

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

---

**DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE NÍVEL DE GÁS**  
**EM BOTIJÕES RESIDENCIAIS DE GLP**

**Leonardo Mouta Trautewein**  
**Maurício Ribeiro de Menezes**

**Orientador: Amílton Sinatora**

*São Paulo 12 de dezembro 2003*  
*Amílton 10,0*  
*Bez zero*

**São Paulo**  
**2003**

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

---

**DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE NÍVEL DE GÁS  
EM BOTIJÕES RESIDENCIAIS DE GLP**

Trabalho de formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a obtenção do título de  
Graduação em Engenharia

**Leonardo Mouta Trautewein  
Maurício Ribeiro de Menezes**

**Orientador: Amílton Sinatora**

**São Paulo  
2003**



## Índice

1. Introdução .....	2
2. Desenvolvimento.....	3
2.1. Definição do Problema.....	4
2.2. Considerações Básicas .....	4
2.3. Componentes do Problema.....	6
2.3.1. Gás Liquefeito de Petróleo – GLP .....	6
2.3.2. Botijão residencial de GLP – P13.....	7
2.3.3. Válvula Reguladora de Pressão .....	7
2.3.4. Fogão Residencial .....	8
2.3.5. Tempo disponível para aviso .....	9
2.3.6. Materiais para construção .....	10
2.4. Proposição de Soluções .....	10
2.4.1. Êmbolo.....	11
2.4.2. Balão .....	12
2.4.3. Diafragma.....	13
2.4.4. Consumo de GLP .....	13
2.4.5. Balança.....	14
2.4.6. Bourdon .....	14
2.5. Análise das soluções.....	15
2.5.1. Análise detalhada da solução Diafragma .....	16
2.5.2. Análise detalhada da solução Bourdon.....	20
2.6. Plano de Estudo.....	21
2.6.1. Aquisição de Manômetro de Bourdon .....	22
2.6.2. Análise de seu funcionamento.....	22
2.6.3. Adaptação para realização de testes .....	26
2.6.4. Desenho do produto final.....	29
3. Conclusão .....	31
4. Agradecimentos .....	32
5. Bibliografia .....	33
6. Apêndice A – Código do Programa em Visual Basic.....	34
7. Apêndice B – Desenhos de Fabricação .....	35



## 1. Introdução

Um problema freqüentemente encontrado na maioria dos lares brasileiros é o término repentino do gás de cozinha (GLP), o que causa uma enorme irritação ao usuário, pois por muitas vezes ele acaba perdendo o alimento que estava preparando ou necessita substituir às pressas o botijão de gás.

Técnicas caseiras extremamente perigosas são utilizadas como forma de aproveitar os resquícios de gás no botijão. Como exemplo, podemos citar:

- Chacoalhar o botijão
- Deitar o botijão
- Expor o botijão ao sol, uma vez que o aumento de temperatura do mesmo gera aumento da pressão interna e o consequente consumo do restante do gás

Uma solução simples para o término repentino de GLP é o armazenamento de um botijão reserva cheio. Porém, o armazenamento apresenta algumas inconveniências, como:

- Necessidade de espaço para o seu armazenamento, o que vai de encontro com a tendência de casas e apartamentos em áreas urbanas de tamanhos cada vez mais reduzidos
- O risco de vazamento aliado ao condicionamento em locais fechados geram um grande perigo com relação a explosões acidentais

Portanto, o que este projeto de formatura se propõe a fazer é desenvolver uma solução de engenharia adequada para este problema, ou seja, desenvolver um dispositivo para notificar o usuário quando o gás do botijão está acabando. Note que, apesar de ser um problema cotidiano, este tema é de caráter inédito, pois não se tem notícia de algo projetado para este fim.

Os autores deste projeto de formatura ficaram extremamente interessados em desenvolver este tema por vários motivos. O primeiro deles, é o fato de que ao término



do projeto haveria um produto físico, uma solução real fruto das análises e cálculos feitos durante a elaboração do projeto. Este ponto é de extrema importância para os alunos, pois durante o aprendizado na faculdade de engenharia, foram raras as vezes em que foi possível ter uma aplicação prática dos conceitos adquiridos. Além disso, é esperado que imperfeições resultantes da idealização dos modelos sejam vistas com o dispositivo construído, o que obrigaria a equipe a sugerir melhorias de forma a corrigir estes problemas. Outro ponto que despertou o interesse dos alunos foi o fato deste problema ter uma abrangência social, sendo facilmente compreendido pela mais simples pessoa, o que traduz em suma o conceito de engenharia, isto é, aplicar os conceitos físicos e matemáticos para melhorar as condições de vida das pessoas.

## **2. Desenvolvimento**

Nesta parte será detalhada a sequência das atividades, mostrando passo a passo o desenvolver do projeto. Em cada tarefa serão mostradas as dificuldades encontradas bem como os resultados de cada etapa. Ao final, concluiremos o trabalho com os resultados do projeto, tanto sob o ponto de vista da engenharia quanto sob o ponto de vista acadêmico.

Apesar de ser um projeto único, que até então não foi idealizado, a metodologia utilizada para a elaboração deste projeto não foge muito àquelas utilizadas para o projeto de qualquer produto novo. As etapas básicas são:

- Definição do problema
- Proposição de soluções
- Detalhamento e avaliação das soluções
- Escolha da solução final
- Construção de protótipo e realização de testes
- Sugestão de melhorias e desenho do produto final



É claro que a estas fases foram adicionadas etapas complementares como, por exemplo, a pesquisa bibliográfica na qual os alunos adquiriram um melhor domínio do campo de estudo envolvido.

## 2.1. Definição do Problema

O primeiro passo de todo projeto como este foi definir exatamente qual o problema a ser solucionado e quais as funções que qualquer solução proposta deve atender. Após algumas conversas com o professor orientador e o Engenheiro Metalurgista Jean Carlo C. de Paola, o qual tem supervisionado os alunos de maneira ativa, chegou-se a conclusão de que qualquer solução encontrada deveria atender a dois requisitos básicos:

- Monitorar a quantidade de gás no botijão e detectar o momento quando o nível chegasse a um valor pré-estabelecido
- Avisar o usuário de maneira eficiente para que este possa ficar ciente que o gás está chegando ao fim

A título ilustrativo, a figura abaixo está representando estas duas funções:



*Figura 1: Sistema de funcionamento do dispositivo*

## 2.2. Considerações Básicas

Além de ser capaz de realizar as funções descritas na seção anterior, as soluções propostas também devem atender algumas restrições ou considerações básicas. Algumas destas considerações são um tanto quanto óbvias, mas é válido listar todas elas e explicar sucintamente cada uma:



- **Custo:** o preço de venda do produto é a variável mais importante no estudo de viabilidade da produção do mesmo, pois seu valor de venda não pode ser comparável ao do fogão, isto é, o impacto no preço do fogão deve ser o menor possível. Além disso, o público alvo inclui usuários de todas as classes sociais, o que obriga o desenvolvimento de uma solução barata para que todos possam ter acesso a mesma, mediante a incorporação a fogões de baixo custo.
- **Produção:** simplicidade de fabricação é outra variável extremamente importante, pois além de facilitar a produção a série, ela está intimamente ligada ao custo de produção, isto é, quanto mais fácil de produzir, menor será o seu custo, contribuindo para a redução do valor de venda do produto.
- **Segurança:** como o combustível do botijão, o GLP, é inflamável, podendo causar explosões, o dispositivo deverá cumprir todos os requisitos de segurança necessários, e provavelmente terá que possuir alguma certificação para que seja comercializado.
- **Manuseio:** a simplicidade de instalação e manuseio do dispositivo também é importante, pois os usuários a que se destina o produto pertencem a todas as classes sociais, com todo o tipo de nível de escolaridade possível.
- **Comunicação:** como já foi mencionado, o dispositivo deve comunicar o usuário de maneira eficiente quando o nível de gás atingir um valor pré-estabelecido. Para isso, ficou definido que a comunicação deve ser feita de forma luminosa (lâmpadas ou LED's) e/ou sonora (sirene ou apito).
- **Confiabilidade:** é imprescindível que a solução seja confiável, ou seja, é inaceitável que o dispositivo esteja mal calibrado e avise o usuário quando o botijão ainda contém metade do volume total de gás, ou, ainda pior, que o dispositivo avise o usuário quando o gás na verdade já acabou.
- **Condições adversas:** o dispositivo deve estar preparado a suportar as mais adversas situações que podem ocorrer no dia-a-dia. Como exemplo podemos citar: exposição ao sol e chuva, choques mecânicos, etc ...



