

## ANEXO V – Resumo Técnico do Projeto

# P252 – TURBOEXPANDER SUPORTADO À MANCAL MAGNÉTICO Ciclo 2020/2021

Vitor Cestaro Randoli <sup>1</sup>, João Roberto C. M. Silva <sup>1</sup>, Fábio Lima <sup>2</sup>, Marco Antônio Fumagalli <sup>2</sup>

1 COMGÁS

2 MUTEKI AUTOMAÇÃO

### Resumo

Energia elétrica é uma das bases mais importantes das atuais sociedades modernas. Neste contexto a transformação da energia do gás natural em energia elétrica, tem ganho importância significativa, em que um turbogerador pode ser utilizado para a redução da alta pressão para a baixa pressão, e com isto gerar energia. O objetivo deste projeto foi a implementação de um *turbogerador* de 10 kW suportado à mancal magnético, e a sintonia de seus parâmetros de controle. Neste projeto foi desenvolvida também a turbina e seus respectivos componentes para a redução de pressão do sistema. Um *setup* experimental foi utilizado, e, diversos resultados foram obtidos como: sistema hermeticamente fechado, o sistema de levitação magnética se mostrou estável girando a alta rotação durante todos os ensaios.

Palavras-chave: Turbogenerador, Mancal magnético, redução de pressão, energia

### Introdução

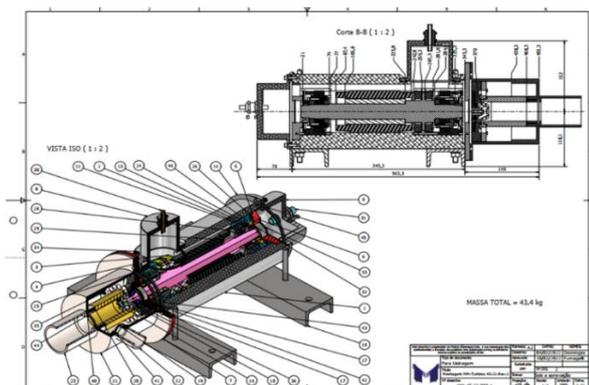
Energia elétrica é uma das bases mais importantes das atuais sociedades modernas. Neste contexto a transformação da energia do gás natural em energia elétrica, tem ganho importância significativa, devido à perda de energia existente no ponto da tubulação, onde ocorre a redução da alta pressão para a baixa pressão, resultando assim um gás de baixa pressão, própria para consumo comercial. Uma maneira convencional de redução da alta pressão do gás da tubulação para a baixa pressão, é realizada por válvulas, com consequência de 100 % da perda da energia de pressão do gás. Uma melhor solução seria a utilização desta diferença de pressão para aplicar em máquinas de expansão (turbogeradores), com utilização de grande parte desta energia perdida. Este projeto, portanto, tem como proposta a confecção mecânica de um eixo suportado por mancais magnéticos, reproduzindo assim um protótipo de um turbogerador. Neste turbogerador o eixo será suportado por dois mancais magnéticos radiais e axiais. No centro do eixo será colocada uma máquina assíncrona, que terá a função de motor e gerador, e na extremidade do eixo uma pequena turbina.

### Desenvolvimento

O estado da arte indica o desenvolvimento de sistemas semelhantes ao conceito do trabalho apresentado explicitando as técnicas utilizadas.

#### A. Realização mecânica de um sistema a mancal magnético

Um dos objetivos deste trabalho é proporcionar o giro do eixo a altas rotações. Eixos pequenos tem a vantagem de possuir altas rigidezes de flexão, e comportar-se como um corpo rígido. Para o desenvolvimento do eixo, devem ser observados os seguintes requisitos: - Rotor de alta rotação: máxima rotação angular do eixo é de:  $\Omega_{\text{máx}} = 30.000$  rpm. Esta velocidade máxima do eixo foi escolhida, a fim de se obter uma alta eficiência da turbina. Todo o projeto mecânico foi desenvolvido com o programa Inventor, e é mostrado na Figura 1.



