrogênio disponível foi levantada através de um balanço de massa e a quantidade de energia disponível foi calculada com base no poder calorífico inferior. Com a adequada escolha de alguns parâmetros operativos, como a taxa de compressão, quantidade de ar utilizada e temperatura de entrada da turbina, foi possível modelar um ciclo a gás simples, entregando cerca de 1 MW e operando com um rendimento energético de 28%, semelhante ao disponível na literatura para essa mesma faixa de potência.

Palavras-chave: Hidrogênio. Turbina a Gás. Potencial Energético.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do enunciado de Kelvin-Planck em um ciclo de potência 15

Figura 2 - Representação esquemática de uma turbina a gás.....17

Figura 3 - Representação esquemática de uma turbina a gás.....17

Figura 4 - Visão Aérea da Empresa 19

Figura 5 - Eficiências Típicas dos Sistemas de Potência a partir do Hidrogênio.....22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de Hidrogênio na Empresa 20

Tabela 2 – Consumo de Hidrogênio na Empresa.....20

Tabela 3 – Balanço da Produção e Consumo de Hidrogênio.....25

Tabela 4 – Propriedades do Ar na Entrada do Compressor.....28

Tabela 5 – Propriedades do Ar na Saída do Compressor.....30

Tabela 6 – Propriedades dos Gases na Entrada da Turbina 31

Tabela 7 – Propriedades do Ar na Saída da Turbina 32

LISTA DE SIGLAS

PCI Poder Calorífico Inferior

PCS Poder Calorífico Superior

TIT *Turbine Inlet Temperature* (temperatura de entrada da turbina)

LISTA DE SÍMBOLOS

c_P	calor específico
e	excesso de ar
h_i	entalpia específica
$\dot{m}$	vazão de massa
MM	massa molecular
p	pressão
$\dot{Q}$	taxa de transferência de calor
$\bar{R}$	constante universal dos gases
R	constante do gás
s	entropia específica
T	temperatura
v	volume específico
y	fração molar
$\dot{W}$	potência
β	taxa de compressão
$\Delta H°$	entalpia de reação
η	eficiência ou rendimento térmico

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS 4
RESUMO 5
LISTA DE FIGURAS 6
LISTA DE TABELAS 7
LISTA DE SIGLAS 8
LISTA DE SÍMBOLOS 9

1. INTRODUÇÃO 9

1.1. OBJETIVO GERAL 10
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 10

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 11

2.1. PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO 11
2.2. COMBUSTÃO DO HIDROGÊNIO 12
2.3. PODER CALORÍFICO INFERIOR 14
2.4. SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA 15
2.5. TURBINAS A GÁS 16

3. METODOLOGIA 19

3.1. ETAPA 1 – Levantamento de Dados 19
3.2. ETAPA 2 – Projeção da Quantidade de Potência 21
3.3. ETAPA 3 – Cálculo do Ciclo a Gás 22

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 25

4.1. CÁLCULO DA QUANTIDADE DE ENERGIA DISPONÍVEL 25
4.2. ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE ENERGIA A SER RECUPERADA 26
4.3. CÁLCULO DO CICLO A GÁS 27

5. CONCLUSÃO 35

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 36

1. INTRODUÇÃO

A indústria química possui uma estreita relação com o setor energético. Não apenas por causa da energia que é consumida nos processos industriais utilizados para a produção das substâncias químicas de interesse, mas também de que muitas reações são exotérmicas, liberando energia para o ambiente, ou geram produtos de interesse energético (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2005). Esse é o caso do hidrogênio, um produto de alto valor energético que, embora não possa ser considerado uma fonte de energia, é um dos principais vetores energéticos a ser considerados em uma matriz de energia limpa.

O hidrogênio é tido como um excelente vetor energético – ou seja, um excelente portador de energia – devido à sua capacidade de ser comprimido até atingir um estado de elevada densidade energética, conseguindo armazenar um alto conteúdo de energia por unidade de massa. Esse conceito é o principal por trás da pesquisa e desenvolvimento de automóveis movidos a hidrogênio, como acontece no caso dos modelos Honda FCX Clarity, Toyota FCHV, Hyundai ix35 Fuel Cell e Toyota FCV. Nos automóveis, o hidrogênio alimenta uma célula a combustível onde os átomos de hidrogênio são dissociados, gerando corrente elétrica, e se associam com átomos de oxigênio, produzindo água (SILVA, 2014). É um processo diferente da oxidação do hidrogênio que, embora alcance altas eficiências energéticas por tratar-se de uma conversão direta de energia, envolve o uso de materiais nobres, como a platina, encarecendo o investimento necessário.

Por outro lado, o hidrogênio pode ser um excelente combustível para turbinas a gás, produzindo energia elétrica com elevada eficiência térmica. Turbinas a gás são máquinas térmicas que produzem energia elétrica com grande eficiência, a partir da compressão do ar, queima do combustível junto do ar comprimido, gerando altos níveis de pressão e temperaturas, e em seguida permitindo a sua expansão, que produz a rotação das palhetas e acionamento do gerador elétrico (MORAN; SHAPIRO, 2006). Por ser um gás simples, uma molécula diatômica, e com elevado poder calorífico, trata-se de um ótimo combustível, e seu aproveitamento energético pode ser muito atrativo tanto do ponto de vista econômico como do ponto de vista ambiental.

O hidrogênio é uma alternativa limpa pois sua reação com oxigênio libera grandes quantidades de energia gerando apenas água como produto de reação. Dessa forma, o uso do hidrogênio para propósitos energéticos não produz nenhum efluente, líquido ou gasoso, além da água. Assim, qualquer emissão associada ao hidrogênio refere-se apenas ao seu ciclo de produção, e não ao uso direto. No caso da utilização do hidrogênio que é recuperado em processos químicos existentes, o uso do hidrogênio torna-se totalmente sustentável, sem qualquer emissão relacionada (SILVA, 2014).

O grande interesse é para aplicações industriais. Isso se deve ao fato de que existe grande preocupação ambiental, uma vez que, vivemos um momento de crise energética e a busca por fontes de energia renováveis, faz-se cada dia mais necessária. Sendo assim, qualquer desperdício de uma fonte ecologicamente sustentável como o hidrogênio, não deveria ser tolerada.

Esse trabalho explora essa possibilidade, de aproveitamento energético do hidrogênio excedente produzido em um ambiente de uma indústria química. Será calculada a quantidade de energia que poderia ser recuperada a partir da quantidade disponível de hidrogênio e será proposto um arranjo para o seu aproveitamento.

