

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA DETERMINAÇÃO DE VAZAMENTO DE CÂMARAS DE VÁCUO.

Rafaella Sales Mendonça Alheiros¹, Júlio César Pereira Barbosa²

Resumo: No presente trabalho, desenvolve-se um programa de computador capaz de estabelecer uma relação entre o fluxo de vazamento de uma câmara a vácuo e a pressão residual da mesma, possibilitando a determinação do nível de vedação que o sistema possui. Para o desenvolvimento do programa foi necessário inicialmente adotar uma equação geral que relaciona os dois parâmetros em questão. Para isso, foram coletados dados experimentais publicados em trabalhos anteriores e medições conjuntas adicionais relacionadas no trabalho presente. Dessa forma foi possível desenvolver um algoritmo que foi balizado através de um compilador. O comportamento esperado entre os parâmetros monitorados é linear. O programa foi pensado com a pretensão de poder ser utilizado em qualquer sistema de baixa pressão, pois possui como dados iniciais de entrada o módulo dos coeficientes angular e linear da equação que descreve a capacidade de vedação da câmara de vácuo. Foi observado que o método utilizado garante um percentual de erro máximo de 6,95% para até 0,5 mbar de pressão residual. É possível notar que para pressões mais altas que 0,5 mbar o erro experimental tende a aumentar.

Palavras-chave: Simulação; Vácuo; Pressão residual; Fluxo de vazamento

1. INTRODUÇÃO

Considera-se vácuo as regiões do espaço ocupadas por uma quantidade de partículas inferior ao encontrado normalmente na atmosfera [1]. Quando se deseja trabalhar com baixa pressão, o equipamento responsável por gerar vácuo e controlar a pressão de trabalho é a bomba de vácuo [1].

O vácuo possui grande importância na ciência atualmente e uma das aplicações mais promissoras com que se relaciona a tecnologia de vácuo é a nitretação por plasma, uma das tecnologias utilizadas neste trabalho. Esse é um processo que exige uma atmosfera interna de baixa pressão, assim como vários outros processos envolvendo plasma [2].

Em diversos processos dessa natureza, o conhecimento e medição do nível do vazamento e de como o mesmo se estabelece no sistema proporciona leituras mais precisas e aumentam a eficiência do processo. Neste trabalho serão utilizados dados de pressão residual e fluxos de vazamento estimados por uma técnica de medição que inclui gases de trabalho como H_2 e N_2 com o objetivo de estabelecer matematicamente uma relação entre os parâmetros de controle de um reator a vácuo e o fluxo de vazamento.

Após estabelecer a equação que relaciona a pressão residual promovida pela bomba no sistema, e a taxa de vazamento do reator, generalizada através dos dados experimentais, o trabalho possui também o objetivo de criar e desenvolver um programa de computador capaz de prever o quanto a câmara está isolada do meio externo.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Aplicações do vácuo em processos com plasma

Existem vários sistemas de baixa pressão para um gama enorme de aplicações na ciência, tecnologia e indústria em geral, como por exemplo, simuladores de reentrada atmosférica, deposição de filmes fino, produção de chips, esterilização de equipamentos cirúrgicos, etc [3]. Para atingir pressões adequadas dentro de reatores de vácuo, é necessário em sistema de conexão que inclui bomba de vácuo. Existem vários modelos que são específicos para cada aplicação como bombas mecânicas rotativas, roots, ou do tipo difusores, turbomoleculares ou criogênicas [4].

Quando se deseja trabalhar com vácuo é necessário estabelecer uma pressão de trabalho. A densidade das partículas no ambiente de trabalho define diferentes faixas de pressão, sendo cada uma delas mais apropriada para determinadas aplicações específicas [5].

Uma tecnologia muito relacionada a utilização do vácuo a baixa pressão são os reatores de plasma, pois existem

diversos processos por plasma que necessitam de uma atmosfera interna de baixa pressão, como a deposição de filmes finos, nitretação, sinterização e outras técnicas de recobrimento por plasma.