## 2.3. Componentes do Problema

Para projetar o dispositivo eficientemente, é necessário obter todas as características possíveis do meio onde o dispositivo irá atuar. Isto significa conhecer a fundo todos os equipamentos que interagem com o fogão, como válvulas reguladoras de pressão, mangueiras, botijões, etc. Para a realização desta tarefa, foi feita uma pesquisa extensiva a catálogos de fabricantes, normas técnicas e portarias de regulamentação, além de várias visitas a fabricantes de materiais correlacionados com o assunto. A seguir pode-se ver um resumo destes dados:

### 2.3.1. Gás Liquefeito de Petróleo – GLP

O gás liquefeito de petróleo (GLP), também chamado de gás de cozinha, é o gás contido nos botijões que são utilizados residencialmente. Este gás é uma mistura de hidrocarbonetos onde predominam o propano e o butano, sendo sua densidade de aproximadamente  $2,10 \text{ kg/m}^3$ , a  $15^\circ\text{C}$  e 1 ATM. Existe uma portaria regulamentatória, emitida pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), que estipula as suas características. Veja abaixo algumas características do GLP:

GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO	PROPANO COMERCIAL	BUTANO COMERCIAL	PROPANO BUTANO	PROPANO ESPECIAL	MÉTODO
PRESSÃO DE VAPOR 37,8°C, kgf/cm <sup>2</sup> máximo	15,0	5,0	15,0	15,0	MB-205
PONTO DE EBULIÇÃO 95% a 760 mmHg, °C máximo	-38	2	2	-38	MB-285

Figura 2: Propriedades do GLP

Como se pode ver, existem várias categorias na especificação do GLP, porém àquela utilizada nos botijões residenciais é a composição Propano-Butano.

Por ser armazenado nos botijões, a maior parte do GLP fica no estado líquido quando o botijão está com sua capacidade máxima preenchida. Se o gás fosse uma mistura pura, poderíamos afirmar que a pressão interna do botijão permaneceria





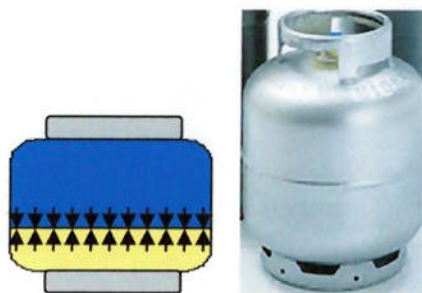
constante até que a última gota de GLP se evaporasse dentro do botijão, mas como o gás é constituído por uma mistura de substâncias, a sua pressão interna varia mesmo que haja parcela líquida em seu interior.

### **2.3.2. Botijão residencial de GLP – P13**

Este botijão tem a nomenclatura P-13, pois possui 13 kg de massa de GLP em seu interior. Sua construção segue a norma ABNT 8642 e suas principais características são:

- Pressão de Trabalho: 15 atm ou 1,5 MPa
- Massa de GLP: 13 kg
- Volume Útil: 31 litros
- Porcentagem Máxima de GLP na fase líquida: 85%

A porcentagem máxima de líquido dentro do botijão tem a função de controlar a pressão máxima dentro do recipiente, por aspectos de segurança. Veja abaixo, um esquema representativo do botijão:



**Figura 3: Botijão de Gás Residencial (P-13)**

### **2.3.3. Válvula Reguladora de Pressão**

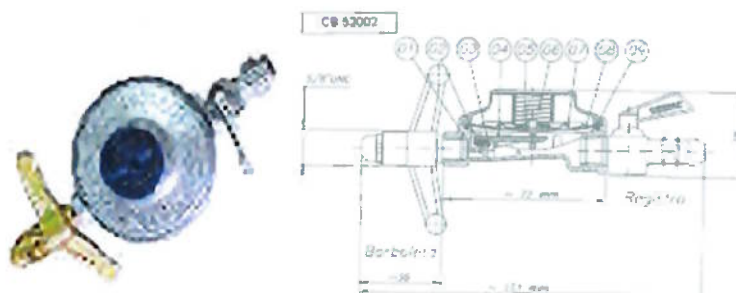
A válvula reguladora de pressão é aquele dispositivo obrigatório presente logo acima de todos os botijões. A sua função básica é manter uma pressão constante durante todo o uso do GLP de um botijão e possibilitar uma combustão eficaz no fogão. Ela segue a norma ABNT 8474 e suas principais características são:

- Pressão Nominal de Saída: 2,8 kPa



- Pressão de Entrada: 0,5 a 17 atm
- Vazão Máxima: 4 kg/h

Como é possível notar, a pressão de saída na válvula reguladora de pressão é extremamente baixa, e praticamente constante durante todo o consumo de gás de um botijão. Esta característica inviabilizaria qualquer dispositivo baseado na variação de pressão e vazão que quisesse ser colocado após a válvula.



**Figura 4: Regulador de Pressão**

#### **2.3.4. Fogão Residencial**

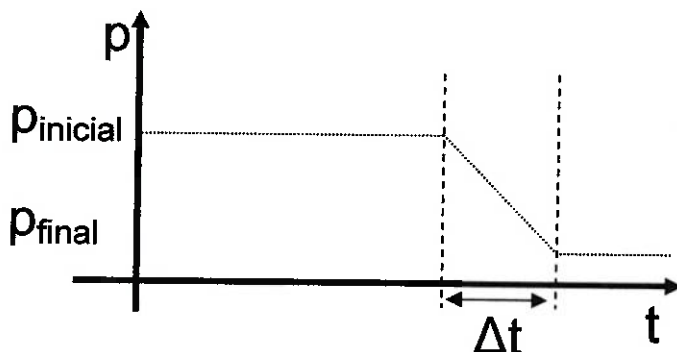
Outro importante componente do problema é o próprio fogão residencial, pois ele é o dispositivo responsável pelo consumo do gás. Após analisar o seu funcionamento e características, podemos dizer que as variáveis mais importantes deste aparelho para o nosso problema é a sua pressão de trabalho, em torno de 2.8 Kpa, e a taxa de consumo de GLP. Para esta segunda variável, foi feita uma estimativa de consumo baseada na taxa média de consumo de GLP por residência. O IBGE indica que uma família comum consome em média 1 botijão de GLP por mês. Assim, realizando uma estimativa de quantas horas por dia o fogão fica ligado, chegamos a conclusão que a taxa de consumo está em torno de 300 gramas de GLP por hora.



**Figura 5: Modelo de fogão residencial**

### **2.3.5. Tempo disponível para aviso**

O tempo disponível para aviso ao usuário de que o gás está acabando é uma importante variável, pois ele deve ser suficiente para garantir que o mesmo possa terminar o uso do fogão para posteriormente reabastecer o botijão. Veja figura ilustrativa com o modelo utilizado para o cálculo deste intervalo de tempo:



**Figura 6: Modelo do tempo disponível para aviso ao usuário**

Note que a incógnita  $p_{\text{inicial}}$  vale 15 atm, isto é, a pressão de trabalho do botijão. Vale destacar que foi levantada a informação de que o valor de  $p_{\text{inicial}}$ , ou seja, o valor da pressão na saída do botijão quando cheio, é inferior a 15 atm devido a perdas de carga na válvula do mesmo. Porém, o valor 15 atm está sendo utilizado como medida de segurança.



Assim, com o valor de  $p_{\text{inicial}}$ , o volume do botijão, e a taxa de consumo de GLP podemos definir o valor de  $p_{\text{final}}$  para que o usuário possua um intervalo de tempo razoável para utilizar o fogão. Este valor deve ser tal que permita o usuário acabar de preparar seu alimento sem a necessidade de interrupções, ou ainda, este valor deve proporcionar um tempo adequado ao usuário para que ele possa pedir um outro botijão ao distribuidor e este ser entregue em sua casa. O valor utilizado para o dimensionamento do dispositivo foi uma  $p_{\text{final}}$  de 2 atm, pois se utilizarmos a teoria dos gases perfeitos teremos que para esta pressão a densidade do gás será de 4,20 kg/m<sup>3</sup>, e se o botijão possui 31 litros, chegamos que a massa restante no botijão a esta pressão é de aproximadamente 130 g. Este valor corresponde a aproximadamente 20 minutos do funcionamento do fogão com capacidade total. Vale ressaltar que este valor deverá ser refinado após ensaios de campo e pesquisas de mercado que otimizarão da melhor forma este valor, até porque esta variável tempo deverá constar no catálogo do produto.

### **2.3.6. Materiais para construção**

Como foi dito anteriormente, acredita-se que para a comercialização deste dispositivo será necessária a aprovação de um órgão regulamentador. Portanto, para facilitar este processo, optamos por utilizar para a construção do dispositivo os mesmos materiais utilizados na construção dos itens anteriores. Veja abaixo uma lista com as principais normas relacionadas a este tópico:

- NBR 8613 : "Mangueiras de PVC - Plastificado para instalações domésticas de GLP"
- NBR 8474 : "Reguladores de pressão para GLP - uso doméstico dimensões"

## **2.4. Proposição de Soluções**

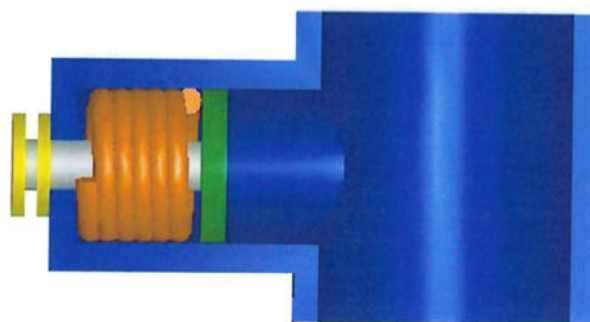
Após ter analisado e definido as características do ambiente ao qual o dispositivo será inserido, serão descritas a seguir as soluções encontradas com os respectivos detalhamentos. No total, foram propostas 6 tipos de soluções diferentes.