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é realizar o cálculo do potencial energético de uma turbina a gás utilizando o hidrogênio como combustível.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular a quantidade de energia disponível no combustível;
- Calcular a quantidade de energia que pode ser recuperada a partir da queima do combustível;
- Propor um arranjo de sistema para realizar o aproveitamento energético.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O hidrogênio, como apresentado na seção anterior, é um importante componente para o estabelecimento de um sistema energético sustentável e de baixa emissão, por ser um produto de elevada densidade energética e por sua reação de oxidação não gerar qualquer outro produto além de água (SILVA, 2014). A seguinte revisão bibliográfica aborda os principais métodos de produção do hidrogênio, a reação de oxidação do hidrogênio, o conceito de poder calorífico inferior, o aproveitamento da energia de um combustível segundo uma perspectiva da segunda lei da termodinâmica e, finalmente, turbinas a gás.

2.1. PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO

Embora seja o elemento atômico mais abundante do universo, o hidrogênio dificilmente é encontrado disponível em sua forma molecular (H_2) devido a razões termodinâmicas. O potencial químico desta molécula faz com que seja muito mais fácil encontrar átomos de hidrogênio ligados em arranjos moleculares mais estáveis, com átomos de outra natureza (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2005). De fato, o hidrogênio encontra-se comumente ligado a átomos de oxigênio, para formar moléculas de H_2O; ou com átomos de carbono, formando hidrocarbonetos (cadeias de $-CH_2-$, combustíveis fósseis); ou com ambos, oxigênio e carbono, formando carboidratos (CH_2O, biomassa).

Assim, o hidrogênio em sua forma molecular precisa ser produzido. Existem diversas rotas tecnológicas para realizar a produção do hidrogênio em escala industrial (SILVA, 2014). Por exemplo, o hidrogênio por ser produzido a partir da eletrólise da água (hidrólise) conforme a seguinte reação:

$$H_2O \rightarrow H_2 + 1/2\ O_2 \qquad \Delta H°(298K) = 242\ kJ/mol$$

No entanto, a hidrólise é um processo muito demandante de energia. Cada mol de água a ser hidrolisada exige 242 kJ de energia (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2005). Portanto, é um processo viável somente se grandes quantidades de energia elétrica de baixo custo estiverem disponíveis.

Consequentemente, os hidrocarbonetos são as fontes mais viáveis de H_2 (e também de energia). Os processos mais comuns e largamente utilizados para a produção de hidrogênio molecular são as reformas de hidrocarbonetos (reforma a vapor ou auto reforma). Na reforma a vapor, um combustível fóssil, normalmente o gás natural, é misturado com vapor de água e aquecido, ocasionando a quebra das moléculas de combustível e gerando moléculas mais simples, como o hidrogênio e o dióxido de carbono. Na auto reforma, o combustível fóssil, novamente o gás natural é o mais utilizado, é misturado com vapor e oxigênio. Uma vez que a reação seja iniciada, ela se auto alimenta produzindo hidrogênio, dióxido e monóxido de carbono, e energia para manter a reação (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2005).

Outras rotas tecnológicas para a produção do hidrogênio molecular são a gaseificação de biomassa, eletrólise onde a passagem da corrente elétrica pelo cátodo dissocia íons NaOH (hidróxido de sódio) liberando o hidrogênio da solução em forma de gás e bioprodução por bactéria e por algas (SILVA, 2014). Dentre esses processos, os ciclos termoquímicos são os mais viáveis, propiciando a produção de hidrogênio em conjunto com a síntese de outras substâncias químicas de interesse industrial. Dessa forma, a produção de hidrogênio torna-se mais sustentável do que através da simples reforma de hidrocarbonetos.

2.2. COMBUSTÃO DO HIDROGÊNIO

A oxidação do hidrogênio é um processo altamente exotérmico, liberando grande quantidade de energia por molécula oxidada.

$$H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O \qquad \Delta H°(298K) = -\ 242\ kJ/mol$$

Esse processo pode ser realizado diretamente, através de um processo eletroquímico em uma célula a combustível, ou pode ser realizado por vias da combustão do hidrogênio. Pela via eletroquímica, a conversão é direta, e as células a combustível são capazes de atingir altos níveis de eficiência de conversão. No entanto, são dispositivos que ainda requerem alto investimento, utilizando metais nobres, como a platina (SILVA, 2014).

A combustão é um processo menos eficiente do que a conversão eletroquímica, pois nem todo o calor liberado pode ser aproveitado. No entanto, é um processo mais

simples, com tecnologias mais maduras. Normalmente, por questões de conveniência econômica, a combustão do hidrogênio não terá o oxigênio puro como gás oxidante, mas o ar atmosférico que é composto majoritariamente por nitrogênio (MORAN; SHAPIRO, 2006). Dessa forma, a reação de combustão pode ser escrita como:

$$H_2 + 1/2\ (O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow H_2O + 1{,}88\ N_2$$

A reação acima é chamada de reação de combustão estequiométrica do hidrogênio, por ter a exata quantidade de átomos de oxigênio necessária para promover a oxidação de todos os átomos de hidrogênio presentes. A partir dessa reação, pode-se estabelecer uma relação ar-combustível estequiométrica que é definida como a razão entre a quantidade de ar pela quantidade de combustível, em termos molares ou termos de massa (MORAN; SHAPIRO, 2006).

No entanto, a combustão raramente se dá em proporções estequiométricas. Na realidade pode ser utilizada uma mistura rica (maior presença de combustível em relação ao ar em relação ao caso estequiométrico) ou uma mistura pobre (menor presença de combustível em relação ao ar em relação ao caso estequiométrico). A combustão com mistura rica pode ser utilizada para garantir uma maior temperatura de chama e maior potência por volume de gases de exaustão produzidos (MORAN; SHAPIRO, 2006). A combustão com mistura pobre é utilizada para garantir a utilização de todo o combustível (economicamente mais atraente) e também para reduzir a temperatura máxima atingida, quando uma temperatura demasiadamente alta pode comprometer os materiais utilizados nos equipamentos e instalações.

Para realizar o aproveitamento energético de um recurso combustível, é utilizada a mistura pobre, também chamada de combustão com excesso de ar (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2005). No caso do hidrogênio, a reação de combustão com excesso de ar é:

$$H_2 + e.1/2\ (O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow H_2O + 1{,}88.e\ N_2 + (1/2.e - 1/2)\ O_2$$

Onde e é o excesso de ar, sendo 100% para a reação estequiométrica e igual a 120% para um excesso de ar de 20% em relação à quantidade de ar estequiométrico, por exemplo.

