

30/06/2013

# CONTROLE ANTISURGE DE COMPRESSORES CENTRÍFUGOS

Gabriel Alves Leite



# CONTROLE ANTISURGE DE COMPRESSORES CENTRÍFUGOS

Aluno(s): Gabriel Alves Leite

Orientador(es): Moises Henrique Szwarcman

Trabalho apresentado com requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia de Controle e Automação na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil



## Agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar aos meus pais Pedro Leite Neto, José Ricardo da Silva e Maria de Lourdes Alves da Silva por todo apoio dado até hoje, por terem acreditado no meu sonho, confiarem em mim e me amarem de forma incondicional. Eu só posso dizer que eu amo muito vocês e que vocês são tudo na minha vida. Essa vitória é nossa.

À minha grande família, em especial a minha irmã Alice Alves Leite Galo e ao meu cunhado Roberto Galo Ferreira Junior que sempre que precisei estiveram à disposição para me ajudar, à minha falecida avó Noemia que sempre cuidou de mim com todo o amor desse mundo e foi importantíssima na minha caminhada.

Aos meus grandes amigos, capazes de me levantar nas horas mais difíceis e me recolocar no caminho correto, obrigado por estarem sempre do meu lado. Nossa caminhada está apenas começando, amo muito vocês.

Aos Professores que sempre estiveram dispostos a me ajudar e foram muito importantes na minha graduação, aos colegas de trabalho, que ajudaram de forma consistente durante esse tempo e a todos que não foram citados, mas que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento durante todo esse período.

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar o fenômeno *surge* em compressores centrífugos, bem como o controle antisurge utilizado para evitar esse tipo de perturbação danoso ao sistema. Este controle antisurge será realizado pelo controlador dedicado Series 3 Plus do fabricante Compressor Controls Corporation.

Na primeira parte do trabalho será feito um estudo sobre o fenômeno *surge* e os danos causados ao compressor centrífugo quando o mesmo for submetido a este fenômeno. Também será feito uma análise sobre o algoritmo de controle antisurge utilizado pelo fabricante (Compressor Controls Corporation).

Na segunda parte do trabalho será feito um estudo de caso utilizando os parâmetros do compressor centrífugo utilizado na plataforma P-50 da Petrobras, simulando as condições de operação do compressor no controlador. Configurando os parâmetros do controlador será possível monitorar a resposta de controle e analisar a eficácia do controle empregado.

**Palavras-chave:** Antisurge; Centrífugo; Compressor; Controlador; Surge

## Antisurge control of centrifugal compressors

### Abstract

This work aims to analyze the surge phenomenon in centrifugal compressors, as well as antisurge control used to prevent this type of disturbance detrimental to the system. This antisurge control is performed by dedicated Series 3 Plus Antisurge Controller manufacturer Compressor Controls Corporation.

In the first part of the work, will be done a study about surge phenomenon and damage to the centrifugal compressor, when it is subjected to this phenomenon. Also will be an analysis of the control algorithm used by the manufacturer (Compressor Controls Corporation).

In the second part of the work will be done a case study using the parameters of the centrifugal compressor used in the P-50 Petrobras. Simulating operating conditions of the compressor in the controller. Setting the parameters of the controller will be possible to monitor the control response and analyze the effectiveness of control.

**Keywords: Antisurge; Centrifugal; Compressor; Controller; Surge.**

## Sumário

1.	Introdução .....	1
2.	Curvas de Desempenho do Compressor .....	4
3.	Surge .....	6
3.1.	O que é o fenômeno surge?.....	6
3.2.	O ciclo de surge .....	6
3.3.	Consequências do surge .....	8
4.	Controle Antisurge .....	9
5.	Algoritmo de Controle Antisurge CCC Utilizado .....	10
5.1.	Coordenadas do gráfico .....	10
5.2.	Proximidade para o Surge .....	12
5.3.	Como calcular a surge limit line .....	13
5.4.	Linhas de controle.....	15
5.5.	Respostas de controle.....	16
6.	Cálculo da Surge Limit Line .....	21
7.	Parâmetros das Linhas de Controle .....	28
8.	Parâmetros das Respostas de Controle .....	29
9.	Simulação Utilizando o Controlador Series 3 Plus .....	30
10.	Conclusão .....	34
11.	Bibliografia.....	35

## Lista de Figuras

Figura 1- Princípio difusor .....	1
Figura 2 – Impelidor.....	1
Figura 3 - Estágio de compressão completo.....	2
Figura 4 - Caminho do gás dentro do compressor.....	2
Figura 5 - Curvas de Desempenho do Compressor .....	4
Figura 6 - Curvas de Desempenho do Compressor (Pressão de Descarga x Fluxo).....	5
Figura 7 - Curvas de Desempenho do Compressor (Polytropic Head x Fluxo) .....	5
Figura 8 - Principais parâmetros do processo durante o surge.....	6
Figura 9 - Ciclo de Surge em um compressor.....	7
Figura 10 - Controle Antiurge .....	9
Figura 11 - Gráfico com as cinco linhas de controle representadas .....	10
Figura 12 - Curvas formadas para cada peso molecular .....	11
Figura 13 - Curvas utilizando coordenadas invariáveis .....	11
Figura 14 - Erro em função do DEV .....	18
Figura 15 - Resposta Recycle Trip .....	19
Figura 16 - Movimento do ponto de operação .....	20
Figura 17 - Resposta total = Controle PI + Recycle Trip .....	20
Figura 18 – Data Sheet do Compressor - Modelo: 8R8B+D6R8S .....	23
Figura 19 - Dados retirados da curva do compressor .....	24
Figura 20 - Curvas de desempenho do compressor - Modelo: 8R8B+D6R8S .....	24
Figura 21 - Pontos calculados através dos dados do compressor.....	27
Figura 22 - Pontos interpolados .....	27
Figura 23 - Surge Limit Line .....	27
Figura 24 - Simulação dos sensores de entrada do compressor .....	30
Figura 25 - Enginnering Panel e Painel frontal do Controlador .....	31
Figura 26 - Parte traseira do controlador.....	31

## 1. Introdução

Compressores centrífugos são utilizados em plataformas de petróleo para o aproveitamento do gás produzido. O gás pressurizado proveniente do compressor pode ser utilizado para diversas finalidades como a exportação e distribuição para o consumidor, o consumo da plataforma e para utilização no método gas-lift, que consiste na injeção do gás pressurizado ao poço, reduzindo a densidade do óleo e facilitando a elevação de petróleo até a superfície. Por estes motivos o compressor pode ser o componente mais caro e mais importante do processo. Proteger esse equipamento contra danos causados por *surge* é a função do controle antisurge.

A função do compressor centrífugo é realizar o ciclo termodinâmico de compressão. A energia mecânica proveniente do rotor é convertida em energia cinética ao gás que é transformada em energia de pressão, conhecido como Head. Para entendermos o funcionamento do compressor centrífugo precisamos ter em mente a característica do princípio difusor, caracterizado na figura abaixo.

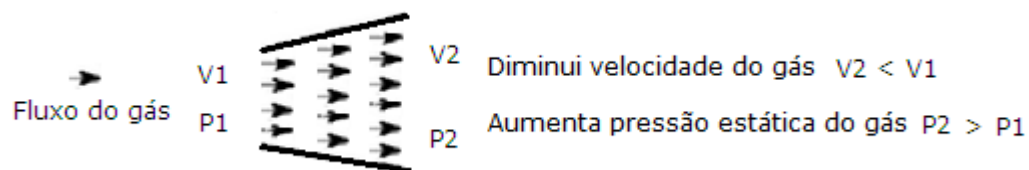


Figura 1- Princípio difusor

Um compressor centrífugo é constituído de partes rotativas e partes estacionárias. O principal componente rotativo é o impelidor, representado na figura 2, e o principal componente estacionário é o difusor.

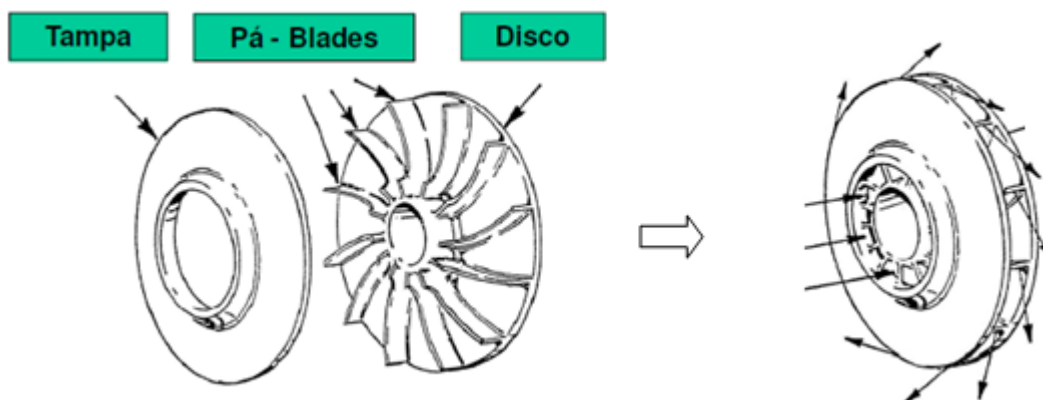


Figura 2 – Impelidor

Agora podemos simplificar o ciclo de funcionamento do compressor centrífugo:

- O gás passa pelo centro do impelidor que está acoplado ao eixo do compressor e através da ação centrífuga é acelerado em direção a tangente (a energia mecânica foi convertida em energia cinética). As blades em formato difusor como podem ser notadas na figura 2, garantem o aumento da pressão estática do gás (parte da energia cinética foi convertida em energia de pressão (Head)).



- O gás agora com uma grande energia cinética acumulada sai da extremidade do impelidor e entra no componente estacionário, o difusor.
- O difusor desacelera o gás e aumenta sua pressão estática. A energia cinética foi convertida em energia de pressão (Head). O gás agora caminha para a entrada do próximo impelidor completando assim um estágio de compressão.
- Como a compressão é um ciclo termodinâmico, parte da energia do sistema é convertida em energia térmica, logo durante o processo há um aumento considerável na temperatura do gás.

A figura 3 exemplifica um estágio de compressão completo bem como o percentual de ganho de pressão estática tanto no impelidor quanto no difusor, já figura 4 ilustra o caminho do gás dentro do compressor desde a sucção até a descarga passando por vários estágios de compressão.

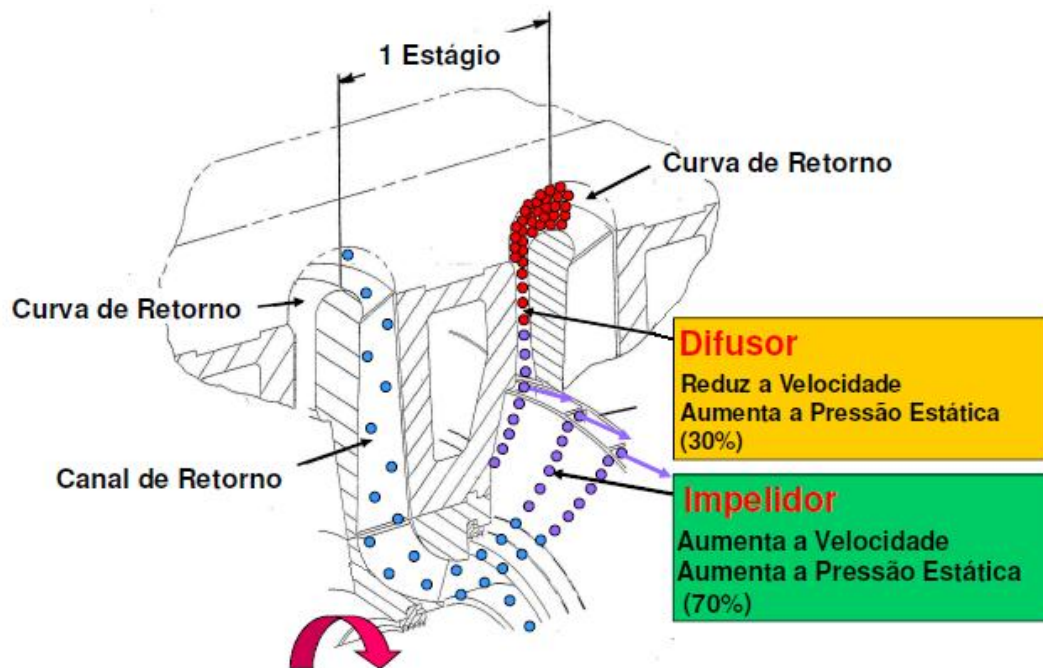


Figura 3 - Estágio de compressão completo

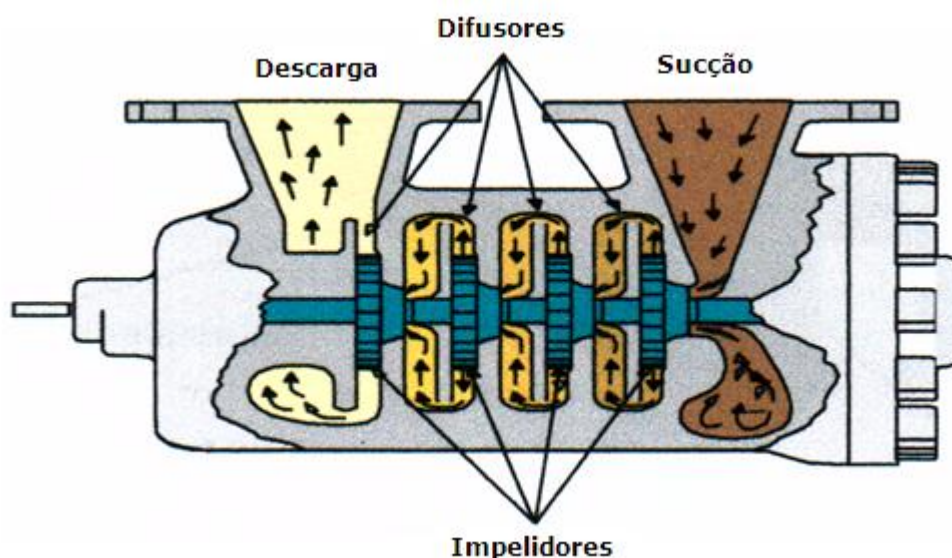


Figura 4 - Caminho do gás dentro do compressor

Um compressor centrífugo necessita de uma fonte externa para movimentar seu rotor gera e com isso conseguir comprimir o gás. Essa fonte externa geralmente é um motor ou uma turbina a ar ligada a uma caixa redutora formando o trem de compressão.

