

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL**

ANDRÉ CRUZ MOREIRA

**PROPOSTA DE SUBSTITUIÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO DE
CONTROLE DE SECAGEM DE AR COMPRIMIDO POR UM SISTEMA
DE CONTROLE BASEADO EM CONTROLADOR PROGRAMÁVEL**

MONOGRAFIA - ESPECIALIZAÇÃO

**CURITIBA
2012**

ANDRÉ CRUZ MOREIRA

**PROPOSTA DE SUBSTITUIÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO DE
CONTROLE DE SECAGEM DE AR COMPRIMIDO POR UM SISTEMA
DE CONTROLE BASEADO EM CONTROLADOR PROGRAMÁVEL**

Monografia de conclusão do Curso de Especialização em Automação Industrial do Departamento Acadêmico de Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Raimundo Erig Lima

**CURITIBA
2012**

AGRADECIMENTO

Agradeço à empresa UEG Araucária e aos técnicos do setor de instrumentação e controle Petter Ronaldo Gonzales e Carlos Vieira, os quais me proporcionaram o primeiro contato com o sistema de secagem de ar comprimido da planta e pelas explicações durante a realização deste trabalho.

Agradecimento especial ao Prof. Dr. Carlos Raimundo Erig Lima por ter aceitado ser meu orientador e pelo norteamento da pesquisa com vista a adequar a mesma às restrições encontradas no campo.

Agradeço aos professores do Curso de Especialização em Automação Industrial e aos professores componentes da Banca Examinadora, pela paciência e disponibilidade.

Agradeço à minha esposa Sulimar e ao meu filho Bruno pela paciência e compreensão das ausências durante a realização deste trabalho.

E o mais importante: agradeço a Deus pois sem Ele nada seria possível.

RESUMO

MOREIRA, André Cruz. **Proposta de Substituição de um Sistema Embarcado de Controle de Secagem de Ar Comprimido por um Sistema de Controle Baseado em Controlador Programável.** 2012. 76 f. Monografia (Especialização) – Programa de Pós-Graduação – Automação Industrial, UTFPR, Curitiba. 2012.

Este trabalho tem por objetivo propor a instalação de um sistema de controle alternativo baseado em Controlador Programável (CP), para controle de processo de secagem de ar comprimido em uma planta industrial. A obtenção de ar comprimido com baixo teor de umidade residual para aplicações de automação pneumática é possível com a utilização de equipamentos secadores de ar, cujo funcionamento varia em função do método de secagem utilizado, quais sejam: secagem por refrigeração, absorção ou adsorção. Adsorção é o método de secagem utilizado nos equipamentos da unidade industrial objeto do estudo, com controle do processo realizado por um sistema eletrônico que não possibilita intervenções da equipe de manutenção. Por meio de pesquisa bibliográfica em livros, manuais de fabricantes, periódicos e *internet*, será apresentado o atual estágio de desenvolvimento da tecnologia de secagem de ar comprimido. Espera-se que a instalação do CP propicie maior eficiência na solução de problemas relacionados ao controle do sistema, com redução de custos de manutenção.

Palavras-chave: Ar comprimido. Secagem. Adsorção. Automação. Controlador Programável.

ABSTRACT

MOREIRA, André Cruz. **Proposed Replacement of an Embedded Control System Drying Compressed Air for a Control System Programmable Controller Based.** 2012. 76 f. Monografia (Especialização) – Programa de Pós-Graduação – Automação Industrial, UTFPR, Curitiba. 2012.

This work will propose the installation of control system based on programmable controller (PC) to control a drying compressed air process in an industry. It is possible to obtain compressed air with low residual humidity to pneumatic applications using dryers that operate according to one of following methods: refrigeration, absorption or adsorption. Adsorption is the method used by plant's equipment. Through research in books, manufacturer manuals, periodics and internet, will be presented current development of drying air compressed technology. It is expected the installation of the PC will increase the efficiency to solve problems related to system control, accompanied by a reduction of maintenance costs.

Key words: Compressed air. Drying. Adsorption. Automation. Programmable Controller.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção, Armazenamento e Condicionamento do Ar Comprimido	12
Figura 2 – Interações entre as variáveis físicas pressão, temperatura e volume	20
Figura 3 – Arranjo típico de equipamentos para produção, armazenamento e secagem do ar comprimido.....	25
Figura 4 – Retirada de contaminantes líquidos (água e vapor d'água) antes da secagem do ar comprimido.....	26
Figura 5 – Filtros coalescentes e elementos filtrantes	28
Figura 6 – Processo da coalescência.....	29
Figura 7 - Purgador eletrônico.....	30
Figura 8 – Purgador tipo bóia.....	30
Figura 9 - Esquematização do processo de secagem por refrigeração	32
Figura 10 - Processo de secagem por absorção	33
Figura 11 - Esquematização do processo de secagem por adsorção	35
Figura 12 - Isotermas de adsorção para o vapor d'água em sílica-gel	36
Figura 13 - Interface gráfica do programa AGDS.....	38
Figura 14 - Interface do modelo Open Loop Blower	39
Figura 15 - Interface do modelo Once Through.....	39
Figura 16 - Vista aérea das instalações da UEG Araucária.....	40
Figura 17 - Fluxograma típico de uma usina de ciclo combinado 2:1	41
Figura 18 - Lay-out da disposição dos equipamentos de produção de ar comprimido	42
Figura 19 – Torres de secagem e fluxo de processo.....	44
Figura 20 - Torres de Secagem de Ar Comprimido e Controlador do Processo.....	47
Figura 21 - Luzes indicadoras do estado de funcionamento do Secador.....	47
Figura 22 - Tela de edição dos parâmetros do simulador PEDCO.....	50
Figura 23 - Resultado de uma simulação do processo de secagem.....	51
Figura 24 - Diagrama SFC de controle do sistema.....	55
Figura 25 - Detalhamento das etapas do modo automático.....	56
Figura 26 - Detalhamento do modo manual de controle	57
Figura 27 - Programação em Ladder	59
Figura 28 - Programação em Ladder (Continuação)	60
Figura 29 - Programação em Ladder (Continuação)	61
Figura 30 - Programação em Ladder (Continuação)	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Exemplos de especificação da qualidade do ar comprimido conforme utilização final do mesmo	23
Quadro 2 - Características de software do clp.....	52
Quadro 3 - Características de hardware do clp.....	53
Quadro 4 - Estados de válvulas de entrada e saída durante funcionamento normal	54
Quadro 5 - Quadro de ações implementadas no clp	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de pureza do ar comprimido em relação a contaminantes sólidos	21
Tabela 2 - Classes de pureza do ar comprimido em relação à contaminação líquida	22
Tabela 3 - Classes de pureza do ar comprimido em relação à contaminação por óleo	22
Tabela 4 - Concentração de contaminantes do ar atmosférico em ambiente industrial típico .	24
Tabela 5 - Dados atuais do processo de controle da secagem de ar comprimido.....	49

LISTA DE SIMBOLOS

- a – área superficial externa do adsorvente [ft^2/ft^3]
- A_c – área transversal do leito [ft^2]
- c – concentração da fase gasosa [$\text{lb}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{ft}^3_{\text{g}}$]
- c_B – concentração da fase gasosa em massa [$\text{lb}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{ft}^3_{\text{g}}$]
- c_{gas} – concentração do gás (densidade) [lb/ft^3]
- c_{initial} – concentração inicial da fase gasosa [$\text{lb}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{ft}^3_{\text{g}}$]
- c_{inlet} – concentração da fase gasosa na entrada do leito [$\text{lb}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{ft}^3_{\text{g}}$]
- $C_{P,f}$ – calor específico do fluido [$\text{Btu}/\text{lb}\cdot\text{R}$]
- $C_{P,s}$ – calor específico do adsorvente [$\text{Btu}/\text{lb}\cdot\text{R}$]
- C_v – calor específico do vaso [$\text{Btu}/\text{lb}\cdot\text{R}$]
- c_R – concentração da fase gasosa na superfície da partícula adsorvente [$\text{lb}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{ft}^3_{\text{g}}$]
- D_{eff} – difusividade efetiva através da partícula adsorvente [ft^2/min]
- d_i – diâmetro interno do vaso [ft]
- D_L – coeficiente axial de dispersão [ft^2/min]
- D_m – difusividade molecular [ft^2/min]
- $D_{m,o}$ – difusividade molecular nas condições padrão de temperatura e pressão [ft^2/min]
- d_o – diâmetro externo do vaso [ft]
- D_p – difusividade dos poros do sorbato [ft^2/min]
- $Flow_{\text{std}}$ – fluxo referenciado as condições padrão de temperatura e pressão [scfm]
- K – condutividade térmica do leito adsorvente [$\text{Btu}/\text{min}\cdot\text{ft}\cdot\text{R}$]
- K_f – coeficiente de transferência de massa de filme externo de fluido [ft/min]
- h_v – coeficiente de filme do vaso [$\text{Btu}/\text{min}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{R}$]
- P – pressão [lb_f/ft^2]
- P_{inlet} – pressão na entrada do leito [lb_f/ft^2]
- P_o – pressão padrão [lb_f/ft^2]
- P_T – pressão total do gás [lb_f/ft^2]
- P_v – pressão de vapor do sorbato [lb_f/ft^2]
- q – concentração da fase sólida [$\text{lb}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{ft}^3_{\text{s}}$]
-
- \bar{q} – concentração média da fase sólida [$\text{lb}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{ft}^3_{\text{s}}$]
- q_{initial} – concentração inicial da fase sólida [$\text{lb}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{ft}^3_{\text{s}}$]
-
- \bar{q}_{initial} – concentração média inicial da fase sólida [$\text{lb}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{ft}^3_{\text{s}}$]
- r – coordenada radial do adsorvente [ft]
- R_a – resistência à perda de calor ambiente do vaso [$\text{min}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{R}/\text{Btu}$]
- R_{gas} – constante gasosa da massa de gás [$\text{ft}\cdot\text{lb}_f/\text{lb}_m\cdot\text{R}$]
- R_s – raio da partícula adsorvente [ft]
- R_v – constante gasosa do sorbato [$\text{ft}\cdot\text{lb}_f/\text{lb}_m\cdot\text{R}$]
- t – tempo [min]

T – temperatura [R]

T_{amb} – temperatura ambiente [R]

T_f – temperatura do fluido [R]

T_{inlet} – temperatura do fluido de entrada [R]

T_o – temperatura padrão [R]

T_s – temperatura do sorvente [R]

T_v – temperatura do vaso [R]

$T_{v,initial}$ – temperatura inicial do vaso [R]

V – velocidade superficial [ft/min]

V_{inlet} – velocidade superficial na entrada do leito [ft/min]

Z – coordenada axial [ft]

DH – calor de adsorção [Btu/lb]

e – porosidade do leito adsorvente [ft³/ft³]

e_p – porosidade da partícula adsorvente [ft³/ft³]

r_f – densidade do fluido [lb/ft³]

r_s – densidade do sorvente [lb/ft³]

r_{std} – densidade do fluido nas condições padrão de pressão e temperatura [lb/scf]

r_v – densidade do vaso [lb/ft³]

t – tortuosidade [ft/ft]

m – viscosidade [lb_m/ft-min]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 TEMA	11
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA	14
1.3 PROBLEMA E PREMISSAS	14
1.4 OBJETIVOS	14
1.4.1 Objetivo Geral	14
1.4.2 Objetivos Específicos	15
1.5 JUSTIFICATIVAS	15
1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	15
1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO	16
1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 COMPOSIÇÃO E GERAÇÃO DO AR COMPRIMIDO	19
2.2 TRATAMENTO DO AR COMPRIMIDO	23
2.3 COMPONENTES DO SISTEMA DE TRATAMENTO DO AR COMPRIMIDO	24
2.3.1 Resfriador	25
2.3.2 Filtros	27
2.3.3 Purgadores	29
2.3.4 Secador de ar comprimido	31
2.3.4.1 Secador por refrigeração	31
2.3.4.2 Secador por absorção	32
2.3.4.3 Secador por adsorção	34
3 SISTEMA DE PRODUÇÃO ATUALMENTE INSTALADO	40
3.1 EQUIPAMENTOS PARA GERAÇÃO DE AR COMPRIMIDO	42
3.1.1 Compressores	43
3.1.2 Secadores por adsorção	43
3.2 CONTROLE ATUAL DO PROCESSO	48
4 PROGRAMAÇÃO E SIMULAÇÕES	50
4.1 SIMULAÇÕES DA DINÂMICA DO PROCESSO DE SECAGEM	50
4.2 SIMULAÇÕES COM CONTROLADOR PROGRAMÁVEL	52
5 CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS	65
APÊNDICE 1 – Ações sequenciadas no clp	67

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção será discorrido sobre o tema e a delimitação do tema objeto de estudo deste trabalho, seguido da descrição do problema e das premissas que norteiam sua solução; dos objetivos gerais e específicos propostos para a solução do problema; dos procedimentos metodológicos a serem seguidos para atingir os objetivos; do embasamento teórico do tema proposto, sendo finalizado com a estrutura do restante do trabalho.

1.1 TEMA

Ao longo do tempo o ar comprimido tornou-se indispensável e é largamente empregado nos mais variados processos industriais. Conforme a aplicação pode ser classificado em ar comprimido de instrumentos e ar comprimido de serviço (LAGEMANN; PEREIRA; SANTÉRIO, 2002).

O primeiro é aplicado em automação pneumática, no comando de válvulas e posicionadores. Já o segundo é utilizado para serviços gerais, tais como, acionamento de ferramentas pneumáticas, agitação de produtos em tanques, trabalhos nas oficinas de manutenção, etc. (LAGEMANN; PEREIRA; SANTÉRIO, 2002).

Na figura 1 é mostrado um esquemático de equipamentos comumente utilizados para produção, armazenamento e condicionamento do ar comprimido. No filtro de admissão, elemento 1, é realizada a filtragem primária do ar atmosférico aspirado pelo compressor de ar (elemento 4), cujo acionamento é realizado pelo motor elétrico (elemento 2). O resfriador intermediário, elemento 6, objetiva diminuir a temperatura do ar ambiente aspirado, para aumentar a eficiência da compressão; já o resfriador posterior (elemento 8) diminui a temperatura do ar comprimido que se encontra em temperatura elevada, resultado do processo de compressão. No elemento 3, separador de condensado, ocorre a extração do líquido resultante da expansão do ar comprimido que segue do resfriador posterior para o reservatório (elemento 5). O secador, elemento 7, objetiva a retirada da umidade prejudicial aos processos industriais e equipamentos pneumáticos.

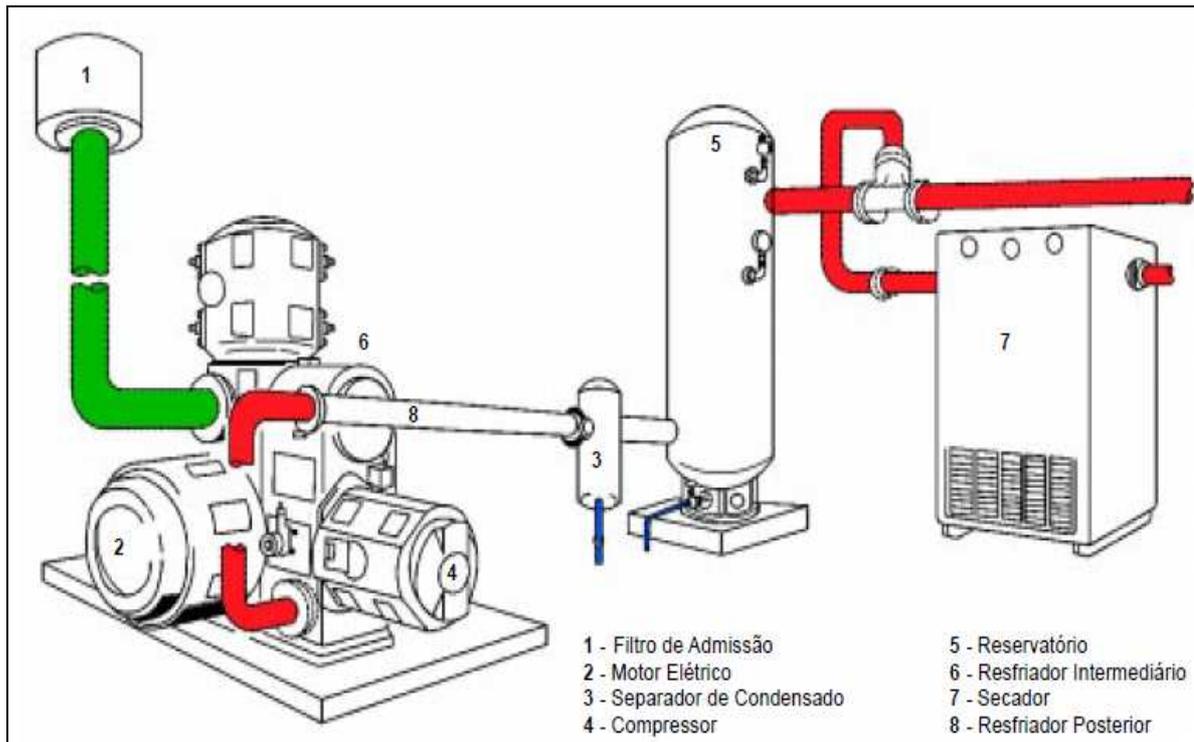


Figura 1 - Produção, Armazenamento e Condicionamento do Ar Comprimido
 Fonte: (PARKER, 2000)

Antes da utilização do ar comprimido para automação pneumática, o mesmo deve ser submetido a um processo de desumidificação, que visa fazer com que a umidade residual contida no ar comprimido não seja prejudicial aos equipamentos pneumáticos. Umidade excessiva no ar comprimido provocará falhas e exigirá a substituição prematura de equipamentos pneumáticos, filtros, válvulas, cilindros, além da impossibilidade de aplicar o ar em determinadas operações como pintura e pulverizações (PARKER, 2000).

O custo da secagem do ar comprimido representa algo em torno de 20% do custo de geração do mesmo (METALPLAN, 2008). Porém, sem um bom sistema de tratamento do ar comprimido gerado, aumentam-se os custos de manutenção e substituição prematura de equipamentos pneumáticos, além de perdas por paradas de produção (METALPLAN, 2008).

A desumidificação eficiente do ar comprimido é alcançada por meio da diminuição do seu ponto de orvalho, que é a temperatura na qual o ar está completamente saturado de umidade. Segundo Antônio et al., (2007), como esta é a temperatura na qual ocorre condensação do vapor de água existente no ar, ela representa a temperatura mínima que a mistura pode sofrer de resfriamento sem haver a precipitação (condensação) de umidade.

Os principais meios de se obter a desumidificação do ar comprimido necessário à automação industrial são a secagem por absorção, secagem por adsorção e secagem por refrigeração (DALL'AMICO, 2003).

Na secagem por absorção, o ar comprimido atravessa materiais higroscópicos, tais como gesso desidratado ou cloreto de cálcio, formando uma solução que deve ser drenada periodicamente. Obtém-se ponto de orvalho máximo próximo de 5° C.

No processo de secagem por adsorção, as moléculas de vapor de água contidas no ar comprimido se depositam na superfície de materiais adsorventes, sem se misturar com os mesmos. Neste processo duas torres são preenchidas com o material adsorvente e, por meio de válvulas de controle de fluxo, o ar úmido é direcionado para uma das torres enquanto a outra sofre processo de regeneração do seu material. A regeneração ocorre pela passagem de ar aquecido na direção oposta ao fluxo do processo de secagem. A troca entre as torres é comandada por temporizador ou por sensor de umidade. Pontos de orvalho ao redor de -50° C podem ser alcançados (DALL'AMICO, 2003).

A secagem por refrigeração ocorre com o ar comprimido passando por dois circuitos trocadores de calor. Em funcionamento normal, o ar de entrada do circuito percorre o primeiro trocador transferindo parte do seu calor para o ar frio de saída. No segundo trocador, o ar de entrada diminui drasticamente sua temperatura e segue para o segundo trocador, onde recebe calor do ar de entrada, aquecendo-se, aumentando seu volume e baixando a umidade relativa.

Para melhorar a eficiência dos equipamentos e obter o controle absoluto dos processos de secagem do ar comprimido, comumente são utilizados sistemas eletrônicos fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos, denominados de sistemas embarcados, os quais são sistemas especializados na execução de determinadas tarefas e com o qual o usuário interage mediante o uso de teclados e *displays* (SABER ELETRÔNICA, 2012).

A utilização de sistemas eletrônicos embarcados é corriqueiro no maquinário encontrado na indústria em geral. Desenvolvedores e fabricantes têm o pleno conhecimento das funções que a solução deve desempenhar. Entretanto, qualquer alteração que o usuário final pretenda realizar nas funções do equipamento, estará limitada ou dependerá sempre do fabricante do sistema.

Partindo-se do correto levantamento das variáveis envolvidas no processo e da criticidade do mesmo, com avaliação dos custos e dos riscos envolvidos, o uso de controladores programáveis é uma alternativa aos sistemas embarcados que necessitem de atualização ou manutenções constantes.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho será focado no controle do processo de secagem de ar comprimido em equipamentos que utilizam o método de secagem por adsorção para prover ar comprimido com baixo teor de umidade residual para automação pneumática em indústria de grande porte.

1.3 PROBLEMA E PREMISSAS

Para suprir a necessidade de ar comprimido seco nas instalações da unidade industrial em estudo, existem dois conjuntos de secadores de ar que utilizam o processo de secagem por adsorção.

O controle do processo de secagem é realizado por meio de tecnologia embarcada, própria do fabricante. A equipe de manutenção da unidade fabril encontra dificuldades na solução dos problemas que envolvem *hardware* e *software* do atual sistema, tendo que aguardar a solução dos problemas pelo fabricante/representante do equipamento, o que pode demorar vários dias.

As dificuldades encontradas variam desde a substituição de componentes utilizados exclusivamente pelos equipamentos, bem como impossibilidade de se efetuar alterações na lógica do programa de controle do processo de secagem.

Também existem os custos com peças e mão de obra necessária para a prestação dos serviços de reparo.

Por estas razões, decidiu-se propor a substituição do atual sistema de controle por outro sistema baseado em um controlador programável (CP).

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Propor um sistema alternativo de controle das torres de secagem de ar comprimido em substituição ao atual sistema de controle.