2.3. PODER CALORÍFICO INFERIOR

Combustível é toda substância química que, em condições apropriadas, pode reagir com um oxidante, normalmente o oxigênio, em uma reação que libera grandes quantidades de energia (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2005). Essa energia liberada é definida como o poder calorífico do combustível. O poder calorífico inferior (PCI) é uma propriedade importante dos combustíveis e representa a quantidade de energia liberada em sua combustão completa (MORAN; SHAPIRO, 2006), para efeitos práticos de sua utilização. Na definição do PCI, considera-se que a água produzida e encontrada nos gases de combustão, encontra-se no estado de vapor, e a energia contida nesse vapor não é aproveitada.

Uma outra definição complementar, a do poder calorífico superior (PCS) representa a energia liberada na queima do combustível na situação em que a água presente nos produtos de combustão está no estado líquido. Ou seja, a combustão gera produtos de combustão, no estado gasoso, inclusive a água, devido ao calor e às altas temperaturas envolvidas. Posteriormente os produtos de combustão são resfriados e sua energia é retirada até a condensação total da água. Deste modo, a diferença entre o PCS e o PCI é exatamente igual à energia de condensação da água existente nos produtos de combustão (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2005).

Para efeitos práticos, na queima de um combustível para geração de energia, o valor a ser considerado é o do PCI, pois normalmente não é realizado o resfriamento dos gases gerados (MORAN; SHAPIRO, 2006). Isso representa uma perda para o sistema, uma vez que os produtos de combustão são eliminados para a atmosfera contendo um teor de energia não desprezível. No entanto, muitas vezes o aproveitamento da energia contida nos gases de exaustão não é economicamente atrativo.

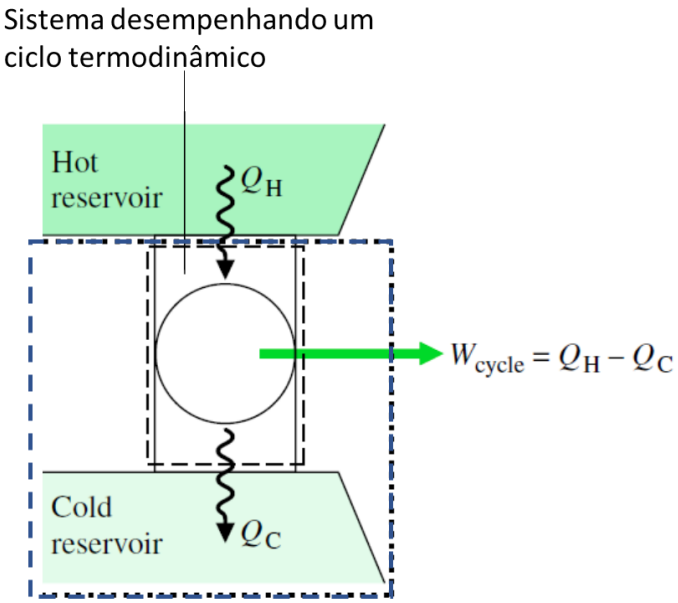
O hidrogênio tem um poder calorífico inferior igual a 121 MJ/kg, sendo a substância com maior densidade energética (quantidade de energia por unidade de massa). Em termos volumétricos, o hidrogênio tem um poder calorífico inferior (PCI) igual a 2.579 kcal/Nm³ e um poder calorífico superior (PCS) igual a 3.048 kcal/Nm³ (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2005).

2.4. SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Para o aproveitamento energético de um combustível, não basta conhecer a quantidade de energia que esse combustível pode liberar durante a combustão. Isso acontece porque nem toda a energia liberada na queima pode ser aproveitada para a geração de potência elétrica. O enunciado de Kelvin-Planck da segunda lei da termodinâmica afirma que para qualquer sistema operando em um ciclo termodinâmico, é impossível gerar trabalho para o ambiente enquanto realiza trocas de energia por transferência de calor com apenas um único reservatório térmico (MORAN; SHAPIRO, 2006). São necessários ao menos dois reservatórios térmicos, um operando como fonte de calor e outro como descarte térmico.

Esse enunciado significa que o trabalho gerado por um ciclo termodinâmico não poderá ser simplesmente igual ao calor recebido a partir de uma fonte térmica. Sempre haverá necessidade de que exista uma rejeição de calor para um outro reservatório térmico, de modo que o trabalho realizado será menor do que a energia recebida por calor (MORAN; SHAPIRO, 2006). A figura a seguir apresenta a única forma de operação de um ciclo termodinâmico de potência, segundo o enunciado de Kelvin-Planck.

Figura 1 - Representação do enunciado de Kelvin-Planck em um ciclo de potência



Fonte: Adaptado de MORAN e SHAPIRO (2006).

Como visto, o trabalho realizado é menor do que o calor disponibilizado pela fonte quente, pois uma parte dessa energia é inevitavelmente rejeitada para a fonte fria (MORAN; SHAPIRO, 2006).

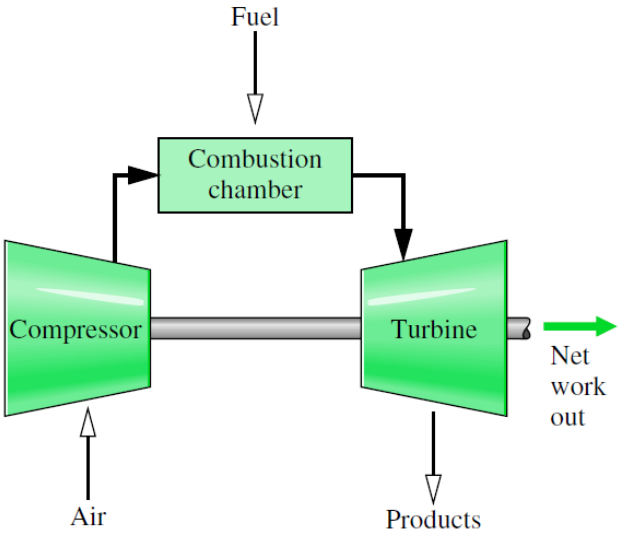
No caso da queima de um combustível, como o hidrogênio, para produção de potência elétrica, o calor disponibilizado (Q_H) para o ciclo termodinâmico é igual à energia liberada na combustão. A potência líquida gerada (W_{CICLO}) corresponde à energia elétrica produzida e o calor rejeitado para o reservatório frio (Q_C) são transferências de calor para o ambiente. Uma eficiência de conversão pode ser definida através da relação entre o efeito útil gerado, no caso a potência produzida, e o consumo do ciclo, no caso a taxa de calor que alimenta o ciclo (MORAN; SHAPIRO, 2006). Dessa forma, temos que a eficiência térmica do ciclo pode ser definida como:

$$\eta_{CICLO} = \frac{W_{CICLO}}{Q_H} \tag{8}$$

2.5. TURBINAS A GÁS

Turbinas a gás são máquinas térmicas capazes de gerar potência mecânica (e elétrica, quando acopladas a um gerador elétrico) a partir da queima de um combustível líquido ou gasoso. A energia gerada pela queima do combustível promove um grande aumento de temperatura, gerando produtos de combustão gasosos. Esses gases são expandidos em uma turbina, movendo as palhetas por efeito fluidodinâmico, e gerando potência mecânica de rotação. As turbinas a gás tendem a ser mais leves e compactas do que as turbinas a vapor. A favorável relação potência/peso das turbinas a gás as torna adequadas para aplicações de transporte (como propulsão de aeronaves, usinas marítimas, etc.). Além disso, por seu elevado rendimento térmico, as turbinas a gás também são comumente usadas para geração estacionária de energia (MORAN; SHAPIRO, 2006). As usinas de turbinas a gás podem operar em ciclos abertos ou fechados. O ciclo aberto mostrado na figura 2 é o mais comum.

Figura 2 - Representação esquemática de uma turbina a gás



Fonte: MORAN e SHAPIRO (2006).

Nesse arranjo, o ar atmosférico é continuamente aspirado para o compressor, onde é comprimido a alta pressão. O ar entra em uma câmara de combustão, ou combustor, onde é misturado com o combustível e ocorre a combustão, resultando em produtos de combustão com uma temperatura elevada. Os produtos de combustão se expandem através da turbina e são posteriormente descarregados para o ambiente. Parte do trabalho desenvolvido pela turbina é usado para acionar o compressor de maneira direta, uma vez que turbina e compressor são montados em um mesmo eixo. O restante da potência está disponível para gerar eletricidade (MORAN; SHAPIRO, 2006).

Figura 3 - Representação esquemática de uma turbina a gás

Fonte: GE POWER (2019).

A figura 3 mostra uma turbina a gás aberta, do fabricante General Electric (GE POWER, 2019). À esquerda é possível visualizar as palhetas do compressor, dividido em múltiplos estágios. No centro, encontra-se a câmara de combustão e à direita é possível visualizar os discos de palhetas da turbina propriamente dita, onde ocorre a expansão dos gases de combustão. Nesse caso específico, a seção da turbina é dividida em quatro estágios.

3. METODOLOGIA

3.1. ETAPA 1 – Levantamento de Dados

A primeira parte deste estudo consistiu em um estudo de caso onde foram levantados os dados disponíveis de uma indústria química, existente no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. Esta empresa opera unidades em todo o mundo, responsáveis pela fabricação de produtos químicos, sendo uma das maiores produtoras internacionais de ácido sulfúrico (H_2SO_4), clorato de sódio ($NaClO_3$), nitritos de sódio e outros produtos clorados e alcalinos. Na fábrica localizada no Espírito Santo são produzidos clorato de sódio e clorados alcalinos (cloro soda).

Figura 4 - Visão Aérea da Empresa

Fonte: GOOGLE MAPS (2019).

Nos ciclos termoquímicos envolvidos na produção do clorato de sódio e dos clorados alcalinos, o hidrogênio é produzido. A tabela abaixo apresenta as quantidades de hidrogênio produzida nesses processos.

Tabela 1 - Produção de Hidrogênio na Empresa

Produção de Hidrogênio (Nm^3/h)	
Cloratos A/B/C	5.428 Nm^3/h
Cloro Soda	1.874 Nm^3/h
Produção Total	7.302 Nm^3/h

Fonte: elaborado pelos autores a partir de dados da empresa.

O hidrogênio produzido é utilizado para alimentar os fornos da empresa, que fornecem a energia térmica necessária para manter os ciclos termoquímicos de reações. As características dos fornos e seu consumo de hidrogênio estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 2 – Consumo de Hidrogênio na Empresa

Forno	Carga	Produção (t/d)	Consumo H_2
Krebs	15 kg/min	22,2	694 Nm^3/h
Carbone	1.800 kg/h	44,4	780 Nm^3/h
SGL	700 Nm^3/h	51,8	978 Nm^3/h
Consumo Interno	-	118,4	2.453 Nm^3/h

Fonte: elaborado pelos autores a partir de dados da empresa.

Além do consumo interno, uma outra indústria química na vizinhança também consome parte do hidrogênio produzido (exportação de H_2). Dessa forma, é possível fazer o balanço da produção e consumo de hidrogênio na planta industrial, calculando qual a quantidade de hidrogênio excedente disponível para aproveitamento energético, conforme será demonstrado nos resultados.

3.2. ETAPA 2 – Projeção da Quantidade de Potência

Conhecendo a quantidade de hidrogênio disponível e sabendo o seu o poder calorífico inferior, é possível conhecer a energia total que pode ser liberada ao utilizar o hidrogênio como combustível em uma turbina a gás. Para isso, basta multiplicar a quantidade de hidrogênio disponível pelo PCI, utilizando as unidades de medida adequadas, como demonstrado na equação 1.

$$\dot{Q}_{\mathrm{H2}} = \dot{m}_{H2} \times PCI_{H2} \tag{1}$$

Onde $\dot{Q}_{\mathrm{H2}}$ é o calor disponibilizado pela queima do hidrogênio;

$\dot{m}_{H2}$ é o fluxo de hidrogênio queimado;

PCI_{H2} é o poder calorífico inferior do hidrogênio.

No entanto, como demonstrado no enunciado de Kelvin-Planck da segunda lei da termodinâmica, não é possível extrair toda a energia disponível de uma fonte térmica para a produção de trabalho, sem que uma parte dessa energia seja descartada termicamente para o ambiente. Assim, apenas uma fração da energia liberada pela queima do combustível poderá ser convertida em potência.