Para a implementação do controle antisurge necessitaremos do valor da velocidade do eixo do compressor proveniente do motor ou turbina, necessitaremos também dos valores da pressão de sucção, pressão de descarga, temperatura de sucção, temperatura de descarga e vazão de sucção do gás. A combinação dessas variáveis determinará se o compressor está em surge ou não e através do controle a ação corretiva a ser tomada.

## 2. Curvas de Desempenho do Compressor

O compressor centrífugo apresenta restrições impostas ao seu funcionamento quando submetido a determinadas circunstâncias, assim fica delimitado uma área útil de operação sobre o conjunto de curvas típicas de desempenho, ou seja, uma curva típica de desempenho do compressor centrífugo ilustra seu range e sua flexibilidade operacional. Esta curva é fornecida pelo fabricante do equipamento e é traçada experimentalmente de acordo com o modelo do compressor.

As coordenadas do gráfico podem variar de acordo com a necessidade de análise, o eixo X geralmente é representado pela vazão (fluxo) de sucção do compressor, já o eixo Y pode ser representado por variáveis de processo como: Pressão de descarga e polytropic Head e relação de compressão. Cada curva de desempenho do compressor representa uma diferente faixa de velocidade de operação.

De acordo com as condições de processo o ponto de operação ira se mover para a esquerda ou para a direita sobre a curva de desempenho fornecida pelo fabricante. Quando o ponto de operação ultrapassa a esquerda da curva de desempenho (figura 5) significa que o compressor entrou em *surge*, logo devemos controlar as condições de pressão de sucção, pressão descarga e vazão de sucção para movimentarmos o ponto de operação novamente para a direita. O ponto de projeto sempre representado na curva de desempenho é o ponto de operação normal em que se deseja uma eficiência ótima no compressor, abaixo podemos identificar o limite de surge e o ponto de projeto.

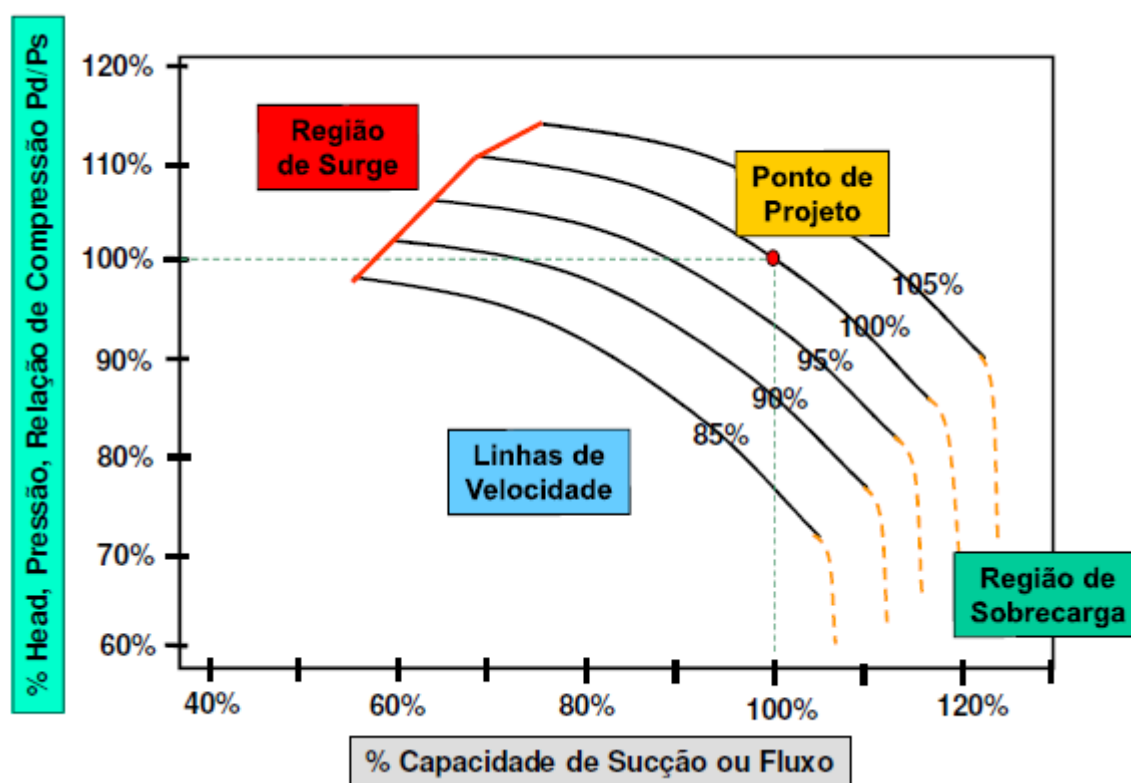


Figura 5 - Curvas de Desempenho do Compressor

Abaixo segue as curvas de desempenho do compressor, modelo: D8R8B+D6R8S, fabricado pela Dresser-Rand utilizado na plataforma P-50 da Petrobras. Este compressor será simulado no controlador antisurge na segunda etapa do trabalho.

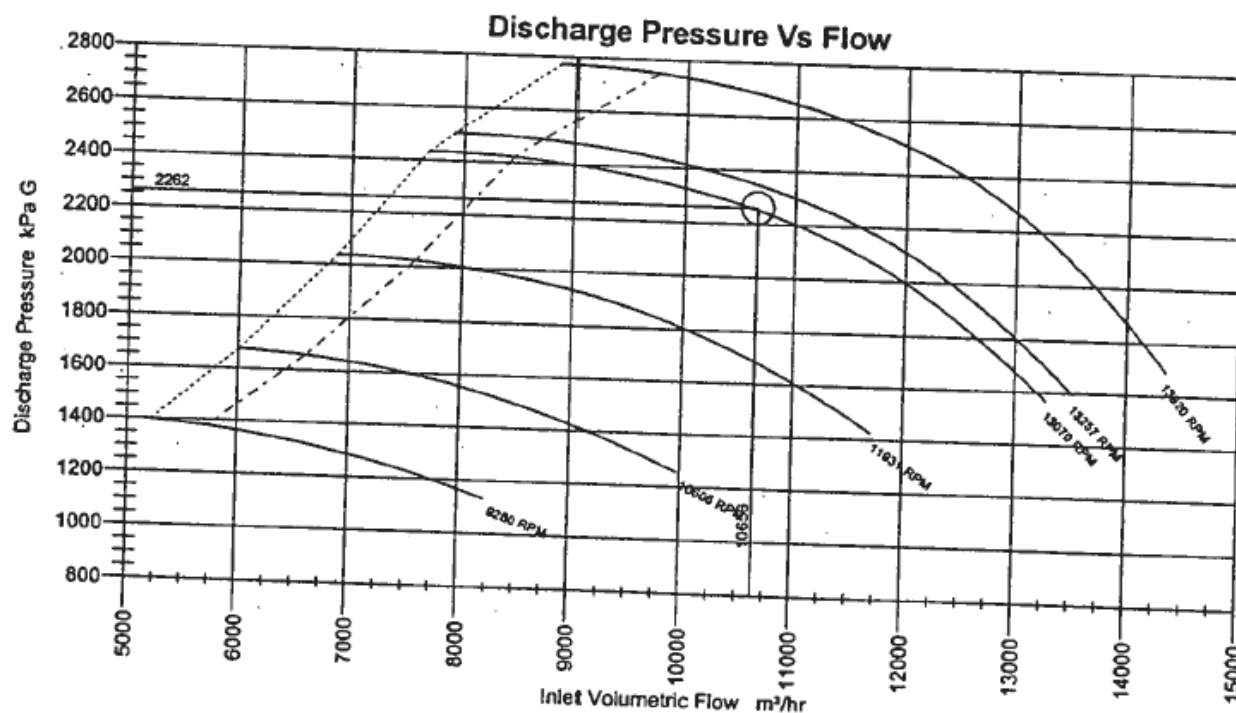


Figura 6 - Curvas de Desempenho do Compressor (Pressão de Descarga x Fluxo)

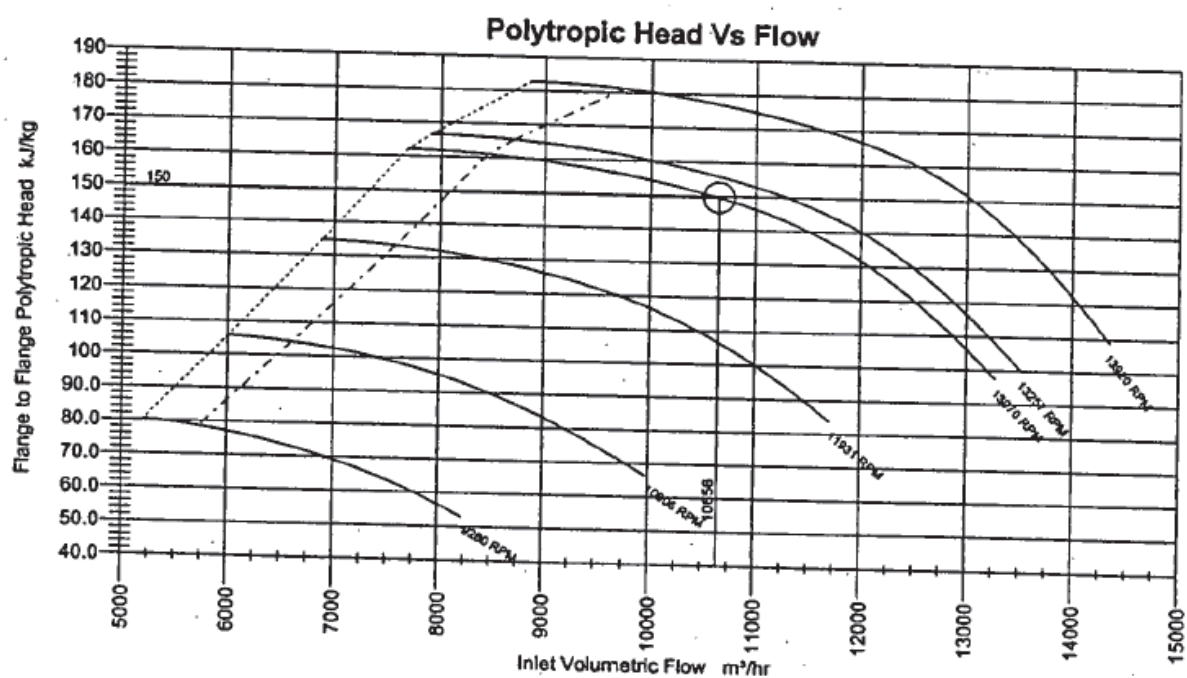


Figura 7 - Curvas de Desempenho do Compressor (Polytropic Head x Fluxo)

### 3. Surge

#### 3.1. O que é o fenômeno surge?

*Surge* é um fenômeno que ocorre em compressores dinâmicos, caracterizado por uma oscilação da vazão total do compressor, frequentemente incluindo uma inversão momentânea do fluxo de gás, este fluxo reverso pode acontecer em menos de 50 milissegundos. Os sinais da ocorrência do surge no compressor são: vibração excessiva do rotor do compressor, mudanças bruscas no deslocamento axial, mudanças bruscas de carga e se o *surge* for severo, produzirá sons audíveis. Abaixo segue os principais parâmetros do processo durante o *surge*.