1.4.2 Objetivos Específicos

O objetivo geral deverá ser alcançado com a conclusão das seguintes proposições específicas:

- a) pesquisar as atuais propostas de controle de secagem de ar comprimido;
- b) coletar os atuais dados de processo;
- c) medir as variáveis envolvidas no processo;
- d) simular o processo de secagem de ar comprimido com utilização de *software* específico para esta finalidade;
- e) comparar os dados de processo obtidos por meio de simulações com os dados do processo original.

1.5 JUSTIFICATIVAS

Justifica-se a substituição do atual sistema de controle por um CP devido ao vasto conhecimento na utilização deste tipo de equipamento pelas equipes de manutenção da empresa, a potencial redução do tempo de indisponibilidade dos equipamentos e dos custos de manutenção relacionados com a dependência do fabricante do sistema atualmente instalado.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Verificando os objetivos propostos e de acordo com Gil (2002), pode-se classificar a pesquisa a ser realizada como sendo do tipo bibliográfica, onde se buscará, por meio da leitura de livros, periódicos, *internet* e catálogos de fabricantes, encontrar o atual

estágio de desenvolvimento dos métodos e equipamentos disponíveis para a secagem de ar comprimido utilizado nos mais variados tipos de indústrias.

Ainda segundo Gil (2002), esta pesquisa pode ser classificada como explicativa e descritiva, sendo que os dados das variáveis envolvidas no processo de secagem do ar comprimido serão coletados com a observação sistemática da dinâmica de funcionamento dos equipamentos e com utilização de instrumentos de campo, tais como, manômetros, medidores de vazão, termômetros e medidores de ponto de orvalho.

Será investigada a relação entre as variáveis envolvidas no processo com tabulação de dados e levantamento de possíveis curvas de atuação do sistema de secagem.

Na efetivação da mudança do atual sistema de controle para outro sistema baseado em controlador programável, a lógica de controle do processo de secagem deverá ser implementada por meio de linguagem *ladder*, que está presente em praticamente todos os controladores disponíveis no mercado (GEORGINI, 2003).

1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO

Segundo Silva (2002), “para entender as características dos sistemas pneumáticos é necessário estudar o comportamento do ar”, com estudos dos conceitos de gás ideal e de pressão. Esta é denominada, dependendo da referência adotada, como sendo pressão absoluta (tem como referência o zero absoluto) ou pressão relativa (leva em consideração a pressão atmosférica).

O gás ideal consiste em um modelo que facilita o equacionamento teórico do seu comportamento, não ocorrendo na prática (SILVA, 2002). Os gases reais são aproximados às características do gás ideal pelo fato de que a condensação dos mesmos ocorre em baixas temperaturas e altas pressões (SILVA, 2002).

A compressão e posterior expansão do ar atmosférico gera o ar comprimido, o qual necessita de um tratamento adequado para remoção de partículas sólidas e do excesso de umidade. Como já exposto anteriormente, para a remoção da umidade do ar comprimido são utilizados equipamentos baseados nos métodos de secagem por adsorção, absorção e refrigeração.

Os estudos dos processos de secagem e dos equipamentos constituintes de um sistema de produção de ar comprimido serão baseados em apostilas de domínio público, tais como Parker (2000) e Metalplan (2008).

Para automação do processo em questão, será utilizado como referência básica Georgini (2003). Segundo este autor, para controlar um processo industrial, “o CLP ainda se destaca como solução nas mais variadas aplicações”.

Ainda, segundo Georgini (2003),

“O CLP pode ser definido como um computador industrial capaz de armazenar instruções para implementações de funções de controle (sequência lógica, temporização e contagem, por exemplo), além de realizar operações lógicas e aritméticas, manipulação de dados e comunicação em rede, sendo utilizado no controle de sistemas automatizados”.

A norma IEC 61131-3 define cinco linguagens de programação as quais, dependendo do fornecedor do controlador, poderão estar disponíveis no equipamento em menor ou maior número. Por meio das linguagens de programação ocorre a comunicação homem-máquina, onde o programador insere códigos que serão interpretados pelo controlador, processados e efetuarão o controle dos processos.

As cinco linguagens de programação padronizadas pela norma IEC 61131-3 são:

- 1) Lista de Instruções (*IL – Instruction List*);
- 2) Texto Estruturado (*ST – Structured Text*);
- 3) Linguagem Ladder (*LD – Ladder Diagram*);
- 4) Diagrama de Blocos de Função (*FBD – Function Block Diagram*);
- 5) Diagrama Funcional Sequencial (*SFC – Sequential Function Chart*)

A programação por Linguagem *Ladder* pode ser considerada como padrão para os controladores lógicos programáveis (GEORGINI, 2003). Esta será a linguagem utilizada na criação da lógica de controle do sistema de secagem de ar comprimido.

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho estará estruturado em 4 capítulos.

No capítulo 1 será realizada a introdução do tema proposto, com uma breve descrição dos processos de secagem de ar comprimido, motivação e delimitação do tema proposto para a pesquisa.

O capítulo 2 tratará da revisão bibliográfica, com aprofundamento dos conhecimentos sobre o estado da arte da tecnologia de secagem de ar comprimido.

No capítulo 3 será descrito as características do sistema de controle atualmente instalado, suas vantagens e limitações. Será proposto a substituição deste sistema por outro baseado em controlador lógico programável, com medição das características atuais do processo de produção. As mesmas características deverão ser mantidas no novo sistema a ser implantado.

O capítulo 4 versará sobre as fases de implementação das mudanças propostas, as dificuldades encontradas e os resultados obtidos.

O trabalho será finalizado com comentários e considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será feita explanação sobre a geração, filtragem e secagem do ar comprimido.

2.1 COMPOSIÇÃO E GERAÇÃO DO AR COMPRIMIDO

O ar comprimido resulta da compressão do ar atmosférico livre, que por sua vez é composto por uma mistura de gases na proporção aproximada de 78 % de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de outros gases, além de vapor de água (SILVA, 2002).

Como principais propriedades do ar atmosférico citam-se:

- a) **compressibilidade** – o ar reduz seu volume quando uma força externa age sobre o mesmo;
- b) **elasticidade** – quando se extingue a força que causa a redução de volume, o ar tem a capacidade de retornar ao seu volume inicial;
- c) **expansibilidade** – propriedade que o ar possui de ocupar todo o volume de qualquer recipiente;
- d) **difusibilidade** – o ar mistura-se homoganeamente com qualquer meio gasoso que não esteja saturado;

O estado de um gás depende das grandezas físicas pressão (P), temperatura (T) e volume (V). O relacionamento entre as grandezas é generalizado pela equação geral dos gases dada pela equação

$$\frac{P_1 * V_1}{T_1} = \frac{P_2 * V_2}{T_2} \quad (1)$$

, a qual é aplicada sempre que um gás sofrer uma transformação que afete suas variáveis de estado.

Na figura 2 é mostrado as interações entre as grandezas físicas pressão, temperatura e volume quando o sistema sofre transformações isobárica, isotérmicas e isovolumétricas.

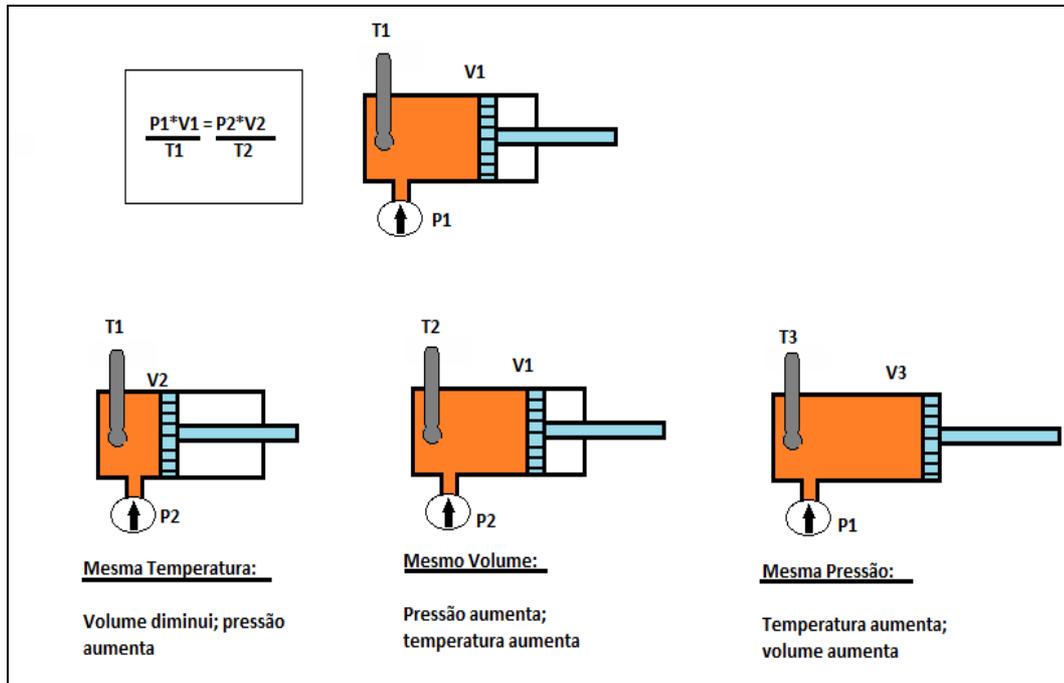


Figura 2 – Interações entre as variáveis físicas pressão, temperatura e volume
 Fonte: (PARKER, 2000)

Para realizar a compressão do ar ambiente são utilizados equipamentos chamados de compressores de ar, que transformam energia elétrica em energia pneumática (METALPLAN, 2008).

A maior parte dos compressores aplicados na indústria é constituída por dois tipos básicos principais: os compressores alternativos (pistão) e os compressores rotativos (de parafuso e centrífugo). Compressores de pistão são empregados em situações onde há necessidade de vazão de ar de até 200 m³/h. Para vazões de ar entre 200 e 2000 m³/h utiliza-se compressores de parafuso. Já os compressores centrífugos são os mais indicados para vazões acima de 2000 m³/h (METALPLAN, 2008).

No processo de geração do ar comprimido ocorre a combinação de contaminantes presentes no ar atmosférico (poeiras, vapor d'água, dióxido de carbono, monóxido de carbono, etc.) com resíduos gerados pelo compressor, tais como, óleo lubrificante e resíduos de desgaste de peças.

A norma ISO 8573 Parte 1, foi editada com o propósito de especificar classes de pureza do ar comprimido para utilização em instalações e processos industriais que não envolvam riscos à saúde humana, com especificações sobre contaminantes líquidos, sólidos e quantidade total de óleo. O fornecimento de ar comprimido para aplicações especiais (tais como instalações hospitalares e indústrias de alimentos e bebidas) seguem normas próprias ditadas pelos órgãos reguladores governamentais destes setores que geralmente englobam especificações de contaminantes biológicos não especificados na norma ISO 8573.

No sistema de ar comprimido os contaminantes ocorrem na forma líquida, sólida ou gasosa, e interagem entre si potencializando os danos ao sistema. Por exemplo, partículas sólidas se aglomeram na presença de líquido formando partículas maiores; óleo e água se combinam formando uma emulsão.

Os contaminantes sólidos são introduzidos através da sucção do ar atmosférico pelo compressor e também por corrosão e abrasão de equipamentos e tubulações do sistema de ar comprimido. Contaminantes líquidos são formados principalmente por água e resíduos de óleo lubrificante/refrigerante, e contribuem para a corrosão de partes metálicas gerando ainda mais resíduos sólidos. Já os contaminantes gasosos são compostos principalmente por vapores de água e de óleo lubrificante/refrigerante, podendo se dissolver no líquido presente no sistema ou se condensarem quando ocorre diminuição de temperatura ou incremento de pressão (INTERNATIONAL..., 2010).

A tabela 1 apresenta as classes de pureza do ar comprimido em relação a contaminantes sólidos.

Tabela 1 - Classes de pureza do ar comprimido em relação a contaminantes sólidos

Classe	Qtde. máxima de partículas por metro cúbico, em função do tamanho da partícula (d)		
	0,1 μm < d \leq 0,5 μm	0,5 μm < d \leq 1,0 μm	1,0 μm < d \leq 5,0 μm
0	Conforme especificação e mais restritiva do que a classe 1		
1	≤ 20.000	≤ 400	≤ 10
2	≤ 400.000	≤ 6.000	≤ 100
3	não especificado	≤ 90.000	≤ 1.000
4	não especificado	não especificado	≤ 10.000
5	não especificado	não especificado	≤ 100.000
Classe	Concentração em Massa - Cp (mg/m ³)		
6	0 < Cp \leq 5		
7	5 < Cp \leq 10		
X	Cp > 10		

Fonte: (INTERNATIONAL, 2010)

As condições de referência utilizadas pela ISO 8373 são as seguintes;

- a) temperatura do ar = 20 °C
- b) pressão absoluta do ar = 100 kPa = 1 bar
- c) pressão relativa do vapor de água = 0

A classificação do ar comprimido em relação a contaminantes líquidos é mostrada na tabela 2.

Tabela 2 - Classes de pureza do ar comprimido em relação à contaminação líquida

Classe	Ponto de Orvalho (°C)
0	Conforme especificação e mais restritiva do que a classe 1
1	≤ -70
2	≤ -40
3	≤ -20
4	$\leq +3$
5	$\leq +7$
6	$\leq +10$
Classe	Concentração de água líquida C_w (g/m ³)
7	$C_w < 0,5$
8	$0,5 < C_w \leq 5$
9	$5 < C_w \leq 10$
X	$C_w > 10$

Fonte: (INTERNATIONAL, 2010)

Em relação à contaminação por óleo, as classes de ar comprimido são mostradas na tabela 3.

Tabela 3 - Classes de pureza do ar comprimido em relação à contaminação por óleo

Classe	Concentração total de óleo (líquido, aerossol e vapor) em mg/m ³
0	Conforme especificação e mais restritiva do que a classe 1
1	$\leq 0,01$
2	$\leq 0,1$
3	≤ 1
4	≤ 5
5	> 5

Fonte: (INTERNATIONAL, 2010)

A designação da classe de pureza do ar comprimido em um ponto de medição é dada na forma ISO 8573-1:2010 [A:B:C], onde A refere-se à classe de pureza relativa aos

contaminantes sólidos; B refere-se à classe de pureza relativa à umidade e contaminantes líquidos; C refere-se à classe de pureza relativa à contaminação por óleo (INTERNATIONAL..., 2010).

Desta maneira pode-se obter variadas combinações qualitativas do ar comprimido, como as apresentadas no quadro 1.

Classe de qualidade	Aplicações
1:7:1	Uso geral; proteção localizada de válvulas, sopragem, pintura, ferramentas pneumática, automação, jateamento, etc. Como o ar não está seco neste sistema, recomenda-se certo cuidado na sua aplicação.
1:7:2	O ar comprimido seco, com ponto de orvalho médio entre 5°C e 15°C. É ideal para pequenas vazões em aplicações de ponto de uso: pintura jateamento, odontologia, etc.
1:4:1	Abrangente nível de proteção, sistema mais utilizado na indústria em setores como automobilístico, plástico, têxtil, papel e celulose, mecânico e metalúrgico, etc.
2:2:1	Utilizado quando o ar comprimido entra em contato com produtos higroscópicos (cimento, leite em pó, resinas, pastilhas efervescentes, etc.), devido ao risco de absorção do vapor d'água e também quando for submetido a baixas temperaturas, devido ao risco de congelamento.
1:2:1	A combinação de um baixíssimo ponto de orvalho com retenção máxima de partículas é fundamental em aplicações como a fabricação de fibras óticas, circuitos integrados, processamento de filmes, instrumentação crítica, siderurgia, reatores nucleares, etc.

Quadro 1 – Exemplos de especificação da qualidade do ar comprimido conforme utilização final do mesmo

Fonte: (METALPLAN, 2008)

2.2 TRATAMENTO DO AR COMPRIMIDO

Segundo Metalplan (2008), em uma região industrial típica são encontradas taxas médias de concentração de contaminantes como as mostradas na tabela 4, nas condições ambientais de 30 °C da temperatura ambiente e 100% de umidade relativa.

Tabela 4 - Concentração de contaminantes do ar atmosférico em ambiente industrial típico

CONTAMINANTE	Dimensão	Concentração
Sólidos	0,01 a 2,0 μm	10^{20} partículas/ m^3
Água	--	46,3 g/m^3
Óleo	--	15 mg/m^3

Fonte: (METALPLAN, 2008)

Os contaminantes serão aspirados pelo compressor de ar, seja lubrificado ou não, e deverão ser removidos antes da utilização do ar comprimido gerado, para restringir os efeitos danosos dos mesmos. Conforme a utilização, mais dispendioso será o sistema de equipamentos destinados ao tratamento, visando a entrega de ar comprimido livre de impurezas.

2.3 COMPONENTES DO SISTEMA DE TRATAMENTO DO AR COMPRIMIDO

Na figura 3 está representado um sistema típico de ar comprimido conforme proposto pela norma ISO 8573. O compressor é o equipamento responsável pela aspiração do ar atmosférico e executa a compressão do mesmo conforme projeto específico. A diminuição da temperatura do ar comprimido gerado é função do equipamento resfriador instalado imediatamente após o compressor. Os filtros são equipamentos destinados à remoção de contaminantes de diferentes tipos (sólidos, líquidos, gasosos) e dimensões, e, conforme a utilização final do ar comprimido, serão utilizados em quantidades e qualidades variadas. No equipamento secador, através de processos de absorção, adsorção ou refrigeração, é retirada a umidade excessiva do ar comprimido disponibilizado à instalação. Os purgadores eletrônicos são elementos responsáveis pela retirada programada do material condensado que se forma ao longo da instalação, conforme o ar comprimido sofre resfriamento. O reservatório é utilizado como um “pulmão”, de forma a evitar a ocorrência de flutuações na rede de ar comprimido.

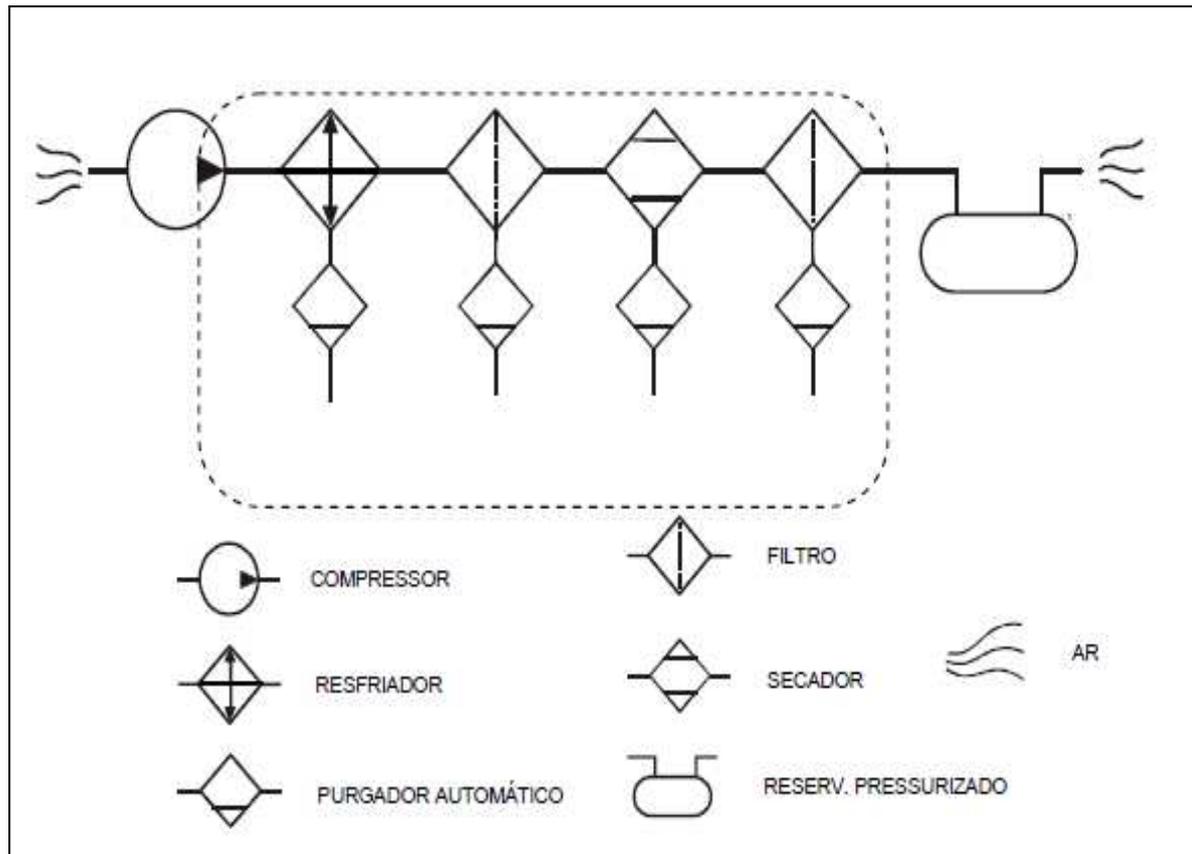


Figura 3 – Arranjo típico de equipamentos para produção, armazenamento e secagem do ar comprimido

Fonte: (METALPLAN, 2008)

O sistema de tratamento de ar comprimido propriamente dito é formado pelo resfriador, filtros, secador e purgadores. Não é mostrado na figura, mas no local de aspiração do ar atmosférico, geralmente é dimensionado um filtro para impedir a entrada de contaminantes. O filtro não pode ser por demais restritivo, de modo a não influenciar na sucção do compressor.

2.3.1 Resfriador

A energia mecânica aplicada na compressão faz com que o ar comprimido na saída do compressor esteja em temperaturas elevadas. Dependendo da pressão de saída do compressor, temperaturas em torno de 200 °C podem ser alcançadas (BOSCH, 2010).

O resfriador posterior (também chamado de *aftercooler*) é um equipamento instalado após o compressor e possui a função de reduzir a temperatura do ar para níveis próximos da temperatura ambiente. Basicamente, é um trocador de calor que utiliza água gelada ou ar ventilado como meio refrigerante, e a redução da temperatura acarreta a condensação dos contaminantes gasosos, principalmente do vapor de água, contidos no ar comprimido.

Na figura 4 é mostrado um exemplo com caracterização dos processos de compressão e resfriamento do ar comprimido, mostrando as temperaturas envolvidas e quantidade de contaminantes líquidos que poderão estar presente no fluxo e que deverão ser retirados do sistema.