Um reator de plasma, por exemplo, consiste basicamente em um sistema de vácuo como sugere o esquema mostrado na Figura 1 logo abaixo.

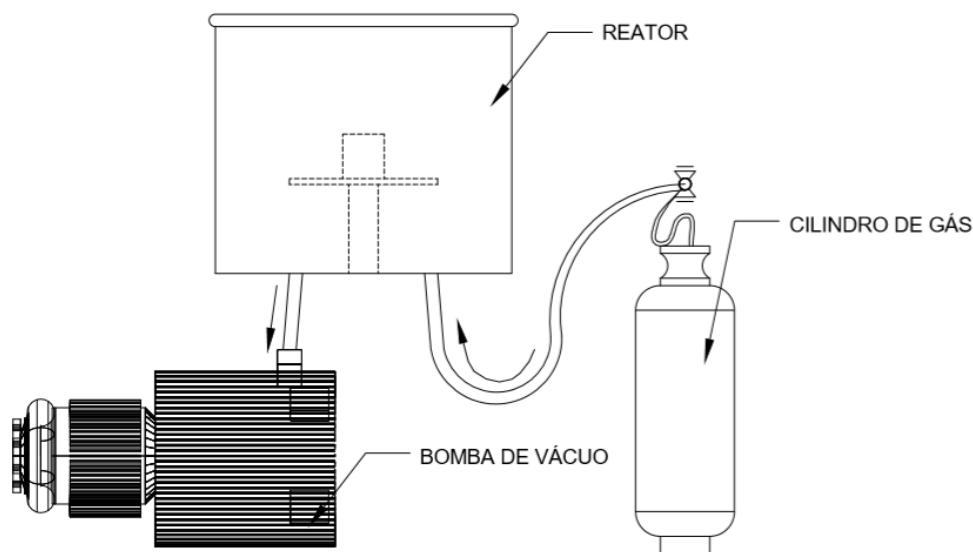


Figura 1: Esquema de um sistema a vácuo (Autoria própria).

Dentro da tecnologia de vácuo o conhecimento sobre o poder de evacuação de bombas de um reator e a capacidade de vedação de tal câmara são características indispensáveis, pois, o objetivo disso é sempre uma maior pureza atmosférica no interior do reator e dependendo da aplicação, o grau de pureza precisa ser muito próximo de 100%. A maior vedação desses reatores necessita então de um cuidado especial, as partículas da atmosfera podem ser elementos contaminantes num processo que exija pureza gasosa. Ocorre que independente do aparato que esteja sendo utilizado existe vazamento da atmosfera externa para o sistema, reduzindo assim a eficiência do processo que se deseja executar [1].

Experimentalmente é possível medir o valor de vazão de gás que invade o reator pelo vazamento, e espera-se que esse fluxo de gás indesejável possua relação linear com a pressão residual no reator, ou seja, a pressão mínima que a bomba do sistema é capaz de promover. A possibilidade de estimar esse vazamento proporciona leituras mais precisas e aumentam a eficiência do processo.

2.2. Linguagem de programação

A implementação de um algoritmo em um programa de computador, é efetuada ao descrevê-lo de uma forma que o computador seja capaz de executá-lo. A descrição do programa é realizada por intermédio de uma “linguagem de programação”.

Segundo [6], considera-se que a primeira linguagem de programação apareceu antes mesmo do primeiro computador moderno. Augusta Ada Byron, filha de Annabella Milbanke e do poeta Lord Byron, publicou uma tradução do artigo de Luigi Menabrea sobre a Máquina Analítica de Charles Babbage, na mesma, foram acrescentadas notas pela tradutora, as quais ela descreve comandos de forma minuciosa com o objetivo calcular os números de Bernoulli. Este, considerado o primeiro software, idealizado por Ada, foi considerado um programa de baixo nível.

Por muito tempo a programação se manteve muito custosa e suscetível a diversos erros, quando na década de 50, surgiu uma das primeiras tentativas bem-sucedidas de facilitar a programação. O FORTRAN, software criado por John Backus no ano de 1954, teve como conceito inicial “aceitar uma formulação concisa de um problema em termos de notação matemática e produzir um programa”[7]. Seu nome FORTRAN deriva da união de duas palavras formula e translation. Desde a década de 50, época da criação do FORTRAN, a programação vem se desenvolvendo de modo significativo [8].