No caso de um ciclo a gás, define-se como eficiência térmica a razão entre a potência líquida produzida e a quantidade de energia liberada pelo combustível. Assim, sabendo-se a quantidade de combustível e o seu PCI e conhecendo-se as eficiências típicas dos ciclos utilizados, é possível estimar a quantidade de potência a ser gerada, como demonstrado na equação 2.

$$\dot{W}_{\mathrm{CICLO}} = \dot{Q}_{H2} \times \eta_{CICLO} \tag{2}$$

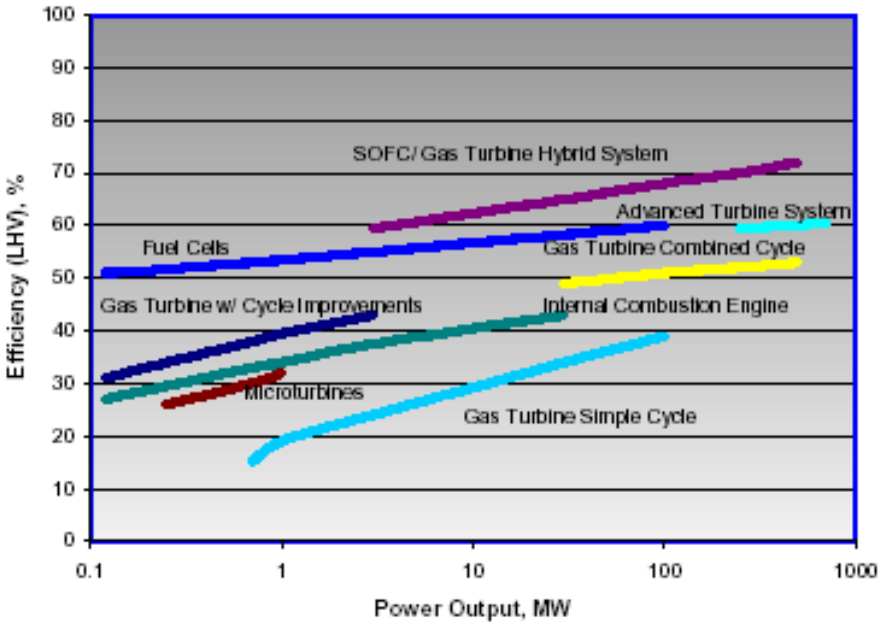
Onde $\dot{W}_{\mathrm{CICLO}}$ é a potência líquida produzida pelo ciclo;

$\dot{Q}_{H2}$ é o calor disponibilizado pela queima do hidrogênio;

η_{CICLO} é a eficiência energética (ou rendimento) do ciclo.

Eficiências típicas de conversão de ciclos baseados na utilização do hidrogênio são encontradas na literatura. Por exemplo, Silva (2014) traz o seguinte gráfico, com as eficiências típicas de conversão para diferentes tecnologias na utilização do hidrogênio.

Figura 5 – Eficiências Típicas dos Sistemas de Potência a partir do Hidrogênio



Fonte: SILVA (2014).

Como é possível observar, para o uso de turbinas a gás, as eficiências térmicas de conversão vão de 15% a 40%, aumentando conforme aumenta-se a capacidade do equipamento. Máquinas maiores são mais eficientes (SILVA, 2014).

3.3. ETAPA 3 – Cálculo do Ciclo a Gás

Para propor um arranjo para aproveitamento energético do hidrogênio, é preciso calcular o ciclo a gás, determinando os parâmetros relevantes do ciclo (como a taxa de compressão utilizada, a temperatura de entrada na turbina, e o excesso de ar utilizado). Para o cálculo é utilizada a representação de uma turbina a gás simples, conforme ilustrado na revisão teórica.

O comportamento dos gases é previsto de acordo com o modelo de gás ideal, utilizando a hipótese de *Cp* constante, para tornar os cálculos mais diretos. A equação de estado que governa as propriedades dos gases ideais é descrita na equação 3:

$$p\,v = R\,T \tag{3}$$

Onde p é a pressão do gás;

v é o volume específico do gás;

T é a temperatura absoluta do gás;

R é a constante do gás (igual à constante universal dos gases dividida pela massa molecular do gás).

Além da relação entre as propriedades volumétricas dos gases ideais, mostrada acima, outras relações são importantes para a análise energética. Essas relações, que definem a variação de entalpia e a variação de entropia, são mostradas abaixo, nas equações 4 e 5:

$$dh = C_p dT \tag{4}$$

$$ds = C_p \ln\left(\frac{T_F}{T_I}\right) - R \ln\left(\frac{p_F}{p_I}\right) \tag{5}$$

Onde h é a entalpia do gás;

C_p é o calor específico a pressão constante;

T é a temperatura absoluta do gás (com os subíndices *"F"* e *"I"* indicando o estado final e inicial, respectivamente);

s é a entropia do gás;

p é a pressão do gás (com os subíndices *"F"* e *"I"* indicando o estado final e inicial, respectivamente);

R é a constante do gás (igual à constante universal dos gases dividida pela massa molecular do gás).

Utilizando a hipótese simplificadora de *Cp* constante, as equações (4) e (5) tornam-se:

$$\Delta h = \overline{C_p} \Delta T \tag{6}$$

$$\Delta s = \overline{C_p} \ln\left(\frac{T_F}{T_I}\right) - R \ln\left(\frac{p_F}{p_I}\right) \tag{7}$$

Tanto a compressão como a expansão na turbina a gás não são processos ideais, isentrópicos. Portanto, é preciso considerar uma eficiência isentrópica nestes processos, que pode ser definida como uma razão conveniente entre as diferenças

de entalpia nos casos real e isentrópico. As eficiências isentrópicas de compressão e de expansão são definidas, respectivamente, conforme as relações abaixo, descritas nas equações 8 e 9:

$$\eta_{COMP} = \frac{h_{2S} - h_1}{h_2 - h_1} \tag{8}$$

$$\eta_{EXP} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2S}} \tag{9}$$

Onde η_{COMP} é a eficiência isentrópica do compressor;

η_{EXP} é a eficiência isentrópica da turbina (ou expansor);

h_1 é a entalpia do gás na entrada do equipamento;

h_2 é a entalpia do gás na saída do equipamento;

h_{2S} é a entalpia do gás na saída do equipamento, caso a operação fosse isentrópica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CÁLCULO DA QUANTIDADE DE ENERGIA DISPONÍVEL

A partir dos levantamentos de produção e consumo interno e externo de hidrogênio, é possível identificar a quantidade de hidrogênio disponível para aproveitamento energético a partir da realização de um simples balanço de massa, como demonstrado na tabela a seguir.

Tabela 3 – Balanço da Produção e Consumo de Hidrogênio

Balanço de Hidrogênio (Nm³/h)	
Produção Total	7.302 Nm³/h
Consumo Interno	2.453 Nm³/h
Exportação	3.600 Nm³/h
Volume Disponível	1.249 Nm³/h

Fonte: elaborado pelos autores a partir de dados da empresa.