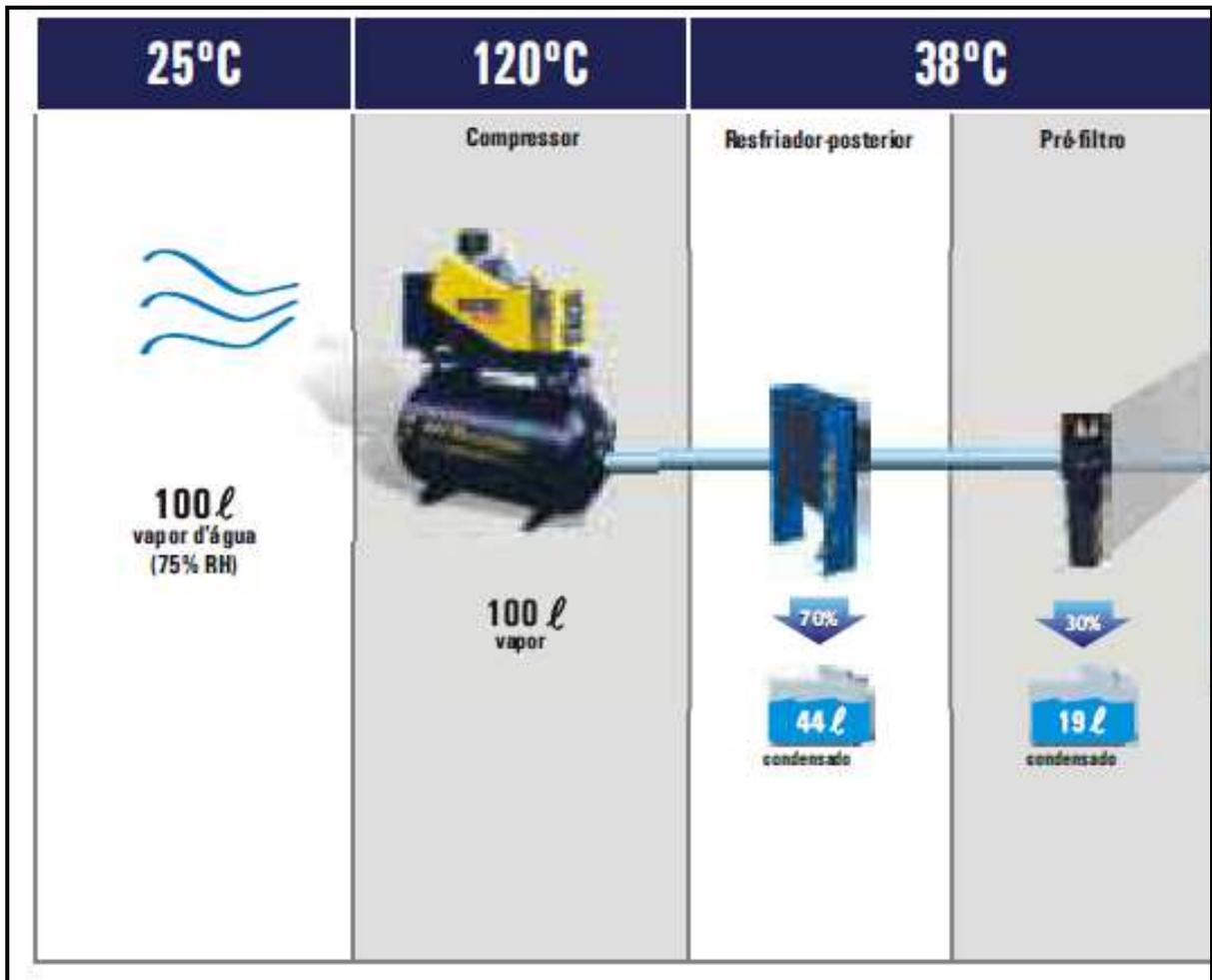


Figura 4 – Retirada de contaminantes líquidos (água e vapor d'água) antes da secagem do ar comprimido
Fonte: (METALPLAN, 2008)

A eliminação do condensado é realizada por meio de purgadores automáticos, que atuam de tempos em tempos liberando seu conteúdo para a atmosfera.

2.3.2 Filtros

São elementos instalados antes e após o equipamento de secagem do ar comprimido e também nos pontos finais de uso da instalação, podendo ser de dois tipos: coalescente e adsorvedor.

O filtro instalado antes do secador (pré-filtro) objetiva a remoção de contaminantes não eliminados no separador de condensados do resfriador, ajudando a garantir a eficiência do secador. Já o filtro instalado após o secador (pós-filtro) deve reter eventuais contaminantes sólidos e líquidos contidos no ar comprimido. Nos pontos finais de utilização são instalados filtros que visam eliminar as contaminações oriundas das tubulações de distribuição do ar comprimido.

Na figura 5 são mostrados imagens de modernos filtros que utilizam o fenômeno da coalescência para retenção de contaminantes.



Figura 5 – Filtros coalescentes e elementos filtrantes
Fonte: (PARKER, 2000)

Os filtros coalescentes tem funcionamento baseado nos processos de retenção mecânica e da coalescência. A retenção mecânica faz com que partículas maiores que o menor poro do elemento filtrante fiquem retidas no mesmo.

A coalescência é a “ação pela qual partículas líquidas em suspensão unem-se para formar partículas maiores”, e é por meio dela que se torna possível a separação de aerossóis presentes no ar comprimido (METALPLAN, 2008).

A coalescência permite que a contaminação líquida atravesse o meio filtrante, possibilitando que os contaminantes coalescidos possam se depositar no fundo do recipiente para posterior drenagem.

A figura 6 ilustra o processo da coalescência.

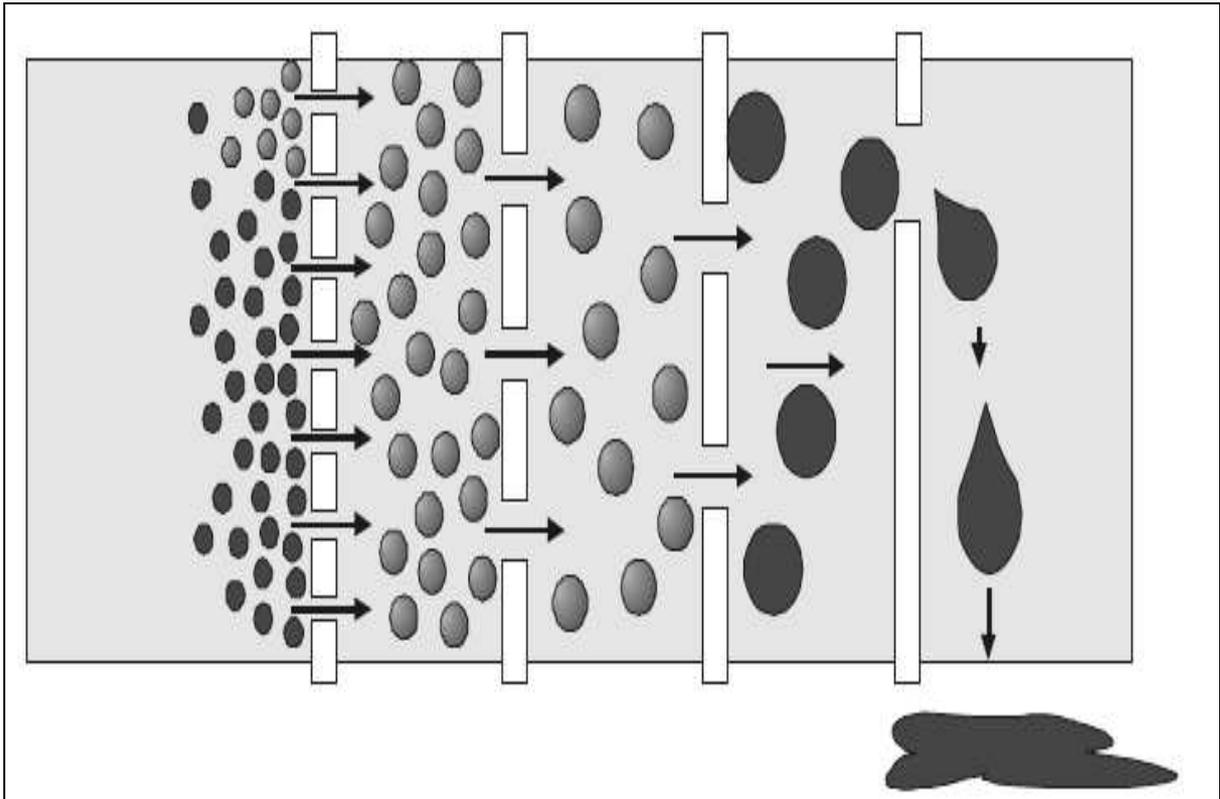


Figura 6 – Processo da coalescência
Fonte: (METALPALN, 2008)

Os filtros adsorvedores utilizam como meio filtrante o carvão ativado e são destinados à remoção de vapores de hidrocarbonetos (óleo). São instalados após os filtros coalescentes para evitar que sejam atingidos pela contaminação líquida.

2.3.3 Purgadores

Purgadores são acessórios automáticos utilizados para drenar a água e o óleo dos equipamentos e linhas de distribuição de ar comprimido, sendo que o purgador eletrônico é o tipo mais utilizado.

O purgador eletrônico é dotado de dois temporizadores nos quais são programados o tempo de duração da descarga (entre 0,5 a 1,0 segundo), e o tempo de intervalo entre as descargas (entre 0,5 a 4,5 minutos).

Na figura 7 é ilustrado este tipo de purgador.

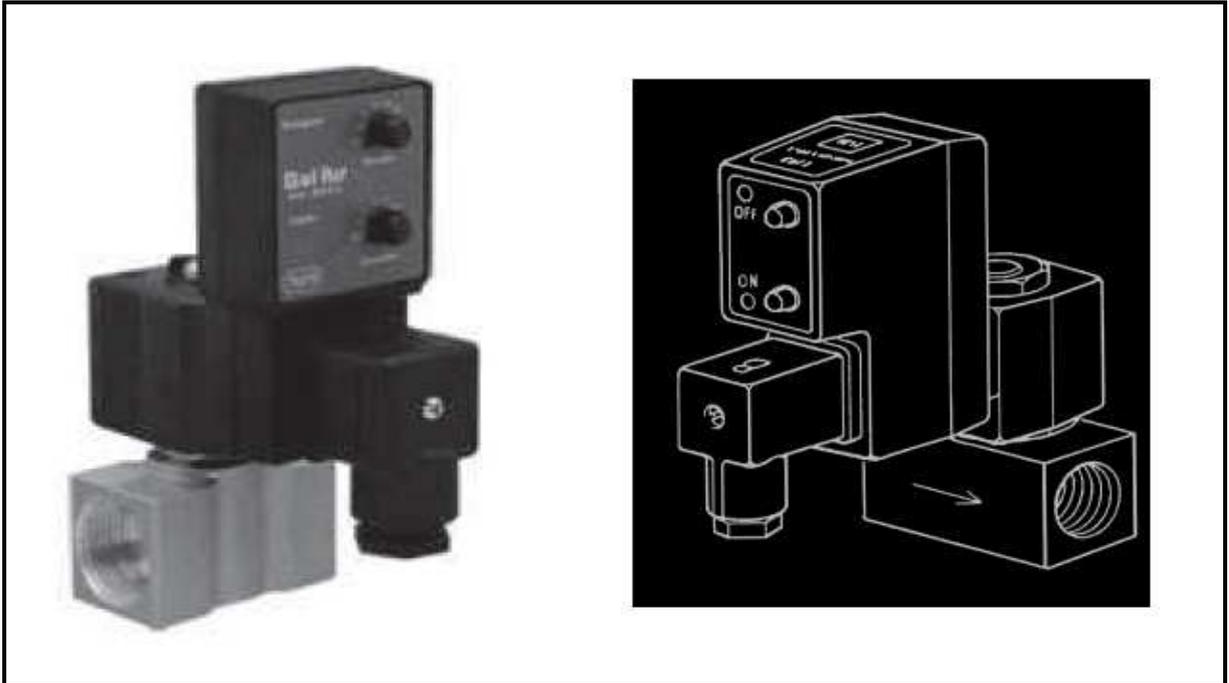


Figura 7 - Purgador eletrônico
Fonte: (ZATTONI, 2010)

Outro tipo de purgador bastante utilizado é o purgador de bóia, o qual é hermeticamente fechado quando não está atuado. O óleo se deposita na sede e na cabeça da sede, travando o purgador (METALPLAN, 2008).

Na figura 8 está ilustrado este tipo de purgador.

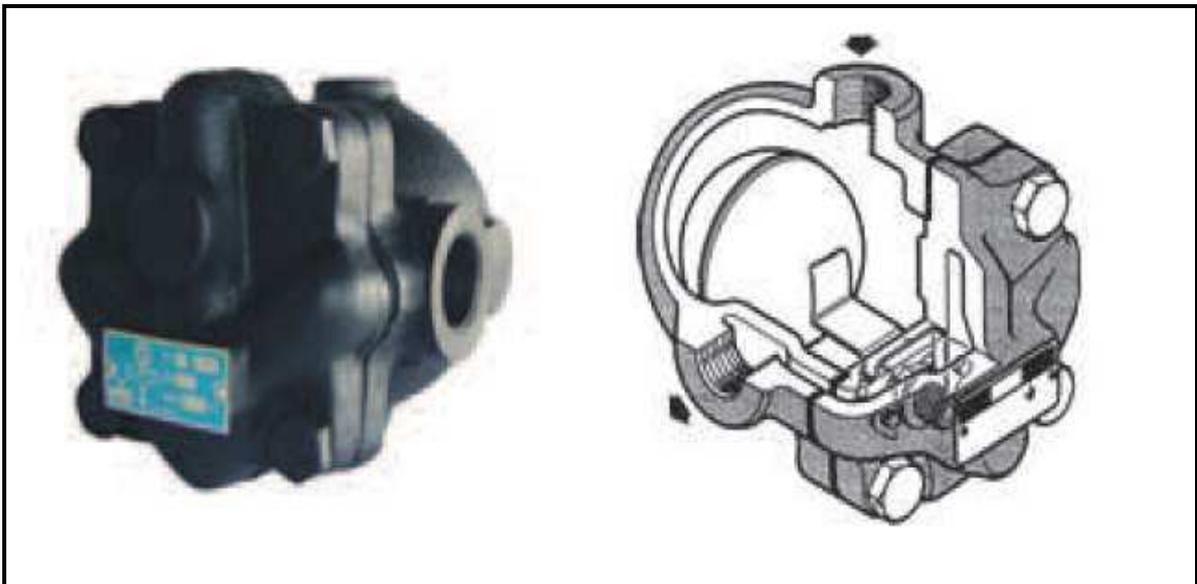


Figura 8 – Purgador tipo bóia
Fonte: (ZATTONI, 2010)

2.3.4 Secador de ar comprimido

Equipamento que é responsável pela eliminação de vapor d'água do fluxo de ar comprimido, e deve fornecer o ar comprimido com o ponto de orvalho exigido para a aplicação. Quanto mais baixo for o ponto de orvalho, menor será a umidade restante no ar comprimido (DALL'AMICO, 2003).

Os tipos principais de secadores operam por processos de refrigeração, absorção e adsorção.

2.3.4.1 Secador por refrigeração

Equipamento cujo funcionamento baseia-se na troca térmica entre o fluxo de ar comprimido e um meio refrigerante.

Secadores que utilizam este sistema são capazes de fornecer pontos de orvalho em torno de +3 °C.

Na figura 9 é mostrado um esquemático do processo de secagem por refrigeração. O ar comprimido úmido penetra no pré-resfriador (A) e neste local troca calor com o ar resfriado que sai do sistema, seguindo então para o resfriador principal (B). No resfriador principal ocorre a condensação do vapor de água contido no fluxo de ar comprimido, e no separador de condensado, (C), a parte líquida é separada e posteriormente drenada, com o ar seco sendo então direcionado para a saída do sistema (PARKER, 2000).

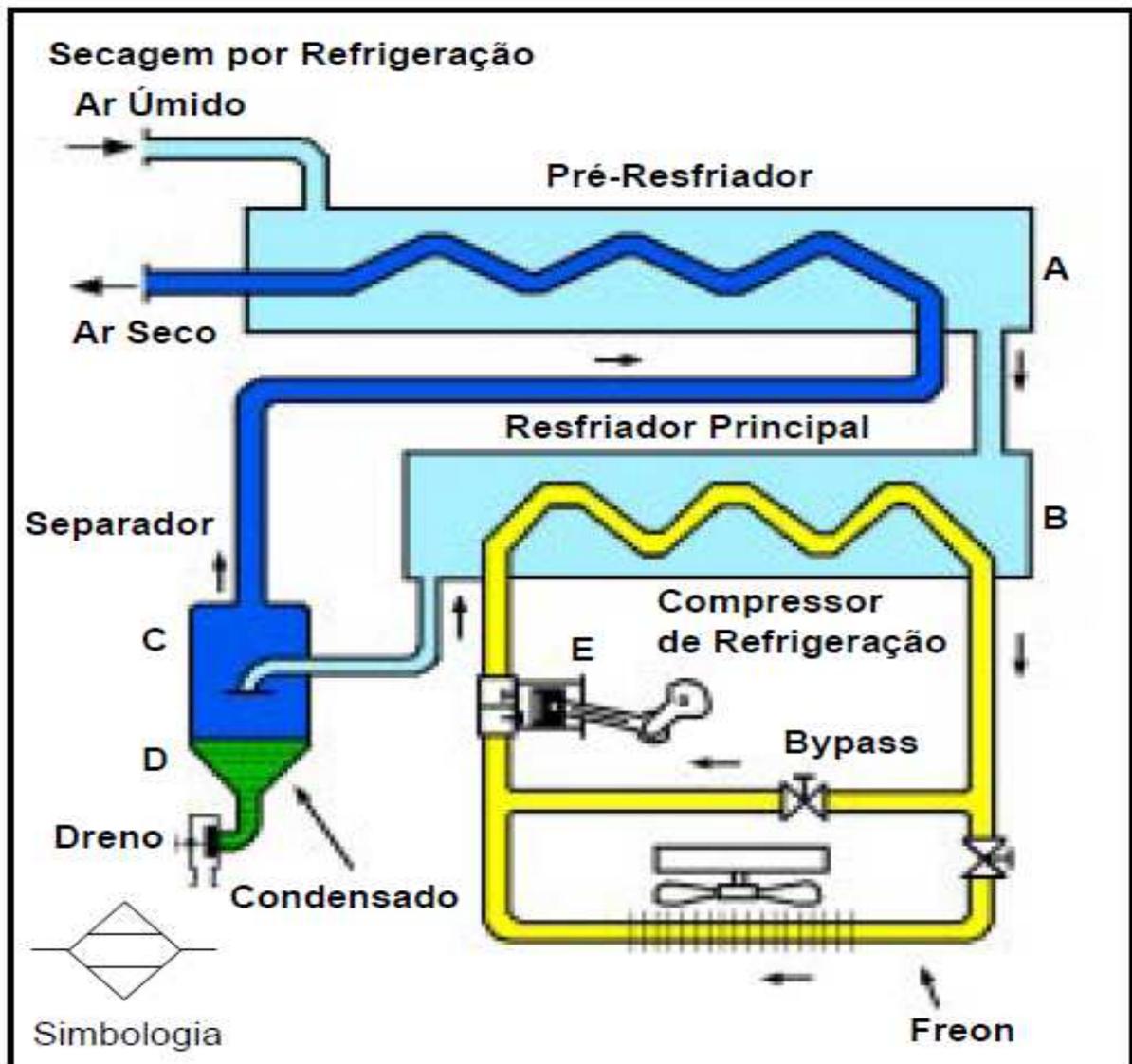


Figura 9 - Esquemática do processo de secagem por refrigeração
 Fonte: (PARKER, 2000)

2.3.4.2 Secador por absorção

Neste tipo de secador, o ar comprimido entra em contato com substâncias higroscópicas que absorvem a umidade contida no ar comprimido, ocorrendo uma reação química. O composto formado pela umidade e o agente secador deve ser drenado periodicamente, bem como a reposição do agente.

As principais substâncias utilizadas são o cloreto de cálcio e o cloreto de lítio.

Este processo é pouco utilizado industrialmente por causa do baixo rendimento e alto custo operacional.

Na figura 10 está esquematizado o processo de secagem por absorção, onde o ar comprimido úmido atravessa o elemento dessecativo, perdendo umidade para o mesmo.

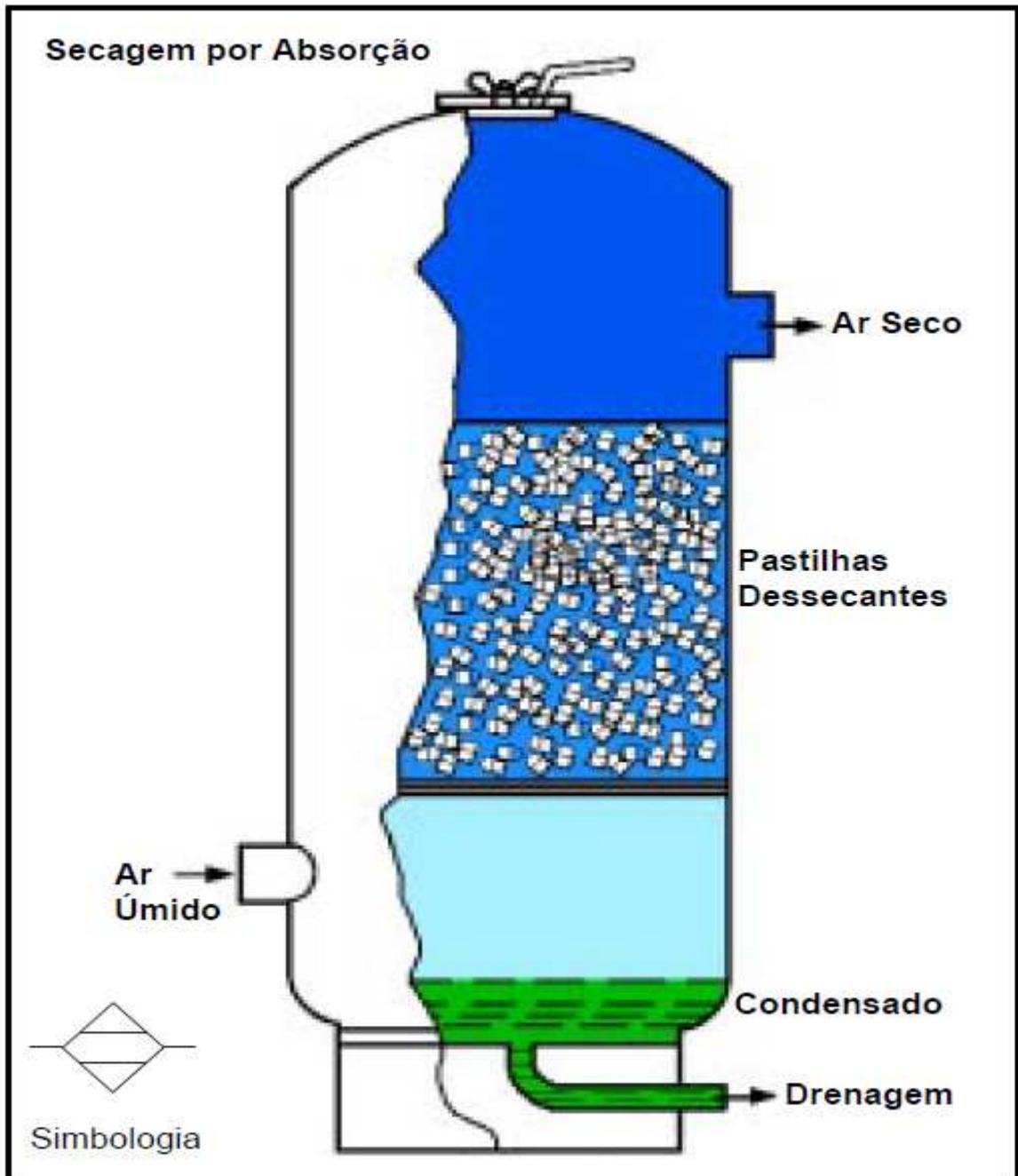


Figura 10 - Processo de secagem por absorção
Fonte: (PARKER, 2000)

2.3.4.3 Secador por adsorção

Neste tipo de equipamento o ar comprimido atravessa um meio dessecante constituído de material sólido, geralmente granulado, onde a umidade ficará retida na superfície do material, sem se misturar com o mesmo. Pontos de orvalho próximos de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ podem ser alcançados através deste processo.