A primeira norma regulamentando a linguagem de programação FORTRAN veio no ano de 1966, quando a “American National Standards Institute” (ANSI) publicou uma norma que unificou a linguagem, esta, foi nomeada FORTRAN 66. Anos depois, a linguagem passou por diversas revisões, de forma que fossem incorporadas ideias da programação estruturada. As mais notáveis revisões, foram o FORTRAN 77 e o FORTRAN 90, introduzidas em 1978 e 1991, respectivamente, esta última, incorpora diversas características das linguagens modernas de programação, dentre estas o uso de “arrays” dinâmicos, “records”, módulos e apontadores, derivação de tipos e “overload” de operadores, um melhor sistema de declarações e o uso de protótipos e modernas estruturas de

controle [9].

As formas existentes de se escrever algoritmos em FORTRAN são basicamente duas: a primeira com formulário fixo, conhecida como ('fixed form'), e a segunda com formulário livre ('free form'). Sendo que esta segunda, a 'free form', se encontra disponível apenas para os compiladores mais modernos que suportam a programação em FORTRAN 90 [10].

3. Materiais e métodos

Para estabelecer uma equação que relaciona o fluxo de vazamento com a pressão residual em uma câmara de vácuo específica, foram utilizados valores de vazamento estimados em outros trabalhos utilizando a mesma câmara. Todas as referências utilizadas são referentes a reatores de nitretação por plasma (Figura 2) que inclui a câmara com seus periféricos e uma bomba rotativa de palhetas (Figura 3), localizados na Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA). A bomba mecânica que foi utilizada é da marca Edwards, modelo E2M5 capaz de atingir uma pressão mínima em torno de 0,1mbar (10 Pa) no sistema de plasma que ela está conectada.



Figura 2: Câmara de Vácuo para Nitretação á Plasma. (Autoria própria).



Figura 3: Bomba mecânica rotativa Edwards (Modelo E2M5). (Autoria própria).

Inicialmente foram utilizadas medições envolvendo o mesmo gás de trabalho, o hidrogênio (H_2), coletados dos

trabalhos [2,11] e através de medição conjunta. As medições foram feitas em duplicatas, e os dados da primeira medição de vazamento com as pressões de trabalho correspondentes, mostradas na Tabela 1, foram utilizadas para gerar o primeiro gráfico.

Tabela 1. Fluxo de vazamento do gás hidrogênio em função da pressão residual no reator da primeira medição. (Autoria própria)

Fluxo de vazamento (SCCM)	Pressão residual (mbar)
9,01	0,1480
5,86	0,1284
5,04	0,1091

Os dados da segunda medição de vazamento com as pressões de trabalho correspondentes, mostradas na Tabela 2, foram utilizadas para gerar o segundo gráfico. Ambos os gráficos foram construídos para verificar a esperada relação linear existente entre os dois parâmetros analisados, avaliando o coeficiente de correlação da regressão linear feita.

Tabela 2. Fluxo de vazamento do gás hidrogênio em função da pressão residual no reator da segunda medição. (Autoria própria)

Fluxo de vazamento (SCCM)	Pressão residual (mbar)
9,20	0,1490
7,10	0,1334
4,96	0,1046

Após essa primeira análise, foram utilizados todos os dados de vazamento e pressão residual mostrados anteriormente obtidos com o hidrogênio como gás de trabalho, junto com dados de vazamento e pressão residual obtidos através de medição conjunta, com um novo gás de trabalho, o nitrogênio (N_2), a fim de se obter uma equação geral que seja possível estimar o fluxo de vazamento de gás desse reator através pressão residual. A utilização de gases diferentes foi necessária para incorporar o máximo de pontos conhecidos nesse modelo e não interfere no resultado final. Os dados utilizados para obtenção dessa equação estão na Tabela 3.