Portanto, segundo os dados levantados junto à empresa, existe uma quantidade disponível de hidrogênio igual a 1.249 Nm³/h cujo aproveitamento não está sendo realizado. É possível identificar a quantidade de energia disponível nesse fluxo, a partir da utilização da equação 1, com as unidades adequadas, uma vez que os dados disponíveis são volumétricos (Nm³). Sabendo que o PCI do hidrogênio é igual a 2.579 kcal/Nm³ (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2005) temos:

$$\dot{Q}_{\mathrm{H2}} = \dot{m}_{H2} \times PCI_{H2}$$

$$\dot{Q}_{\mathrm{H2}} = 1.249\ \mathrm{Nm^3/h} \times 2.579\ \mathrm{kcal/Nm^3}$$

$$\dot{Q}_{\mathrm{H2}} = 3.221.171\ \mathrm{kcal/h}$$

Convertendo as unidades de kcal para kJ (1 kcal = 4,184 kJ) e de hora para segundos (1 h = 3.600 s), temos que:

$$\dot{Q}_{\mathrm{H2}} = 3.221.171 \times 4{,}184/3600\ \mathrm{kJ/s}$$

$$\dot{Q}_{\mathrm{H2}} = 3.743{,}72\ \mathrm{kW}$$

Assim, a quantidade total de energia disponível no recurso é de 3.743,72 kW. No entanto, como visto, nem toda essa potência térmica poderá ser aproveitada e convertida em potência elétrica. A seguir será apresentada a estimativa de geração possível.

4.2. ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE ENERGIA A SER RECUPERADA

Utilizando o resultado encontrado no item anterior, é possível estimar a quantidade de potência elétrica que poderá ser gerada, a partir da aplicação de um rendimento típico encontrado na literatura.

Observando o gráfico da figura 5, podemos observar que as eficiências típicas de uma turbina a gás operando com hidrogênio ficam entre 15% a 40%, tendo um aumento de desempenho conforme aumenta-se o tamanho e capacidade do equipamento. Como a quantidade de hidrogênio disponível não é tão grande, uma vez que já existe um consumo interno e externo desse recurso, sabe-se que não será um equipamento de grande capacidade.

Considerando a disponibilidade de 3,7 MW térmicos disponíveis na queima do hidrogênio, nessa faixa de potência as eficiências típicas – conforme o gráfico da figura 5 – são em torno de 25%. Aplicando-se a equação (2) temos que:

$$\dot{W}_{\mathrm{CICLO}} = \dot{Q}_{H2} \times \eta_{CICLO}$$

$$\dot{W}_{\mathrm{CICLO}} = 3.743{,}72\ \mathrm{kW} \times 0{,}25$$

$$\dot{W}_{\mathrm{CICLO}} = 935{,}93\ \mathrm{kW}$$

Assim, estima-se que cerca de 935 kW de potência elétrica possam ser gerados a partir da queima do hidrogênio em uma turbina a gás em ciclo simples.

4.3. CÁLCULO DO CICLO A GÁS

A partir de um esquema, como o apresentado na Figura 2, é possível utilizar as equações apresentadas na seção 3 para calcular as propriedades dos gases em cada ponto do ciclo, determinando assim a sua performance energética.

Inicialmente deve-se escolher alguns parâmetros operativos importantes, tais como a quantidade de excesso de ar a ser utilizada na combustão (*e*), a temperatura na entrada da turbina (TIT) e a taxa de compressão (β). Pesquisando a literatura, foi encontrado o trabalho de Chiesa, Lozza e Mazzocchi (2005), desenvolvido especificamente para o uso de hidrogênio como combustível de turbina a gás. Os autores sugerem um excesso de ar igual a 108% acima da quantidade de ar estequiométrico (*e* = 2,08), para manter um melhor controle de temperatura. A temperatura de entrada da turbina (TIT) sugerida é de 1.340°C e uma taxa de compressão igual a 17 vezes (β = 17).

Utilizando um valor de excesso de ar igual a 2,08 temos que a reação química de combustão torna-se:

$$H_2 + e.1/2\ (O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow H_2O + 1{,}88.e\ N_2 + (1/2.e - 1/2)\ O_2$$

$$H_2 + 1{,}04\ (O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow H_2O + 3{,}9104\ N_2 + 0{,}54\ O_2$$

A partir da reação acima é possível calcular a relação ar-combustível, em base mássica, conforme demonstrado a seguir:

$$(A/C) = \frac{1{,}04(1*MM_{O2}+3{,}76*MM_{N2})}{1*MM_{H2}} = \frac{1{,}04(1*32{,}00+3{,}76*28{,}01)}{1*2{,}016} = 70{,}8384$$

Dessa forma, deverão ser utilizados 70,8384 kg de ar para cada kg de combustível queimado.

O ar de entrada no compressor encontra-se nas condições ambientes. Em Aracruz, a pressão ambiente é de 1006 mbar e a temperatura ambiente média é de 25 °C (CLIMATEMPO, 2019). Além disso, nessas condições de pressão e temperatura o ar atmosférico tem um calor específico igual a 1,004 kJ/kg.K e uma massa molecular aparente igual a 28,961 kg/kmol (MORAN; SHAPIRO, 2006). A constante específica

do gás (igual à constante universal dos gases dividida pela massa molecular) é igual a 0,2871. A seguir é apresentada uma tabela com os dados das propriedades termodinâmicas do ar na entrada do compressor.

Tabela 4 – Propriedades do Ar na Entrada do Compressor

Propriedades do Ar na Entrada do Compressor	
Pressão (p)	100,6 kPa
Temperatura (T)	298,15 K
Calor específico (Cp)	1,004 kJ/kg.K
Constante do gás	0,2871 kJ/kg.K

Fonte: elaborado pelos autores.

Nas condições normais de temperatura de pressão (CNTP) a pressão é definida como igual a 101,325 kPa e a temperatura é de 293,15 K (MORAN; SHAPIRO, 2006). Sabendo a quantidade de hidrogênio em Nm³, é possível calcular a quantidade de mols de hidrogênio utilizando a equação fundamental dos gases (equação 3).

$$\mathrm{p\,v = n\,\overline{R}\,T}$$

$$101{,}325 \times 1249 = \mathrm{n} \times 8{,}314 \times 293{,}15$$

$$\mathrm{n} = 51{,}9253\ \mathrm{kmol/h}$$

A vazão mássica de hidrogênio pode ser encontrada utilizando o resultado acima e a massa molecular da molécula de hidrogênio (2,016 kg/kmol).

$$\dot{\mathrm{m}}_{\mathrm{H2}} = \mathrm{n} \times \mathrm{MM}_{\mathrm{H2}}$$

$$\dot{\mathrm{m}}_{\mathrm{H2}} = 51{,}9253\,\frac{\mathrm{kmol}}{\mathrm{h}} \times 2{,}016\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}}$$

$$\dot{\mathrm{m}}_{\mathrm{H2}} = 104{,}6814\ \mathrm{kg/h} = 0{,}0291\ \mathrm{kg/s}$$