Segundo Amorim (2007), “adsorção é o fenômeno de superfície no qual um soluto é removido de uma fase fluída e acumulado na superfície de uma fase sólida”.

Os materiais adsorventes (dessecantes) possuem superfícies de alta capacidade adsorvedora e enormes áreas internas superficiais, sendo mais comumente utilizados o dióxido de silício (sílica-gel – SiO_2) e a alumina ativada (Al_2O_3), os quais possuem áreas superficiais internas entre 300 e 600 metros quadrados por grama, respectivamente, (WEBBER; WHITE, 2010).

A instalação mais comum utilizada no processo de secagem pelo processo de adsorção emprega dois cilindros dispostos verticalmente, preenchidos com o material dessecante. Através de válvulas direcionais, o ar comprimido atravessa um dos cilindros, perdendo umidade para o meio. O estado de saturação do material adsorvente e da umidade presente no fluxo do gás de saída são monitorados por sensores de umidade ou controlados por temporizadores; quando do estabelecimento das condições pré-determinadas, ocorre reversão das válvulas direcionais, e o fluxo de ar comprimido é direcionado para o segundo cilindro. O cilindro que anteriormente efetuava a secagem do ar agora sofrerá um processo de regeneração do seu material adsorvente, processo esse que ocorrerá por meio da injeção de ar aquecido que atravessará o material dessecante na direção oposta à direção seguida pelo ar quando do processo de secagem. Geralmente, para diminuir o custo da instalação, parte do próprio ar seco de saída é desviado para efetuar a regeneração do material. Novamente, sensores de umidade ou temporizadores comandarão a reversão do ciclo da torres de secagem.

A figura 11 ilustra o processo de secagem por adsorção em equipamento que utiliza duas torres preenchidas com material adsorvedor.

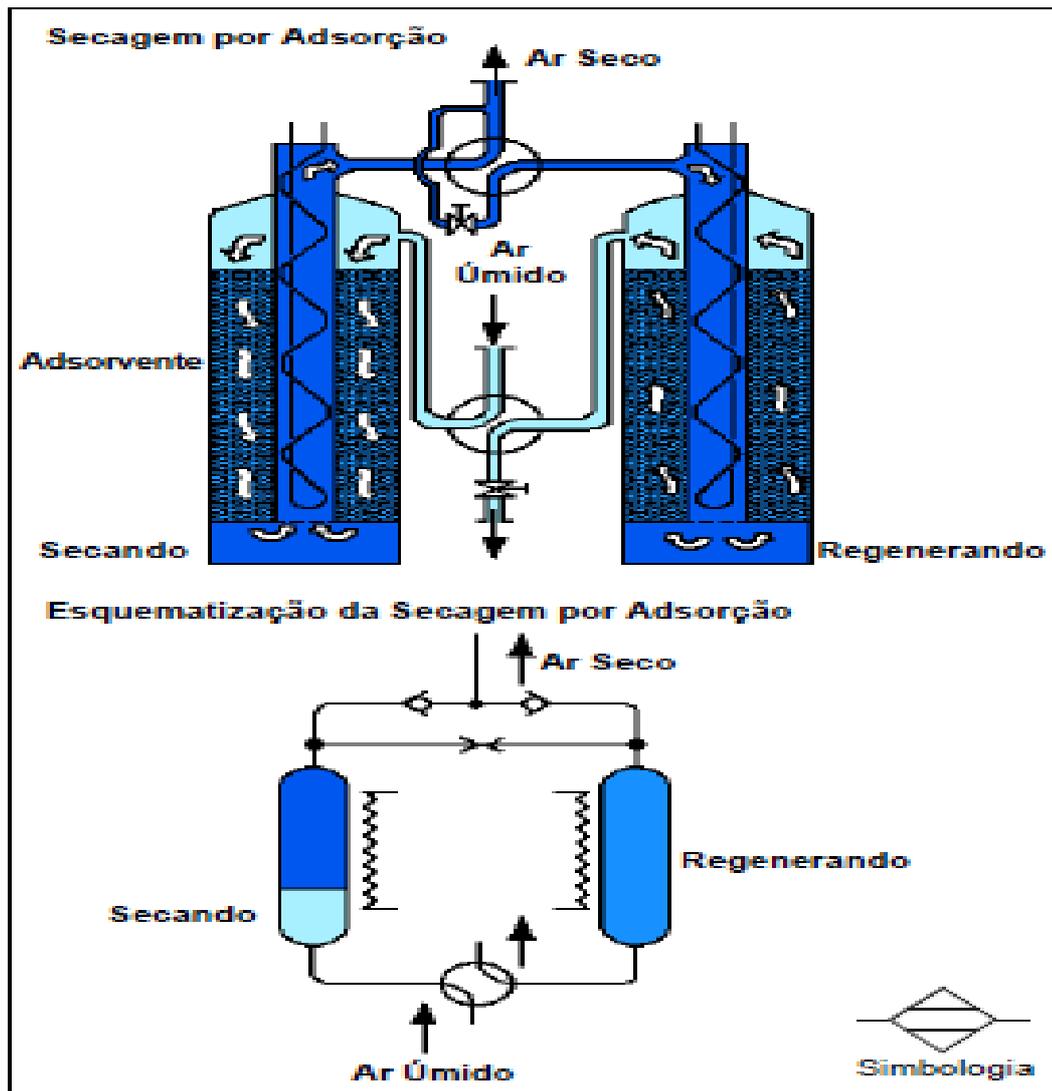


Figura 11 - Esquematisação do processo de secagem por adsorção
 Fonte: (PARKER, 2000)

As propriedades do material adsorvente podem ser obtidas graficamente através de curvas isotermas que definem a capacidade de adsorção como função da saturação relativa, da umidade relativa ou da pressão parcial à uma temperatura constante. Curvas isosteres são utilizadas para determinação do ponto de orvalho de saída de um sistema, e indicam o teor de vapor de saída como função da temperatura do gás de regeneração e do ponto de orvalho, e a temperatura de operação do sistema de adsorção (WEBBER; WHITE, 2010).

A figura 12 mostra algumas isotermas de adsorção relativas ao par sílica-gel/água. Verifica-se que a concentração de líquido retido no adsorvente diminui sensivelmente com o aumento da temperatura do substrato sólido.

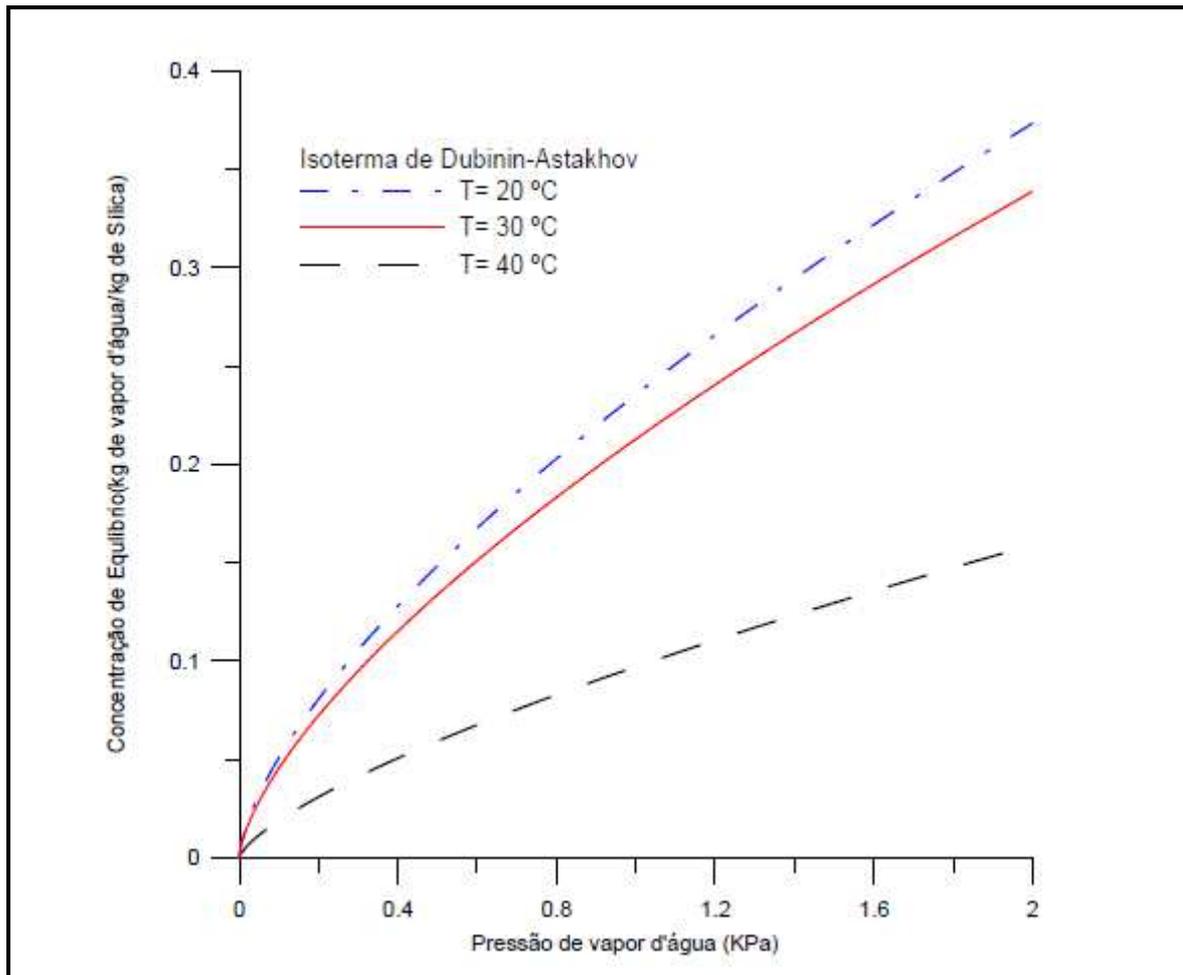


Figura 12 - Isotermas de adsorção para o vapor d'água em sílica-gel
Fonte: (AMORIM, 2007)

A transferência de umidade do fluxo de ar para o material adsorvente envolve processos de transferência de calor e massa, e podem ser manipulados matematicamente por meio de equações de conservação de massa, energia e momento (PEDCO, 2010).

Segundo Pedco (2010), as seguintes equações devem ser manipuladas para descrição do fenômeno de adsorção:

CONSERVAÇÃO DE MASSA DE PARTÍCULA (DIFUSIVIDADE DE PARTÍCULA)

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \varepsilon_p \frac{\partial c}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad (2)$$

$$\text{Condições iniciais: } c(r,0) = c_{inicial} \quad ; \quad q(r,0) = q_{inicial}$$

$$\text{Condições de contorno: } \left(\frac{\partial c}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \quad ; \quad \left(D_{eff} \frac{\partial c}{\partial r} \right)_{r=R_s} = -K_f (c_B - c_R)$$

CONSERVAÇÃO DE MASSA DO FLUIDO GASOSO

$$-\varepsilon D_L \frac{\partial^2 c}{\partial Z^2} + \frac{\partial}{\partial Z}(Vc) + \varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} + (1-\varepsilon) \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

Condições de Contorno: $c(0,t) = c_{entrada}$; $V(0,t) = V_{entrada}$

Relações constitutivas:

Velocidade superficial $V = \frac{Vazão_{std} \sigma_{std}}{c_{gas} A_c}$

Concentração do gas $c_{gas} = \frac{P_T - P_v}{R_{gas} T}$

Carregamento médio $(1-\varepsilon) \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = ak_f (c_b - c_R)$

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA GAS-ADSORVENTE

$$-\varepsilon K \frac{\partial^2 T_f}{\partial Z^2} + V \rho_f C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial Z} + (1-\varepsilon) \rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = -(1-\varepsilon) \Delta H \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} - \frac{4h_v}{d_i} (T_f - T_v) \quad (4)$$

Condições de Contorno: $T(0,t) = T_{entrada}$; $V(0,t) = V_{entrada}$

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NO VASO

$$\pi d_i h_v (T - T_v) = \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) \rho_v C_v \frac{\partial T_v}{\partial t} + \frac{\pi d_o}{R_a} (T_v - T_{amb}) \quad (5)$$

Condições de contorno: $T_{amb}(t) = T_{amb}$

CONSERVAÇÃO DE MOMENTO DO GAS

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = f \left(\frac{\sigma V^2}{2R_s} \right) \quad (6)$$

Condições de contorno $P(0,t) = P_{entrada}$

Relação constitutiva

Fator de fricção de Ergun: $f = \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \left[\frac{150(1-\varepsilon)}{Re} + 1,75 \right]$

Para solução do sistema de equações parciais-diferenciais não lineares formadas por estas equações é estruturado algoritmos que empregam a técnica de elementos finitos. O sistema de equações não lineares criados pela discretização das equações diferenciais é solucionado com o uso do método Newton-Raphson. A automatização destes processos para descrever a física do fenômeno da adsorção pode ser obtida através de softwares específicos, tal qual o fornecido pela empresa PEDCO.

A figura 13 mostra a interface gráfica do programa *Adsorptive Gas Dryer Simulation* (AGDS).

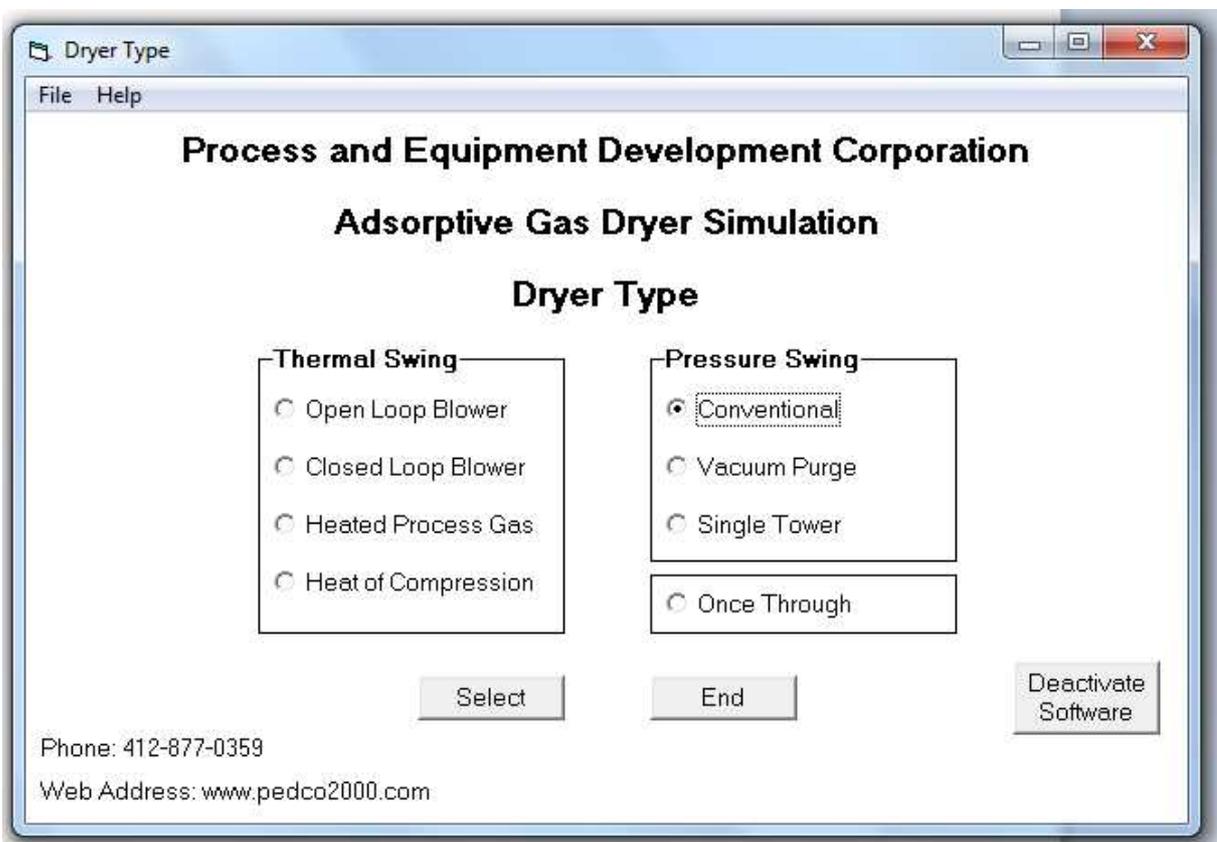


Figura 13 - Interface gráfica do programa AGDS
Fonte: (PEDCO, 2010)

O programa em questão é disponibilizado em uma versão gratuita que somente possibilita a simulação dos sistemas *Open Loop Blower* e *Once Trough*.

As interfaces de entrada de dados destes dois modos simulação são mostrados nas figuras 14 e 15.

Foi obtida uma licença provisória para simular todos os outros modelos disponíveis no programa. Resultados de simulação são mostrados no capítulo 4.

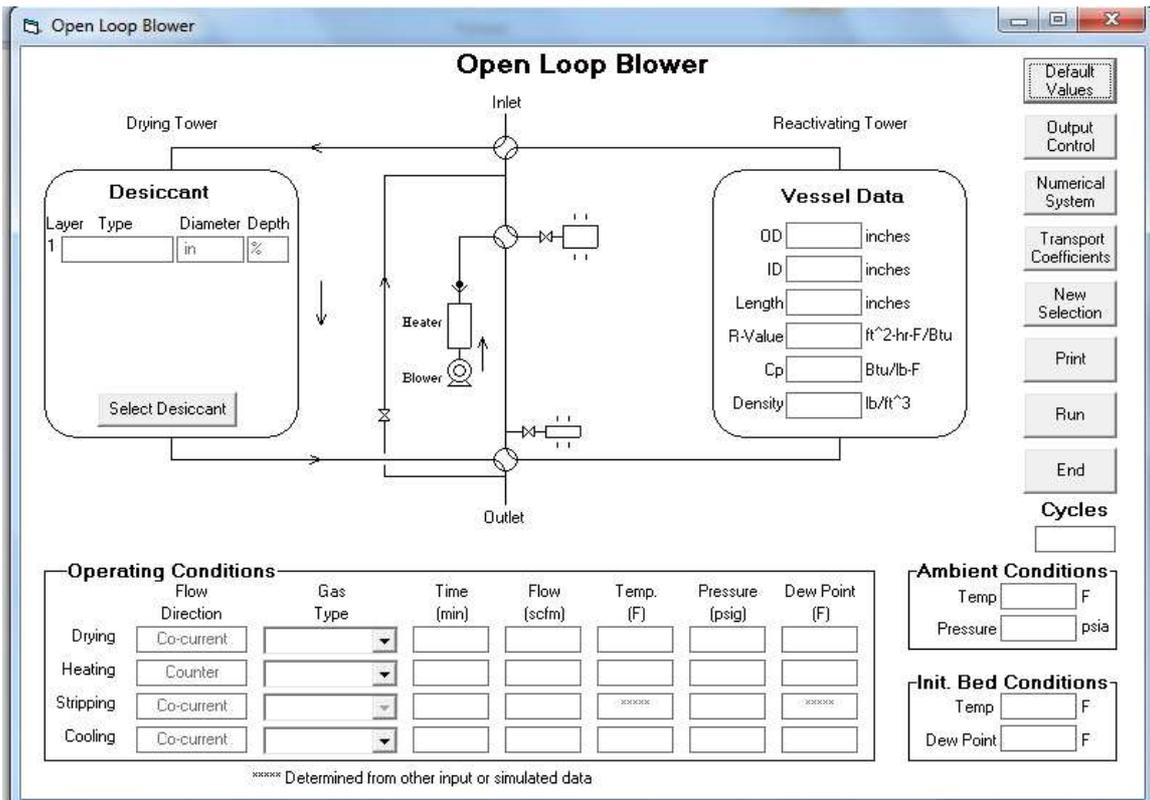


Figura 14 - Interface do modelo Open Loop Blower
 Fonte: (PEDCO, 2010)

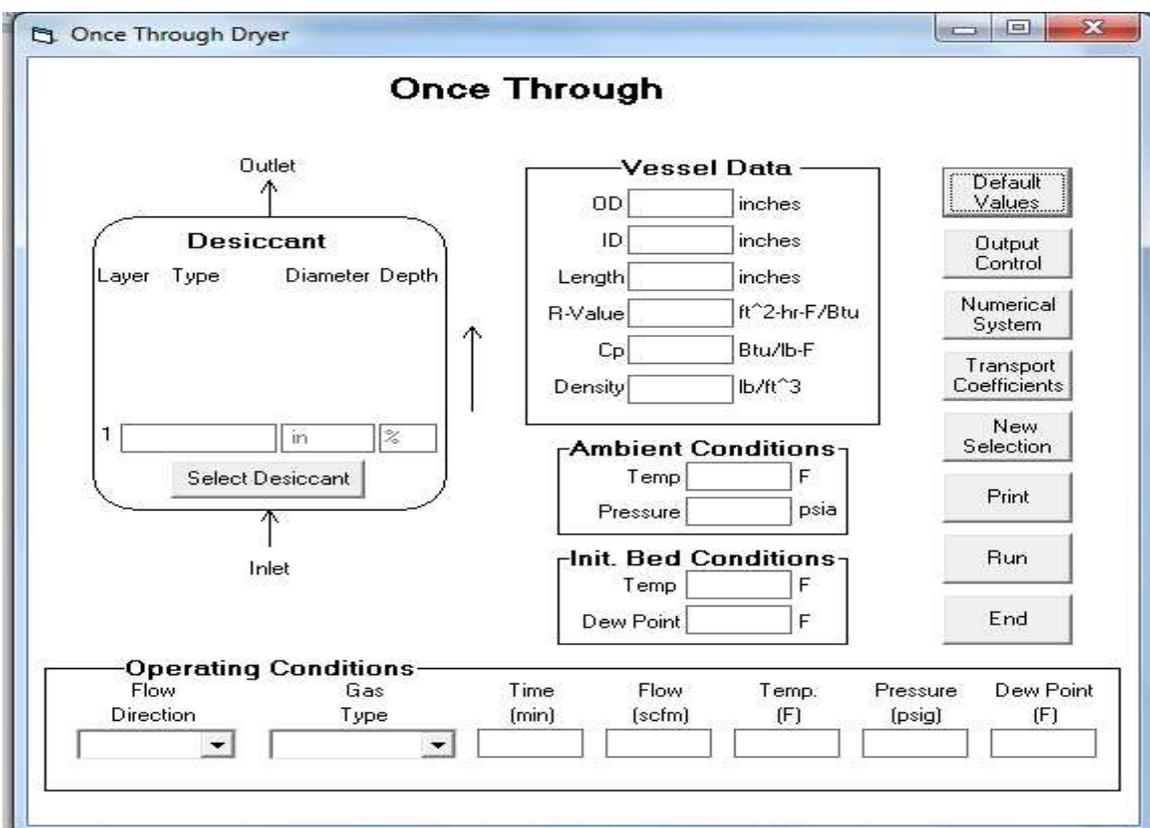


Figura 15 - Interface do modelo Once Through
 Fonte: (PEDCO, 2010)

3 SISTEMA DE PRODUÇÃO ATUALMENTE INSTALADO

Neste capítulo será feita uma descrição das instalações de processamento de ar comprimido da unidade industrial.