Tabela 3. Fluxo de vazamento de diferentes gases em função da pressão residual no reator. (Autoria própria)

Fluxo de vazamento (SCCM)	Pressão residual (mbar)	Gás de referência
9,01	0,1480	Hidrogênio
5,86	0,1284	Hidrogênio
5,04	0,1091	Hidrogênio
9,20	0,1490	Hidrogênio
7,10	0,1334	Hidrogênio
4,96	0,1046	Hidrogênio
4,98	0,1046	Nitrogênio
4,80	0,1097	Nitrogênio

Todos os gráficos e equações foram obtidos através do software Origin. Após realizar a regressão linear e achar a equação que relaciona o fluxo de vazamento de gás com a pressão residual do reator em questão, foi utilizado o software Fortran para implementar esses dados e compor um programa de computador que estima o fluxo de vazamento para qualquer pressão residual do reator que se encontre dentro da faixa de pressões mínima e máxima utilizadas.

4. Resultados e discussão

Estabelecer uma relação entre o fluxo de vazamento e a pressão residual no reator é de grande importância, como já comentado anteriormente, devido a impossibilidade de se ter um sistema totalmente vedado, o conhecimento prévio do fluxo de vazamento proporciona leituras mais precisas.

Na literatura já existiam referências de trabalhos que calcularam o fluxo de vazamento em função da pressão residual no processo de nitretação por plasma no reator a vácuo da UFERSA, esses dados juntos com outros dados de medição conjunta foram utilizados para generalizar uma relação entre esses dois parâmetros. O Gráfico 1 mostra a relação entre as primeiras medições de fluxo de vazamento e pressão residual no reator quando utilizado o Hidrogênio como gás de referência.

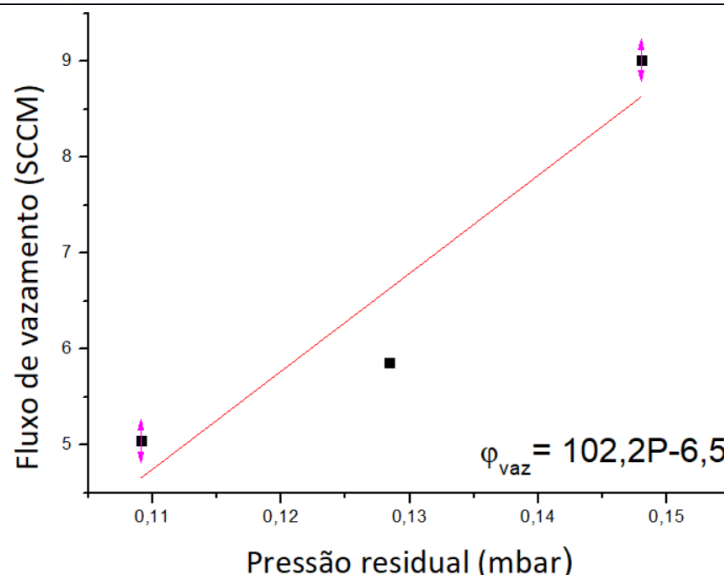


Gráfico 1: Relação entre o fluxo de vazamento e a pressão residual da primeira medição utilizando o Hidrogênio como gás de trabalho. (Autoria própria)

Analisando o gráfico 1 é possível perceber que após a realização da regressão linear, como previsto, existe uma forte relação diretamente proporcional entre os dois parâmetros, explicado pelo fato pontos experimentais se mantêm próximos da reta de regressão, confirmada pelo valor do seu coeficiente de correlação igual a 0,949.

O Gráfico 2 apresenta a relação entre as medições duplicatas de fluxo de vazamento e pressão residual no reator quando utilizado o hidrogênio como gás de referência.