Utilizando a relação ar-combustível e a vazão mássica de hidrogênio, pode-se calcular a vazão mássica de ar no compressor.

$$\dot{\mathrm{m}}_{\mathrm{AR}} = (\mathrm{A/C}) \times \dot{\mathrm{m}}_{\mathrm{H2}}$$

$$\dot{m}_{AR} = 70{,}8384 \times 0{,}0291 = 2{,}0599 \text{ kg/s}$$

De posse desses dados, é possível calcular o processo de compressão. Para isso, irá utilizar-se a hipótese de Cp constante, fixado em um valor igual a 1,04 kJ/kg.K, ligeiramente acima do valor do calor específico na entrada do compressor, pois espera-se que o processo de compressão aumente também a temperatura do gás, aumentando seu calor específico. Primeiramente, será calculado o caso isentrópico (compressão ideal) utilizando a equação (7):

$$\Delta s = \overline{C_p} \ln\left(\frac{T_F}{T_I}\right) - R \ln\left(\frac{p_F}{p_I}\right)$$

$$0 = 1{,}04 \ln\left(\frac{T_{2S}}{298{,}15}\right) - 0{,}2871 \ln(17)$$

$$T_{2S} = 298{,}15 \times \exp\left(\frac{0{,}2871}{1{,}04} \times \ln(17)\right)$$

$$T_{2S} = 651{,}79 \text{ K}$$

No entanto, a compressão não é perfeitamente isentrópica. Utilizando uma eficiência isentrópica igual a 85%, um valor típico (MORAN; SHAPIRO, 2006) podemos calcular a real temperatura de saída do compressor, substituindo as entalpias da equação de eficiência isentrópica de compressão pelas temperaturas, uma vez que usando o modelo de gás ideal, as entalpias dependem apenas das temperaturas. Assim, a equação (8) pode ser reescrita como:

$$\eta_{COMP} = \frac{h_{2S} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2S} - T_1}{T_2 - T_1}$$

$$0{,}85 = \frac{651{,}79 - 298{,}15}{T_2 - 298{,}15}$$

$$T_2 = 714{,}20 \text{ K}$$

A tabela 5, apresenta as propriedades do ar na saída do compressor. O calor específico foi encontrado a partir de tabelas termodinâmicas em Moran e Shapiro (2006).

Tabela 5 – Propriedades do Ar na Saída do Compressor

Propriedades do Ar na Entrada do Compressor	
Pressão (p)	1710,2 kPa
Temperatura (T)	714,20 K
Calor específico (Cp)	1,078 kJ/kg.K
Constante do gás	0,2871 kJ/kg.K

Fonte: elaborado pelos autores.

O calor específico encontrado na condição de saída do compressor mostra que o valor adotado para o Cp constante é adequado, estando praticamente na média aritmética dos valores entre entrada e saída. E a potência de compressão, no modelo de gás ideal, pode ser calculada a partir das temperaturas de entrada e saída do compressor, conforme segue:

$$\dot{W}_{COMP} = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}\,\overline{C_P}\,(T_2 - T_1)$$

$$\dot{W}_{COMP} = 2{,}0599 \times 1{,}04 \times (714{,}20 - 298{,}15)$$

$$\dot{W}_{COMP} = 891{,}30 \text{ kW}$$

Na entrada da turbina temos os gases de combustão, que se encontram a uma temperatura de 1613,15 K (TIT, definida a priori) e pressão de 1710,2 kPa. Sua composição é obtida a partir da reação de combustão.

$$H_2 + 1{,}04\,(O_2 + 3{,}76\,N_2) \rightarrow H_2O + 3{,}9104\,N_2 + 0{,}54\,O_2$$

Como pode ser observado abaixo, é gerado um total de 5,4504 mols de produtos de combustão. A fração molar de cada componente pode ser calculada como se segue:

$$y_{H2O} = 1/5{,}4504 = 0{,}1835$$

$$y_{N2} = 3{,}9104/5{,}4504 = 0{,}7175$$

$$y_{O2} = 0{,}54/5{,}4504 = 0{,}0990$$

Essa composição, nessas condições de pressão e temperatura, resulta em uma mistura com um calor específico igual a 1,41 kJ/kg.K e uma massa molecular aparente igual a 26,676 kg/kmol. O calor específico e a massa molecular aparente de uma mistura podem ser calculadas a partir da média ponderada desses parâmetros, para as substâncias puras, utilizando como critério de ponderação a concentração de cada componente em sua composição (MORAN; SHAPIRO, 2006). A constante específica do gás (igual à constante universal dos gases dividida pela massa molecular) é igual a 0,3117. A seguir é apresentada uma tabela com os dados das propriedades termodinâmicas do ar na entrada da turbina.

Tabela 6 – Propriedades dos Gases na Entrada da Turbina

Propriedades dos Gases na Entrada da Turbina	
Pressão (p)	1710,2 kPa
Temperatura (T)	1613,15 K
Calor específico (Cp)	1,410 kJ/kg.K
Constante do gás	0,3117 kJ/kg.K

Fonte: elaborado pelos autores.

E, como dito anteriormente, a vazão mássica de gases de combustão é igual à soma das vazões mássicas de ar e de combustível. Assim

$$\dot{m}_{GASES} = \dot{m}_{AR} + \dot{m}_{H2}$$

$$\dot{m}_{GASES} = 2{,}0599 + 0{,}0291$$

$$\dot{m}_{GASES} = 2{,}089 \text{ kg/s}$$

De posse desses dados, é possível calcular o processo de expansão na turbina. Para isso, irá utilizar-se a hipótese de Cp constante, fixado em um valor igual a 1,33 kJ/kg.K, ligeiramente abaixo do valor do calor específico na entrada do turbina, pois sabe-se que o processo de expansão irá diminuir a temperatura do gás, diminuindo seu calor específico. Primeiramente, será calculado o caso isentrópico (expansão ideal) utilizando a equação (7):

$$\Delta s = \overline{C_p} \ln\left(\frac{T_F}{T_I}\right) - R \ln\left(\frac{p_F}{p_I}\right)$$

$$0 = 1{,}33 \ln\left(\frac{T_{4S}}{1613{,}15}\right) - 0{,}3117 \ln(1/17)$$

$$T_{4S} = 1613{,}15 \times \exp\left(\frac{0{,}3117}{1{,}33} \times \ln(1/17)\right)$$

$$T_{4S} = 830{,}44 \text{ K}$$

No entanto, assim como a compressão, a expansão também não é perfeitamente isentrópica. Utilizando uma eficiência isentrópica igual a 90% para a expansão, um valor típico (MORAN; SHAPIRO, 2006), podemos calcular a real temperatura de saída da turbina, substituindo as entalpias da equação de eficiência isentrópica de expansão pelas temperaturas, uma vez que usando o modelo de gás ideal, as entalpias dependem apenas das temperaturas. Assim, a equação (9) pode ser reescrita como:

$$\eta_{EXP} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4S}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4S}}$$

$$0{,}90 = \frac{1613{,}15 - T_4}{1613{,}15 - 830{,}44}$$

$$T_4 = 908{,}71 \text{ K}$$

A tabela 5, apresenta as propriedades do ar na saída da turbina. O calor específico foi encontrado a partir de tabelas termodinâmicas em Moran e Shapiro (2006) a partir da composição do gás.