### 2.4.1. Êmbolo

Esta solução se baseia num princípio semelhante ao da seringa. Neste caso, um tubo secundário, onde há um êmbolo de deslocamento, possui uma comunicação com a linha do gás GLP. Assim, seu funcionamento está baseado na ação da força de uma mola em um sentido e na ação da força gerada pela pressão do gás em outro sentido.

Conforme a pressão na linha de gás reduz, é necessária uma força da mola um pouco menor para equilibrar o sistema, fazendo com que esta se expanda em um certo valor. No êmbolo é presa uma haste que possui um contato elétrico que se move juntamente com o êmbolo. Ao se chegar numa pressão pré-definida, o contato móvel encosta-se a um contato fixo ao tubo, fechando o circuito e acionando o dispositivo de aviso (luminoso e/ou sonoro).



*Figura 7: Esquema da solução tipo êmbolo*

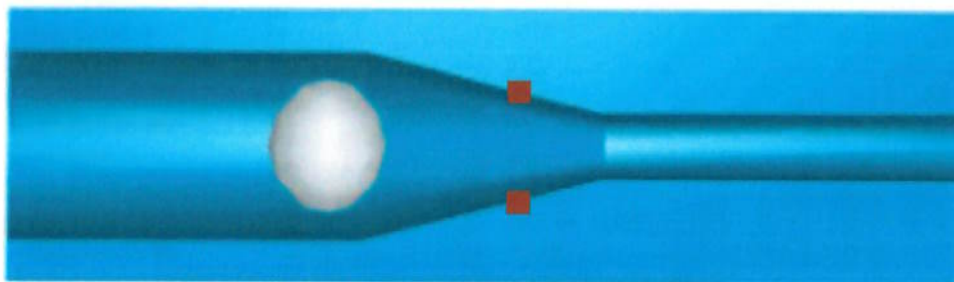
Esta solução apresenta como grande obstáculo a garantia de vedação, isto é, como garantir que não ocorrerá vazamento, pois estamos trabalhando com uma variação de pressão muito grande, de 2 a 15 atm. Assim, o êmbolo deve ser capaz de vedar uma pressão de 15 atm. Desenhar um dispositivo que consiga realizar isto não é problema, mas quando a pressão atingir 2 atm, o atrito do sistema pode ser muito alto, impossibilitando o deslocamento. Portanto, o principal problema aqui é dimensionar um sistema de vedação eficiente para o dispositivo e que ao mesmo possibilite uma modelagem correta do atrito, já que existem grandes diferenças entre o atrito estático e dinâmico nestas condições.



Como solução para o problema anterior, foi proposto o uso de um anel de borracha ligada ao êmbolo e ao tubo, pois assim, há a vedação e ainda permite-se o deslocamento do tubo devido a elasticidade da borracha. Porém, não foi encontrado nenhum material que fosse economicamente viável para ser utilizado.

#### **2.4.2. Balão**

Esta solução é muito semelhante ao que é encontrado nos balões de oxigênio. Ela se baseia num tubo de seção transversal variável, em formato de cone, onde uma esfera se deslocará. De acordo com a vazão de gás existente no tubo, haverá uma força de arrasto diferente incidindo sobre a esfera, fazendo com que ela se desloque longitudinalmente no tubo. Existem dois contatos numa altura desejada do cone de forma que quando a vazão chegue a um valor especificado a esfera encostará nestes contatos e fechará o circuito, acionando então o dispositivo de aviso.



**Figura 8: Esquema da solução tipo balão**

Podemos listar como principais problemas desta solução:

- Posicionamento vertical: é necessário que o dispositivo seja mantido em uma posição vertical para que funcione corretamente
- Contatos internos: note que os contatos elétricos são internos, o que gera um risco de ocorrência de faíscas em contato com o GLP, causando explosões acidentais





### 2.4.3. Diafragma

O funcionamento desta alternativa se baseia na deflexão/deslocamento de uma membrana de metal, ou seja, com a variação de pressão na tubulação do gás, o deslocamento do centro da membrana irá variar, permitindo o monitoramento da quantidade de gás do botijão. Além disso, as propriedades de um metal, como o aço, são claramente conhecidas o que garante uma maior confiabilidade do dispositivo e dos resultados esperados. Também devemos destacar que esta alternativa acaba com os possíveis problemas de vedação, disposição de contatos elétricos e é de fácil dimensionamento pois já existem modelagens para o mesmo.

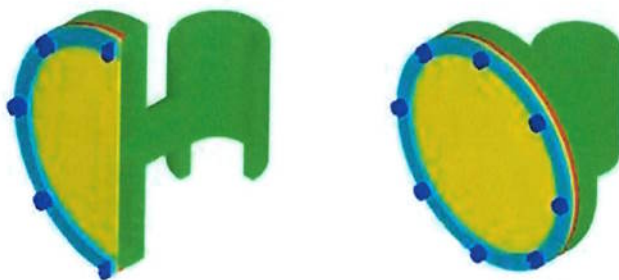


Figura 9: Esquema da solução tipo diafragma

### 2.4.4. Consumo de GLP

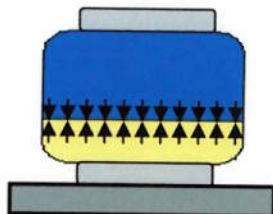
O princípio desta solução é medir a quantidade de gás GLP consumida. Quando a quantidade consumida em massa de GLP atingir um valor pré-determinado, o dispositivo de aviso é acionado.

Esta solução é extremamente interessante pois permite que o dispositivo seja acoplado ao fogão, visto que seu funcionamento não depende da variação de pressão ou vazão, isto é, pode-se posicioná-lo posteriormente a válvula reguladora de pressão. Porém, esta solução adota como premissa o fato de que o botijão de GLP está totalmente cheio. Assim, caso o usuário utilize um botijão já usado ou receba um botijão não totalmente cheio, o dispositivo não funcionará corretamente. Portanto, a confiabilidade desta solução não é muito boa.



#### 2.4.5. Balança

Como mencionado na seção de análise das componentes do problema, o botijão contém 13 kilogramas de GLP quando cheio. Portanto, se utilizássemos uma balança para monitorar o peso deste botijão poderíamos identificar o momento para que a troca seja necessária.



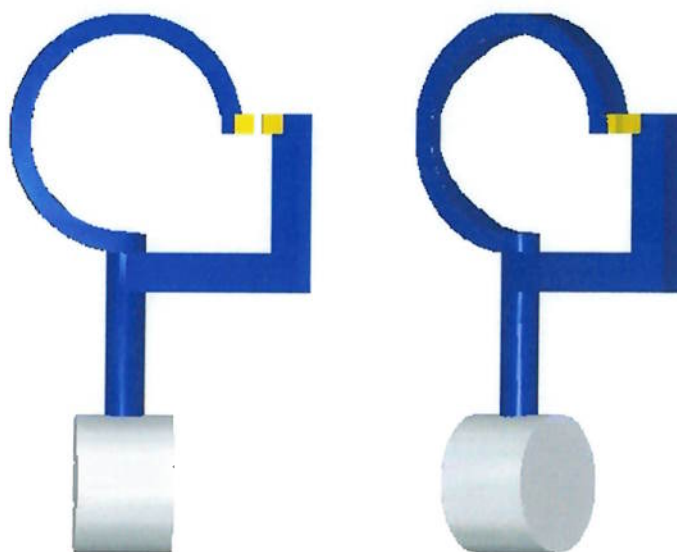
*Figura 10: Esquema da solução tipo balança*

A solução é extremamente simples e de fácil construção, mas apresenta como principal problema a falta de acoplamento com o fogão ou linha de gás, o que não interessaria aos fabricantes de fogão. Além disso, seria necessário a calibração periódica do dispositivo e a garantia de que o piso onde está o botijão seja horizontal.

#### 2.4.6. Bourdon

Esta solução se baseia no mesmo princípio do manômetro de Bourdon, onde um tubo em forma de arco tem comunicação com a linha de gás. Ao se aumentar a pressão, a tendência deste tubo é de voltar para a posição esticada, e ao se reduzir, o tubo tende a ficar curvado. Na ponta do tubo há um contato elétrico que se encosta a outro contato que é fixo a estrutura. Quando a pressão chega a um valor especificado, a curvatura do tubo é de tal forma que os contatos se encostam, acionando assim o dispositivo de aviso.





*Figura 11: Esquema da solução tipo Bourdon*

O grande problema desta solução é que ela se baseia somente em dados empíricos, uma vez que não existe modelamento para o mesmo.

## **2.5. Análise das soluções**

Para darmos continuidade com o desenvolvimento do projeto devemos passar para uma etapa de análise de viabilidade das soluções propostas. Já na exposição inicial das soluções, enumeramos alguns dos principais problemas relacionados com cada uma das soluções. Mas, nesta etapa, iremos verificar a quantidade de esforço necessária para solucioná-los. Assim, poderemos escolher a melhor solução. Além disso, iremos confrontar as soluções com as considerações básicas identificadas no início do projeto. Veja na tabela abaixo as considerações feitas para a realização de um primeiro filtro nas soluções propostas, isto é, o objetivo deste primeiro passo não é escolher uma solução, mas descartar aquelas que não são tão viáveis.