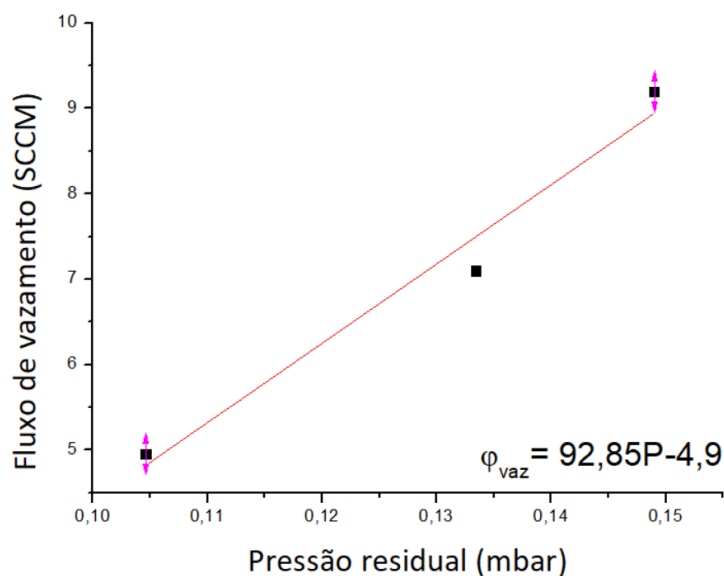


Gráfico 2: Relação entre o fluxo de vazamento e a pressão residual da segunda medição utilizando o Hidrogênio como gás de trabalho. (Autoria própria)

Aqui é possível confirmar a interpretação anterior pois é possível, novamente, verificar uma proximidade entre os pontos experimentais e a reta de regressão, que indica, uma forte relação diretamente proporcional entre o fluxo de vazamento e a pressão residual de trabalho do reator, o coeficiente de correlação obtido neste caso foi 0,987.

Ambas as análises anteriores foram realizadas com o hidrogênio (H_2) sendo o gás de referência, este fato não implica que o mesmo seja um gás específico para este tipo de medição, dessa forma, outros gases de trabalho podem servir como referência, como por exemplo o nitrogênio (N_2).

O Gráfico 3, mostra um comparativo dos dois resultados anteriores. Nele é possível verificar que quanto maior os valores mais altos de pressão residual, maior a diferença de fluxo de vazamento estimado entre as duas equações. Isso indica uma maior imprecisão ao estabelecer fluxos de vazamento relacionados a altas pressões. É perceptível que as duas curvas tendem a se distanciar uma da outra ao ponto em que a pressão residual precisamente 0,5 mbar apresenta um erro experimental de 6,95%. Por causa disso qualquer tentativa de estimar o vazamento do reator a uma pressão residual acima desse valor crítico se torna inadequada.

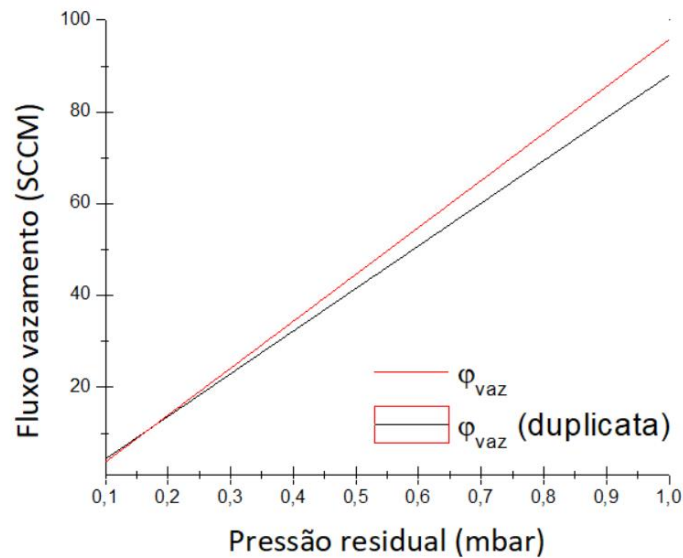


Gráfico 3: Comparação entre 1ª medição e duplicata. (Autoria própria)

Com o máximo de dados possíveis foi construído o Gráfico 4, que mostra os oito pontos coletados para o trabalho e a equação que generaliza a relação entre o fluxo de vazamento e a pressão residual do reator de plasma da UFERSA através desses dados.