Trata-se de uma unidade industrial de propriedade da Usina Elétrica a Gás de Araucária Ltda (UEG Araucária), localizada na cidade de Araucária-PR, cuja atividade principal é a produção de energia elétrica, com potência nominal instalada de 480 MW. Sua construção foi concluída no ano de 2002 ficando a disposição do Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN), despachando energia de acordo com orientações do Operador Nacional do Sistema (ONS).

Na figura 16 tem-se uma vista aérea das instalações da UEG Araucária.

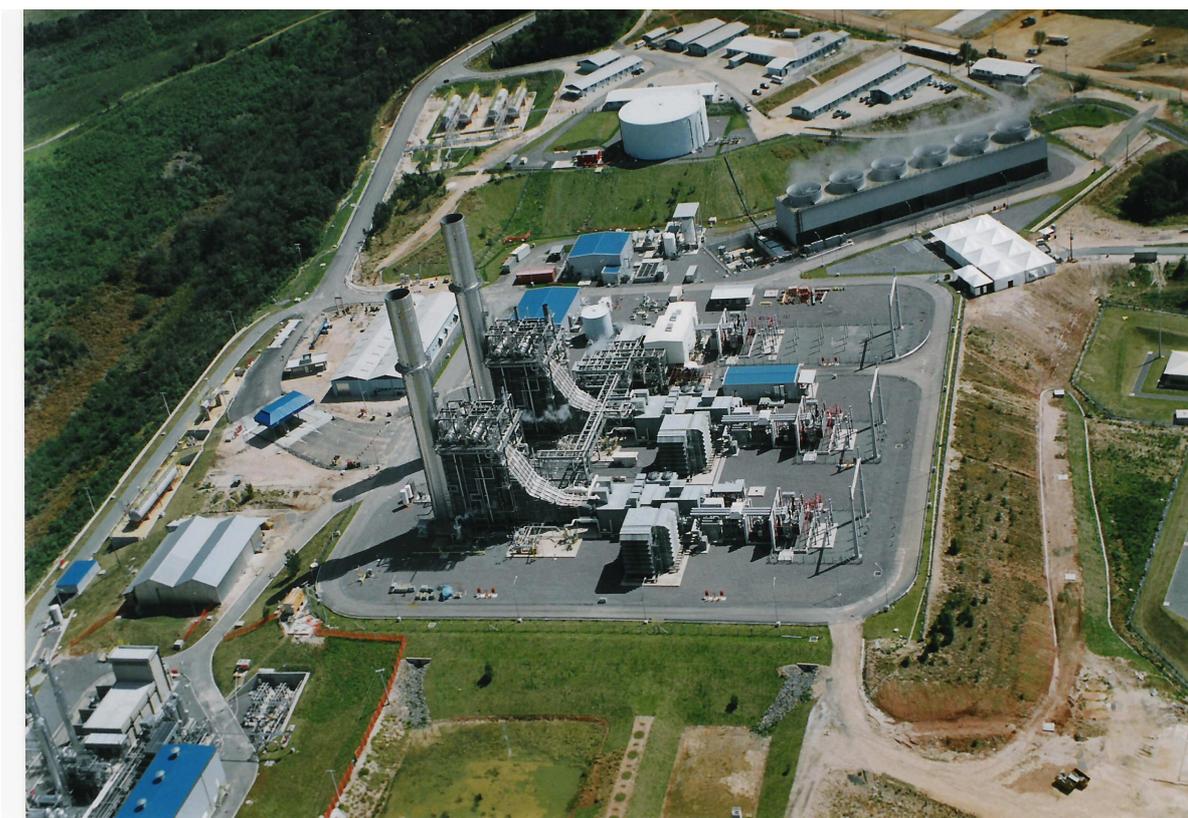


Figura 16 - Vista aérea das instalações da UEG Araucária

A UEG Araucária utiliza-se de tecnologia de ciclo combinado do tipo 2:1 para geração de termoeletricidade.

Uma usina a ciclo combinado utiliza turbinas a gás e a vapor associadas em uma única planta, ambas gerando energia elétrica a partir da queima do mesmo combustível. Para isto, o calor existente nos gases de exaustão das turbinas a gás é recuperado, produzindo o vapor necessário ao acionamento da turbina a vapor (GASNET, 2012).

Na figura 17 é mostrado o fluxograma típico de uma usina termelétrica de ciclo combinado na configuração clássica 2:1, muito próximo do sistema utilizado na UEG Araucária.

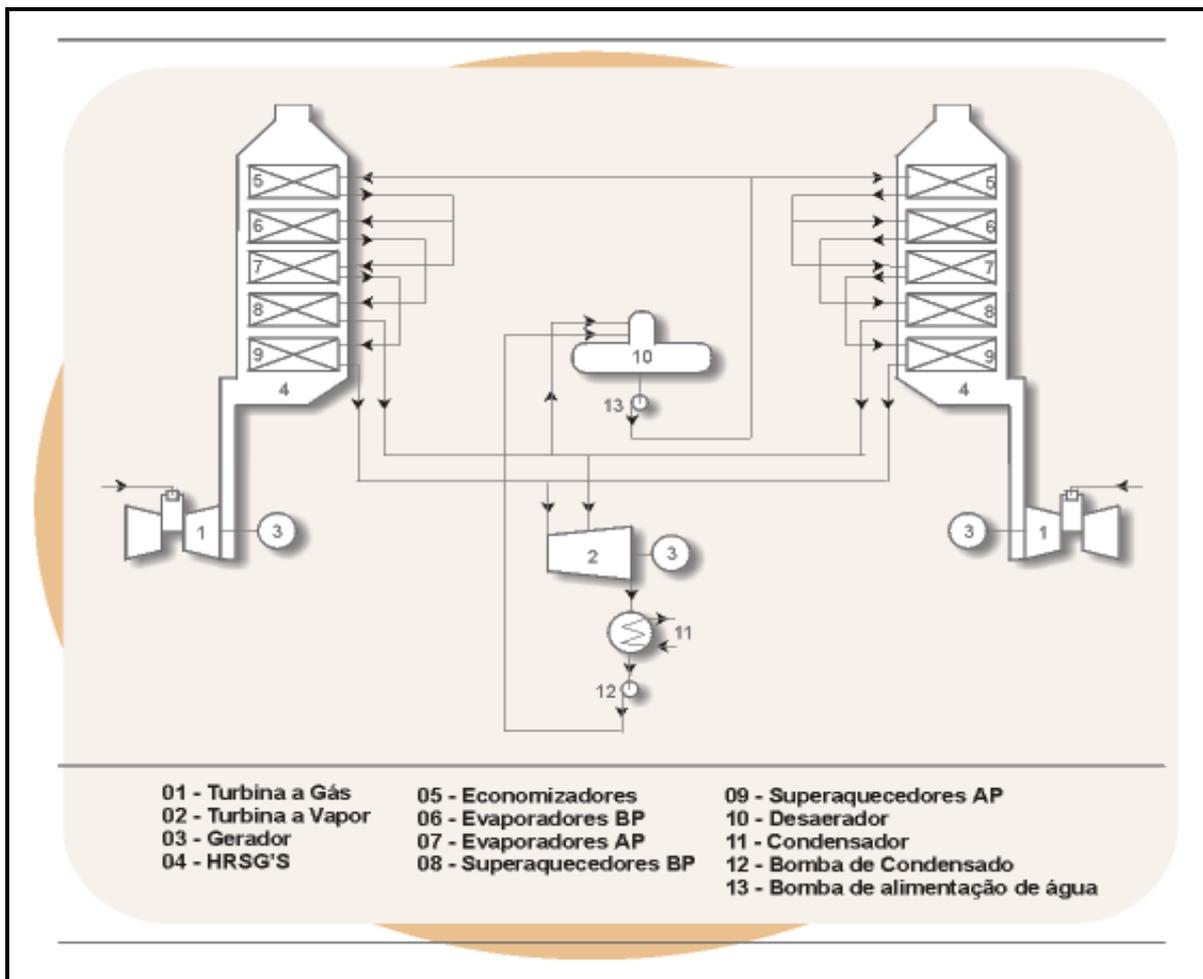


Figura 17 - Fluxograma típico de uma usina de ciclo combinado 2:1
Fonte: GASNET, 2012

O ciclo combinado na UEG Araucária consiste na queima de gás natural para movimentar dois turbo geradores e, a partir dos gases de escapamento destas turbinas, é feita a geração de vapor para movimentar um terceiro turbo gerador. Cada turbo gerador possui potência nominal de 160 MW. A energia gerada pela UEG Araucária é injetada na subestação Gralha Azul e, a partir deste ponto, distribuída para a rede básica de energia elétrica.

3.1 EQUIPAMENTOS PARA GERAÇÃO DE AR COMPRIMIDO

O *lay-out* dos equipamentos utilizados para geração e tratamento de ar comprimido aumenta a confiabilidade do sistema de produção de ar comprimido, com equipamentos redundantes interligados por meio de tubulações e válvulas manuais para manobras.

Na figura 18 é mostrada a configuração do *lay-out* das instalações.

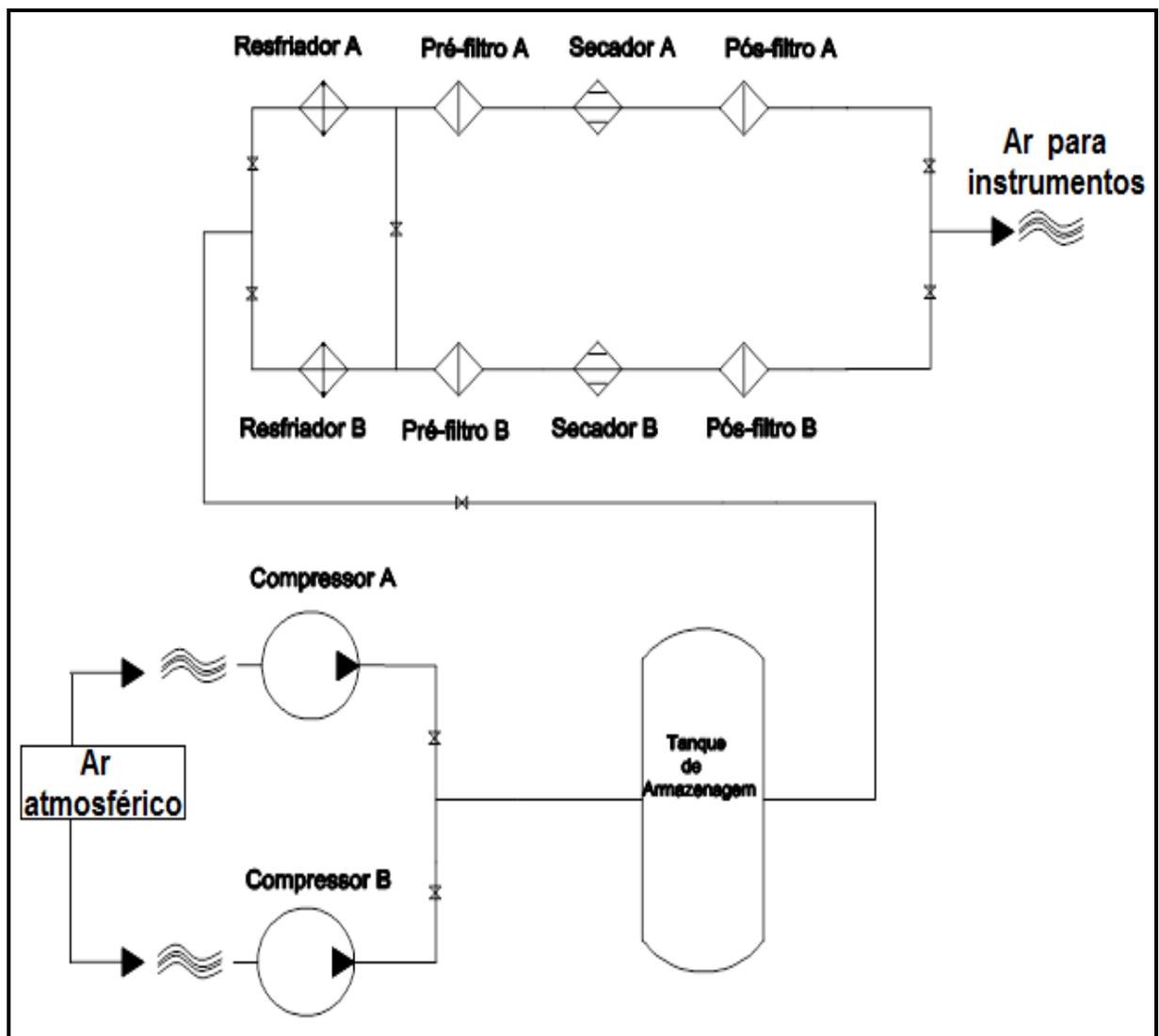


Figura 18 - Lay-out da disposição dos equipamentos de produção de ar comprimido
Fonte: Autoria própria.

3.1.1 Compressores

Equipamentos de rotor tipo parafuso, de simples estágio, 100% isentos de óleo, fornecidos com todos os subsistemas montados em um único pacote (*self-contained*), projetados para fornecimento de ar comprimido a uma pressão de 8,6 barg/100 psig e vazão de 11,50 m³/minuto.

Cada compressor é constituído dos seguintes subsistemas:

- a) sistema de filtragem do ar de admissão;
- b) sistema de refrigeração pressurizado;
- c) sistema de instrumentação e controle do compressor;
- d) sistema de separação e drenagem de umidade.

A compressão do ar atmosférico admitido no compressor de ar de parafuso é criada pela engrenagem de dois rotores helicoidais (macho e fêmea) em eixos paralelos, envolvido por uma caixa de ferro fundido, com os pontos de ar de admissão e de escape estando localizados em extremidades opostas. Rolamentos cônicos montados na extremidade de descarga impedem o movimento axial dos rotores.

A mistura de gás com o fluido refrigerante é descarregada do compressor para o sistema de separação. Este sistema, autocontido no tanque receptor, remove todo vestígio de fluido refrigerante que possa estar contido no ar de descarga. O refrigerante é devolvido ao sistema, e o ar passa para o resfriador posterior (*aftercooler*). O sistema de resfriamento de ar comprimido é constituído por um trocador de calor, um separador de condensado e um sifão. Ao resfriar o ar de descarga, a maior parte do vapor de água naturalmente contida no ar comprimido é condensado e eliminado, a fim de impedir que a umidade atinja a tubulação e os equipamentos a jusante do compressor.

3.1.2 Secadores por adsorção

Cada equipamento fornece um fluxo contínuo de ar seco comprimido entre duas torres de secagem, uma absorvendo umidade do ar de entrada e a outra se reativando com o ar seco de saída. A figura 19 mostra o fluxo de ar através de cada secador, com a torre “A” em linha e a torre “B” em regeneração.

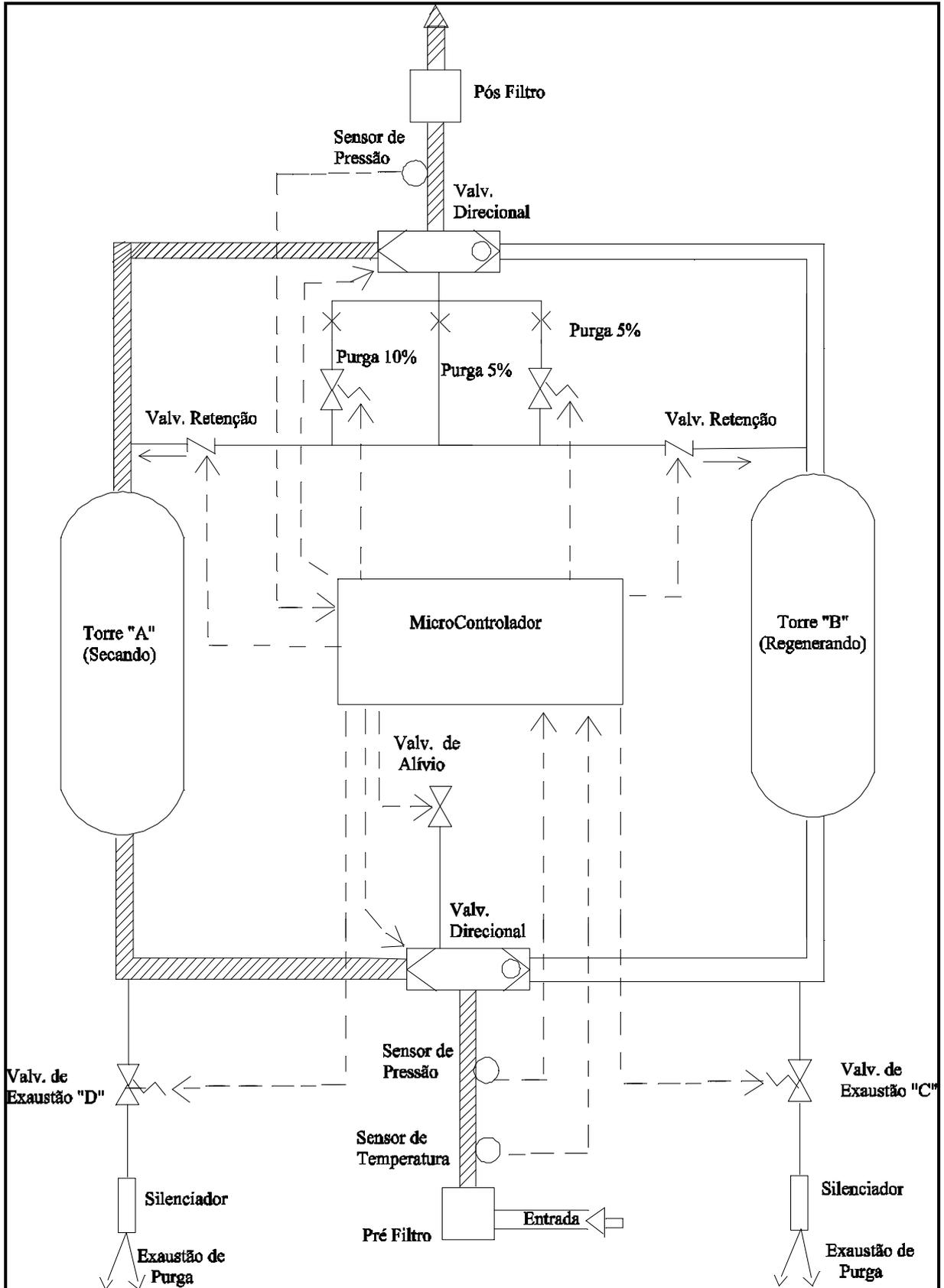


Figura 19 – Torres de secagem e fluxo de processo.

Fonte: Autoria própria

O ar saturado entra pelo pré-filtro, que separa o vapor de óleo, o óleo líquido, a água e partículas do fluxo de entrada. A contaminação é descartada por meio de válvula de drenagem. Com a válvula de escape “C” aberta e “D” fechada, o ar filtrado entra na parte inferior da torre “A” através da válvula direcional de fluxo. O dessecante remove a umidade. O ar seco sai pela parte superior da torre e é dividido em duas fontes: o ar de processo flui pela válvula de fluxo de saída, passa pelo pós-filtro particular e continua para o processo.

Uma porção de ar seco (“ar de purga”) passa pelo orifício de purga quase à pressão atmosférica, de acordo com o valor percentual ajustado. Este ar flui através do dessecante para a parte inferior da torre “B”, passa pela válvula de exaustão “C” e sai pelo silenciador, levando consigo a umidade absorvida pelo dessecante no ciclo anterior.

Ao final do período de secagem, a válvula de exaustão “D” se abre, a torre “A” se despressuriza. As válvulas de fluxo de entrada e saída mudam de posição, o fluxo de entrada muda para a torre “B” e o ciclo de secagem/regeneração se repete.