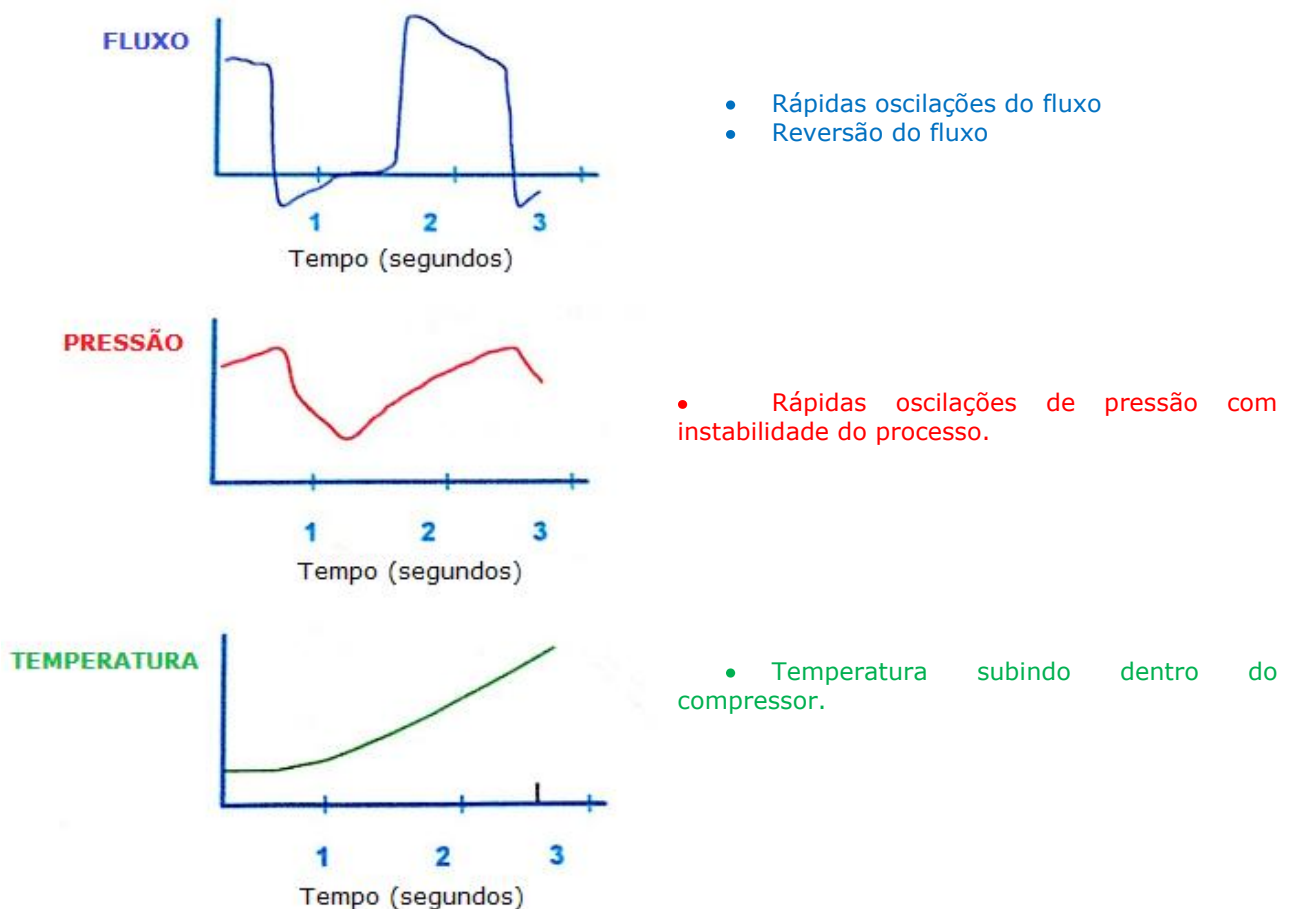


Figura 8 - Principais parâmetros do processo durante o surge

#### 3.2. O ciclo de surge

Para melhor compreensão do fenômeno surge, devemos observar o movimento do ponto de operação do compressor na sua curva típica de desempenho durante o surge.

Para cada velocidade, existe uma vazão mínima abaixo da qual o compressor não pode ser operado numa condição estável, este valor de vazão mínima é conhecido como limite de *surge*. Este ponto é alcançado quando o gás não tem velocidade suficiente para superar o aumento da pressão, logo o fluxo é invertido.

O Ciclo de Surge é descrito de acordo com a figura 9 da seguinte forma:

- O compressor está operando no ponto A.
- Se a pressão de sucção é mantida constante e pressão de descarga é elevada, a taxa de fluxo cai e o ponto de operação passa para B. Ponto de vazão mínima, o limite de *surge*.
- Neste ponto o gás não tem velocidade suficiente para superar o aumento da pressão, logo o gás é temporariamente armazenado no volume da descarga, sendo incapacitado de descarregar. Com isso o alívio para essas condições é o ponto de operação caminhar para C, ocasionando uma vazão ou fluxo reverso no compressor.
- O fluxo reverso é suficiente para fazer cair à pressão na descarga, logo o ponto de operação passa para o ponto D, retornando o fluxo positivo.
- No ponto D a vazão é insuficiente para provocar um aumento na pressão de descarga, logo o ponto de operação passa para E aumentando o fluxo o compressor.
- Com o aumento da pressão a vazão volta a diminuir e o ponto de operação começa a percorrer a curva de desempenho do compressor novamente cruzando o ponto A, o ciclo de surge está completo.

A duração de um ciclo de surge varia entre 0,33 a 3 segundos.

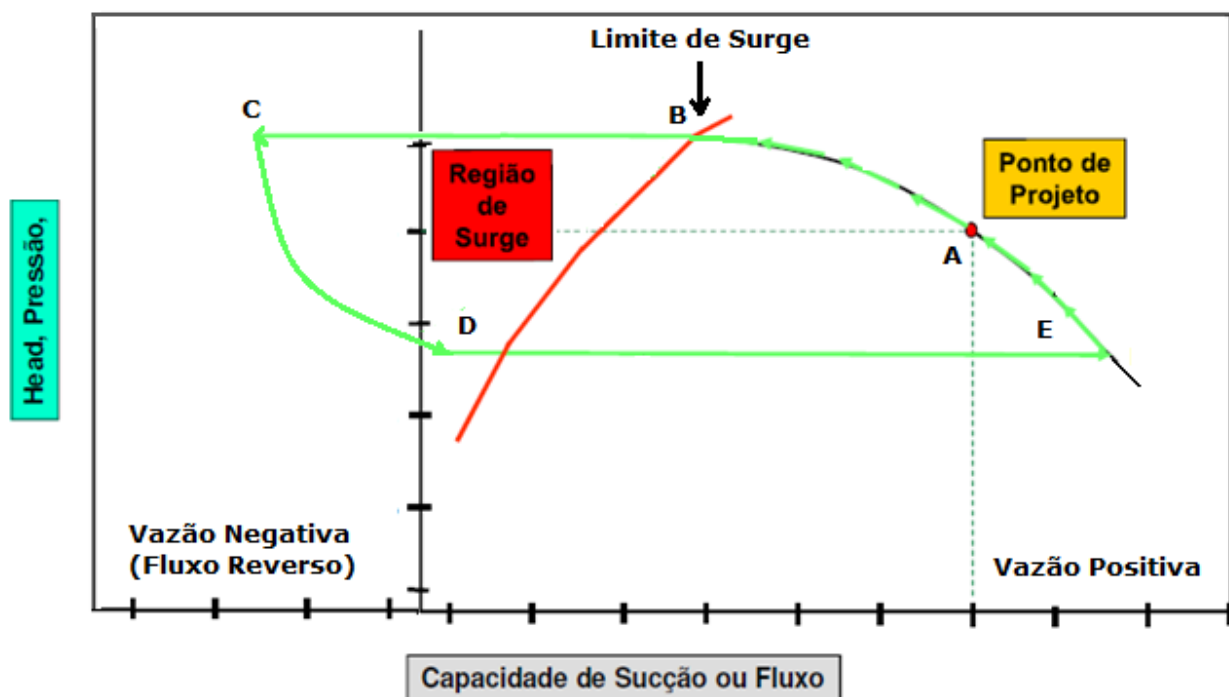


Figura 9 - Ciclo de Surge em um compressor

Este ciclo de surge continuará até que alguma mudança seja feita no processo ou nas condições de operação do compressor. Logo válvulas de controle antisurge são usadas para evitar essa condição de instabilidade aumentando a vazão de sucção, aliviando a pressão de descarga e diminuindo a relação de compressão.

### 3.3. Consequências do surge

O *surge* incontrolado pode acarretar sérios problemas mecânicos ao compressor, como danos aos mancais, impelidores, eixo e principalmente aos selos do compressor, além de reduzir a vida útil do equipamento e diminuir consideravelmente sua eficiência através de recirculações internas ocasionadas por folgas internas. *Surges* progressivos podem resultar em uma completa destruição do compressor.

Problemas mecânicos no compressor interferem diretamente ao processo, isso acarreta em danos financeiros consideráveis. A paralização de um compressor dependendo de sua função acarreta a paralização do processo de extração do óleo. Em uma plataforma de petróleo em que se extrai 100 mil barris de petróleo por dia, onde o barril custa em média 200 reais, a paralização do compressor pode gerar um prejuízo diário de aproximadamente 20 milhões de reais.

#### 4. Controle Antisurge

O controle antisurge em compressores centrífugos consiste na instalação de uma válvula de controle antisurge em uma linha de recirculação entre a descarga e a sucção. O controlador antisurge deve ser programado para comandar a abertura da válvula à medida que o ponto de operação do compressor se aproxime da linha de surge vista no item 3.2. (ciclo de surge), aliviando a pressão de descarga e aumentando a vazão ou fluxo de forma que a vazão do compressor fique acima da vazão mínima. O controle antisurge possui 6 entradas analógicas (pressão de sucção, pressão de descarga, temperatura de sucção, temperatura de descarga, vazão de sucção e velocidade do compressor) e uma saída analógica que representa o sinal para atuação da válvula.

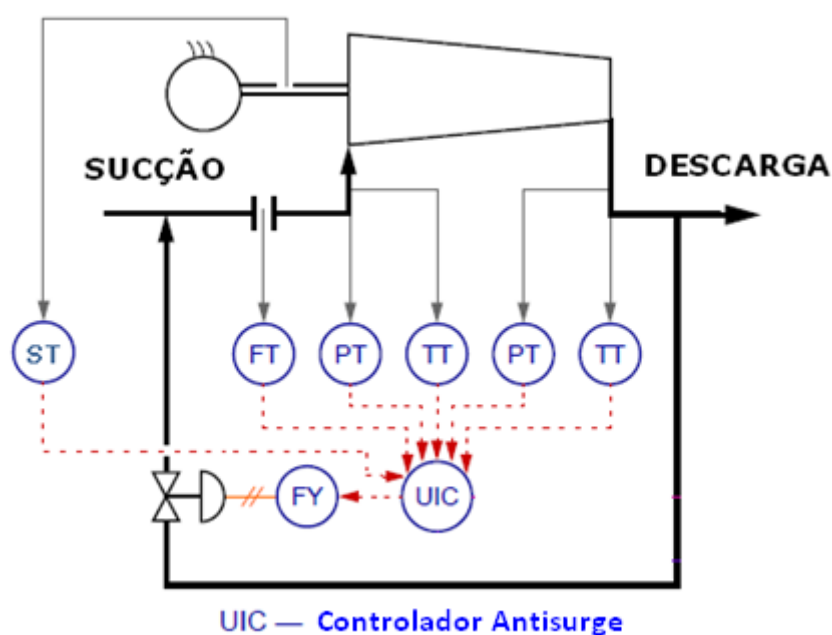


Figura 10 - Controle Antiurge

FT = Transmissor de vazão ou fluxo

PT = Transmissor de pressão

TT = Transmissor de temperatura

ST = Transmissor de velocidade

FY = Solenoide da válvula de controle antisurge.



## 5. Algoritmo de Controle Antisurge CCC Utilizado

O algoritmo de controle utilizado pelo fabricante do controlador (Compressor Control Corporation) para atuação da válvula de controle antisurge consiste em traçar um gráfico com cinco linhas. A linha Surge Limit é calculada através dos parâmetros do compressor fornecidos pelo fabricante, porém esta linha Surge Limit difere-se da linha de limite de surge que já conhecemos acima, pois as coordenadas do gráfico que o controlador utiliza são diferentes das coordenadas disponibilizadas pelo fabricante, o motivo para a mudança de coordenadas será discutido no próximo tópico. As demais linhas são traçadas a partir da Surge Limit Line (figura 11). Cada vez que o ponto de operação do compressor cruzar uma linha à direita ou a esquerda gerará uma resposta de controle diferente.

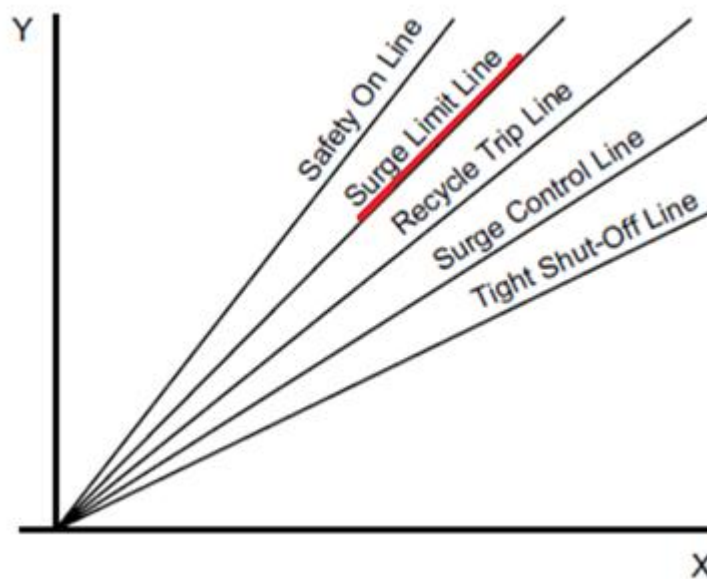


Figura 11 - Gráfico com as cinco linhas de controle representadas

### Resposta de Controle:

- RESPOSTA ANTISURGE PI: Aumenta a taxa de recirculação quando o ponto de operação está à esquerda da Surge Control Line e reduz quando está à direita da mesma.
- RESPOSTA RECYCLE TRIP: Mantém a válvula de controle aberta quando o ponto de operação está à esquerda da Recycle Trip Line.
- RESPOSTA SAFETY ON: Move a Surge Control Line para direita se o ponto de operação cruzar a Safety On Line.
- RESPOSTA TIGHT SHUT OFF: Fecha a válvula de controle completamente quando o ponto de operação está à direita da Tight Shut-Off Line.