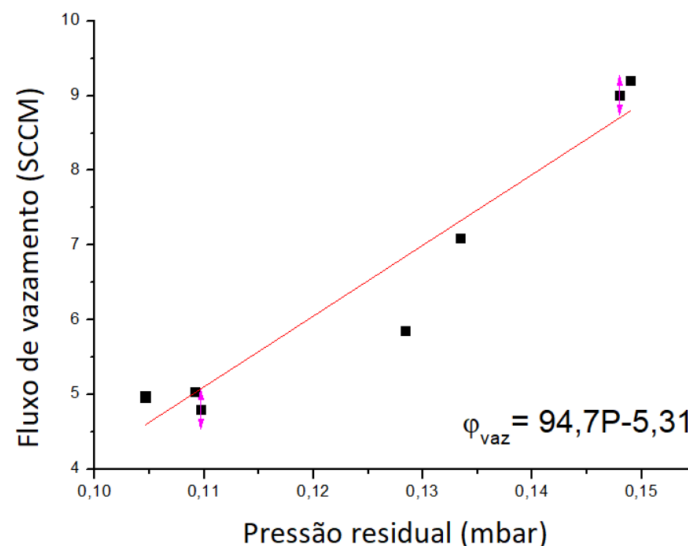


Gráfico 4: Relação entre o fluxo de vazamento e a pressão residual do reator de plasma. (Autoria própria)

O gráfico 4 mostra novamente a relação linear existente entre esses dois parâmetros, que possui coeficiente de correlação igual a 0,965. A Equação 1 obtida representa reta de regressão ajustada entre os dados experimentais e pode agora ser utilizada para estimar o vazamento de gás que vai ocorrer para qualquer pressão residual de trabalho entre a pressão mínima de 0,1046 mbar (10,46 Pa) e máxima de 0,1490 mbar (14,90 Pa).

$$\varphi_{vaz} = 94,7P - 5,31 \quad (1)$$

A partir da Equação 1 algumas interpretações importantes podem ser tomadas, o coeficiente linear negativo tem uma explicação física bem útil, mostra que o sistema só possui fluxo de vazamento a partir de uma pressão mínima positiva, já o coeficiente linear positivo no caso, pode ser entendido como uma falha na medição ou no processo de generalização da equação. Essa situação em que teríamos o fluxo de vazamento igual a zero, isto é, o caso onde o sistema fosse totalmente vedado, nos dá a pressão mínima de trabalho no reator, sendo este o valor de pressão mínimo mostrado logo abaixo:

$$P_{min} = \frac{5,31}{94,7} = 0,056$$

Esse valor, obtido ao dividir o coeficiente linear pelo coeficiente angular da reta de regressão, foi o valor mínimo de pressão residual considerado no momento da implementação dos dados do reator da UFERSA no programa de computador.

O software proposto pelo trabalho teve o objeto de estimar o fluxo de vazamento no sistema ao ser relacionado uma pressão residual, sendo este valor mais preciso no regime de baixa pressão. Para confecção do programa foi utilizado a linguagem de programação em Fortran, o código foi escrito de forma que o mesmo não fosse limitado a ser utilizado apenas no reator em questão.

O programa inicia solicitando como dados de entrada o módulo dos coeficientes angular e linear da equação generalizada. O fato de serem pedidos o módulo desses coeficientes limita o cálculo do fluxo de vazamento para os casos onde o coeficiente linear é negativo apenas. A função utilizada no programa corresponde a Equação 2, onde “a” é o valor do coeficiente angular da equação, e “b” o coeficiente linear.

$$\varphi_{vaz} = |a| \cdot P - |b| \quad (2)$$

Após a inserção desses valores, o programa retorna imediatamente a pressão mínima necessária para ocorrer vazamento de gás no reator e solicita um novo valor, sendo esse, a pressão residual no reator para que o programa estime o fluxo de vazamento que irá ocorrer. A pressão residual inserida deve necessariamente ser um valor maior que a pressão mínima informada, sendo assim, o software poderá retornar duas opções de resposta: se a pressão residual não for maior do que a mínima, o programa informa o erro, senão, é informado pelo programa o fluxo de vazamento relacionado aquela pressão.