Por meio do sistema de controle microprocessado obtêm-se o ajuste para o volume do fluxo de purga e o relaciona automaticamente com o teor de umidade no ar de entrada.

Os sensores eletrônicos de pressão e temperatura verificam a temperatura de entrada e as pressões de entrada e saída, e transmitem estas informações ao microcomputador. Este calcula o teor de umidade do secador e calcula a combinação mais eficiente de volume e duração do fluxo de purga para eliminar a umidade absorvida durante o período de secagem.

O volume do fluxo de purga pode variar de 0 a 20%, em incrementos de 5%, por meio das válvulas de controle de purga 1 e 2. A duração da purga também pode variar. O microcomputador seleciona automaticamente a combinação ótima de abertura das válvulas de controle de purga para prover o ar justamente necessário para a regeneração completa da torre.

Quando a quantidade de ar de purga necessário para regenerar o dessecante é maior que os 20% do volume de entrada, o secador automaticamente diminuirá o tempo do ciclo, até que a condição de sobrecarga seja corrigida. Para se produzir ponto de orvalho de -40 °C é programado um ciclo de cinco minutos quando se apresenta uma condição de sobrecarga. Para ponto de orvalho de -73,33 °C é programado um ciclo de 3 minutos.

O microcomputador utiliza três métodos de operação para comparar a carga de umidade de entrada:

- 1) Método *Compu-purge* – quando o microcomputador ajusta o ar de purga para equalizar a carga de umidade.

2) Método de *Stand-by* ou Espera – quando o requisito de ar de purga é muito baixo, ou quando não há necessidade deste. O secador purga até que o dessecante esteja regenerado, as torres se pressurizam, o secador desliga-se automaticamente; o secador purga a cada 30 minutos para assegurar o ponto de orvalho especificado;

3) Método de Ciclo Fixo – se todos os sensores estiverem danificados, o secador começará a operar em um ciclo fixo automaticamente, usando 15% do fluxo predefinido para regenerar a torre *off-line*. Se somente um sensor se danifica, o secador funcionará sob as condições normais deste sensor e continuará operando sob o método de purga variável.

Para eliminar o óleo e a água periodicamente da carcaça do pré-filtro, os secadores são equipados com uma válvula eletrônica que descarrega automaticamente a condensação do pré-filtro.

Esta válvula possui duas luzes indicadoras de *LED* e uma tecla de verificação de operação. A válvula se abre ao pressionar esta tecla. Uma das luzes indica que está energizado e a outra indica que a válvula está aberta.

A operação da válvula é controlada por um temporizador eletrônico, podendo ser regulado tempos de abertura da válvula entre 0,5 a 10 segundos. O ciclo de drenagem pode ser regulado de 0,5 a 45 minutos.

No painel do controlador do sistema existem luzes indicativas do funcionamento do equipamento, conforme pode ser visto nas figuras 20 e 21.



Figura 20 - Torres de Secagem de Ar Comprimido e Controlador do Processo
Fonte: Autoria própria



Figura 21 - Luzes indicadoras do estado de funcionamento do Secador
Fonte: Autoria própria

As funções das sinalizações indicadas no painel do controlador são as seguintes:

- a) ***Variable Purge Mode*** – acende quando o ciclo do secador está sendo controlado pelo microcomputador.
- b) ***High Inlet Air Temperature*** – acende quando a temperatura de entrada excede 120 °F (48,89 °C). Temperaturas altas do gás de entrada diminuem a capacidade de secagem e pode resultar em pontos de orvalho acima do especificado.
- c) ***Dryer Overload*** – acende quando o fluxo de entrada excede a capacidade do secador de manter o ponto de orvalho.
- d) ***Low Inlet Air Pressure*** – acende quando a pressão do ar de entrada é menor de 65 psig.
- e) ***Sensor Malfunction*** – acende quando algum dos sensores de temperatura e de pressão enviam sinais ao microprocessador fora do alcance normal do sensor.
- f) ***High Humidity*** – acende quando o monitor de alta temperatura detecta umidade excessiva no ar de saída.
- g) ***Failure to Switch Towers*** – acende quando o controlador para de alternar o processo entre as duas torres em um tempo designado de mudança. Esta falha resultará em pontos de orvalho altos.

3.2 CONTROLE ATUAL DO PROCESSO

Durante acompanhamento do funcionamento do equipamento, foram cronometrados os tempos de secagem e regeneração de cada torre e coletadas as informações mostradas na tabela 5, as quais foram retiradas da tela de mensagens do controlador e de manômetros localizados nas duas torres de secagem.

O controle do processo de secagem está baseado em tempos fixos de rodízio das duas torres; se o processo está estável, a secagem do ar comprimido e a regeneração do leito de secagem de cada uma das torres compõem um ciclo com duração aproximada de cinco minutos.

Conforme os dados mostrados na tabela 5, a temperatura de entrada do ar comprimido permaneceu estável em 70 °F (21 °C). As medições foram realizadas sob temperatura ambiente de 26 °C.

Tabela 5 - Dados atuais do processo de controle da secagem de ar comprimido

Temp. ar de entrada (°F)	Economia de energia (%)	Pressão Torre A (psi)	Pressão Torre B (psi)	Tempo cronometrado (seg)
70	61	120	0	Início
70	61	120	0	240
70	61	120	pressurizando	5
70	61	120	120	20
70	64	0	120	240
70	64	Pressurizando	120	5
70	65	120	120	20
70	65	120	0	240
70	65	120	pressurizando	5
70	65	120	120	20
70	65	0	120	240
70	65	Pressurizando	120	5
70	65	120	120	20
70	65	120	0	240

Fonte: Autoria própria

A economia de energia refere-se a cálculo interno do controlador, que estima a quantidade de energia que seria gasta para secar a mesma quantidade de ar se não existisse controle da quantidade de ar solicitada pela carga da instalação.

No início da medição o ar comprimido estava sendo direcionado para a torre A, a qual estava pressurizada a 120 psi (8,3 bar). A torre B estava despressurizada em processo de regeneração. Após 4 minutos, a torre B começa a ser pressurizada até atingir 120 psi. Durante aproximadamente 20 segundos as duas torres ficam pressurizadas, e, ao final deste tempo, a torre A passa a ser regenerada e o ar comprimido é direcionado para a torre B.

Não é disponibilizado ao usuário informação alguma sobre a umidade de saída do ar comprimido após a secagem. Por meio da lógica do programa, o valor de referência programado como referência de umidade para o processo é comparado com o valor medido na saída de ar comprimido seco. A única comunicação que ocorre quando há umidade excessiva é o acendimento da sinalização *High Humidity* no painel do controlador.

4 PROGRAMAÇÃO E SIMULAÇÕES

4.1 SIMULAÇÕES DA DINÂMICA DO PROCESSO DE SECAGEM

Com a utilização do programa *Adsorptive Gas Dryer Simulation* da PEDCO, foi realizado simulações de desempenho de secadores semelhantes aos instalados na planta. Os dados que não foram possíveis de se obter, tais como, medidas internas dos vasos e vazões de entrada e saída, foram simulados com valores padrões do próprio programa.

As simulações foram realizadas com o modelo de secador *Conventional Pressure Swing* (pequena parcela do ar seco de saída é utilizada para regenerar o leito de secagem), e uma das telas do simulador contendo os dados de entrada pode ser visualizada na figura 22.

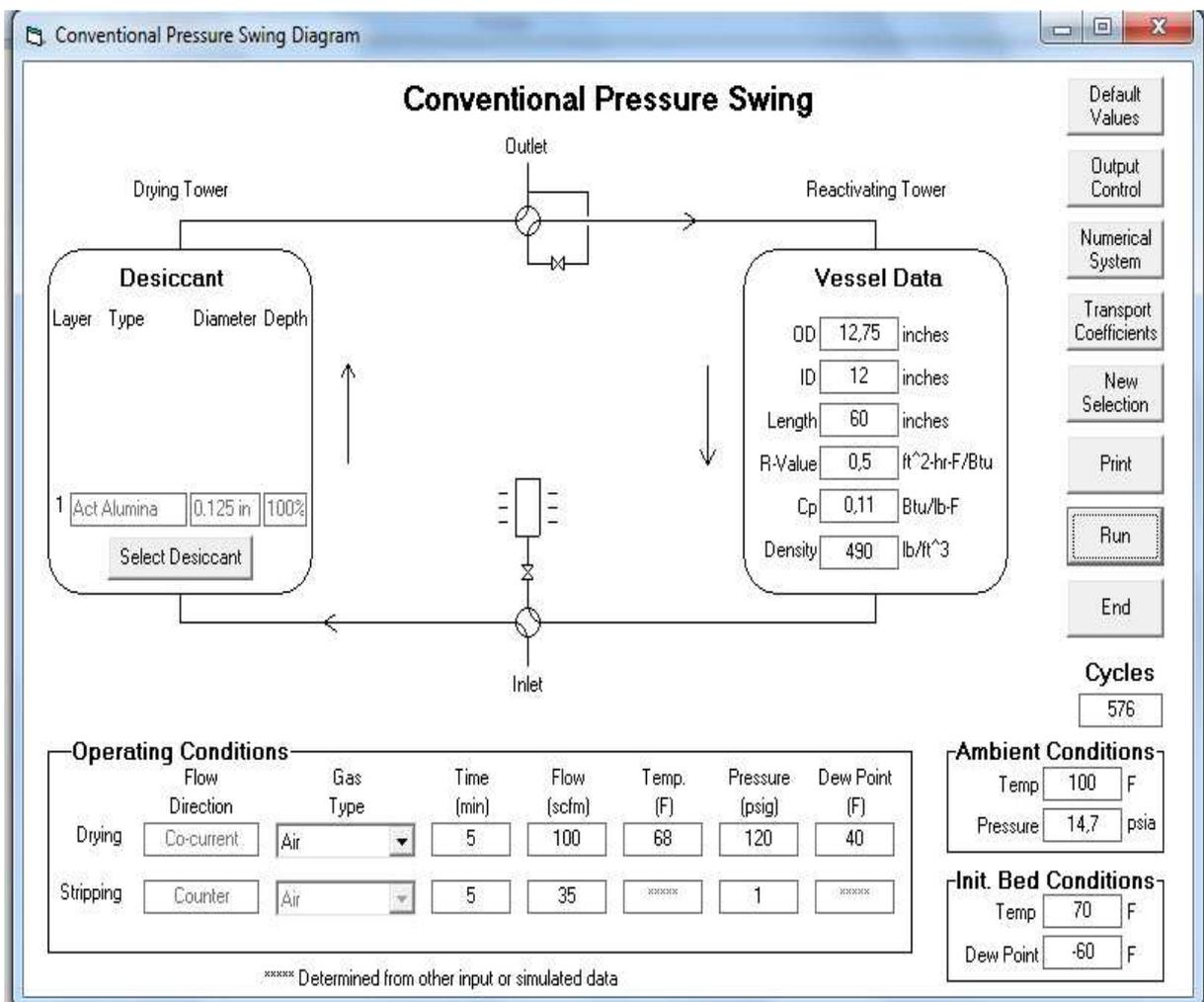


Figura 22 - Tela de edição dos parâmetros do simulador PEDCO

Os gráficos gerados com os parâmetros escolhidos, são mostrados na figura 23. O período de tempo simulado foi de 72 horas de operação das torres secadoras, e a execução do programa teve duração de 10 minutos. O primeiro gráfico mostra a oscilação do ponto de orvalho do ar seco, entre, aproximadamente, 0 °F (-18 °C) e 40 °F (4,4 °C). A temperatura do ar seco oscilou entre 21,7 °C e 23,3 °C.

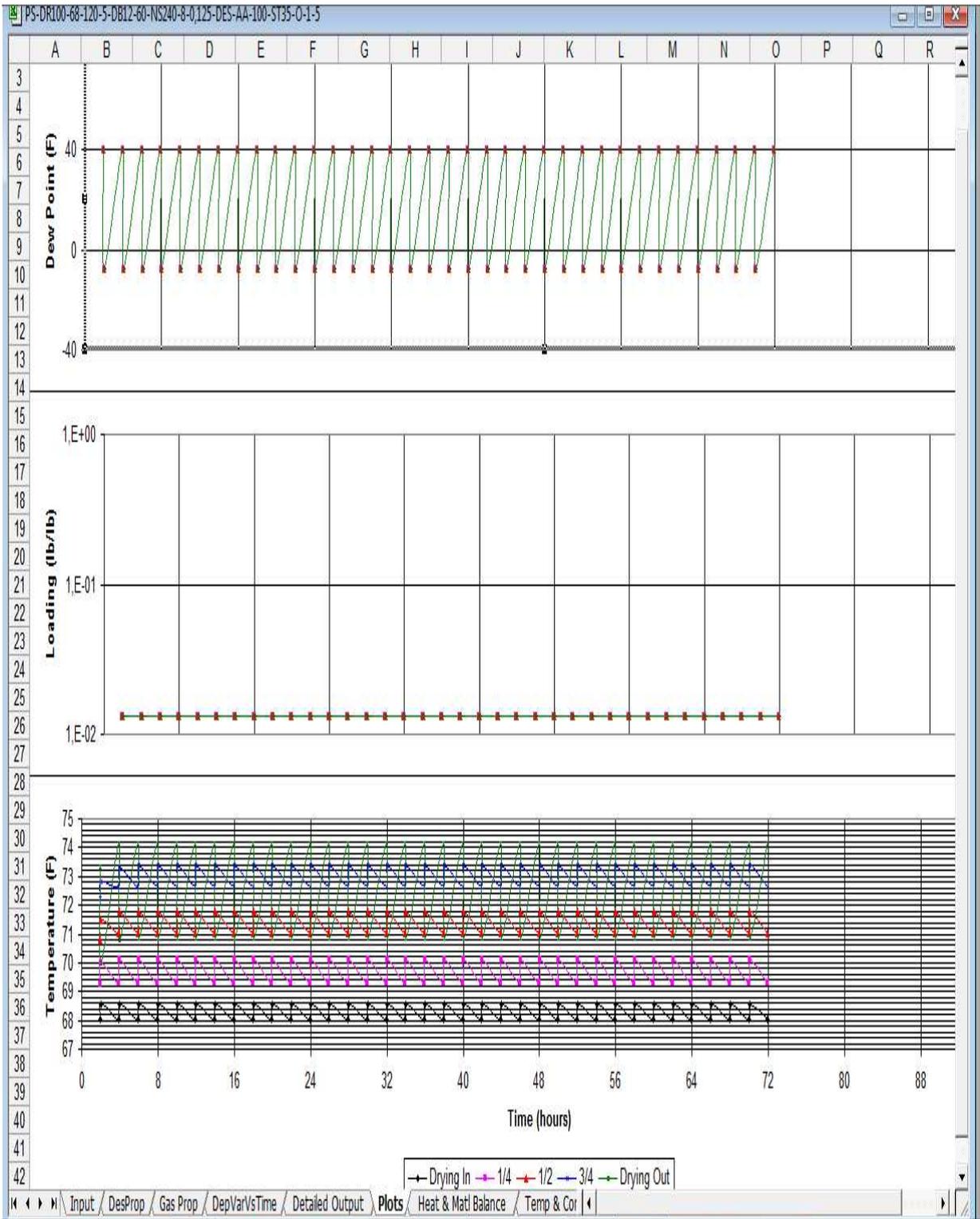


Figura 23 - Resultado de uma simulação do processo de secagem

4.2 SIMULAÇÕES COM CONTROLADOR PROGRAMÁVEL

A solução avaliada teve como base a utilização de um CP de fabricação Altus[®], modelo DU350, disponível para utilização. Trata-se de um controlador compacto o qual possui uma interface homem máquina (IHM) incorporada, arquitetura de *hardware* baseada em processadores de 32 bits, alta densidade de pontos de E/S integrados, portas de comunicação seriais e suporte para posicionamento de eixos utilizando entradas e saídas rápidas.

No quadro 2 são mostradas algumas características de *software* do CP utilizado.

	DU350, DU351
Linguagem de programação	IL, ST, LD, SFC, FBD e CFC
Programação on-line	Não
Conversão de linguagem	Conversão dos códigos de linguagem disponível
Memória de aplicativo	256 kbytes
Ocupação média de memória por instrução IL	1000 instruções a cada 7 kbytes
Memória para download de código fonte	256 kbytes
Memória de dados do tipo I	128 bytes
Memória de dados do tipo Q	128 bytes
Memória de dados do tipo M	6656 bytes
Memória Global	6656 bytes
Retentividade	Memória não volátil de 1250 Bytes
Número de POU's	300
Programador da IHM	Incluso na mesma interface do programador da aplicação
Simulador	Simulador de CP para testes de aplicação sem necessidade de equipamento
Funções avançadas	Disponíveis bibliotecas para controle avançado

Quadro 2 - Características de software do CP
 Fonte: (ALTUS, 2011)

No quadro 3 são mostradas algumas características de *hardware* do CP.

DU350, DU351	
Número de pontos de entrada digital	20 pontos de entrada digital isolados: 14 entradas digitais comuns 6 entradas digitais rápidas (as entradas rápidas podem ser utilizadas como contadores ou como entradas comuns)
Número de pontos de saída relé / transistor	16 pontos de saída digital isolados: 2 pontos de saída rápida e 14 pontos de saída transistor-DU350 2 pontos de saída rápida e 14 pontos de saída relé-DU351
Número de pontos de saída rápida	2 pontos de saídas rápidas: PTO, PWM, Frequência ou saída digital
Contadores rápidos	6 pontos rápidos divididos em 2 blocos configuráveis como bidirecional ou unidirecional(2 contadores por bloco)
Entradas analógicas	4 entradas analógicas 0 a 10V ou 0 a 20 mA ou 4 a 20 mA
Saídas analógicas	2 saídas analógicas 0 a 10V ou 0 a 20 mA
Relógio de tempo real RTC	Sim, autonomia de 15 dias sem alimentação. Resolução de um segundo e variação máxima de 2s por dia
Visor	Visor gráfico monocromático 128 x 64 com <i>backlight</i> e controle de contraste.
Teclado	Teclado de membrana com 25 teclas
Protocolo MODBUS	Mestre e escravo RS-232 e RS-485
Carga de aplicativo em campo	Sim, através da COM 1, RS-232
Programação on-line	Não
Interface RS-232	Sim, uma interface com sinais de modem TXD, RXD, RTS, CTS, DTR, DSR, DCD
Interfaces RS-485	Sim, não isolada
Circuito de cão-de-guarda	Sim
Tensão de alimentação externa	19 a 30 Vdc
Consumo 24V	350 mA
Potência	8,4 W
Interrupção máxima de fonte de alimentação	10 ms @ 24 Vdc
Isolação da fonte de alimentação	Sim
Tempo de inicialização	10 segundos
Normas atendidas	IEC 61131-3 2003 - CE, diretivas de Compatibilidade Eletromagnética (EMC) e Dispositivos de Baixa Tensão (Low-Voltage Directive – LVD). 
Peso	600 g
Temperatura de operação	0 a 60°C
Temperatura de armazenagem	-20 a 75°C
Proteção painel frontal	IP 54
Proteção painel traseiro	IP 20
Dimensões	180,1 x 144,1 x 51 mm

Quadro 3 - Características de hardware do CP

Fonte: (ALTUS, 2011)

A programação e simulação foram realizadas no software de desenvolvimento MasterTool IEC, fornecido pelo mesmo fabricante do controlador.

No quadro 4 estão mostrados os estados de atuação das válvulas instaladas nos equipamentos, estados estes de acordo com os ciclos de secagem e regeneração do leito de cada vaso conforme os tempos cronometrados na tabela 5.

Ciclo	VDE	VDS	VR_a	VR_b	VE_c	VE_d
Torre A secando	direciona fluxo de entrada para torre A	aberta para o fluxo vindo da torre A	fechada	aberta	Aberta	Fechada
Torre A secando e Torre B pressurizando	direciona fluxo de entrada para torre A	aberta para o fluxo vindo da torre A	fechada	aberta	fechada	Fechada
Mantem torres equalizadas (20s)	direciona fluxo de entrada para torre A	aberta para o fluxo vindo da torre A	fechada	aberta	fechada	Fechada
Torre B secando	direciona fluxo de entrada para torre B	aberta para o fluxo vindo da torre B	aberta	fechada	fechada	Aberta
Torre B secando e Torre A pressurizando	direciona fluxo de entrada para torre B	aberta para o fluxo vindo da torre B	aberta	fechada	fechada	Fechada
Mantem torres equalizadas (20s)	direciona fluxo de entrada para torre B	aberta para o fluxo vindo da torre B	aberta	fechada	fechada	Fechada
Torre A secando	direciona fluxo de entrada para torre A	aberta para o fluxo vindo da torre A	fechada	aberta	Aberta	Fechada

Quadro 4 - Estados de válvulas de entrada e saída durante funcionamento normal

Para controle do processo de secagem é apresentado na figura 24 um diagrama construído com base na linguagem de programação SFC. As etapas 1 a 7 correspondem à evolução do programa em modo automático de funcionamento e as etapas 20, 21 e 31 realizam as operações de controle quando a chave de seleção do modo de funcionamento estiver em manual. As etapas 50 a 55 correspondem à monitoração e geração de alarmes quando da ocorrência de valores de umidade e temperatura que estejam fora dos valores especificados. O estado inicial de operação do sistema é dado pelas condições especificadas nas etapas 0 e 50.