Tabela 7 – Propriedades do Ar na Saída da Turbina

Propriedades do Ar na Saída da Turbina	
Pressão (p)	100,6 kPa
Temperatura (T)	908,71 K
Calor específico (Cp)	1,264 kJ/kg.K
Constante do gás	0,3117 kJ/kg.K

Fonte: elaborado pelos autores.

O calor específico encontrado na condição de saída da turbina mostra que o valor adotado para o Cp constante também foi adequado, estando praticamente na média aritmética dos valores entre entrada e saída. E a potência de expansão, desenvolvida pela turbina no modelo de gás ideal, pode ser calculada a partir das temperaturas de entrada e saída da turbina, conforme segue:

$$\dot{W}_{EXP} = \dot{m}(h_3 - h_4) = \dot{m}\,\overline{C_P}\,(T_3 - T_4)$$

$$\dot{W}_{EXP} = 2{,}089 \times 1{,}33 \times (1613{,}15 - 908{,}71)$$

$$\dot{W}_{EXP} = 1.957{,}20\ \mathrm{kW}$$

A potência líquida desenvolvida pelo ciclo é obtida pela diferença entre a potência de expansão produzida e a potência de compressão consumida. Assim:

$$\dot{W}_{LIQ} = \dot{W}_{EXP} - \dot{W}_{COMP}$$

$$\dot{W}_{LIQ} = 1957{,}20 - 891{,}30$$

$$\dot{W}_{LIQ} = 1.065{,}90\ \mathrm{kW}$$

E a eficiência térmica do ciclo seria:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{LIQ}}{\dot{Q}_{H2}} = \frac{1065{,}90}{3743{,}72} = 28{,}47\%$$

O valor encontrado de eficiência é coerente com o esperado e visto na literatura, sendo um pouco superior provavelmente devido às simplificações e idealizações utilizadas nos cálculos, como por exemplo a adoção do modelo de gás ideal.

Finalmente, a título de projeção dos benefícios gerados pelo aproveitamento do hidrogênio disponível nessa configuração proposta, caso se considere uma eficiência do sistema elétrico de geração de 97%, uma disponibilidade típica da turbina a gás de 8.000 horas por ano (GE POWER, 2019) e uma tarifa de eletricidade média no valor de R$ 0,53/kWh, a adoção desse sistema de geração de energia poderia produzir 8.271 MWh/ano, gerando uma economia anual pouco maior de R$ 4,3 milhões para a indústria, conforme demonstrado a seguir:

$$\text{Geração de energia} = \dot{W}_{LIQ} \times \eta_{\text{gerador}} \times \text{h}_{\text{eq}}$$

$$\text{Geração de energia} = 1065{,}9\ \text{kW} \times 0{,}97 \times 8000\ \text{h/ano}$$

$$\text{Geração de energia} = 8.271.384\ \text{kWh/ano}$$

$$\text{Economia gerada} = 8.271.384\ \text{kWh/ano} \times \text{R\$}\ 0{,}53/\text{kWh}$$

$$\text{Economia gerada} = \text{R\$}\ 4.383.833{,}52/\text{ano}$$

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou o aproveitamento energético do hidrogênio, através de sua utilização em uma turbina a gás. Através do levantamento das informações da indústria, foi realizado um balanço de massa para determinação da quantidade de hidrogênio disponível para a queima. A energia disponível no hidrogênio pôde ser encontrada através do poder calorífico inferior desta substância, verificando-se a existência de pouco mais de 3,7 MW térmicos para aproveitamento. Adotando-se valores típicos de eficiência de ciclos a gás nessa faixa de potência, foi possível determinar a possibilidade de geração pouco menos de 1 MW elétrico.

A partir da adoção de alguns parâmetros de operação, como a taxa de compressão (igual a 17 vezes), a temperatura de entrada da turbina (1340°C) e a quantidade de ar na combustão (2,08 vezes o valor estequiométrico), e utilizando algumas hipóteses simplificadoras, especificamente a adoção do modelo de gás ideal e a hipótese de calor específico constante na compressão e na expansão, foi possível dimensionar um ciclo a gás e calcular o potencial de geração.

Nas condições estudadas, determinou-se um potencial de geração de pouco mais de 1 MW (ou mais precisamente 1.065,9 kW), o que poderia resultar em uma geração de eletricidade de 8.271 MWh/ano e uma economia de energia equivalente a R$ 4,3 milhões por ano (para uma tarifa de eletricidade de R$ 0,53/kWh).

Para trabalhos futuros, pode-se sugerir a verificação do efeito das hipóteses simplificadoras, utilizando-se as equações de estado para gases reais através dos modelos matemáticos existentes e eliminando a hipótese de calor específico constante. Outra sugestão é utilizar um ciclo a gás modificado, com inter-resfriamento na compressão, reaquecimento na expansão e regeneração de calor.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHIESA, P.; LOZZA, G.; MAZZOCCHI, L. Using Hydrogen as Gas Turbine Fuel. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v.127, p. 73-80, January 2005.

CLIMATEMPO. **Climatologia Aracruz-ES**. Disponível em: https://www.climatempo.com.br/climatologia/63/aracruz-es. Acesso em: 07 dez. 2019.

GE POWER. **Aeroderivative and Heavy Duty Gas Turbines**. Disponível em: https://www.ge.com/power/gas/gas-turbines. Acesso em: 07 dez. 2019.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. Chichester: John Wiley and Sons, 2006.

SILVA, Ennio Peres da. **Fontes renováveis de energia**: Produção de energia para um desenvolvimento sustentável. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.

SMITH, J.M.; VAN NESS, H.C.; ABBOTT, M.M. **Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics**, 7th Edition. New York: McGraw Hill, 2005.