Cada reator ou câmara de vácuo pode gerar uma função geral diferente, isso ocorre por vários motivos, sendo alguns deles a conexão entre os equipamentos, o desgaste da vedação entre outros. A escolha de pedir também os dados da equação generalizada ocorreu de forma proposital, dessa forma, o software criado não se limita apenas ao reator da UFERSA, podendo ser utilizado por qualquer sistema a vácuo em que se conheça essa relação o fluxo de vazamento e a pressão residual.

5. CONCLUSÕES

Os dois parâmetros avaliados se comportaram de maneira previsível, possibilitando estabelecer uma relação entre o fluxo de vazamento de gás num sistema a vácuo e a pressão residual no mesmo, sendo esta, uma relação linear. A precisão da relação se mostra variável, sendo esta mais precisa quando o sistema trabalha no regime de pressão mais baixa.

O software desenvolvido funciona exatamente como planejado, informa um valor estimado do fluxo de vazamento de gás que ocorrerá ao ser associado a uma pressão residual. O mesmo foi elaborado de forma a poder ser utilizado para outros reatores apenas mudando os seus coeficientes de uma função linear

Para futuros trabalhos que envolvam o reator a vácuo da UFERSA, é recomendado a utilização do software desenvolvido para aumentar a eficiência das medições. Em futuros trabalhos que busquem a generalização de uma equação que relacione esses parâmetros para outros sistemas a vácuo, é recomendado a metodologia utilizada neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- [1] MOUTINHO, A. M. C. et al. Tecnologia de vácuo. 1 ed. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 1980.
- [2] AZEVEDO, L. O. Medição do fluxo de gás atmosférico por vazamento numa câmara de vácuo, utilizando ar e H₂ como gases de referência. 2018. Monografia de Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [3] SILVA, W. G. et al. Experimental plasma wind tunnel for hypersonic flight simulating. In: Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, 10., 2008, São José dos Campos/SP. ITA. p. 20-23
- [4] AMERICAN VACUUM SOCIETY – History of Vacuum Science and Technology, published in the 30th Anniversary of AVS, 1984.
- [5] ALVES JÚNIOR, C. Nitretação a plasma: fundamentos e aplicações. 2001.
- [6] KIM, E. E.; TOOLE, B. A. Ada and the first computer. Scientific American, v. 280, p. 76- 81, 1999.
- [7] BACKUS, J. The history of Fortran I, II, and III. In: History of programming languages I. ACM, p. 25-74, 1978.
- [8] MIESEL, D. FORTRAN The Pioneering Language. 2012. Disponível em: <<http://www03.ibm.com/ibm/history/ibm100/us/en/icons/fortran/>>. Acesso em: 25 jan. 2020.
- [9] GUDWIN, R. R. Linguagens de Programação. 1997. Universidade Estadual de Campinas (Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação).
- [10] CRISTO, H. P. Programação em Linguagem FORTRAN. 2003.
- [11] PEREIRA, I. L. Determinação experimental do fluxo de gás atmosférico por vazamento numa câmara de vácuo. 2017. Monografia de Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