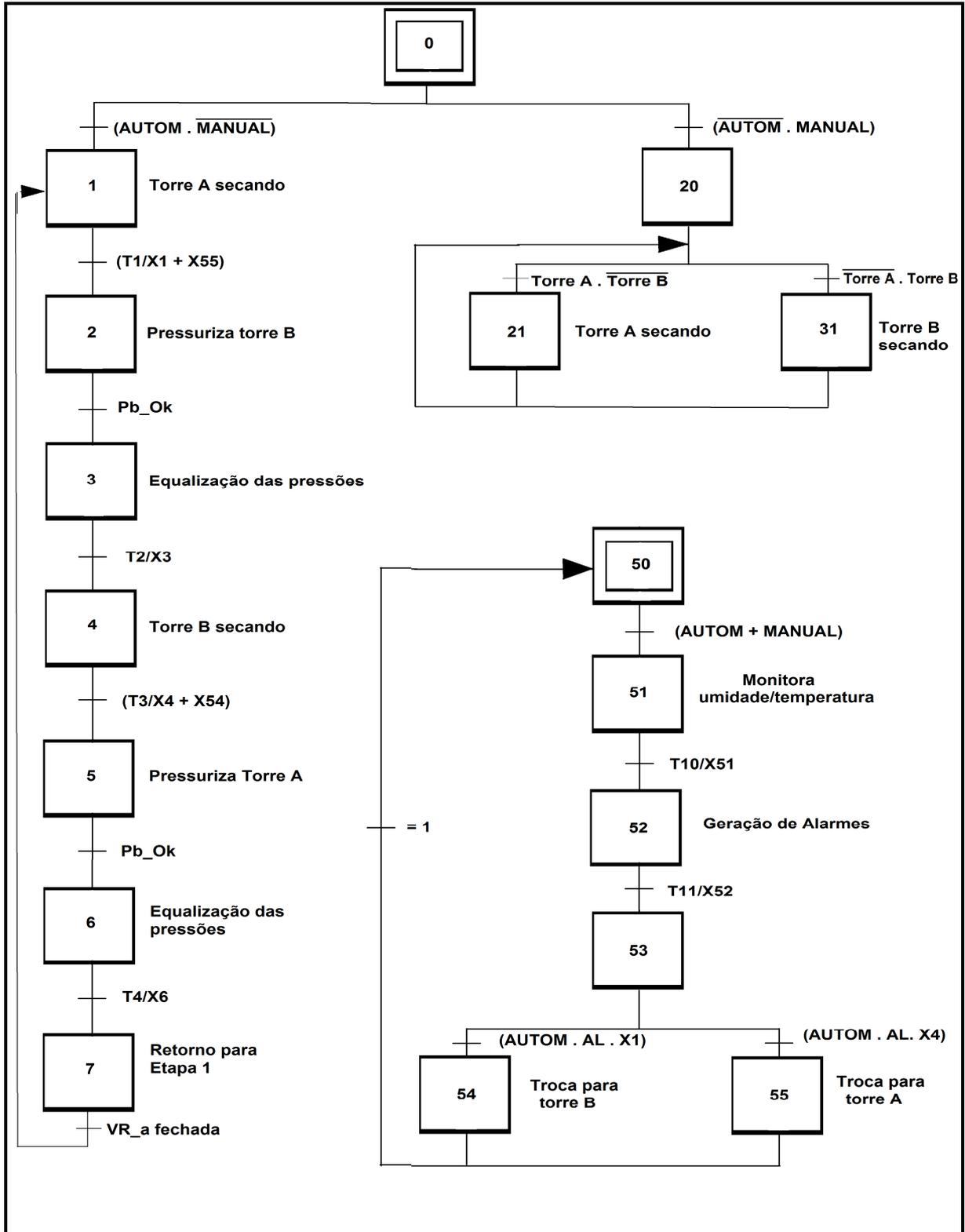


Figura 24 - Diagrama SFC de controle do sistema

Fonte: Autoria própria

Com o objetivo de melhor descrever as ações de cada etapa, nas figuras seguintes serão demonstradas cada um dos modos de operação, manual e automático, e o controle de

temperatura e umidade do ar comprimido produzido. Na figura 25 estão detalhados os acionamentos que devem ocorrer em cada etapa quando o sistema estiver em funcionamento no modo automático.

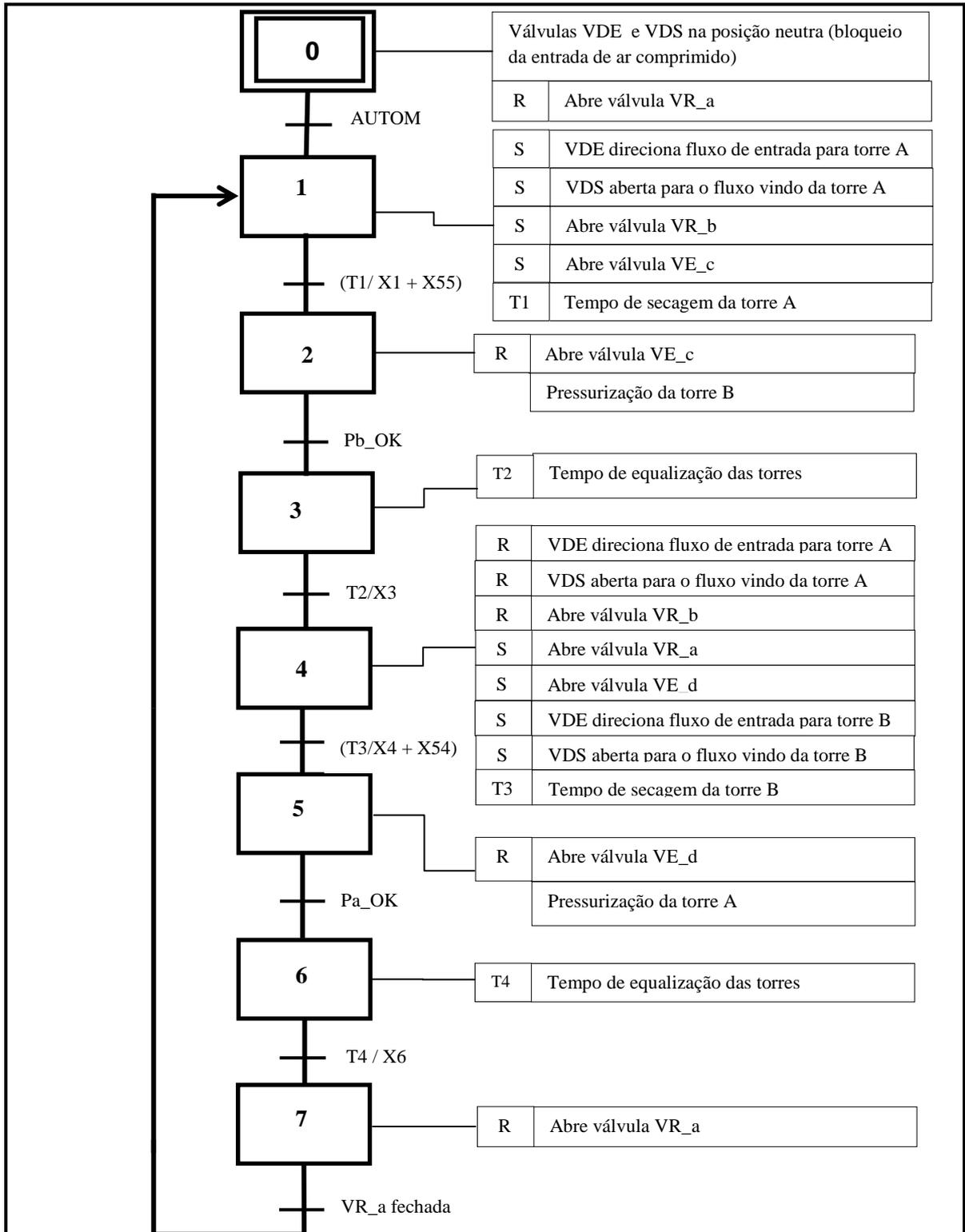


Figura 25 - Detalhamento das etapas do modo automático
Fonte: Autoria própria

Por questões de segurança, foi definido que para mudança do modo de operação (de automático para manual e vice-versa) há necessidade de que o sistema seja desligado e a chave de seleção seja posicionada no modo desejado. Após isto o sistema poderá ser religado e entrará em funcionamento no modo de operação selecionado.

Na figura 26 está representado as etapas do controle em modo manual de operação.

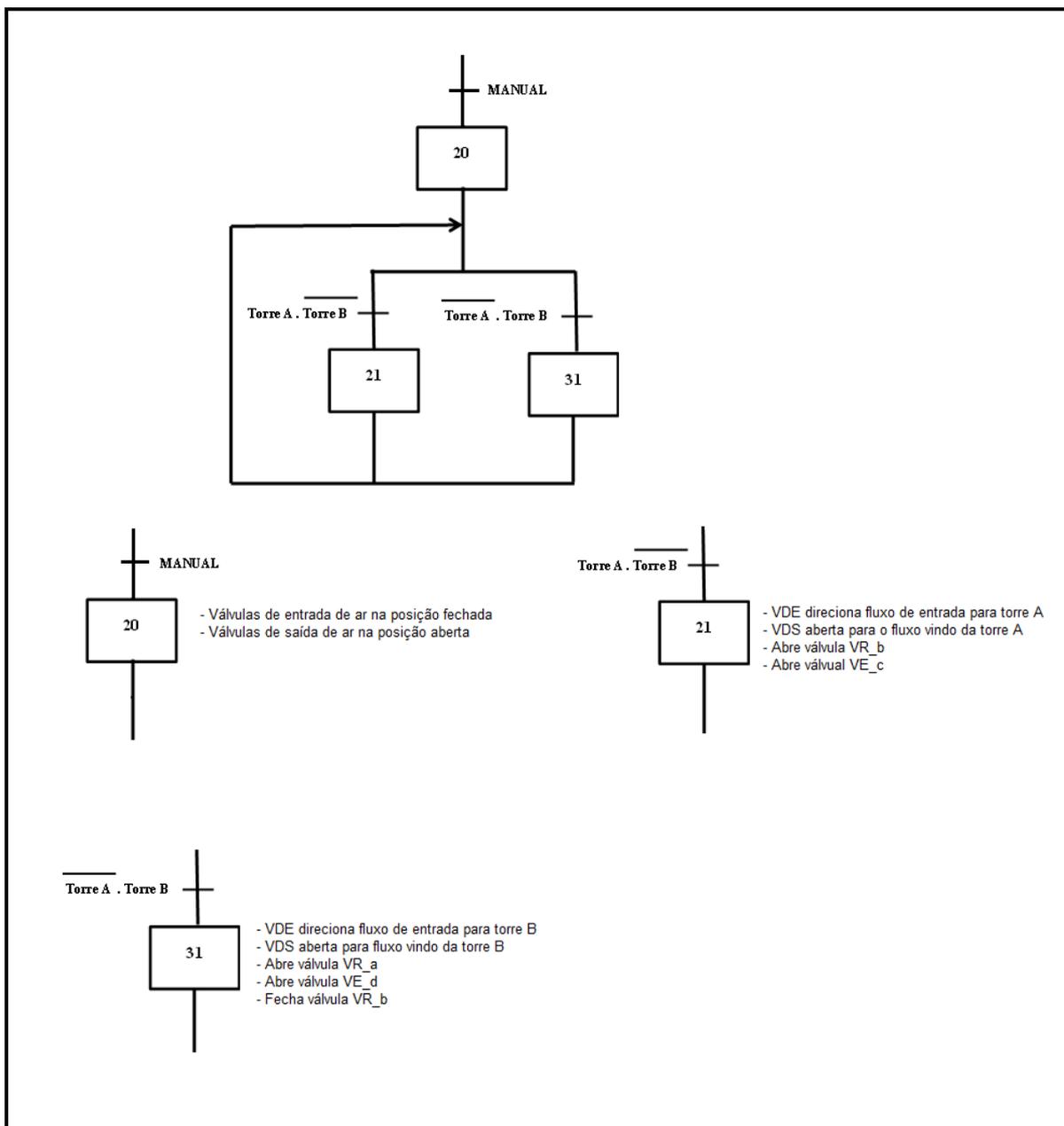


Figura 26 - Detalhamento do modo manual de controle
Fonte: Autoria própria

Tendo como base o diagrama SFC, nas figuras 27 a 30 são mostrados a programação em linguagem *Ladder* para implementação em controlador programável.

As variáveis denominadas M0, M1 até M55 correspondem a bits de memória CP e estão relacionadas às etapas da evolução do programa mostrados nos diagramas SFC. As temporizações necessárias estão sinalizadas com variáveis T1 até T11.

Para leitura de entradas analógicas e armazenamento de valores são realizados nas variáveis I: 4.0 e F:10.0, respectivamente.

O modo de se efetivar a programação vai depender das características do fabricante do CP. Há infinidades de fornecedores de controladores, cada um com suas vantagens e custos variados.

No Apêndice 1 está documentado a implementação do programa *Ladder* realizado no controlador Altus[®], modelo DU350, possível de controlar o processo, conforme os estados das variáveis de entrada e saída do sistema. A programação e simulação não foram exaustivas em equacionar todas as possibilidades de se controlar o processo, nem tampouco depurar todos os equívocos de lógica; teve maior relevância a compreensão de como se trabalhar no ambiente de programação.

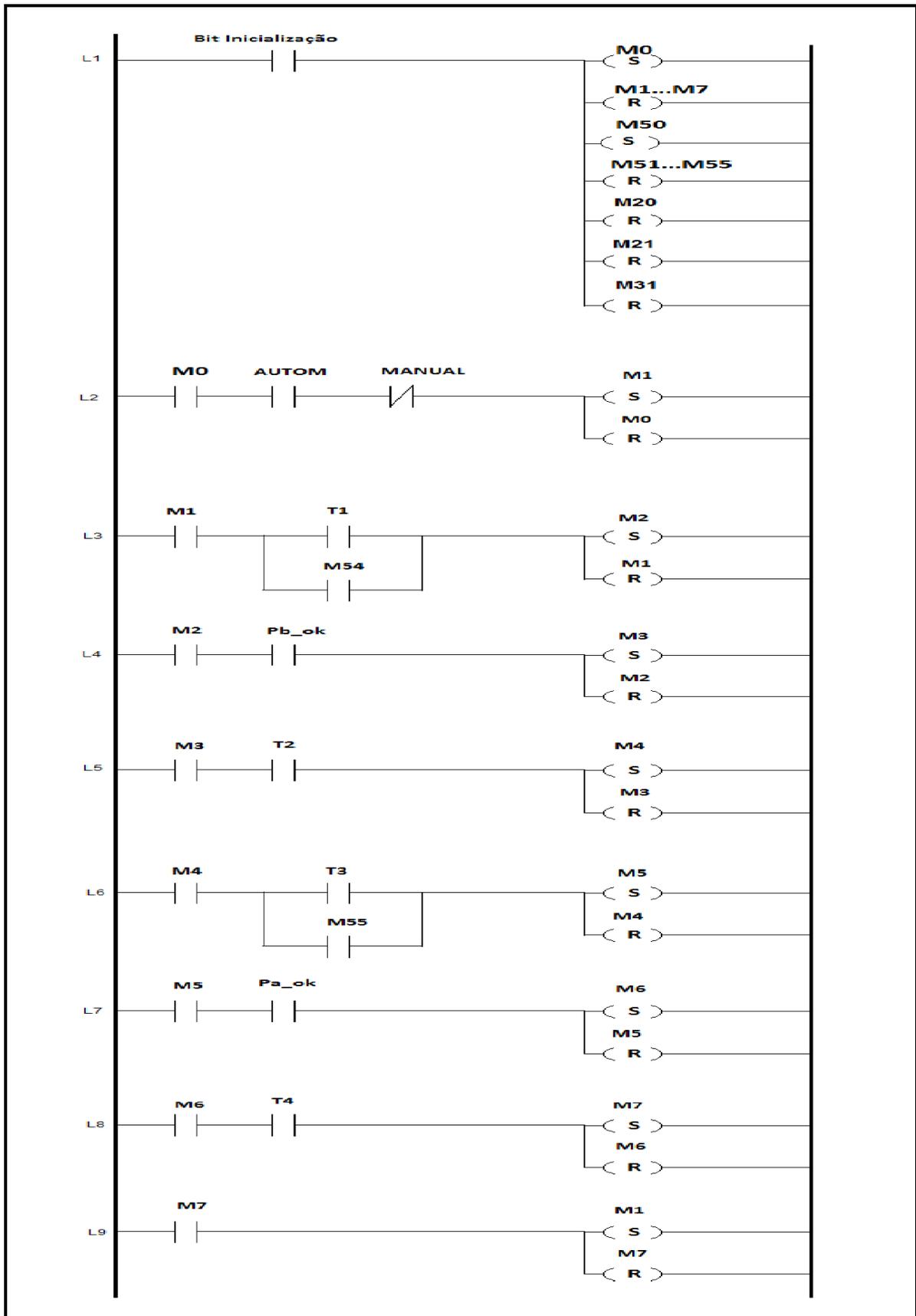


Figura 27 - Programação em Ladder
 Fonte: Autoria própria

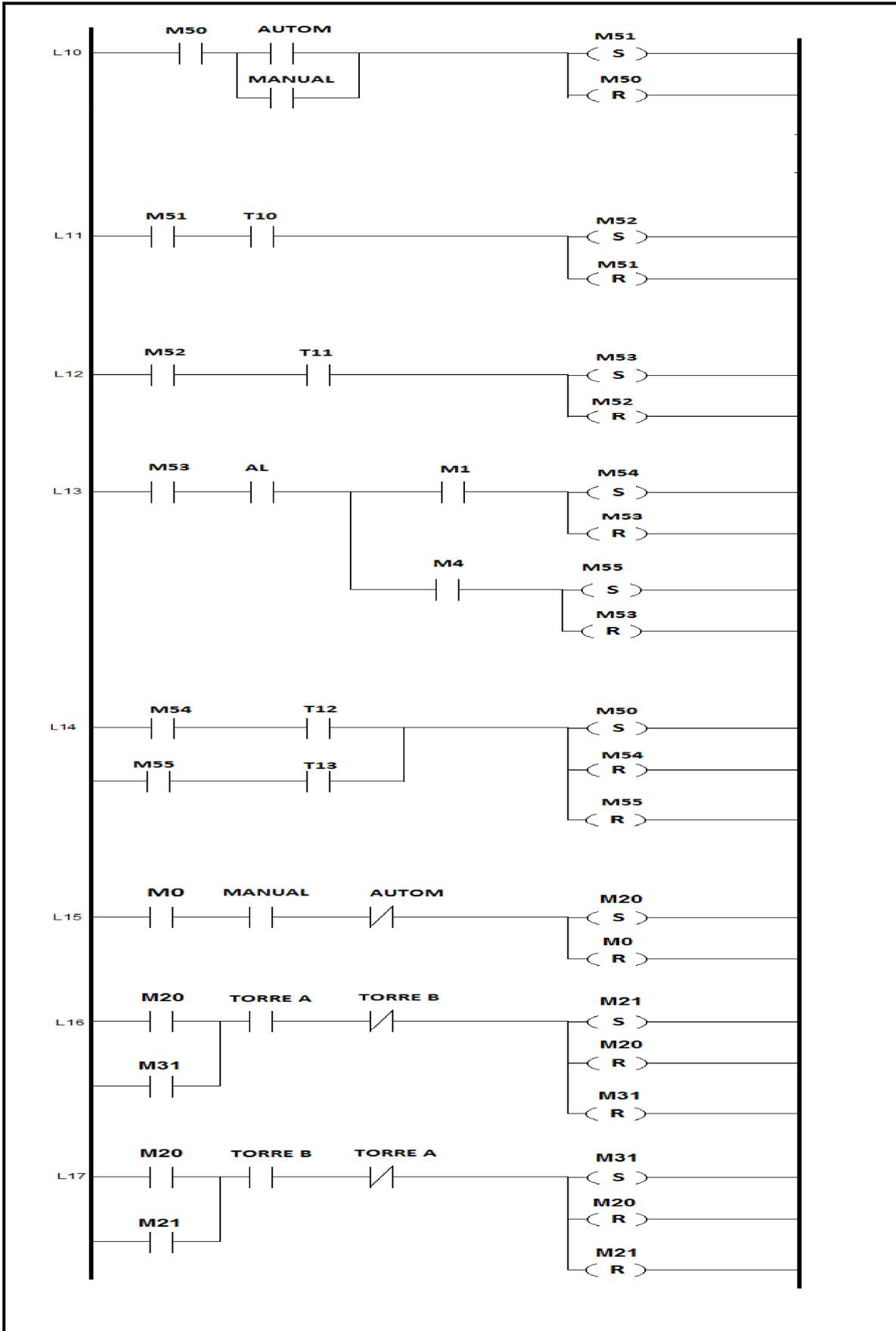


Figura 28 - Programação em Ladder (Continuação)
 Fonte: Autoria própria

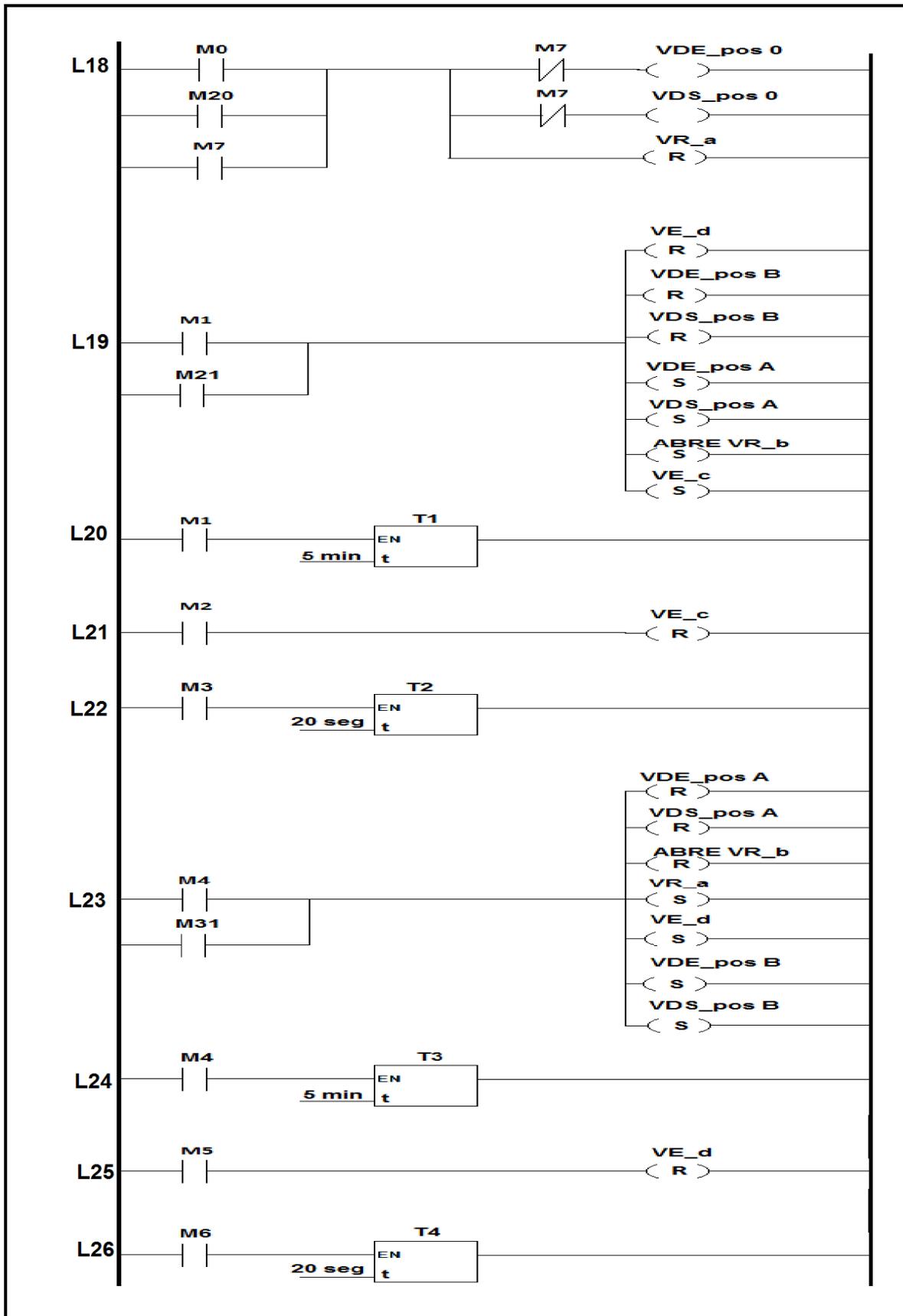


Figura 29 - Programação em Ladder (Continuação)