### 5.1. Coordenadas do gráfico

A seleção das variáveis que compõem as coordenadas do gráfico na qual a Surge Limit Line está situada é muito importante, pois, com o compressor em operação, a Surge Limit Line deve permanecer fixa, permitindo somente o movimento do ponto de operação quando as condições de processo

mudarem. Isso permite um controle seguro, reduzindo a margem de controle, o que significa aumentar a área operacional do compressor.

Coordenadas usadas no mapa de desempenho do compressor como Pressão de descarga ( $P_D$ ), poliotropic head ( $H_p$ ) ou relação de compressão ( $R_c$ ) por fluxo volumétrico ( $Q_s$ ) são definidas para uma situação específica de condições de sucção: Pressão de sucção ( $P_s$ ), Temperatura de sucção ( $T_s$ ), Peso Molecular (MW) e Expoente para compressão isentrópica do gás ( $K_s$ ). Logo quando modificamos alguma condição de sucção a curva formada também modificará, abaixo podemos perceber diferentes curvas para diferentes pesos moleculares do gás, tanto para head x vazão como para Relação de compressão x vazão.

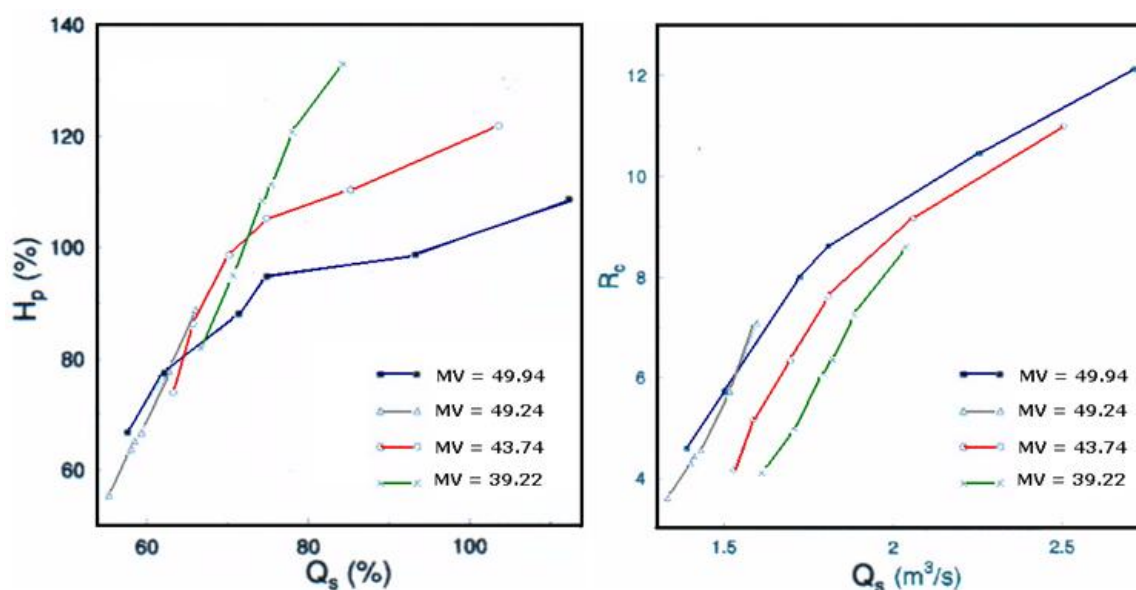


Figura 12 - Curvas formadas para cada peso molecular

Para a curva permanecer praticamente inalterada a CCC (Control Compressor Corporation) utiliza outras coordenadas para representar a Surge Limit Line, como o Head reduzido ( $h_r$ ) por Fluxo reduzido ao quadrado ( $q_r^2$ ), exemplificado na figura abaixo. Adiante veremos a formulação dessas coordenadas invariáveis.

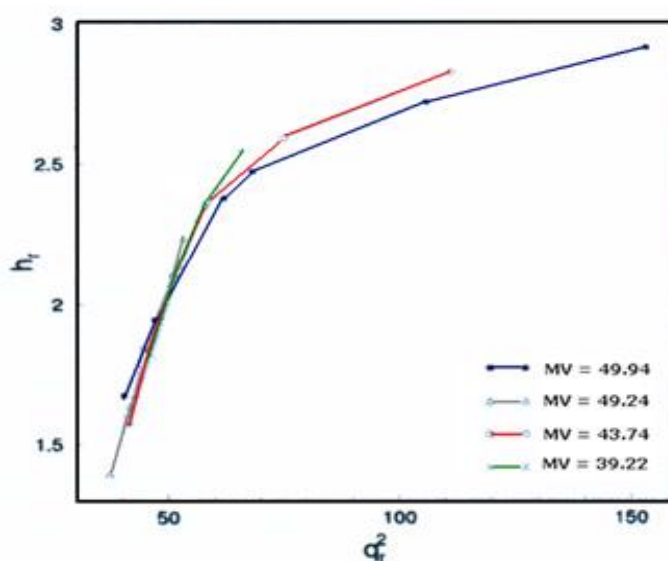


Figura 13 - Curvas utilizando coordenadas invariáveis

**Head reduzido ( $h_r$ ):**

Para calcular o Head reduzido utilizamos a fórmula abaixo:

$$h_r = (R_c^\sigma - 1) / \sigma \quad (1)$$

Onde:

$H_r$  = Head reduzido

$R_c$  = Relação de Compressão ( $P_d/P_s$ )

$\sigma$  = Exponente polytropic Head

O expoente polytropic Head é calculado através da razão entre as temperaturas de sucção e descarga e a razão entre as pressões de sucção e descarga.

$$\sigma = \log(T_d/T_s) / \log(P_d/P_s) \quad (2)$$

**Fluxo reduzido ao quadrado ( $q_r^2$ )**

Para calcular o fluxo reduzido ao quadrado utilizamos a fórmula abaixo:

$$q_r^2 = \Delta P_{o,s} / P_s \quad (3)$$

Onde:

$\Delta P_{o,s}$  = pressão diferencial medida através do fluxo de sucção.

$P_s$  = Pressão de sucção

Veremos na próxima seção "proximidade para o surge" a fórmula para o cálculo da localização do ponto de operação, que está diretamente relacionado com as duas variáveis mencionadas acima.

**5.2. Proximidade para o Surge**

O limite de surge de um compressor pode ser expresso como o valor mínimo seguro de uma variável (X) do mapa de desempenho do compressor, expresso como uma função de outra variável Y, ou seja:

$$X_{\min} = f(Y) \quad (4)$$

A proximidade para o surge pode ser calculada dividindo o valor mínimo seguro da variável pelo seu valor atual. Proximidade para o surge é representado por  $S_s$ .

$$S_s = \frac{X_{\min}}{X_{\text{atual}}} \quad (5)$$

Como o algoritmo de controle utiliza coordenadas diferentes do mapa de desempenho do compressor (Fluxo reduzido ao quadrado ( $q_r^2$ ) e Head reduzido ( $h_r$ )), podemos escrever  $S_s$  como sendo:

$$X_{\min} = f(Y) \rightarrow q_{r,s}^2 = f(h_r) \quad (6)$$

$$S_s = \frac{f(h_r)}{q_{r,atual}^2} \quad (7)$$

Quando o valor de  $S_s$  for igual a 1, podemos dizer que o compressor está operando em cima do limite de surge, quando o valor de  $S_s$  for maior que 1, o compressor está operando em uma região de Surge e quando o valor de  $S_s$  for menor que 1, o compressor está operando em uma zona de operação estável.

Para escalar de forma adequada a expressão da proximidade para o surge é inserido duas constantes na fórmula, veremos adiante que essas constantes são importantes na hora do cálculo da Surge Limit line. Assumindo valor 1 para  $S_s$  delimitados a função para a Surge limit mine representada por  $f_1$ .

$$S_s = \frac{K \cdot f_1[h_r \cdot f_3]}{q_{r,s}^2} = 1 \rightarrow f_1[h_r \cdot f_3] = \frac{q_{r,s}^2}{K} \quad (8)$$

Como:

$$q_{r,s}^2 = \frac{\Delta P_{o,s}}{P_s} \quad (3)$$

Temos:

$$f_1[h_r \cdot f_3] = \frac{\Delta P_{o,s}}{K \cdot P_s} \quad (9)$$

Onde:

$K$  = Coeficiente da Linha Surge Limit

$f_1(h_r \cdot f_3)$  = Surge Limit line

### 5.3. Como calcular a surge limit line

A Surge Limit line utilizada na malha de controle antisurge consiste em encontrar 10 pontos e traçar uma linha interligando-os, ou seja, encontrar os valores para  $f_1(h_{r0} \cdot f_3)$  até  $f_1(h_{r9} \cdot f_3)$ . O Primeiro ponto  $h_{r0} \cdot f_3$  é fixado em 0 e o ultimo ponto  $h_{r9} \cdot f_3$  é fixado em 10. A escolha de  $f_3$  será importante justamente para ajustar esse intervalo de 0 a 10. Abaixo serão mostradas as etapas para obter os respectivos pontos.

Através do DataSheet do compressor fornecido pelo fabricante, devemos obter as seguintes informações:

- Peso molecular (MV)
- Pressão de sucção ( $P_s$ )

- Temperatura de sucção ( $T_s$ )
- Fator de compressibilidade do gás na sucção ( $Z_s$ )
- Relação de calor específico do gás ( $k$ )
- Faixas de velocidade do compressor ( $N$ )

Através das curvas de desempenho fornecido pelo fabricante, devemos obter as seguintes informações de operação do compressor sobre a linha de limite de surge:

- Pressão de Descarga ( $P_d$ )
- Eficiência politrópica ( $N_p$ )
- Fluxo de volume de gás na sucção ( $Q_s$ )

Par cada ponto de surge da curva de desempenho do compressor devemos calcular o valor do head reduzido:

$$h_r = (R_c^\sigma - 1) / \sigma \quad (1)$$

Onde a relação de compressão é dada por:

$$R_c = P_d / P_s \quad (10)$$

O expoente polytropic Head pode ser calculado a seguir:

$$\sigma = \frac{k - 1}{k \cdot \eta_p} \quad (11)$$

Onde:

$K$  = Relação de calor específico do gás

$N_p$  = Eficiência politrópica

Par cada ponto de surge da curva de desempenho do compressor devemos calcular o valor pressão diferencial medida através do fluxo de sucção:

$$\Delta P_o = \left( \frac{W}{A} \right)^2 \cdot \frac{1}{\rho_s} \text{ kPa} \quad (12)$$

Onde:

$A$  = constante de medição do dispositivo de fluxo.

$W$  = relação de fluxo de massa de gás expressa por:

$$W = Q_s \cdot \rho_s \text{ kg/h} \quad (13)$$

Onde:

$Q_s$  = Fluxo de volume de gás na sucção

$\rho_s$  = Densidade do gás expressa por:

$$\rho = \rho_s = \frac{P \cdot MW}{Z \cdot R_0 \cdot T} \text{ kg/m}^3 \quad (14)$$

Onde:

$P$  = pressão do gás =  $P_s$

$T$  = Temperatura do gás =  $T_s$

$MW$  = Peso molecular

$Z$  = Fator de compressibilidade do gás =  $Z_s$

$R_0$  = Constante universal do gás = 8,31441 KJ/kg.mole.k

Com Os 10 pontos ( $h_r$ ,  $q_r^2$ ) mapeados é traçada a surge limit line.

#### 5.4. Linhas de controle

Com a surge limit line encontrada basta traçar as outras linhas adicionando margens em relação a surge limit line. Como a surge limit line é o conjunto de pontos onde o parâmetro  $S_s$  (proximidade para o surge) igual a 1, cada linha de controle é o conjunto de pontos onde:

$$S_s = 1 + \text{margem} \quad (15)$$

Outro parâmetro adicionado é o desvio (DEV) que pode ser calculado em relação a qualquer linha de controle como:

$$DEV = 1 + \text{margem} - S_s \quad (16)$$

Se o DEV da respectiva linha de controle for igual à zero, significa que o parâmetro  $S_s$  ou ponto de operação está em cima da respectiva linha, se o DEV for negativo, o ponto de operação está a esquerda e se o DEV for positivo significa que o ponto de operação está a direita. Este parâmetro é importante tanto para o operador, pois ele não se confunde na hora da operação do compressor, quanto para o controle, pois o DEV da Surge Control Line será a variável de processo (PV) para o controle PI empregado.

#### Surge Control Line

A surge control line define a distância mínima entre o ponto de operação e a surge limit line, logo a margem da surge control line (SCM) é a distancia entre as duas linhas que pode ser representada como:

$$SCM = - (B_1 + CR_{SO}) \quad (17)$$

Onde:

$B_1$  = margem da surge control line inicial

$CR_{SO}$  = Resposta Safety On que move a Surge Control Line para direita se o ponto de operação cruzar a Safety On Line.

### Recycle Trip Line

A margem entre a recycle trip line e a surge limit line (RTM) é definida por:

$$RTM = (RT - B_1 - CR_{SO}) \quad (18)$$

Onde:

RT = distância Recycle trip line

$B_1$  = margem da surge control line inicial

$CR_{SO}$  = Resposta Safety On que move a Surge Control Line para direita se o ponto de operação cruzar a Safety On Line.