**Figura 1** – Concepção mecânica do projeto

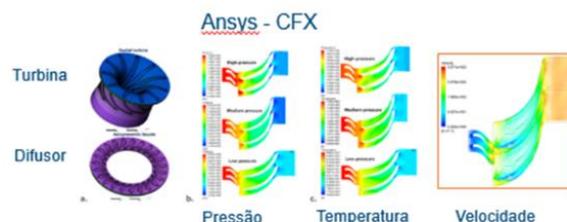
### B. Projeto da Turbina

Este projeto tem o intuito principal da colocação dos turbogeradores em clientes da Comgás. Com isso, foi realizada uma pesquisa e constatou-se que grande parte dos clientes consumidores de gás recebem gás a 7 bar e reduzem para 4 bar para a sua utilização. Como este é um protótipo experimental foi também escolhido um motor de baixa potência (10 kW). A alta rotação é necessária para aumentar a eficiência mecânica da turbina. A Tabela 1 mostra as condições de contorno que foram escolhidas para a realização do projeto da turbina.

Tabela 1- Dados para o projeto da turbina

Condições Teóricas	
Fluido	Gás Natural
Pressão de Entrada	7 bar
Pressão de Saída	4 bar
Temperatura de Entrada	30 °C
Potência	10 kW
Rotação	30.000 rpm

As condições de operação previstas das turbinas de expansão foram utilizadas no projeto preliminar da turbina usando Ansys Bladegen®. As coordenadas foram validadas a partir de software desenvolvido internamente. O projeto inclui a previsão da forma aerodinâmica da pá, além da otimização de turbina de expansão radial com e sem lâminas *splitter* desenvolvendo um código interno em Ambiente Matlab®. Para otimização e teste de sensibilidade Sobol, uma Rede Neural Artificial e ANFIS foram usados. Em seguida, uma simulação numérica foi realizada para visualizar a física do fluxo e a análise térmica do turboexpansor operando em várias pressões de operação, temperatura e velocidades de rotação, conforme mostrado na Figura 2. A Figura 2 representa a distribuição de pressão e temperatura dentro do difusor e turbina, simulados no software ANSYS Turbogrid®.



**Figura 2** - a. Design da turbina e do difusor b. Simulação para diferentes condições de pressão, temperatura.

### C. Painel Elétrico

O painel elétrico para o acionamento e controle do gerador de energia de 10kW e do sistema de levitação magnética foi desenvolvido e é apresentado na Figura 3.



**Figura 3** – Painel elétrico para acionamento e controle do sistema de geração

## Resultados

As seções anteriores descreveram detalhadamente o desenvolvimento teórico e experimental dos componentes de um sistema de mancal magnético ativo. A seguir a integração de todo o sistema é apresentada, bem como os resultados experimentais obtidos.

### A. Sistema Completo

O sistema de controle adquirido da empresa MECOS para atuação junto ao sistema de mancal magnético ativo, é composto de uma unidade de hardware e um software desenvolvido para a plataforma Matlab. A comunicação entre o software e o hardware é realizada através de uma comunicação serial. A primeira etapa do procedimento experimental consistiu, portanto, no estabelecimento da comunicação serial entre hardware e software. A Figura 4 apresenta o sistema completo do turbogerador conectado ao painel elétrico.

## Resultado – Sistema Completo



Figura 4: Visão geral do sistema de mancal magnético

### B. Respostas de Posição

Diversos parâmetros da estrutura de controle de avanço de fase puderam ser ajustados, como o valor do ganho do integrador, a fim de se verificar a estabilidade e a velocidade de resposta do sistema. A resposta presente na Figura 5 apresenta o resultado de posição medido pelos sensores radiais e axiais.