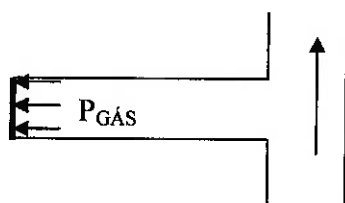
Solução	Problema	Consequência	Resultado da Análise
Êmbolo	Vedação	Vazamento	Não foi encontrado nenhuma maneira viável para solucionar este problema
Balão	Contatos Internos	Explosão acidental	Não há como realizar o acionamento do dispositivo de maneira economicamente viável sem utilizar contatos internos
Diafragma	-	-	Não foi identificado nenhum grande obstáculo neste primeiro filtro
Consumo	Premissa de botijão cheio	Aviso no momento errado	A premissa de que o botijão está cheio pode fazer com que o usuário não seja notificado e o gás acabe
Balança	Posicionamento	Mal funcionamento	Não foi encontrado nenhuma maneira viável para solucionar este problema
Bourdon	-	-	Não foi identificado nenhum grande obstáculo neste primeiro filtro

Portanto, após realizar este primeiro filtro das soluções propostas chegamos a conclusão de que as melhores idéias, e que merecem uma análise mais detalhada são:

- Diafragma
- Bourdon

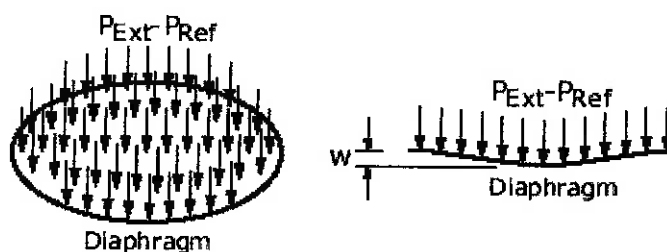
### **2.5.1. Análise detalhada da solução Diafragma**

Para esta etapa do projeto foram utilizados diversos conceitos da engenharia mecânica, como resistência dos materiais e seleção de materiais. Veja abaixo o modelo utilizado nos cálculos do dimensionamento do diafragma:



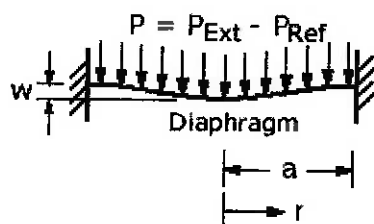
**Figura 12: Modelo para dimensionamento do diafragma**

- **Dimensionamento da tubulação:** para o dimensionamento da tubulação foram utilizados os conceitos de vasos de pressão da “Mecânica dos sólidos”. Portanto, utilizando as propriedades do aço, e um coeficiente de segurança apropriado, conseguimos calcular a espessura mínima da tubulação para que não haja deformação considerável e o dispositivo funcione de maneira segura.
- **Dimensionamento da membrama:** para o dimensionamento da membrama de aço foram utilizados os conceitos de teoria da elasticidade da “Mecânica dos sólidos”. Veja abaixo modelo utilizado para este cálculo:



**Figura 13: Modelo da “Teoria da elasticidade” para dimensionamento do diafragma**

Neste caso, devemos considerar que o diafragma está engastado. Portanto, temos:



$$w(r) = \frac{Pa^4}{64D} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right]^2$$

$$w_{\max} = w(0) = \frac{Pa^4}{64D} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right]^2$$

$$\Rightarrow P = \frac{64D}{a^4 \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right]^2} w_{\max}$$

Assim conseguimos dimensionar o diafragma para o material escolhido e calcular a deflexão central do mesmo. No caso estudado, o melhor estado para a aplicação é aquele em que ocorre máxima deflexão central do diafragma. Assim, foi criado um programa em Visual Basic para simular todas as condições possíveis (diâmetro e espessura do diafragma diferentes) e nos fornecesse o melhor caso. No Apêndice A se encontra o extrato do código do programa.

Com este programa, conseguimos varrer todas as condições de contorno possíveis e encontrar a melhor situação aplicável ao caso estudado.

### Resultados

<b>diâmetro</b>	112 mm
<b>raio</b>	56 mm
<b>espessura</b>	2.6 mm
<b>desl_máx</b>	0.77 mm
<b>desl_mín</b>	0.09 mm
<b>curso</b>	0.68 mm
<b>ten_máx</b>	599.316.391 MPa

A simulação conseguiu identificar um problema nesta solução, o curso ou deflexão do centro do diafragma seria apenas de 0.7 mm. Após algumas análises, chegamos a conclusão de que a causa para esta pequena deflexão é o fato de sermos obrigados a adotar uma espessura suficiente espessa para suportar uma pressão de 15 atm, mas



ao mesmo tempo não muito espessa, para que haja deflexão quando a pressão for de 2 atm.

Portanto, seria necessário uma alta precisão para garantir o funcionamento deste dispositivo. Assim, passamos a analisar as possibilidades de monitoramento do centro deste diafragma e chegamos as seguintes opções:

- **Botoeira ON/OFF:** é um botão liga/desliga. Quando o diafragma atingisse a sua posição máxima, a chave seria acionada. E, quando a pressão se reduzisse, a chave seria desligada. O grande problema nesta solução é a precisão da construção do dispositivo, pois devemos garantir que o botão será acionado quando o diafragma defletir 0.7 mm. Portanto, além de dificultar a produção em série, a confiabilidade do produto seria colocada em risco.
- **Strain-gages:** como a deflexão é pequena, foi levantada a possibilidade do uso de elastômeros para o monitoramento do diafragma. Porém, para esta aplicação seria necessário o uso de uma fonte de corrente contínua de 5V (para amplificadores e filtros) e de 12 V (para o strain-gage). E, uma pilha ou bateria não conseguiria atender esta demanda de energia por muito tempo, visto que o aparelho fica ligado o dia inteiro. Assim, o grande problema desta opção é a fonte de energia. O uso de fontes de tensão elevaria muito o custo do produto. Além disso, seria necessário mão de obra especializada para a produção do mesmo, pois strain-gages possuem técnicas especiais de colagem, o que acarretaria novamente em aumento do custo de produção.
- **Fotoelasticidade:** outra opção levantada foi o uso da fotoelasticidade, cujo conceito está baseado em pintar o diafragma com um "verniz" especial e à medida que esta membrana se deforma, a cor deste verniz se altera. Assim, poderia ser feito um esquema de cores que notificasse o usuário. Mas, o principal problema desta solução é a falta da possibilidade de comunicar o usuário, pois não há como acionar um mecanismo eletrônico como uma sirene ou LED. Portanto, o usuário seria obrigado a olhar constantemente o botijão. Como em muitos casos, o botijão não fica a vista do usuário, a comunicação ao



usuário é um problema. Porém vale ressaltar que esta opção pode ser explorada por trabalhos futuros.

Após realizar uma análise mais detalhada desta solução chegamos a conclusão de que o uso de um diafragma não é a melhor opção para este problema, portanto, deveríamos explorar outras opções.

### ***2.5.2. Análise detalhada da solução Bourdon***

Como mencionado anteriormente o maior problema desta solução é o dimensionamento da mesma, pois não existe nenhum modelo de equacionamento para simular o comportamento do manômetro quando submetido a um carregamento. Assim, a equipe do projeto entrou em contato com fabricantes de manômetro do tipo de Bourdon para entender melhor seu funcionamento, processo de fabricação e dimensionamento.

Quanto ao processo de fabricação do manômetro, foi levantado que o corpo (carcaça) do manômetro é produzida através de fundição, enquanto que a "língua" do manômetro é um tubo metálico achatado que é encurvado e soldado a peça fundida.

E, quanto ao dimensionamento do manômetro, os fabricantes consultados confirmaram utilizar uma tabela para escolha das dimensões do tubo do manômetro, sendo que esta tabela fora gerada no passado de maneira empírica.

Considerando a enorme aplicação de manômetros de bourdon na medição de pressão em linhas de carga, nas quais fluem tanto fluidos gasosos como líquidos, e considerando a enorme disponibilidade de manômetros no mercado, o que facilitaria sua aquisição e adaptação para realização dos testes, a equipe do projeto elaborou um plano de estudo mais detalhado do mesmo de tal maneira que pudéssemos utilizá-lo para solucionar o nosso problema, uma vez que esta solução não infringia nenhuma das considerações e se mostrou a mais viável. Portanto, análise detalhada desta solução foi feita neste plano de estudo proposto.



## 2.6. Plano de Estudo

Como mencionado na seção anterior, a equipe elaborou um plano de estudo detalhado do manômetro do Bourdon, pois esta se mostrou a solução mais viável para o problema. Portanto, o objetivo do plano é garantir completo entendimento deste instrumento de medição de tal maneira a garantir que a confiabilidade do dispositivo produzido.



*Figura 14: Plano de estudo proposto para o manômetro de Bourdon*

- **Aquisição de Manômetro de Bourdon:** o objetivo desta etapa do plano é a aquisição de um manômetro que atenda os requisitos mínimos do projeto. Assim, poderemos analisar um dispositivo semelhante ao que estamos propondo construir. As características que este produto deve possuir são:
  - Escala: 1 a 15 atm
  - Tamanho físico: diâmetro < 15 cm
  - Acoplação rosqueável a linha de gás
  - Material barato (ex.: aço, latão, ...)
- **Análise de seu funcionamento:** após a compra do manômetro iniciou-se uma etapa de análise de seu funcionamento. Para um melhor entendimento, dois tipos de análises foram propostas, uma pela "Mecânica dos Sólidos", e outra através de "Métodos de Elementos Finitos".
- **Adaptação para realização de testes:** após completo conhecimento do comportamento do manômetro quando submetido a carregamento, este será adaptado a nossa aplicação para a realização dos testes.