### Safety On Line

A Safety On line define um limite operacional no qual é assumido o compressor em surge. A resposta Resposta Safety On ( $CR_{SO}$ ) irá incrementar um contador de surge aumentando a margem da surge control line (SCM) quando o ponto de operação move-se para a esquerda desta linha. A margem entre a Safety On line e a surge limit line (SOM) é definida por:

$$SOM = SO \quad (19)$$

Onde:

SO = distância Safety On Line

### Tight Shut-Off Line

A Tight Shut-Off line define o mínimo desvio (DEV) da surge control line na qual a resposta tight shut-off pode reduzir o sinal de controle para o atuador para zero. A margem da Tight Shut-Off line (TSM) é definida por:

$$TSM = - (D_1 + B_1 + CR_{SO}) \quad (20)$$

Onde:

$D_1$  = distância da Tight Shut –Off line para Surge Control Line

$B_1$  = margem da surge control line inicial

$CR_{SO}$  = Resposta Safety On que move a Surge Control Line para direita se o ponto de operação cruzar a Safety On Line.

## 5.5. Respostas de controle

### Resposta Safety On

Algumas circunstâncias como desgaste do compressor, mudanças no processo, erros de configuração do controlador, ou distúrbios severos podem ocasionar o surge mesmo com as respostas antisurge PI e Recycle trip. A detecção de surge (ponto de operação a esquerda da Safety On Line) aciona o contador de surge e move a Surge Control Line para a direita, aumentando a distância entre o ponto de operação e a Surge Limit Line.

A resposta Safety On é definida por:

$$CR_{SO} = N \cdot B_2 \quad (21)$$

Onde:

N = Contador de surge

B<sub>2</sub> = valor da margem de incremento Safety On

### Resposta Antisurge PI

O conceito de controle PID consiste em analisar o valor da variável de processo (PV), compará-la com o set point desejado (SP) e calcular a resposta de saída do atuador através do somatório do cálculo Proporcional, Integral e Derivativo. A diferença entre o valor da variável de processo e do set point gera o erro (E) que necessita ser minimizado, abaixo segue a formula do controle PID:

$$MV(t) = K_p \times \left[ E(t) + K_i \times \int E(t) dt + K_d \times \frac{dE(t)}{dt} \right] \quad (22)$$

Onde:

MV = Variável de saída do atuador

K<sub>p</sub> = ganho proporcional

K<sub>i</sub> = ganho integral

K<sub>d</sub> = ganho derivativo

Para representar o ganho expresso em porcentagem substitui-se K<sub>p</sub> por banda proporcional (Pb), K<sub>d</sub> por termo derivativo (Dt) e K<sub>i</sub> por taxa integral ou reset (Kr).

$$MV(t) = \frac{100}{Pb} \times \left[ E(t) + Kr \times \int E(t) dt + Dt \times \frac{dE(t)}{dt} \right] \quad (23)$$

O termo proporcional é utilizado para corrigir o processo na proporção que o erro aumenta (diferença entre o valor real e o valor desejado). O termo integral é utilizado para erros pequenos que no regime permanente que necessitam de uma correção mais intensa, já o termo derivativo é utilizado quando há grandes variações no erro gerando grandes oscilações no sistema.

O controlador antisurge utiliza o termo proporcional e integral para desenvolver seu controle. A variável de processo utilizada é o parâmetro DEV da surge control line visto na seção 5.4. A resposta proporcional e integral do controlador é expressa abaixo:

$$CR_p = (100/PB) \cdot E \quad (24)$$

$$CR_i = (100/PB) \cdot (Kr/60) \cdot E \cdot \Delta t \quad (25)$$

Onde:

CR<sub>p</sub> = Resposta proporcional

CR<sub>i</sub> = Resposta Integral

PB = Banda proporcional

Kr = taxa integral ou reset (repetições por minuto)



$\Delta t$  = Tempo de scan (em segundos)

E = Erro (diferença entre o set point e o valor atual)

Durante cada scan o controlador analisa o valor de DEV E utiliza o controle PI de malha fechada para gerar as respostas  $CR_p$  e  $CR_i$ . Quando o valor de DEV for maior que zero, a resposta antisurge PI fechará gradativamente a válvula antisurge. Quando o valor de DEV for menor do que zero a resposta antisurge PI abrirá a válvula antisurge o necessário para o valor de DEV retornar a zero, ou seja, a resposta PI tentará manter o ponto de operação o mais próximo possível da surge control line, onde o DEV é igual à zero.

Na figura 14 é representado o erro (E) em função do desvio (DEV) da surge control line.

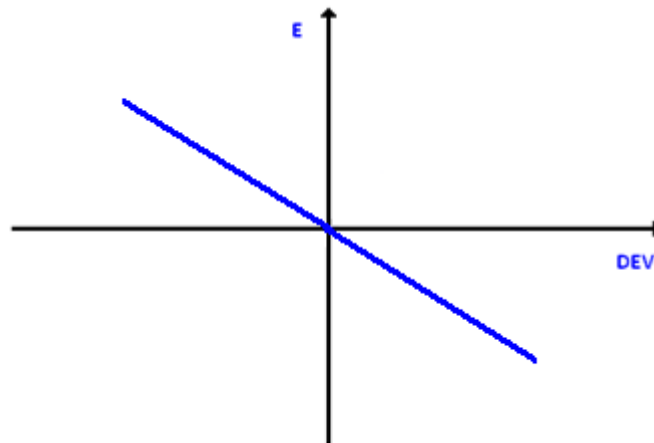


Figura 14 - Erro em função do DEV

O Erro é então calculado a partir do desvio da surge control line e é representado por:

$$E = -0,512 * (DEV) \quad (26)$$

Essa ação de controle que abre a válvula antisurge é tipicamente lenta sendo efetiva para distúrbios pequenos do processo. Para aumentar a velocidade de controle da resposta PI é necessário diminuir a banda proporcional (PB) e/ou aumentar a taxa de integral (Kr), o que aumentaria a instabilidade do sistema gerando grandes oscilações. Por este motivo é acrescentada outra linha entre a surge limit line e a surge control line chamada de Recycle Trip Line.

### Resposta Recycle Trip

O objetivo da resposta Recycle Trip é prevenir o surge no compressor devido a distúrbios grandes e rápidos. Quando o ponto de operação cruza a recycle trip line uma resposta de controle em malha aberta é gerada. Se o ponto de operação cruza a linha à esquerda o controle abrirá a válvula antisurge rapidamente com degraus pré-definidos, se o ponto de operação cruza a linha a direita o controle fechará a válvula antisurge devagar de forma exponencial. A magnitude ou o tamanho de cada degrau empregado para a abertura da válvula é expresso abaixo:

$$CR_{RT} = C_1 * (-C_0 \cdot DEV_{RT}) \quad (27)$$

Onde:

$C_1$  = Máximo tamanho do degrau

$C_0$  = Ganho Recycle Trip

$DEV_{RT}$  = Desvio em relação a Recycle Trip Line

O tamanho de cada degrau é restringido da seguinte forma:

$$0 \leq CR_{RT} \leq C_1 \quad (28)$$

O intervalo de tempo entre os degraus para a abertura da válvula é definido pela constante  $C_2$  em segundos configurado manualmente no controlador. Se a cada intervalo  $C_2$  o ponto de operação não retornar para a direita da Recycle Trip Line um novo degrau é aplicado até a abertura da válvula atingir 100%.

O tempo de fechamento definido é por  $T_L$ . O intervalo  $T_L$  é subdividido em 4 intervalos iguais, no primeiro intervalo a válvula fechará 2/3 do seu curso e o restante durante os 3 outros intervalos. A figura 15 mostra o comportamento da saída durante a resposta Recycle Trip.

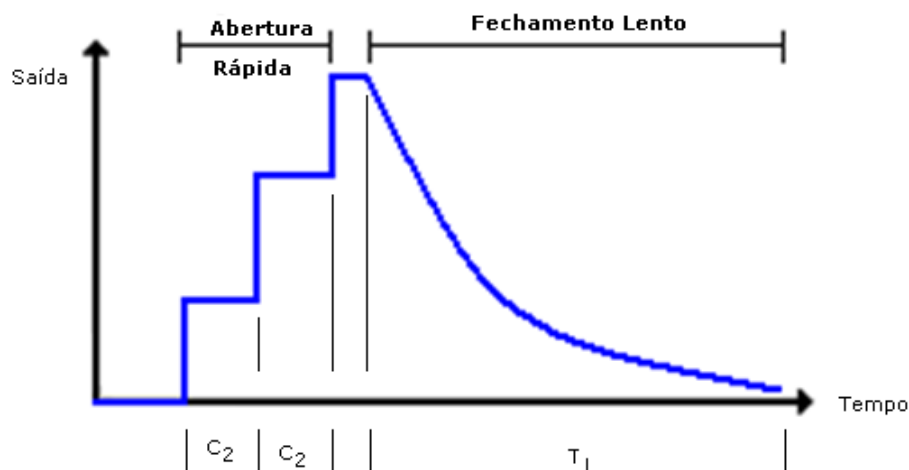


Figura 15 - Resposta Recycle Trip

### Resposta Tight Shut Off

Quando o fluxo de recirculação de gás desejada é zero, a válvula de controle deve estar fechada de modo que a recirculação do gás esteja completamente bloqueada. Com a Tight Shut Off Line tracada, temos este ponto no mapa onde a recirculação desejada do gás é zero, logo se o ponto de operação estiver a direita da Tight Shut Off Line, o controlador então forçará o sinal do atuador para zero.

### Resposta Antisurge PI + Recycle Trip

A resposta total do controlador para a atuação da válvula de controle é o somatório da resposta Antisurge PI com a Resposta Recycle Trip. Essa combinação possibilita uma atuação rápida e brusca quando o ponto de operação sinaliza que o compressor está próximo ao surge e uma resposta branda para distúrbios pequenos quando o ponto de operação ainda está distante da surge limit line.

$$CRT = CR_p + CR_I + CR_{RT} \quad (29)$$

Onde:

$CRT$  = Resposta de controle total

$CR_p$  = Resposta proporcional

$CR_I$  = Resposta Integral

$CR_{RT}$  = Resposta Recycle Trip

A figura abaixo mostra o movimento do ponto de operação em torno das linhas de controle em instantes T de tempo.

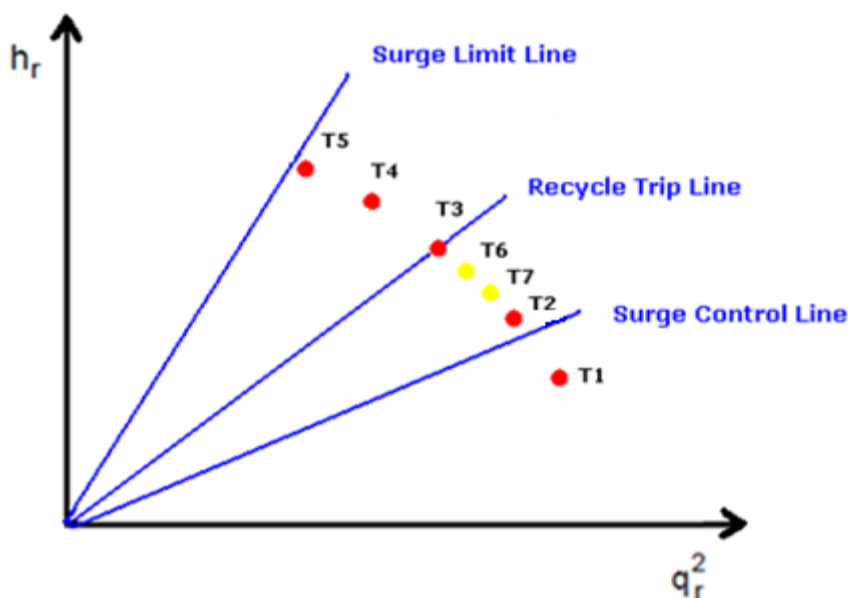


Figura 16 - Movimento do ponto de operação

Abaixo podemos notar a resposta de controle total como o somatório do controle PI e o controle Recycle Trip para o movimento do ponto de operação da figura acima.

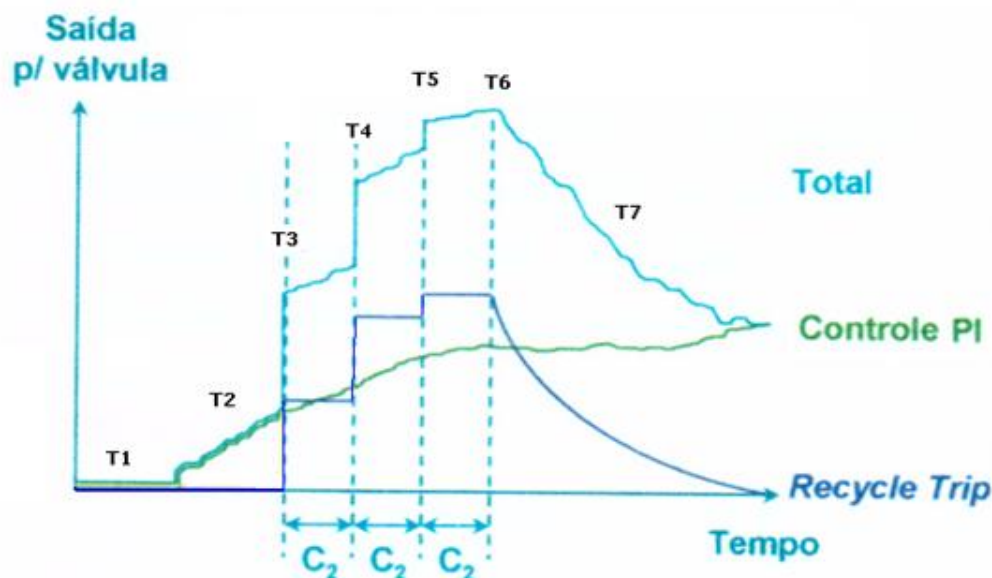


Figura 17 - Resposta total = Controle PI + Recycle Trip

No instante T1 tanto a resposta PI quanto a Recycle Trip estão zeradas, pois o ponto de operação se encontra a esquerda da surge control line. À medida que se percebe um distúrbio pequeno onde o ponto de operação começa a caminhar em direção ao surge, a resposta PI é acionada (Instante T2). Caso o distúrbio aumente rapidamente com o ponto de operação atingindo a recycle Trip Line (instante T3) a resposta Recycle Trip é acionada. Após o período  $C_2$  o controlador verifica se o ponto de operação retornou ao lado seguro da Recycle Trip line, caso não ocorra (instante T4) outro degrau é acionado, e assim sucessivamente (instante T5) até o ponto de operação retornar a direita da recycle trip line (instante T6). Após o instante T6 ocorrerá um decréscimo exponencial na resposta recycle trip.