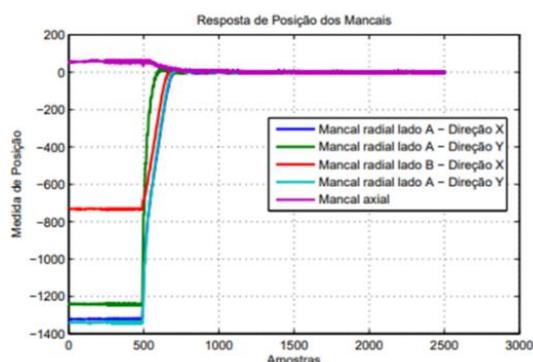


Figura 5: Resposta de posição com ganho integral igual a 1000

### C. Sistema hermeticamente fechado

Um dos importantes aspectos do projeto foi o desenvolvimento deste para que o sistema se comporta-se hermeticamente fechado. Em todas as tampas foram utilizados anéis especiais, a fim de que não houvesse vazamento de gás, e com isso o sistema fosse seguro. A Figura 6, mostra o turbogerador montando no *setup* experimental da Comgás. Os testes realizados referentes ao sistema hermeticamente fechado se mostraram satisfatórios, não havendo vazamento de ar.

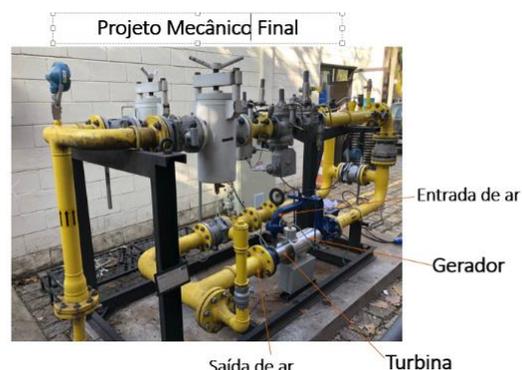


Figura 6: Montagem final no site da comgas

## Conclusões e contribuições

Neste projeto foi desenvolvida uma turbina e seus respectivos componentes para a redução de pressão do sistema. Para otimização e teste de sensibilidade uma Rede Neural Artificial e ANFIS foram usados. Além disso, as variáveis de projeto adimensional e geométrica também foram otimizadas, e seus índices de sensibilidade foram obtidos para o melhor desempenho aerodinâmico do perfil da pá da turbina.

Um *setup* experimental foi utilizado para os testes do conjunto de geração. O sistema é alimentado por ar fornecido através de um compressor. Apesar do *setup* experimental não apresentar as condições ideais calculadas, ele foi escolhido por motivo de segurança (realizar os testes com ar e não com gás natural), e para que não fosse interrompido o fornecimento de gás, caso o teste fosse realizado em um cliente da Comgás.

A modelagem dinâmica de todo o sistema foi inicialmente desenvolvida. O sistema se mostrou estável e com velocidade de resposta e rigidez satisfatórias para uma rotação do eixo sem e com a aplicação de carga externa. A partir da sintonia do controlador e da aplicação de uma corrente de pré-magnetização, então, foi possível levitar o eixo até o seu ponto de equilíbrio permitindo assim a análise da resposta de posição do eixo para diversos valores de referência, conforme apresentado. Após a levitação do eixo, ele foi rotacionado à alta velocidade a partir de um motor assíncrono acionado de forma escalar.

O sistema de levitação magnética se mostrou estável durante todos os ensaios. Quanto à geração de energia, esta não pode ser verificada de maneira prática por três motivos: manutenção constante da pressão de entrada no compressor; vazão nominal do sistema muito abaixo do projeto nominal e perda rápida de vazão no compressor; a redução de pressão constatada nos ensaios não foi suficiente para a geração de energia.

Como proposta de continuidade desta prova de conceito sugere-se a realização de ensaios práticos em um sistema que possa fornecer as condições nominais especificadas no projeto.