- **Desenho do produto final:** com os resultados da análise e dos testes realizados conseguiremos propor uma solução final para o problema. O produto desta etapa serão os desenhos de fabricação do dispositivo.

### **2.6.1. Aquisição de Manômetro de Bourdon**

O manômetro adquirido pela equipe para a realização das análises foi um manômetro da empresa MTR Equipamentos com as seguintes características:

- **Escala do Produto:** 1 a 20 Kgf / cm<sup>2</sup> ~ 1 a 20 atm
- **Diâmetro do relógio:** 2 ½" ~ 7.2 cm
- **Material:** Latão
- **Acoplação:** Rosca ¼" NPT



*Figura 15: Foto do manômetro adquirido para análise*

### **2.6.2. Análise de seu funcionamento**

Como proposto, o objetivo desta etapa é análise do funcionamento do manômetro adquirido através da Mecânica dos Sólidos e do Método de Elementos Finitos. Após diversas tentativas de aplicação dos conceitos da Mecânica dos Sólidos, não conseguimos desenvolver um modelo de equacionamento para o manômetro. Todas as abordagens utilizadas resultavam em comportamento estático do manômetro, isto é, ele não reagia quando submetido a carregamento. Assim, o método utilizado para a análise técnica foi o de elementos finitos. Esta análise foi feita no software ADINA.





Para realizar a análise por elementos finitos, foi definida uma seção transversal octogonal que mais se assemelhasse a seção real do manômetro. Veja abaixo a seção utilizada, assim como suas dimensões:



**Figura 16: Seção transversal do manômetro**

Para gerar a geometria do manômetro, esta seção transversal foi revolucionada em 250 graus com um raio de 370 mm:



**Figura 17: Geometria do manômetro construída no ADINA**

Seguindo os conceitos do método de elemento finitos, é necessário gerar-se uma malha de elementos para a realização da análise. Assim, esta foi gerada com as seguintes características:

- **Tipo do elemento:** casca grossa
- **Número de Elementos:** 20 x 20
- **Número de nós:** 4 nós por elemento



- **Material isotrópico:** módulo de elasticidade de 100 Gpa e coeficiente de poisson igual a 0.34 (propriedades do latão)



**Figura 18: Malha do manômetro construída no ADINA**

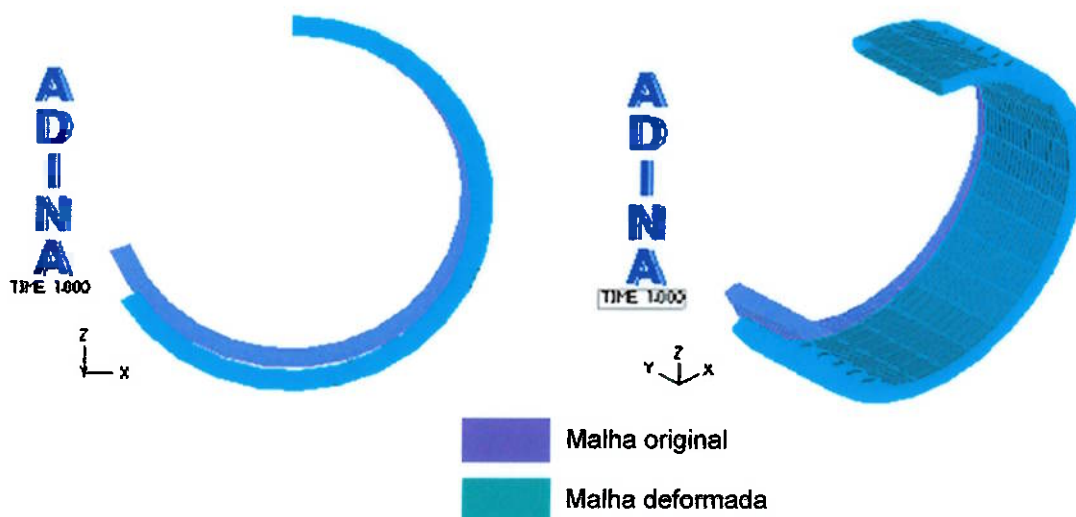
Note que uma das pontas da malha gerada está engastada, isto é, não há graus de liberdade neste engaste, pois o manômetro está conectado a linha de gás neste ponto. E, a outra ponta está livre para deslocamento nas 3 direções. Também vale destacar que a ponta livre está tampada, ou seja, não permite a passagem de gás, representando a extremidade do manômetro, a qual esperamos que se desloque quando submetida a carregamento.

Para simular o carregamento, foi utilizado uma carga distribuída na direção normal de todas as superfícies, conforme figura abaixo. A magnitude deste carregamento foi variada de tal maneira a simular diversas condições de pressão ao longo do uso do botijão.

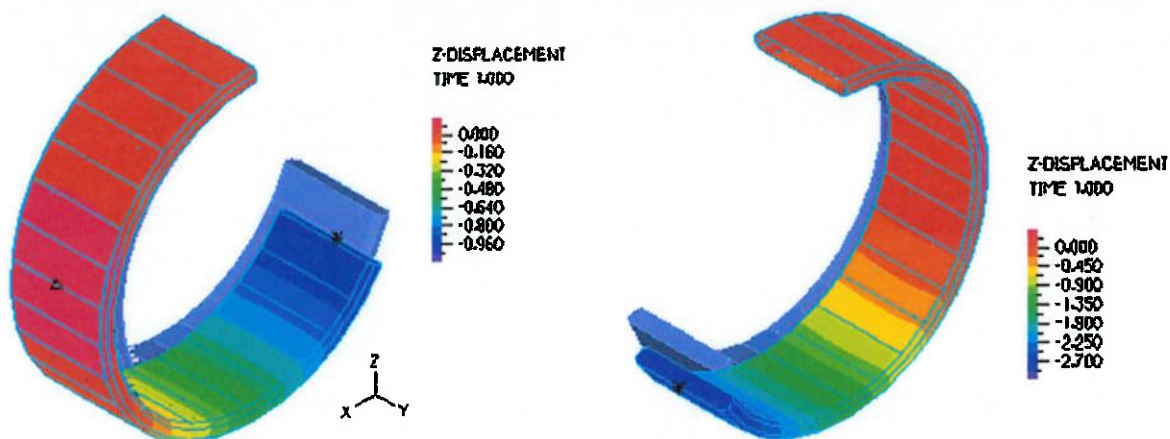


**Figura 19: Carregamento utilizado em simulação no ADINA**

Após definir todas as variáveis, o sistema estava pronto para a execução da simulação. Esta foi realizada variando-se o carregamento entre os pontos de 2 a 15 atm. Veja abaixo um modelo do que acontece quando um carregamento é imposto a esta estrutura:



**Figura 20: Comportamento da estrutura quando submetida a carregamento**



**Figura 21: Resultados para carregamento de 2 atm e 15 atm**

Analisando os resultados acima, concluímos que existe um range de 3 milímetros para o acionamento do dispositivo de alarme, o qual é um espaço suficiente para a ação de um contato elétrico, como por exemplo um contato tipo TAC.

A análise de distribuição de tensões também foi realizada, porém ela foi de importância secundária se comparado com o nosso objetivo de entender o deslocamento do manômetro. Especialmente porque as tensões encontradas na simulação são bem inferiores aquelas referentes ao material utilizado. Por isso, estes resultados não foram inseridos no relatório.

Mesmo que não tenhamos conseguido desenvolver um modelo de equações que representasse o comportamento do manômetro, o importante foi garantir através de métodos computacionais a veracidade do conceito de Bourdon provado até então apenas de maneira empírica.