## 6. Cálculo da Surge Limit Line

Vimos na seção anterior como calcular a surge limit line para ser inserida no controlador. Utilizaremos o compressor centrífugo, modelo: 8R8B+D6R8S, fabricado pela Dresser-Rand utilizado na plataforma P-50 da Petrobras para calcular a surge limit line.

A fórmula abaixo é utilizada para achar a surge limit line:

$$f_1[h_r \cdot f_3] = \frac{\Delta P_{O,s}}{K \cdot P_s} \quad (9)$$

Como  $f_3$  e  $K$  são constantes para melhor dimensionamento da linha, assumiremos o seguinte valor:

$$f_3 = 6.00$$

$$K = 0.375$$

### Ganhos e Bias

As entradas analógicas como pressão, temperatura e fluxo devem ser convertidas em valores absolutos para implementação do algoritmo de controle, portanto devemos converter as entradas em variáveis de processo (PV).

$$PV = \text{Ganho} \cdot SV + \text{Bias} \quad (30)$$

Os ganhos permitem que o controlador utilize os transmissores na sucção (pressão e temperatura) na mesma escala que os respectivos transmissores na descarga. Bias convertem a pressão e a temperatura para unidades absolutas. Logo para o cálculo da surge limit line precisamos converter  $\Delta P_O$  e  $P_s$ . Suas respectivas fórmulas são descritas abaixo:

$\Delta P_O$ :

$$SV = \Delta P_O / \Delta P_{O,SPAN} \quad (31)$$

$$\text{Ganho} = 1$$

$$\text{Bias} = 0$$

$P_s$ :

$$SV = P_s - P_{s,L} / P_{s,SPAN} \quad (32)$$

$$\text{Ganho} = P_{s,SPAN} / P_{d,SPAN} + P_{d,L} + P_{atm} \quad (33)$$

$$\text{Bias} = P_{d,L} + P_{atm} / P_{d,SPAN} + P_{d,L} + P_{atm} \quad (34)$$

$\Delta P_{O,SPAN}$ ,  $P_{s,SPAN}$  e  $P_{d,SPAN}$  são os ranges de pressão diferencial (fluxo) e pressão de sucção e pressão de descarga.  $P_{s,L}$  e  $P_{d,L}$  são os menores valores de pressão de sucção e pressão de descarga.

De acordo com as calibrações dos transmissores do projeto temos:

$$\Delta P_{O,SPAN} = 110.0 \text{ inWC (27.37 kPa)}$$

$$P_{s,SPAN} = 1000 \text{ kPa}$$

$$P_{d,SPAN} = 3000 \text{ kPa}$$

$$P_{s,L} = 0.0 \text{ kPa}$$

$$P_{d,L} = 0.0 \text{ kPa}$$

Substituindo os valores encontramos o PV das duas variáveis requeridas.

$\Delta P_o$ :

$$PV_{\Delta po} = \Delta P_o / 27,37 \quad (35)$$

$P_s$ :

$$SV = P_s / 1000$$

$$\text{Ganho} = 0.322$$

$$\text{Bias} = 0.033$$

$$PV_{ps} = 0.000322 * P_s + 0.033 \quad (36)$$

Substituindo as constantes f3 e k na fórmula além de  $\Delta P_o$  e  $P_s$  por suas respectivas variáveis de processo  $PV_{\Delta po}$  e  $PV_{ps}$ , encontramos a seguinte formula para o cálculo da surge limit line:

$$f_1[h_r * 6] = (\Delta P_o / 27,37) / 0.375 * (0.000322 * P_s + 0.033) \quad (37)$$

$$f_1[h_r * 6] = \Delta P_o / (0.00330493 * P_s + 0.33870375) \quad (38)$$

Como assumimos a não variação da pressão de sucção para o cálculo da surge limit line podemos substituir  $P_s$  pelo valor encontrado no data sheet do compressor para condições normais.  $P_s = 730$  KPa. Logo devemos encontrar o valor de  $H_r$  e  $\Delta P_o$  Para traçar a surge limit line.

$$f_1[h_r * 6] = \Delta P_o / 2.75130265 \quad (39)$$

Com a fórmula rearranjada basta seguir o passo a passo do item 5.3 e para obter os 10 pontos necessários para traçar a surge limit line.

Através do DataSheet do compressor fornecido pelo fabricante, obtemos as seguintes informações:

- Peso molecular (MV) = 20,16

- Pressão de sucção ( $P_s$ ) = 730 kPa + 101.3 Kpa (atmosférica) = 831.3 Kpa
- Temperatura de sucção ( $T_s$ ) = 40 degC ou 313 K
- Fator de compressibilidade do gás na sucção ( $Z_s$ ) = 0.9824


DATA SHEET		Nº I-FD-3010.62-1231-PPC	
	CLIENT:	FPSO UNIT - P-50	
	JOB:		
	AREA:	NORMAL CONDITION	
	TITLE:	CENTRIFUGAL COMPRESSOR	
ITEM N°: C-UC-12301 A/B/C			
FOR: E & P BACIA DE CAMPOS			
LOCATION: ALBACORA LESTE FIELD DEVELOPMENT			
SERVICE: NATURAL GAS COMPRESSION		ITEM N°:	
MANUFACTURER: DRESSER RAND	MODEL: D8R8B/D6R8S	QUANTITY: 03 (THREE) (1)	
DRIVER TYPE: ELECTRIC MOTOR (NOTE 3) COMPRESSOR TYPE : THREE STAGES CENTRIFUGAL COMPRESSOR			
APPLICABLE TO: <input type="checkbox"/> PROPOSAL <input checked="" type="checkbox"/> PURCHASE <input type="checkbox"/> AS BUILT			
(ALL DATA ON PER UNIT BASIS)			
OPERATING CONDITIONS		NORMAL OPERATING POINT (API-POINT B)	
STAGE	1st Stage	2nd Stage	3rd Stage
GAS HANDLED ( Also see page 3a)	Natural gas	Natural gas	Natural gas
CORROSIVE COMPOUNDS	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
STARTING GAS	-	-	-
NORMAL CONDITION AT COMPRESSOR FLANGE(S)			
INLET CONDITIONS			
MOLECULAR WEIGHT	20.16	19.79	19.09
RELATIVE HUMIDITY, %			
TEMPERATURE, °C	40.0	37.0	39.5
PRESSURE, [kPa.g]	730	2192	6103
SPECIFIC HEAT RATIO, K <sub>avg</sub>	1.244	1.253	1.240
COMPRESSIBILITY FACTOR, Z <sub>avg</sub>	0.9824	0.9520	0.9319
WEIGHT FLOW , kg/h	69827	67814	63625
INLET VOLUME , m³/h	10656	3662	1229
DISCHARGE CONDITIONS			
PRESSURE, [kPa, g.]	2262	6361	19615
TEMPERATURE, °C	123.7	126.9	165.4
SPECIFIC HEAT RATIO, K <sub>avg</sub>	1.244	1.253	1.240
COMPRESSIBILITY FACTOR, Z <sub>avg</sub>	0.9824	0.9520	0.9319
PRESSURE RATIO	3.10	2.90	3.21
ESTIMATED Surge (at speed above) m³/h	see performance maps		
REQUIRED POWER (ALL LOSSES INCLUDED), (+0%)	12139		
SPEED, rpm	13073		
GAS POWER KW (Predicted)	11481		
POLYTROPIC HEAD, kJ / kg	149.66	146.41	174.59
POLYTROPIC EFFICIENCY, %	86.55	82.12	66.41
Guarantee Point	YES	YES	YES

Figura 18 – Data Sheet do Compressor - Modelo: 8R8B+D6R8S

Através das curvas de desempenho fornecido pelo fabricante, devemos obter as seguintes informações de operação do compressor sobre a linha de limite de surge para cada curva de velocidade do compressor:

	9,280 RPM	10,606 RPM	11,931 RPM	13,070 RPM	13,920 RPM
Pressão de Descarga ( $P_d$ )	1501.3 KPa	1770.3 KPa	2131.3 KPa	2533.3 KPa	2882.3 KPa
Eficiência politrópica ( $N_p$ )	86%	85,71%	85,38%	84,26%	84,41%
Fluxo de volume de gás na sucção ( $Q_s$ )	5200 ACMH	6000 ACMH	6867 ACMH	7667 ACMH	8820 ACMH

Observação: Os valores de Pressão de Descarga ( $P_d$ ) foram acrescidos da Pressão Atmosférica (101.3 KPa).

Figura 19 - Dados retirados da curva do compressor

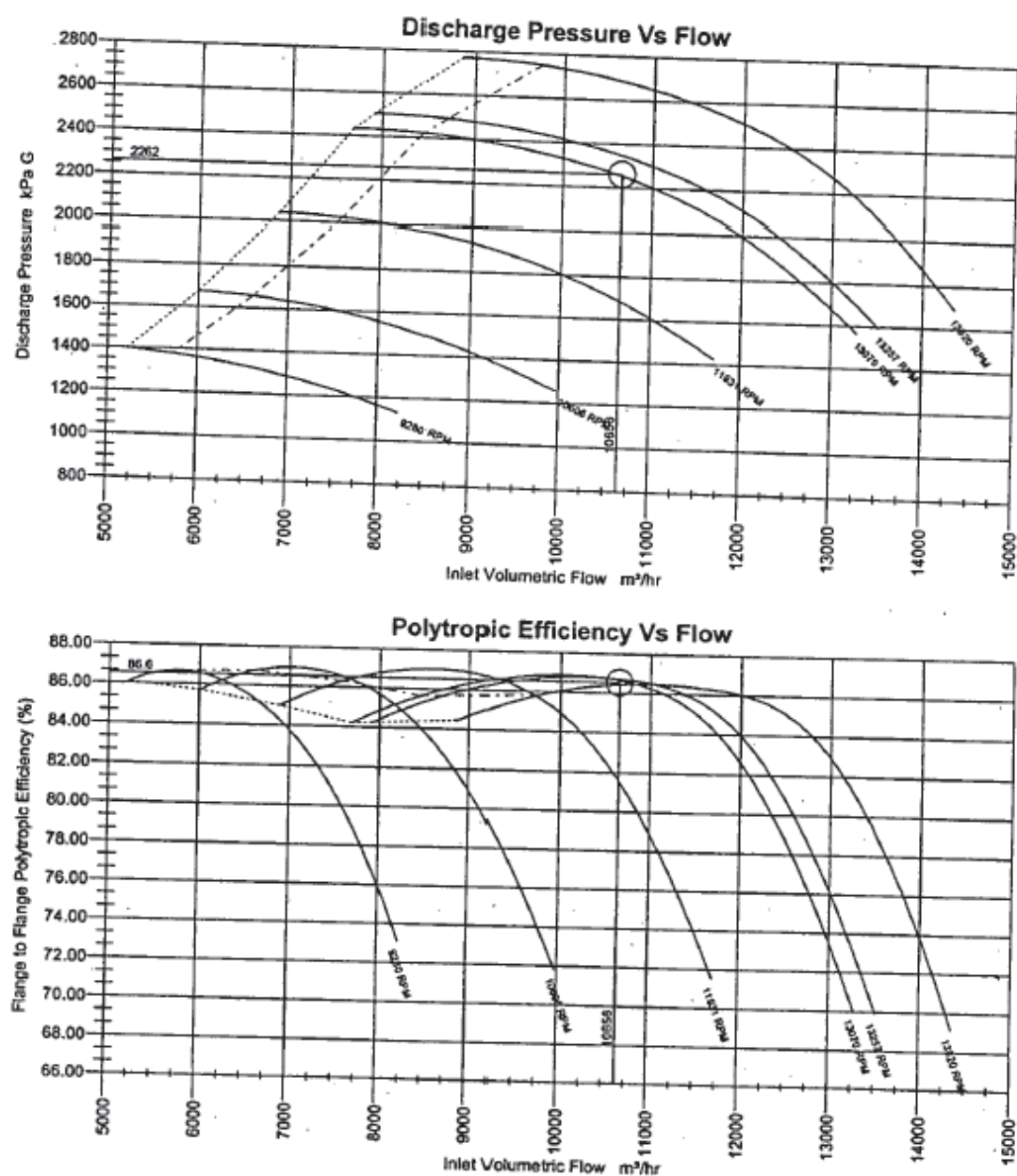


Figura 20 - Curvas de desempenho do compressor - Modelo: 8R8B+D6R8S



**Cálculo do ponto 1 (ponto de surge para velocidade de 9280 RPM)**Cálculo de  $h_r$ 

$$Rc = P_d/P_s \rightarrow Rc = 1501,3/831.3 \rightarrow Rc = 1.81$$

$$\sigma = (k - 1)/k * Np \rightarrow \sigma = (1.244 - 1)/ 1.244*0.86 \rightarrow \sigma = 0.2281$$

$$h_r = ((Rc)^\sigma - 1)/ \sigma \rightarrow h_r = (1.81^{0.2281} - 1)/ 0.2281 \rightarrow \mathbf{h_r = 0.63}$$