7. Anexos

Algoritmo do programa desenvolvido:

```
Program tcc

Real*8:: a, b, c, fi, P

Write(*,*) "Este programa informa o fluxo de vazamento em uma câ"
Write(*,*) "mara de vácuo a partir de dados de pressão residual."
Write(*,*) "*****"

Write(*,*) "Relação linear entre fluxo de vazamento e pressão."
Write(*,*) "*****"

Write(*,*) "Digite o módulo do coeficiente angular em 'SCCM/mbar'"
write(*,*) "e aperte 'ENTER'."
Write(*,*) "*****"

Read(*,*) a

Write(*,*) "Digite o módulo do coeficiente linear em 'SCCM e'"
Write(*,*) "aperte 'ENTER'."
Write(*,*) "*****"

Read(*,*) b

c=b/a

Write(*,*) "O valo da pressão residual mínima ,:", c, "mbar."
Write(*,*) "-----"
Write(*,*) "-----"

Write(*,*) "Digite o valor da pressão residual em 'mbar' e aperte"
Write(*,*) "'ENTER'."
Write(*,*) "-----"
Write(*,*) "-----"

Read(*,*) P

If (P.lt.c) then

Write(*,*) "O valor de pressão residual não atinge menos do que"
Write(*,*) ", c, "mbar. Portanto, digite um valor maior."
Write(*,*) "-----"
Write(*,*) "-----"

else

    fi=a*P-b

Write(*,*) "A câmara de vácuo sofre com vazamento de:", fi, "SCCM"
Write(*,*) "-----"
Write(*,*) "-----"

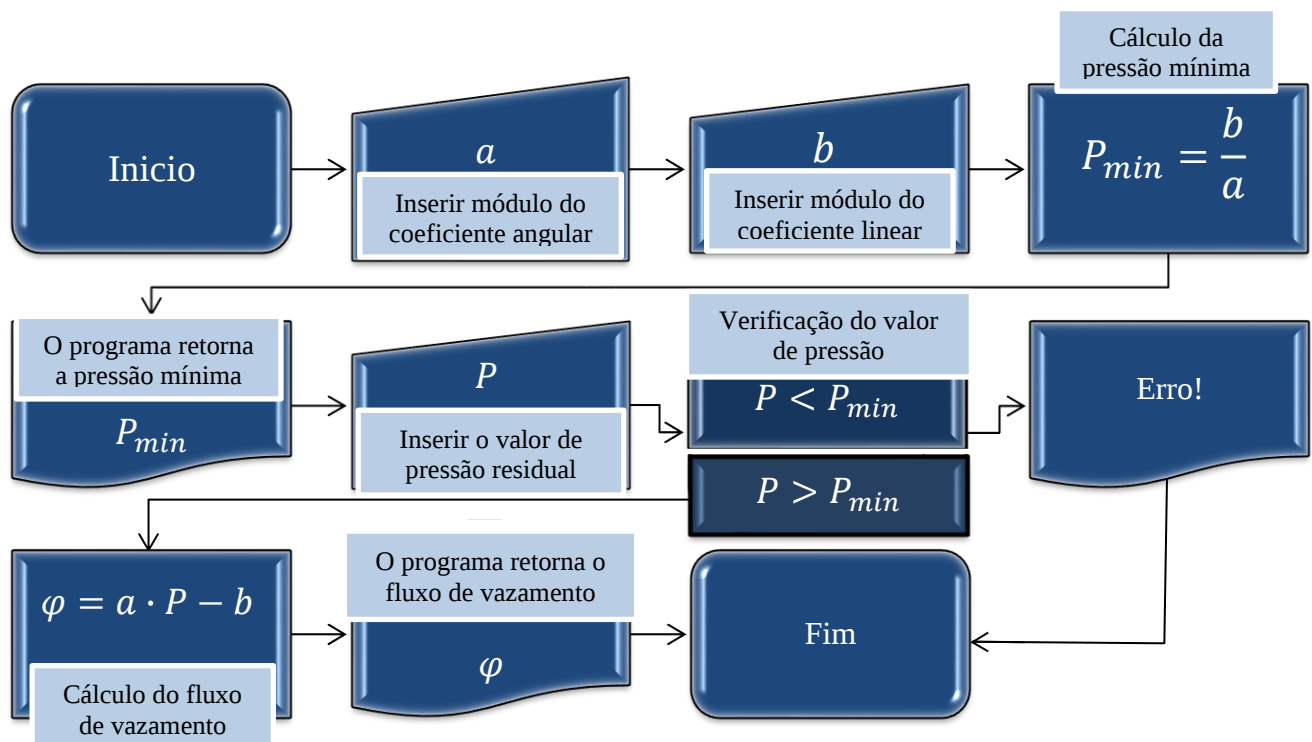
endif

Write(*,*) "Clique no 'x' da janela para sair."

read(*,*)

End program tcc
```

Fluxograma do funcionamento do programa:



LEGENDA