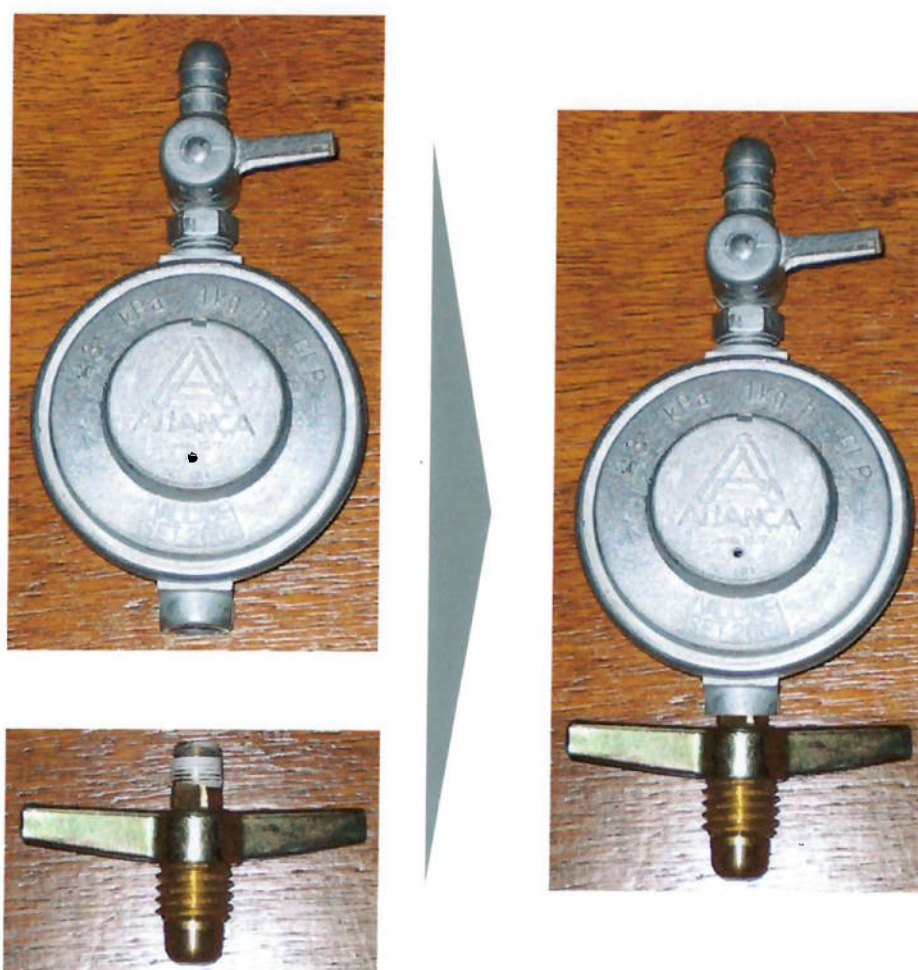
### **2.6.3. Adaptação para realização de testes**

Comprovado o funcionamento da solução, passamos para uma etapa cujo objetivo é a criação do protótipo para a realização dos testes.

A primeira atividade foi desenvolver como o manômetro seria conectado a linha de pressão. Para isso, foi feito um levantamento de mercado buscando conexões e válvulas reguladoras de pressão disponíveis. Uma peça de extrema importância para



esta etapa foi um regulador de pressão rosqueável que permite o acoplamento do manômetro, fazendo uso de uma válvula T dimensionada pela equipe. A espessura da parede para este dispositivo está sobre o mesmo carregamento que o manômetro, portanto, poderíamos utilizar sem problemas o valor de 0,5 mm. Como esta parte ficará mais exposta a choques, já que não existirá nenhum tipo de proteção externa, resolvemos adotar inicialmente uma parede de 10 mm, que evita tranquilamente este risco. Veja abaixo foto destes mecanismos:



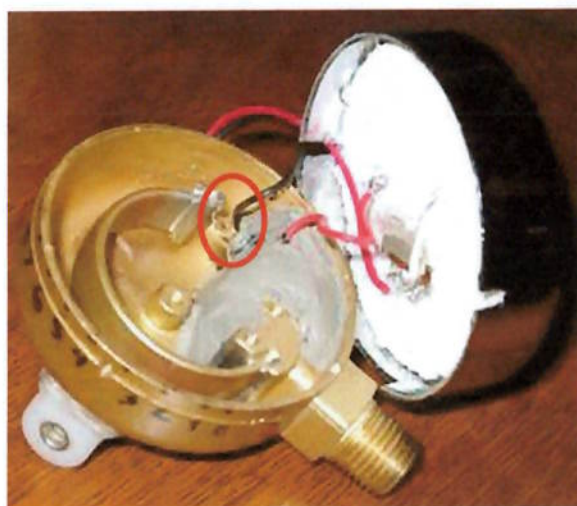
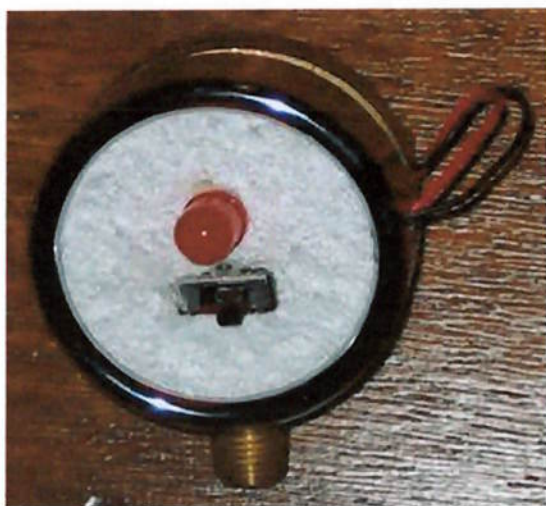
**Figura 22: Válvula reguladora de pressão rosqueável**





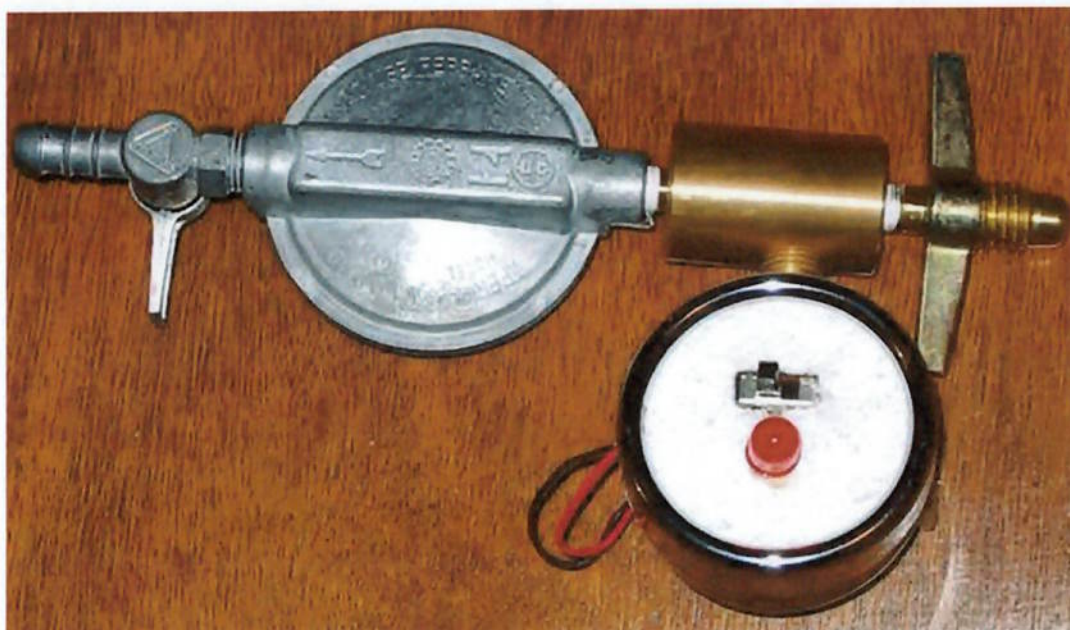
**Figura 23: Válvula T dimensionada pela equipe para conexão dos dispositivos**

Para a construção do dispositivo de aviso foram utilizados um contato elétrico do tipo TAC, um LED e uma chave liga/desliga. A alimentação do sistema será feita por uma pilha pequena de 1,5 V, por ser extremamente barata e prática. A durabilidade da pilha é garantida pois o LED só acende para avisar que o gás está acabando, portanto fica ligado por apenas um pequeno intervalo de tempo durante todo o consumo do botijão. Já a utilização de um transformador AC/DC também foi proposta, porém encareceria em muito o preço do produto final.



**Figura 24: Manômetro adaptado**

Com todos os dispositivos prontos, podemos acoplá-los para montar o dispositivo final. Veja foto a seguir:



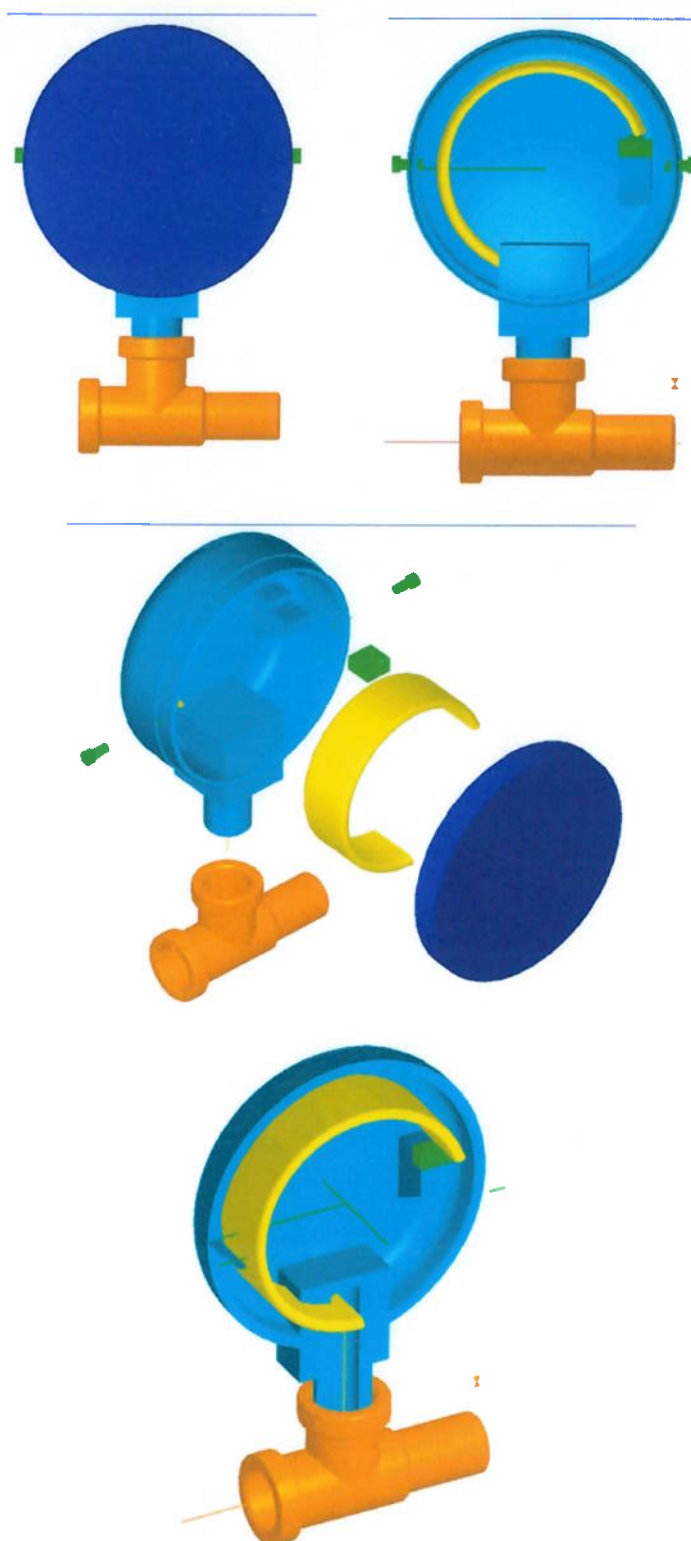
**Figura 25: Protótipo final**

Como pode ser visto, o dispositivo está pronto para a realização dos testes. Porém, estes ainda não foram realizados devido a falta de equipamentos de segurança necessários. Mas, os testes estão sendo agendados junto a “Continental Eletrodomésticos”, pois estes possuem todos as bancadas de testes e equipamentos necessários. Portanto, os resultados dos testes não estão presentes neste relatório.

#### **2.6.4. Desenho do produto final**

Baseando-se em todas as análises feitas até o momento, foi desenvolvido o desenho do produto final, isto é, o desenho do produto que será produzido para comercialização. Os desenhos de fabricação estão anexos no final do relatório.

Veja a seguir algumas fotos em 3D deste dispositivo. Note que o regulador de pressão não está representado neste esquema, pois estamos propondo que esta peça seria adquirida no mercado, enquanto que as outras duas (manômetro e válvula T) sejam fabricadas.



**Figura 26: Modelo 3D do produto final**





### 3. Conclusão

Antes de iniciarmos a análise dos resultados finais deste trabalho, gostaríamos de expor neste parte do relatório os principais pontos que nos motivaram a desenvolver este projeto. O primeiro deles, é o fato de que ao término do projeto haveria um produto físico, uma solução real fruto das análises e cálculos feitos durante a elaboração do projeto. Este ponto é de extrema importância para os alunos, pois durante o aprendizado na faculdade de engenharia, foram raras as vezes em que foi possível ter uma aplicação prática dos conceitos adquiridos. Outro ponto que despertou interesse foi o fato deste problema ter uma abrangência social, sendo facilmente compreendido pela mais simples pessoa, o que traduz em suma o conceito de engenharia, isto é, aplicar os conceitos físicos e matemáticos na vida cotidiana das pessoas.

Quanto aos resultados obtidos no final do projeto, acreditamos que foram extremamente satisfatórios, pois conseguimos atingir o nosso objetivo, o qual era desenvolver o dispositivo. Além disso, os problemas enfrentados ao longo do ano foram numerosos, principalmente devido a falta de bibliografia no assunto. Porém, procuramos buscar métodos alternativos para solucionar estes problemas, por exemplo, a análise do mecanismo por elementos finitos foi uma "rota" alternativa para a modelagem do mesmo, visto que não encontramos conceitos que se adaptassem a esta aplicação. Portanto, sob o ponto de vista de execução do projeto acreditamos que conseguimos aprender bastante.

Outro ponto bastante interessante do projeto é o fato de termos conseguido utilizar uma solução extremamente simples, o que nos surpreendeu bastante, pois no início do projeto acreditávamos que seria necessário uma solução mais complexa.

Apesar de não termos realizados os testes até o momento, estes estão sendo agendados em um local próprio para o ensaio, uma vez que o GLP é um material inflamável. Realizar o ensaio sem adotar medidas de segurança colocaria em risco a vida dos executores.



Portanto, apesar dos problemas, a construção do dispositivo foi realizada e o desenho do produto final para produção em série também, o que nos permite dizer que nossa meta foi atingida. Além disso, estimamos que o custo de produção de todo o dispositivo seja inferior a R\$ 20,00, o que atende novamente nossas expectativas.

Os próximos passos após os testes seriam a proposição de melhorias visando já um produto final a ser fabricado, a obtenção da patente do dispositivo e a elaboração de um estudo de viabilidade comercial para a fabricação e comercialização do produto. É importante dizer que já estamos negociando com a *Continental Fogões* sobre a possibilidade de incluir este dispositivo em sua linha de produtos.

#### **4. Agradecimentos**

Queremos agradecer ao apoio do Prof. Amilton Sinatora, que além de nos fornecer um tema muito interessante e desafiador, soube como encaminhar o trabalho, nos orientando devidamente. Agradecemos também à *Continental Fogões*, pelo fornecimento das normas técnicas e de todo o esclarecimento técnico necessário. E sem dúvida devemos um agradecimento especial ao Jean, que por todo ano nos auxiliou ativamente, propondo idéias, prevendo dificuldades e nos dando sempre uma visão prática da engenharia, voltada para a geração de algo viável do ponto de vista técnico e econômico.



## 5. Bibliografia

Timoshenko, S.P., Goodier, J.N, "Theory of Elasticity", Mcgraw-Hill, 3<sup>rd</sup> ed, New York, 1970. pp. 119

Timoshenko, S.P., Woinowsky-Krieger, S., "Theory of Plates and Shells", McGraw-Hill, 2<sup>nd</sup> ed, New York, 1959. pp. 56

Bednar, H. H., "Pressure Vessel Handbook", VNR Company, 1<sup>st</sup> ed, Canada, 1981. pp. 42

Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Normas NBR 8460, 8473 e 8613"

Conselho Nacional do Petróleo, "Resolução 02, de 7 de Janeiro de 1975"

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, <https://www.ibge.gov.br>



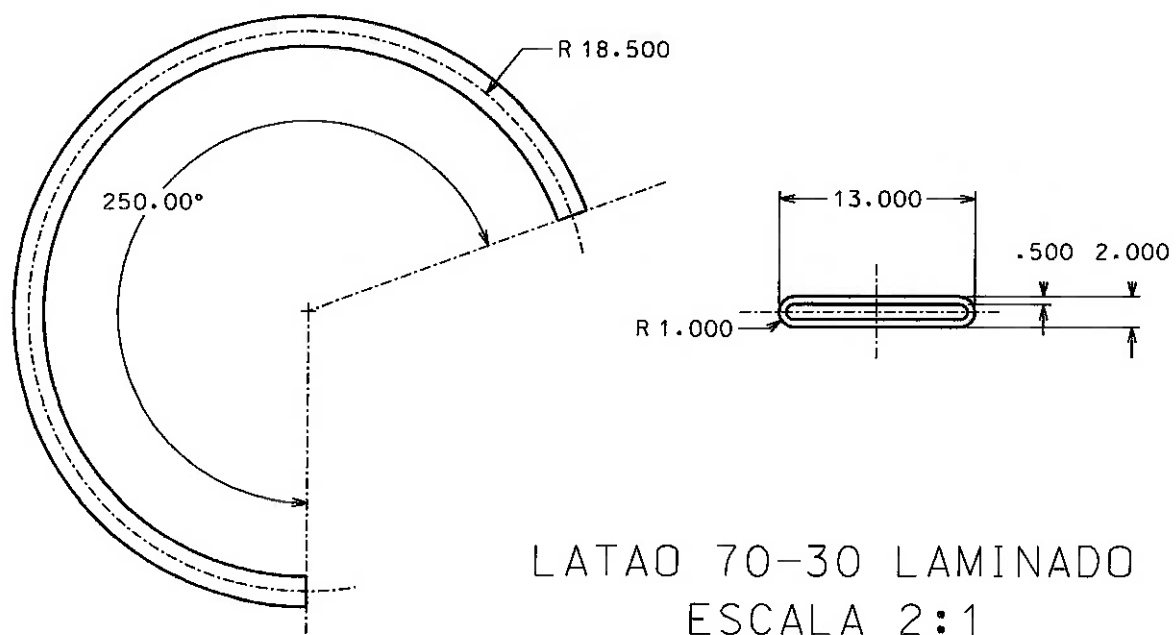
## 6. Apêndice A – Código do Programa em Visual Basic

```
For diametro_it = d_min To d_max Step 0.5
    diametro = diametro_it / 1000
    raio = diametro / 2
    For espessura_it = esp_min To esp_max Step 0.5
        espessura = espessura_it / 1000
        rigidez = elasticidade * (espessura ^ 3) / (12 * (1 - Poisson ^ 2))
        tensao_max = 3 * pressao_max * (raio ^ 2) / (4 * espessura ^ 2)
        If tensao_max < tensao_adm Then
            deslocamento_max = pressao_max * (raio ^ 4) / (64 * rigidez)
            deslocamento_min = pressao_min * (raio ^ 4) / (64 * rigidez)
            curso_extra = deslocamento_max - deslocamento_min
            If curso_extra > curso Then
                curso = curso_extra
                diametro_fin = diametro
                raio_fin = raio
                espessura_fin = espessura
                deslocamento_max_fin = deslocamento_max
                deslocamento_min_fin = deslocamento_min
                tensao_max_fin = tensao_max
                Sheets("data_simulacao").Cells(i + 1, 2).Value = diametro
                Sheets("data_simulacao").Cells(i + 1, 3).Value = raio
                Sheets("data_simulacao").Cells(i + 1, 4).Value = espessura
                Sheets("data_simulacao").Cells(i + 1, 5).Value = deslocamento_max
                Sheets("data_simulacao").Cells(i + 1, 6).Value = deslocamento_min
                Sheets("data_simulacao").Cells(i + 1, 7).Value = curso_extra
                Sheets("data_simulacao").Cells(i + 1, 8).Value = tensao_max
                Sheets("data_simulacao").Cells(i + 1, 9).Value = tensao_adm
                i = i + 1
            End If
        End If
    Next espessura_it
Next diametro_it
```