Cálculo de  $\Delta P_0$ 

$$\rho_s = P_s * MW/Z_s * R_0 * T_s \rightarrow \rho_s = 831.3 * 20,16 / 0.9824 * 8,31441 * 313 \rightarrow \rho_s = 6.5551 \text{ kg/m}^3$$

$$W = Q_s * \rho_s \rightarrow W = 5200 * 6.5551 \rightarrow 34086.52 \text{ Kg/h}$$

A = constante de medição do dispositivo de fluxo = 7299

$$\Delta P_0 = (W/A)^2 / (1/ \rho_s) \rightarrow \Delta P_0 = (34086.52/7299)^2 * (1/6.5551) \rightarrow \mathbf{\Delta P_0 = 3.32 \text{ kPa}}$$

Substituindo  $h_r$  e  $\Delta P_0$  na fórmula encontramos o primeiro ponto:

$$f_1[h_r*6] = \Delta P_0 / 2.75130265 \rightarrow \mathbf{f_1[3.78] = 1.20}$$

**Cálculo do ponto 2 (ponto de surge para velocidade de 10606 RPM)**Cálculo de  $h_r$ 

$$Rc = P_d/P_s \rightarrow Rc = 1770,3/831.3 \rightarrow Rc = 2.13$$

$$\sigma = (k - 1)/k * Np \rightarrow \sigma = (1.244 - 1)/ 1.244*0.8571 \rightarrow \sigma = 0.2288$$

$$h_r = ((Rc)^\sigma - 1)/ \sigma \rightarrow h_r = (2.13^{0.2288} - 1)/ 0.2288 \rightarrow \mathbf{h_r = 0.83}$$

Cálculo de  $\Delta P_0$ 

$$\rho_s = P_s * MW/Z_s * R_0 * T_s \rightarrow \rho_s = 831.3 * 20,16 / 0.9824 * 8,31441 * 313 \rightarrow \rho_s = 6.5551 \text{ kg/m}^3$$

$$W = Q_s * \rho_s \rightarrow W = 6000 * 6.5551 \rightarrow 39330.6 \text{ Kg/h}$$

A = constante de medição do dispositivo de fluxo = 7299

$$\Delta P_0 = (W/A)^2 / (1/ \rho_s) \rightarrow \Delta P_0 = (39330.6/7299)^2 * (1/6.5551) \rightarrow \mathbf{\Delta P_0 = 4.43 \text{ kPa}}$$

Substituindo  $h_r$  e  $\Delta P_0$  na fórmula encontramos o segundo ponto:

$$f_1[h_r*6] = \Delta P_0 / 2.75130265 \rightarrow \mathbf{f_1[4.98] = 1.61}$$

**Cálculo do ponto 3 (ponto de surge para velocidade de 11931 RPM)**Cálculo de  $h_r$ 

$$Rc = P_d/P_s \rightarrow Rc = 2131.3/831.3 \rightarrow Rc = 2.56$$

$$\sigma = (k - 1)/k * Np \rightarrow \sigma = (1.244 - 1)/ 1.244*0.8538 \rightarrow \sigma = 0.2297$$



$$h_r = ((Rc)^\sigma - 1) / \sigma \rightarrow h_r = (2.56^{0.2297} - 1) / 0.2297 \rightarrow \mathbf{h_r = 1.05}$$

Cálculo de  $\Delta P_0$

$$\rho_s = P_s * MW / Z_s * R_0 * T_s \rightarrow \rho_s = 831.3 * 20,16 / 0.9824 * 8,31441 * 313 \rightarrow \rho_s = 6.5551 \text{ kg/m}^3$$

$$W = Q_s * \rho_s \rightarrow W = 6867 * 6.5551 \rightarrow 45013.87 \text{ Kg/h}$$

A = constante de medição do dispositivo de fluxo = 7299

$$\Delta P_0 = (W/A)^2 / (1 / \rho_s) \rightarrow \Delta P_0 = (45013.87 / 7299)^2 * (1 / 6.5551) \rightarrow \mathbf{\Delta P_0 = 5.80 \text{ kPa}}$$

Substituindo  $h_r$  e  $\Delta P_0$  na fórmula encontramos o terceiro ponto:

$$f_1[h_r * 6] = \Delta P_0 / 2.75130265 \rightarrow \mathbf{f_1[6.3] = 2.10}$$

#### Cálculo do ponto 4 (ponto de surge para velocidade de 13070 RPM)

Cálculo de  $h_r$

$$Rc = P_d / P_s \rightarrow Rc = 2533.3 / 831.3 \rightarrow Rc = 3.05$$

$$\sigma = (k - 1) / k * Np \rightarrow \sigma = (1.244 - 1) / 1.244 * 0.8426 \rightarrow \sigma = 0.2328$$

$$h_r = ((Rc)^\sigma - 1) / \sigma \rightarrow h_r = (3.05^{0.2328} - 1) / 0.2328 \rightarrow \mathbf{h_r = 1.27}$$

Cálculo de  $\Delta P_0$

$$\rho_s = P_s * MW / Z_s * R_0 * T_s \rightarrow \rho_s = 831.3 * 20,16 / 0.9824 * 8,31441 * 313 \rightarrow \rho_s = 6.5551 \text{ kg/m}^3$$

$$W = Q_s * \rho_s \rightarrow W = 7667 * 6.5551 \rightarrow 50257.95 \text{ Kg/h}$$

A = constante de medição do dispositivo de fluxo = 7299

$$\Delta P_0 = (W/A)^2 / (1 / \rho_s) \rightarrow \Delta P_0 = (50257.95 / 7299)^2 * (1 / 6.5551) \rightarrow \mathbf{\Delta P_0 = 7.23 \text{ kPa}}$$

Substituindo  $h_r$  e  $\Delta P_0$  na fórmula encontramos o quarto ponto:

$$f_1[h_r * 6] = \Delta P_0 / 2.75130265 \rightarrow \mathbf{f_1[7.62] = 2.62}$$

#### Cálculo do ponto 5 (ponto de surge para velocidade de 13070 RPM)

Cálculo de  $h_r$

$$Rc = P_d / P_s \rightarrow Rc = 2882.3 / 831.3 \rightarrow Rc = 3.47$$

$$\sigma = (k - 1) / k * Np \rightarrow \sigma = (1.244 - 1) / 1.244 * 0.8441 \rightarrow \sigma = 0.2324$$

$$h_r = ((Rc)^\sigma - 1) / \sigma \rightarrow h_r = (3.47^{0.2324} - 1) / 0.2324 \rightarrow \mathbf{h_r = 1.44}$$

Cálculo de  $\Delta P_0$

$$\rho_s = P_s * MW / Z_s * R_0 * T_s \rightarrow \rho_s = 831.3 * 20,16 / 0.9824 * 8,31441 * 313 \rightarrow \rho_s = 6.5551 \text{ kg/m}^3$$

$$W = Q_s * \rho_s \rightarrow W = 8820 * 6.5551 \rightarrow 57815.98 \text{ Kg/h}$$

$A =$  constante de medição do dispositivo de fluxo = 7299

$$\Delta P_0 = (W/A)^2 / (1/\rho_s) \rightarrow \Delta P_0 = (57815.98/7299)^2 * (1/6.5551) \rightarrow \Delta P_0 = 9.57 \text{ kPa}$$

Substituindo  $h_r$  e  $\Delta P_0$  na fórmula encontramos o quinto ponto:

$$f_1[h_r*6] = \Delta P_0 / 2.75130265 \rightarrow f_1[8.64] = 3.47$$

Como só temos 5 pontos além da origem e precisamos de 10 pontos com o último ponto situado em 10, utilizamos interpolação linear para inserir no controlador os 10 pontos. O controlador então também utiliza interpolação linear para traçar a surge limit line entre os 10 pontos inseridos.

Pontos Calculados						
$h_r*6$	0	3,78	4,98	6,3	7,62	8,64
$f_1(h_r*6)$	0	1,20	1,61	2,1	2,62	3,47

Figura 21 - Pontos calculados através dos dados do compressor

Pontos interpolados				
$h_r*6$	1.1	2.2	9.1	10
$f_1(h_r*6)$	0.3	0.65	3.8	4.7

Figura 22 - Pontos interpolados

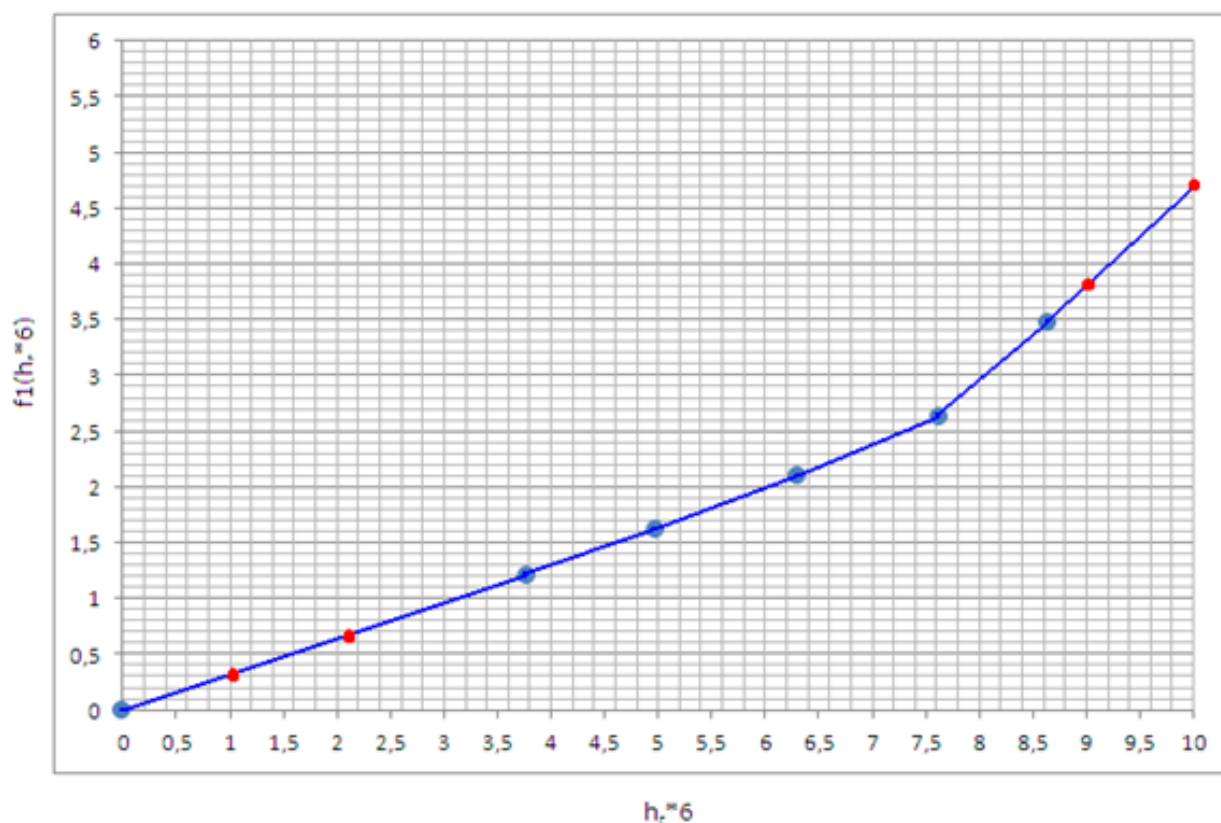


Figura 23 - Surge Limit Line

Com a Surge Limit Line do compressor calculada, podemos definir então as margens que compõem as outras linhas do controlador.

## 7. Parâmetros das Linhas de Controle

Com a surge limit line encontrada é necessário definir os valores das margens para gerar as outras linhas de controle.

### Surge Control Line

$$SCM = - (B_1 + CR_{SO}) \quad (17)$$

Onde:

$B_1$  = margem da surge control line inicial = 20%      Range: 0 a 99%

### Recycle Trip Line

$$RTM = (RT - B_1 - CR_{SO}) \quad (18)$$

Onde:

$RT$  = distância Recycle trip line = 10%      Range: 0 a 99%

$B_1$  = margem da surge control line inicial = 20%      Range: 0 a 99%

### Safety On Line

$$SOM = SO \quad (19)$$

Onde:

$SO$  = distância Safety On Line = 5%      Range: 0 a 99%

### Tight Shut-Off Line

$$TSM = - (D_1 + B_1 + CR_{SO}) \quad (20)$$

Onde:

$D_1$  = distância da Tight Shut -Off = 99%      Range: 0 a 99%

$B_1$  = margem da surge control line inicial = 20%      Range: 0 a 99%

## 8. Parâmetros das Respostas de Controle

### Resposta Safety On

$$CR_{SO} = N \cdot B_2 \quad (21)$$

Onde:

$B_2$  = valor da margem de incremento Safety On = 5%    Range: 0 a 99%

### Resposta Antisurge PI

$$CR_P = (100/PB) \cdot E \quad (24) \quad , \quad CR_I = (100/PB) \cdot (Kr/60) \cdot E \cdot \Delta t \quad (25)$$

Onde:

PB = Banda proporcional = 100    Range: 6 a 999

Kr = taxa integral ou reset (repetições por minuto) = 10    Range: 0 a 99.9 repetições por minuto

### Resposta Recycle Trip

$$CR_{RT} = C_1 \cdot (-C_0 \cdot DEV_{RT}) \quad (27)$$

Onde:

$C_1$  = Máximo tamanho do degrau = 20    Range: 0 a 99.9

$C_0$  = Ganho Recycle Trip = 10    Range: 0 a 99.9

$C_2$  = intervalo de repetição Recycle Trip = 0.8    Range: 0.04 a 9.96 segundos

TL = Taxa de decréscimo Recycle Trip = 30    Range: 0 a 999 segundos

## 9. Simulação Utilizando o Controlador Series 3 Plus

Utilizando o controlador dedicado Series 3 Plus do fabricante Compressor Controls Corporation, foi feita a simulação da operação do compressor e análise do sinal de saída (atuação da válvula antisurge).

Para simular os sensores do compressor (pressão de sucção, pressão de descarga, temperatura de sucção, temperatura de descarga, vazão de sucção e velocidade) foi utilizado potenciômetros, gerando sinais de entrada 4 a 20 mA.

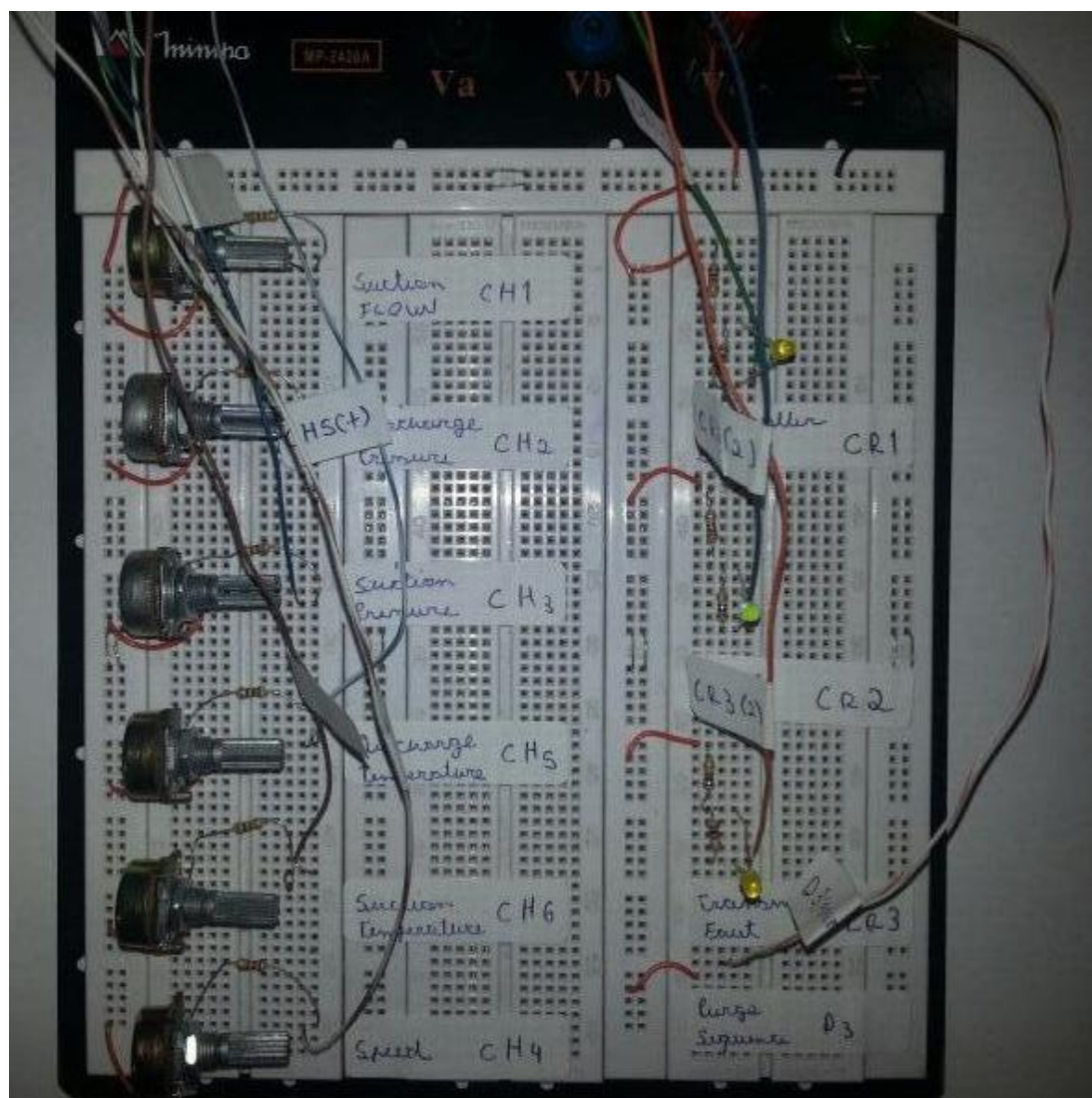


Figura 24 - Simulação dos sensores de entrada do compressor

Após ter conectado os sensores no controlador, foi inserido todos os valores dos parâmetros visto na seção 7 e 8 bem como os 10 pontos que geram a surge limit line no controlador. Essa inserção de valores foi feita através do "engineering panel" que se encontra na parte interna do controlador. A figura 25 mostra o engineering panel e a parte frontal do controlador onde podemos ver a atuação da válvula antisurge em porcentagem e o desvio DEV da surge control line, que varia de acordo com a variação do ponto de operação em torno desta linha.



Figura 25 - Enginnering Panel e Painei frontal do Controlador

A figura 26 mostra a parte traseira do controlador onde são conectados os sinais de entrada e a saída para a válvula.

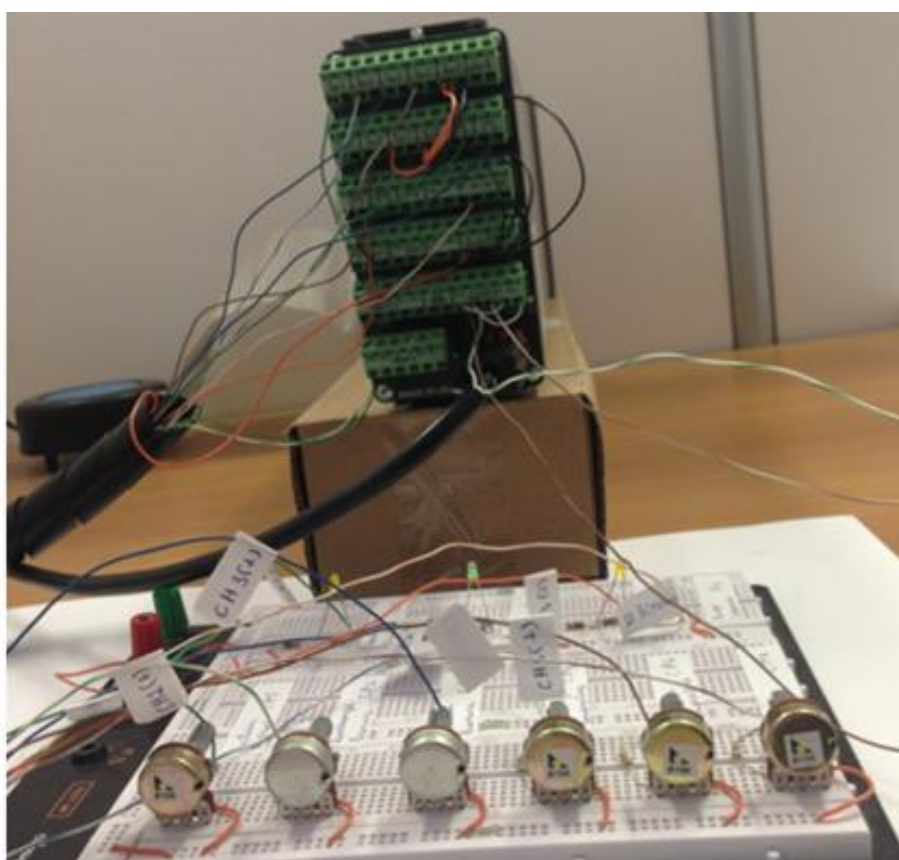


Figura 26 - Parte traseira do controlador



### Primeira análise

Primeiramente vamos simular as condições normais de operação do compressor, ou seja, esperamos que a atuação da válvula antisurge seja zero e que o DEV em relação a Surge Control Line seja positivo (ponto de operação a direita da surge control line).

Velocidade: 13073 rpm

Temperatura de sucção: 40° C

Pressão de sucção: 730 KPa

Fluxo de sucção medido em diferencial de pressão: 56 inWC ou 13,95 KPa

Temperatura de descarga: 123.7° C

Pressão de descarga: 2262 KPa

De fato o resultado do controlador foi o esperado, pois ele me gerou um DEV de 0.270, ou seja, um DEV positivo confirmando que o ponto de operação de fato está à direita da surge control line. Nesta situação o compressor opera em uma região segura sem a necessidade da recirculação de gás, ou seja, válvula antisurge fechada. O OUT do controlador em porcentagem foi 0.00, logo o resultado esperado foi atingido.

### Segunda análise

Nesta análise diminuimos a pressão diferencial através da sucção do compressor para 34,93 inWC ou 8.7 KPa. A redução do fluxo de sucção é uma das maiores causas de surge no compressor. Nesta faixa de operação do compressor o DEV registrado foi de -0.05, significando que o ponto de operação esta caminhando em direção ao surge e que cruzou a surge control line. De fato o OUT do controlador (saída para atuação da válvula) começou a aumentar de indicando que a resposta PI estava atuando.

Velocidade: 13073 rpm

Temperatura de sucção: 40° C

Pressão de sucção: 730 KPa

Fluxo de sucção medido em diferencial de pressão: 34,93 inWC ou 8.7 KPa

Temperatura de descarga: 123.7° C

Pressão de descarga: 2262 KPa

### Terceira análise

Nesta análise diminuimos ainda mais a pressão diferencial através da sucção do compressor para 30,91 inWC ou 7,7 KPa. Nesta faixa de operação do compressor o DEV registrado foi de -0.16, significando que o ponto de operação esta caminhando em direção ao surge e que cruzou a surge control line. A diferença entre o DEV da surge control line e da recycle trip line é 0.1, logo percebemos que o DEV recycle trip line foi -0.06. Isto significa que o ponto de operação cruzou a recycle trip line e acionou sua resposta também gerando a resposta total (recycle trip + PI). De fato o OUT do controlador (saída para atuação da válvula) aumentou neste ponto praticamente instantaneamente para 99.9. Isso deve ao fato do intervalo de tempo entre os degraus da resposta (C2) configurado ser muito pequeno: 0.8

segundos. Como a vazão o fluxo permaneceu inalterado a resposta recycle trip gerou degraus até a completa abertura da válvula.

Velocidade: 13073 rpm

Temperatura de sucção: 40° C

Pressão de sucção: 730 KPa

Fluxo de sucção medido em diferencial de pressão: 30,91 inWC ou 7,7 KPa.

Temperatura de descarga: 123.7° C

Pressão de descarga: 2262 KPa



## 10. Conclusão

Podemos concluir que o controlador antisurge Series 3 + é eficiente não só para distúrbios pequenos e lentos no compressor, quanto para distúrbios grandes e rápidos. De acordo com a segunda análise da simulação, a abertura gradual da válvula antisurge gerada pela resposta PI, de acordo com a intensidade do distúrbio, evita uma recirculação desnecessária do gás que causa uma ineficiência do processo. Na terceira análise da simulação perdemos um aumento considerável do distúrbio sendo necessária uma intervenção maior e mais rápida (resposta recycle trip) além da resposta PI. Esta resposta recycle trip tem que ser muito rápida e intensa, pois a duração de um ciclo de surge varia entre 0,33 a 3 segundos, por este motivo o tempo de scan para esta resposta ( $C_2$ ) é baixo.

Pela rapidez da resposta recycle trip podemos atuá-la bem próximo do limite de surge do compressor que mesmo assim o controlador poderá evitar o surge, essa é a grande vantagem do controlador antisurge series 3 +, pois quanto menos a válvula antisurge for aberta menor será a recirculação de gás, consequentemente maior será a relação de compressão e melhor será o desempenho do compressor.

## 11. Bibliografia

- [1] Dresser-Rand Company, UNIT CONTROL PANEL FOR F.P.S.O. UNIT P50 - (Manual de Operação) - Contract 40326, 2002.
- [2] Dresser-Rand Company, Treinamento Compressores Centrífugos, 2012.
- [3] Dresser-Rand Company, Treinamento turbina a gás, 2013.
- [4] Compressor Controls Corporation's, Engineering Manual - Suction Header Pressure Control - Load Sharing Control & Antisurge Control for the Three Parallel Re-injection Compressors for the Petrobras P-50 Retrofit Project- Brasil, 2002.
- [5] Compressor Controls Corporation's, Series 3 Plus Antisurge Controller for axial and Centrifugal Compressors - Publication IM301 (6.1.3), 2005.
- [6] Compressor Controls Corporation's, Series 3 Plus Hardware Reference - Publication IM300/H (6.2.0), 2005.
- [7] Compressor Controls Corporation's, Seminário de Treinamento Operação de Controladores Série 3 Plus - Antisurge controllers - petrobras - Plataforma P-53, 2008.
- [8] Petrobrás, UN-RIO / ATP-MLS / TBM - COMPRESSORES CENTRÍFUGOS, 2002.
- [9] Novus Produtos Eletrônicos, Artigo Técnico - Introdução ao controle PID, 2003.
- [10] Jann Tommy Gravdahl, Modeling and Control of Surge and Rotating Stall in Compressors, 1998.