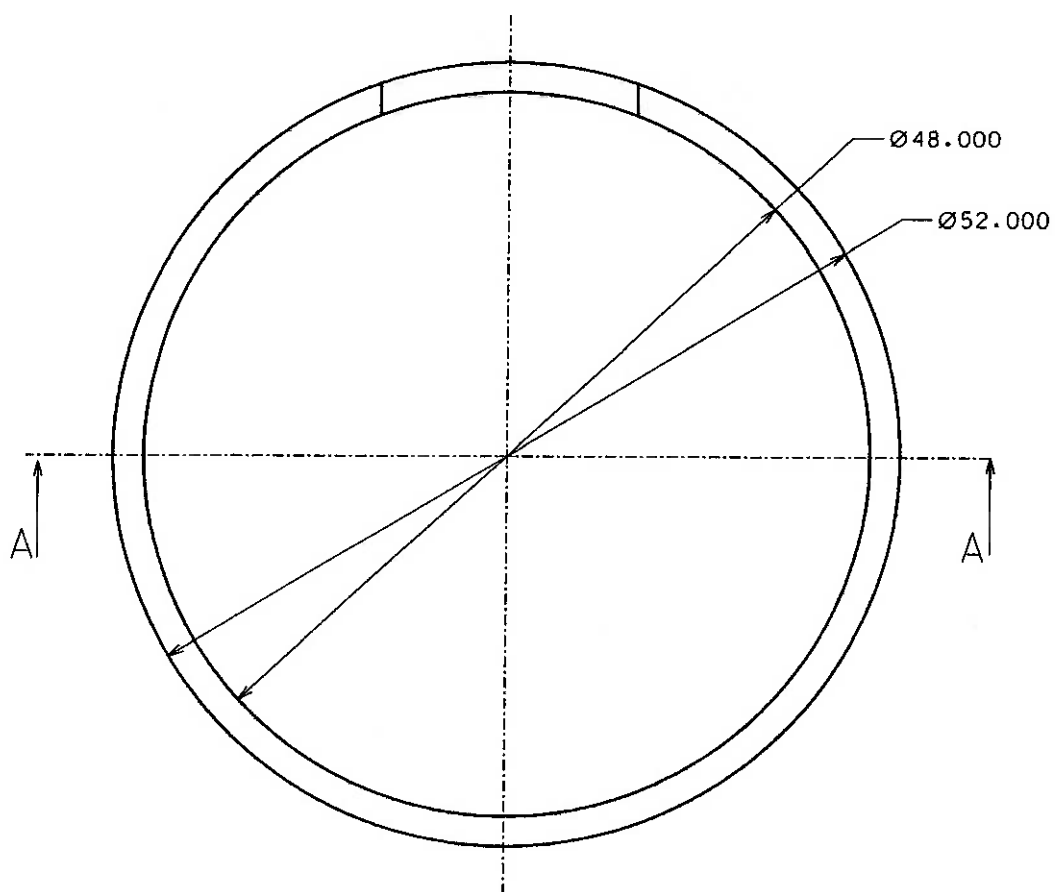
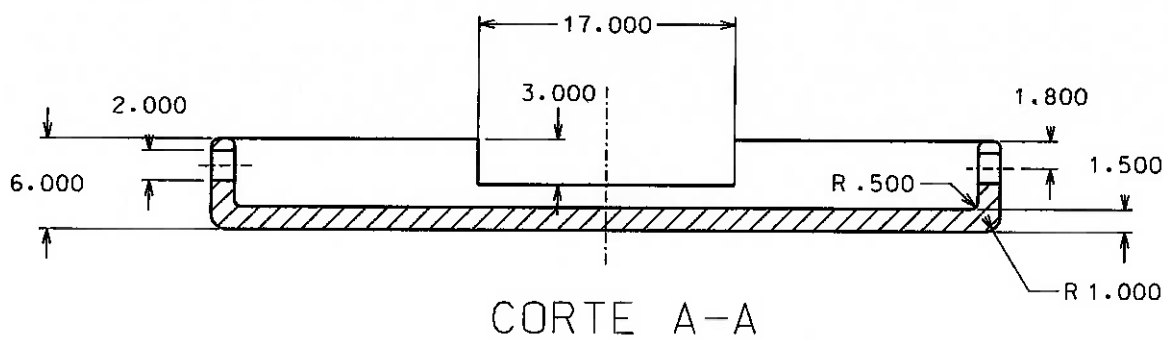
## **7. Apêndice B – Desenhos de Fabricação**





LATAO 70-30 LAMINADO  
ESCALA 2:1

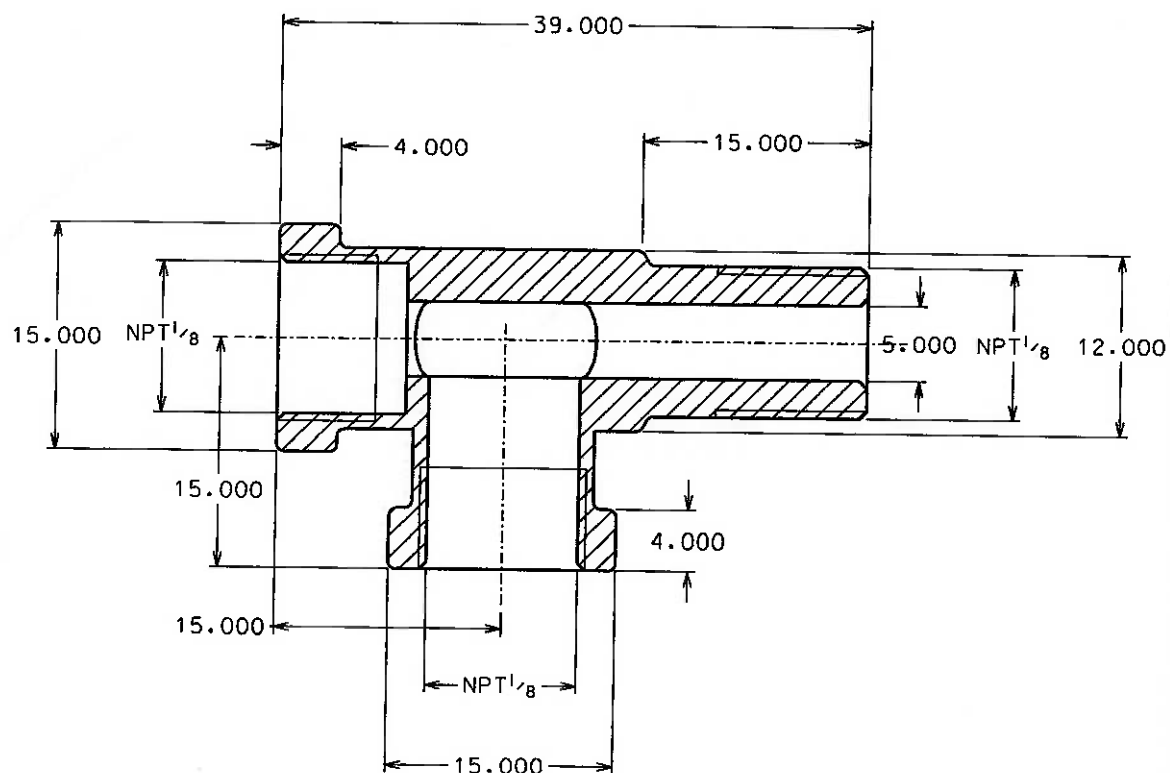
DESENHO DE FABRICACAO - TUBO DE BOURDON



LATAO 70-30 FUNDIDO  
ESCALA 2:1

DESENHO DE FABRICACAO - TAMPA





LATAO 70-30 FUNDIDO  
 ESCALA 2:1  
 CANTOS CHANFRADOS 0.5 MM

DESENHO DE FABRICACAO - CONECTOR