Fonte: Autoria própria

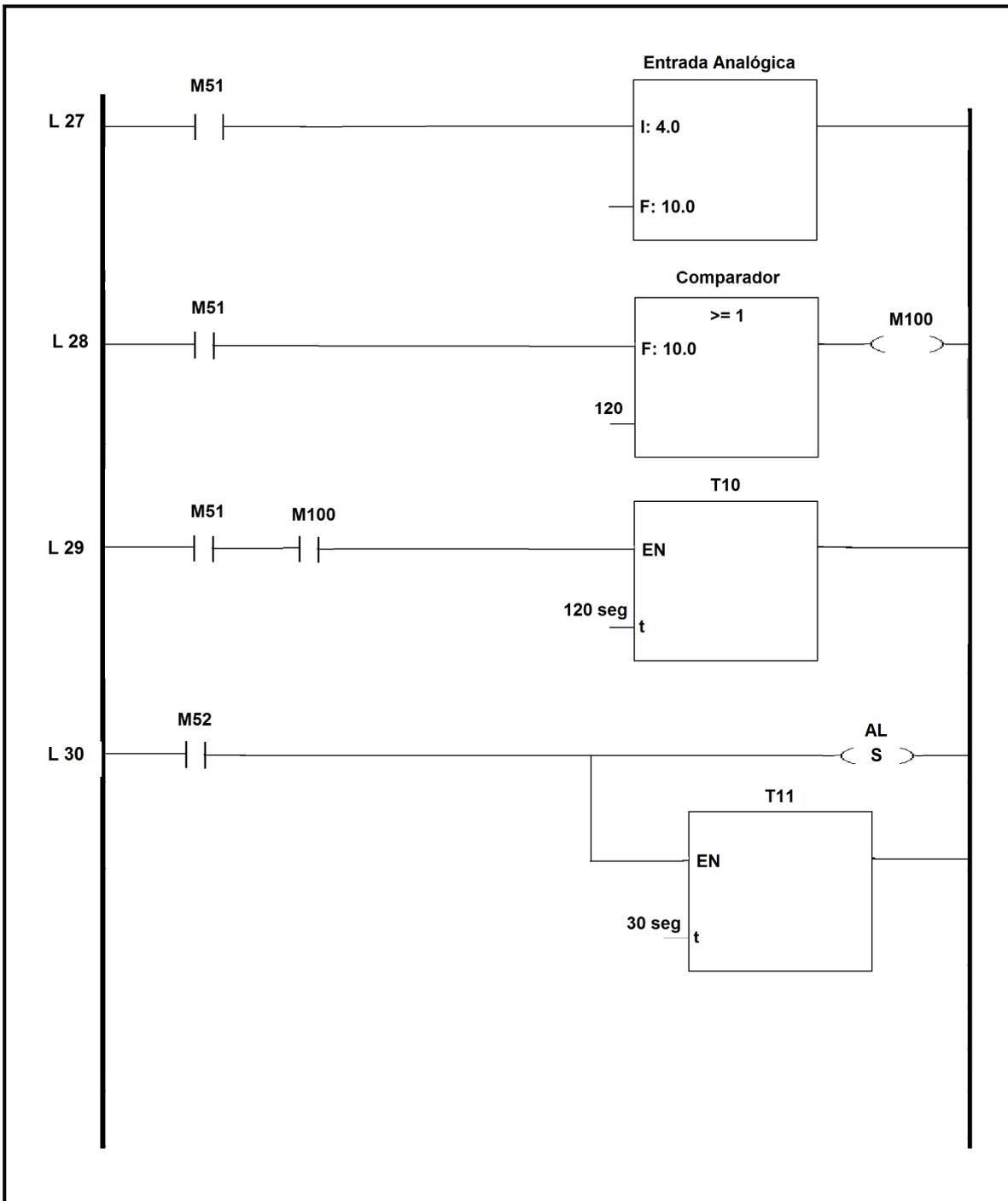


Figura 30 - Programação em Ladder (Continuação)

Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

Na realização deste trabalho, uma grande dificuldade encontrada foi a escassez de informações sobre os métodos utilizados pelos fabricantes de equipamentos de pequeno porte utilizados para secagem de ar comprimido. A literatura disponível descreve superficialmente o funcionamento dos equipamentos, com pequenas variações entre os modelos. As modelagens dos fenômenos envolvidos no processo de secagem do ar comprimido encontradas na literatura fogem em muito do principal objetivo proposto, sendo encontrados muitos trabalhos relativos à secagem de grãos e de madeira. Após vários meses de pesquisas e tempo de negociação é que foi obtida uma licença provisória para utilização do programa fornecido pela empresa PEDCO.

Este programa mostrou-se extremamente útil para avaliação de desempenho dos equipamentos secadores de ar comprimido da planta, além de possibilitar comparações com outros tipos de secadores, como os denominados de *termal swing* os quais fazem uso de algum tipo de aquecimento para regenerar o material adsorvente das torres de secagem.

Como mostrado na figura 21, os valores do ponto de orvalho do ar comprimido de saída variaram entre, aproximadamente, $-10\text{ }^{\circ}\text{F}$ e $40\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $4\text{ }^{\circ}\text{C}$), com a temperatura variando entre $21,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $23,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estes valores se encontram dentro das expectativas criadas pelos catálogos dos fabricantes de equipamentos de secagem de ar comprimido, onde, conforme a capacidade do equipamento, pontos de orvalho de até $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ são possíveis de serem alcançados.

Devido à falta de documentação e à dificuldade de se obter dados completos sobre os equipamentos diretamente com o fabricante as simulações facilitaram avaliações do processo de secagem, onde alterações nos parâmetros de controle são possíveis de análises sem interferência direta nos equipamentos.

Com relação ao controlador programável disponível para implementação da lógica de controle, um ponto a se destacar é a possibilidade que o mesmo disponibiliza de se trabalhar com seis linguagens de programação (*Ladder*, Lista de Instruções, Texto Estruturado, Diagrama de Blocos e Diagrama Sequencial). Como desvantagem cita-se a pequena tela de interface homem máquina.

Com o levantamento em campo dos dados de operação do processo foi possível a elaboração de diagramas de controle utilizando a linguagem *Grafset* (SFC ou Diagrama

Sequencial) e, a partir deles, a programação em linguagem *Ladder* de forma mais racional e rápida.

A instalação do CP em substituição ao controlador atualmente instalado requer estudo pormenorizado da adequação da instrumentação existente ao novo controlador. Para exemplificar, foi identificada a necessidade de substituição de sensores de pressão e temperatura e instalação de um sensor de ponto de orvalho ao longo da tubulação que alimenta as cargas da instalação, para monitoração confiável da umidade do ar comprimido.

No início do estudo do equipamento pensou-se ser possível obter todos os parâmetros de operação do sistema, o que no decorrer do tempo não se tornou realidade, devido ao não acesso aos dados do controlador. Por exemplo, não se tem ideia do valor da umidade e temperatura do “ar seco” que alimenta os instrumentos da instalação.

Durante o período de realização da pesquisa não foi possível a instalação de sensor de ponto de orvalho para monitoração da umidade de saída do ar comprimido. Desta maneira, os tempos de revezamento entre as torres de secagem não puderam ser confrontados com valores de umidade medidos na saída do equipamento, de forma a garantir a qualidade do ar comprimido disponibilizado para a instalação industrial. Com a instalação do CP, juntamente com adequação da instrumentação, o controle das variáveis de processo passará a ser acessível ao operador, tornando a operação e a manutenção do equipamento muito mais racional e econômica.

REFERÊNCIAS

ALTUS. **Manual de Utilização DU350/DU351**. Revisão D 05/2011. Novo Hamburgo, 2011.

AMORIM, Joselma Araújo de. **Caracterização de uma Coluna de Sílica Gel para Desumidificação de Ar**. 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.

ANTONIO, Graziella C. et al. **Conceitos de Processo e Equipamentos de Secagem**. FEAGRI. UNICAMP. Campinas, 2007. Disponível em <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/manuais/concproceqsec_07.pdf> Acesso em fevereiro/2012.

DALL'AMICO, Renato. **Fundamentos de Pneumática**. SMC Pneumáticos do Brasil. Apostila. São Paulo, 2003.

GASNET. Disponível em <http://www.gasnet.com.br/novo_termetricas/ciclo.asp> Acesso em novembro/2012.

GEORGINI, Marcelo. **Automação Aplicada: Descrição e Implementação de Sistemas Sequenciais com PLCs**. 4. ed. Editora Érica. São Paulo, 2003.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. Atlas. São Paulo, 2002.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION. **ISO 8573-1:2010 – Compressed Air. Part 1: Contaminants and purity classes**. Suíça, 2010.

LAGEMANN, Virgílio; PEREIRA, Carlos A. A; SANTÉRIO, Edison L. **Curso de formação de operadores de refinaria: utilidades, sistema térmico e ar comprimido**. Apostila. PETROBRAS. UNICENP. Curitiba, 2002.

METALPLAN. **Tratamento do ar comprimido**. Manual. São Paulo, 2008.

PARKER. **Tecnologia Pneumática Industrial**. Apostila. São Paulo, 2000.

PEDCO. Process and Equipment Development Corporation. Disponível em <<http://www.pedco2000.com>> Acesso em junho de 2012.

SABER ELETRÔNICA. Disponível em
<<http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/274>> Acesso em 15 abril de 2012.

SILVA, Emilio C. N. **Apostila de Pneumática**. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2002.

WEBER, Bill; WHITE, Donald. **The Adsorption Dryer Process**. Technical Article Program. Compressed Air: The Best Choice. Ohio, 2010.

ZATTONI, Célio Carlos. **Ar Comprimido. Curso Básico**. Departamento de Hidráulica e Saneamento. FATECSP. São Paulo, 2010.

APÊNDICE 1 – Ações sequenciadas no CP

Para implementação e simulação da lógica de controle por meio do controlador lógico programável, foi utilizada o quadro mostrado a seguir, onde os ciclos de secagem e regeneração de cada torre são controlados por tempos pré-estabelecidos. É desta maneira que o controlador atualmente instalado funciona, conforme os dados mostrados na tabela 5.

As variáveis denominadas de m1 até m6 foram implementadas no programa do CP como sequenciadoras das ações de acionamentos das válvulas de controle dos fluxos de ar comprimido de entrada e de saída.

Seq.	Ciclo	VDE	VDS	VR_a	VR_b	VE_c	VE_d
m1	Torre A secando	direciona fluxo de entrada para torre A	aberta para o fluxo vindo da torre A	fechada	aberta	Aberta	fechada
m2	Torre A secando e Torre B pressurizando	direciona fluxo de entrada para torre A	aberta para o fluxo vindo da torre A	fechada	aberta	fechada	fechada
m3	Mantem torres equalizadas (20s)	direciona fluxo de entrada para torre A	aberta para o fluxo vindo da torre A	fechada	aberta	fechada	fechada
m4	Torre B secando	direciona fluxo de entrada para torre B	aberta para o fluxo vindo da torre B	aberta	fechada	fechada	aberta
m5	Torre B secando e Torre A pressurizando	direciona fluxo de entrada para torre B	aberta para o fluxo vindo da torre B	aberta	fechada	fechada	fechada
m6	Mantem torres equalizadas (20s)	direciona fluxo de entrada para torre B	aberta para o fluxo vindo da torre B	aberta	fechada	fechada	fechada
m1	Torre A secando	direciona fluxo de entrada para torre A	aberta para o fluxo vindo da torre A	fechada	aberta	Aberta	fechada

Quadro 5 - Quadro de ações implementadas no CP

A seguir é mostrado a documentação gerada pelo programa de simulação fornecido com o CP.

Nome do arquivo: Secadores.pro
Diretório: C:\Program Files\Altus\MasterTool IEC\Projects
Data alter.: 1.8.12 22:08:40 / V2.3
Título:
Autor: Andre Cruz
Versão:
Descrição:

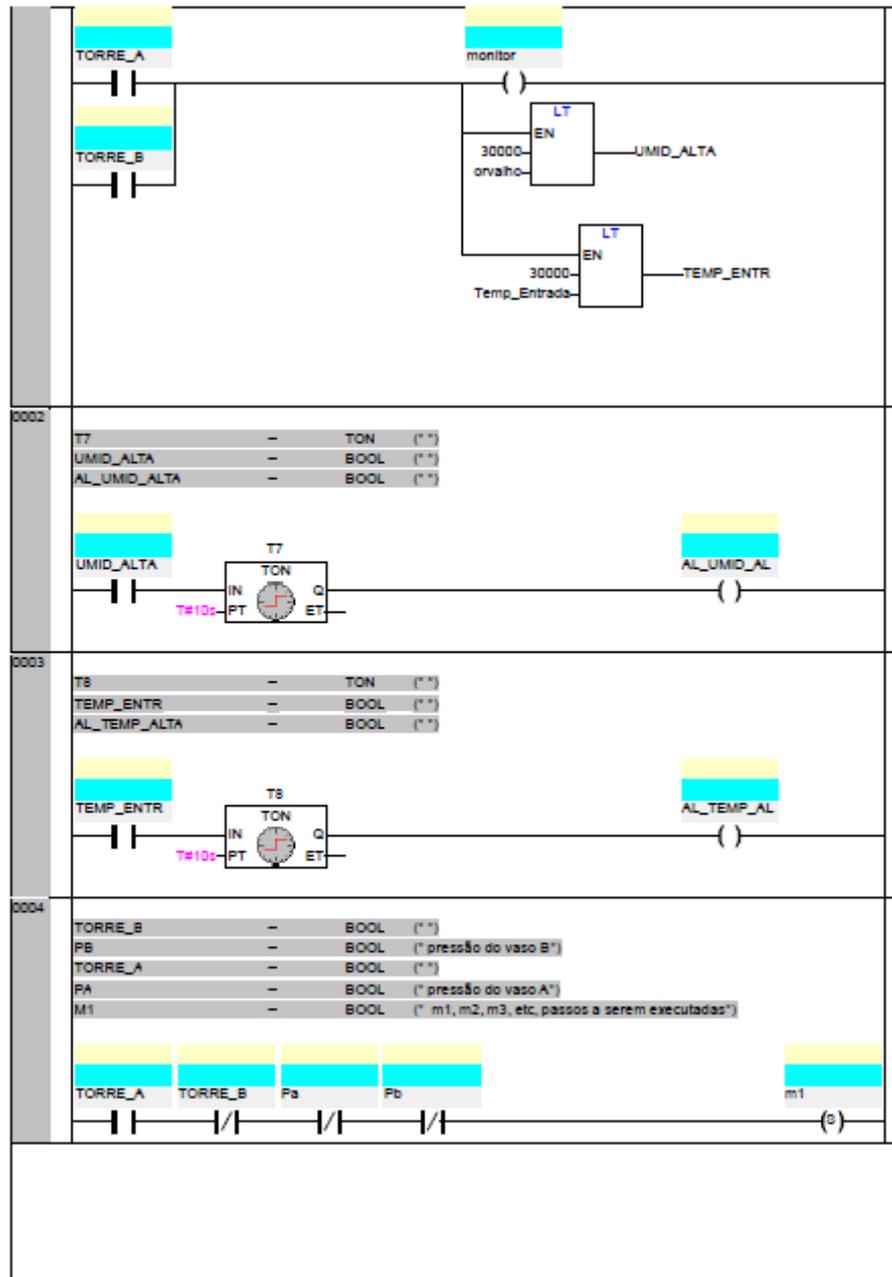
0001	PROGRAM PLC_PRG
0002	VAR
0003	END_VAR
0001	
	SECADORES

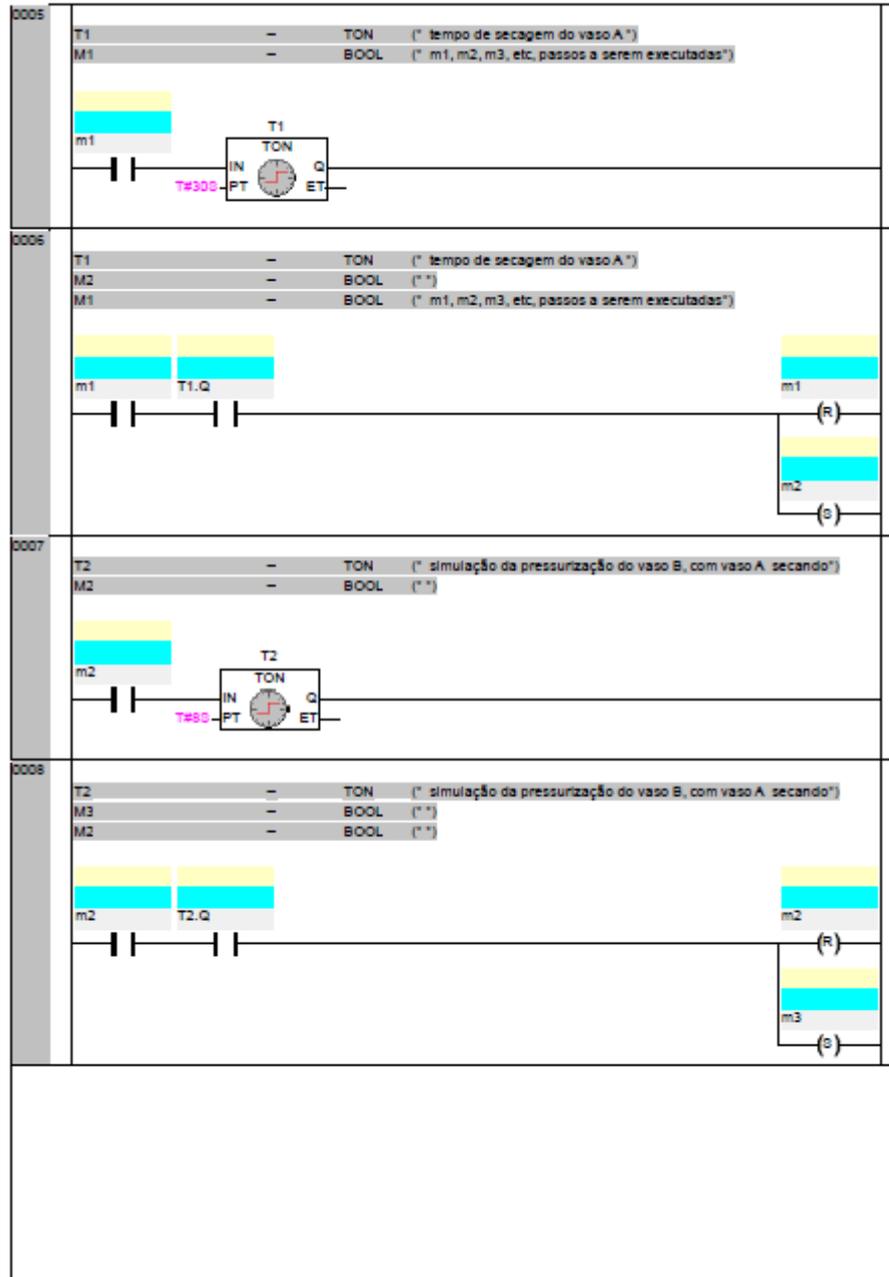
0001	PROGRAM SECADORES
0002	VAR
0003	TORRE_A: BOOL;
0004	TORRE_B: BOOL;
0005	VDS_E:BOOL; ("válvula direcional de saída do vaso A")
0006	VDS_D:BOOL; ("válvula direcional de saída do vaso B")
0007	VDE_E:BOOL; ("válvula direcional de entrada do vaso A")
0008	VDE_D:BOOL; ("válvula direcional de entrada do vaso B")
0009	Pa: BOOL; ("pressão do vaso A")
0010	Pb: BOOL; ("pressão do vaso B")
0011	m1: BOOL; (" m1, m2, m3, etc, passos a serem executadas")
0012	m2: BOOL;
0013	m3: BOOL;
0014	m4: BOOL;
0015	m5: BOOL;
0016	m6: BOOL;
0017	VR_b AT %QX0.2: BOOL; (" válvula de retenção do vaso b ")
0018	VE_c AT %QX0.3: BOOL; (" válvula de exaustão do vaso b ")
0019	VR_a AT %QX0.4: BOOL; (" válvula de retenção do vaso a ")
0020	VE_d AT %QX0.5: BOOL; (" válvula de exaustão do vaso b ")
0021	T1: TON; (" tempo de secagem do vaso A ")
0022	T2: TON; (" simulação da pressurização do vaso B, com vaso A secando")
0023	T3: TON; (" tempo de equalização das pressões dos vasos ")
0024	T4: TON; (" tempo de secagem do vaso B")
0025	T5: TON; (" simulação da pressurização do vaso A, com vaso B secando")
0026	T6: TON; (" tempo de equalização das pressões dos vasos ")
0027	orvalho AT %IW4: WORD; (" sensor de orvalho do ar de saída ")
0028	Temp_Entrada AT %IWS: WORD; ("sensor de temperatura do ar de entrada ")
0029	monitor: BOOL;
0030	AL_UMID_ALTA: BOOL;
0031	AL_TEMP_ENTR: BOOL;
0032	UMID_ALTA: BOOL;
0033	TEMP_ENTR: BOOL;
0034	T7: TON;
0035	T8: TON;
0036	AL_TEMP_ALTA: BOOL;
0037	END_VAR

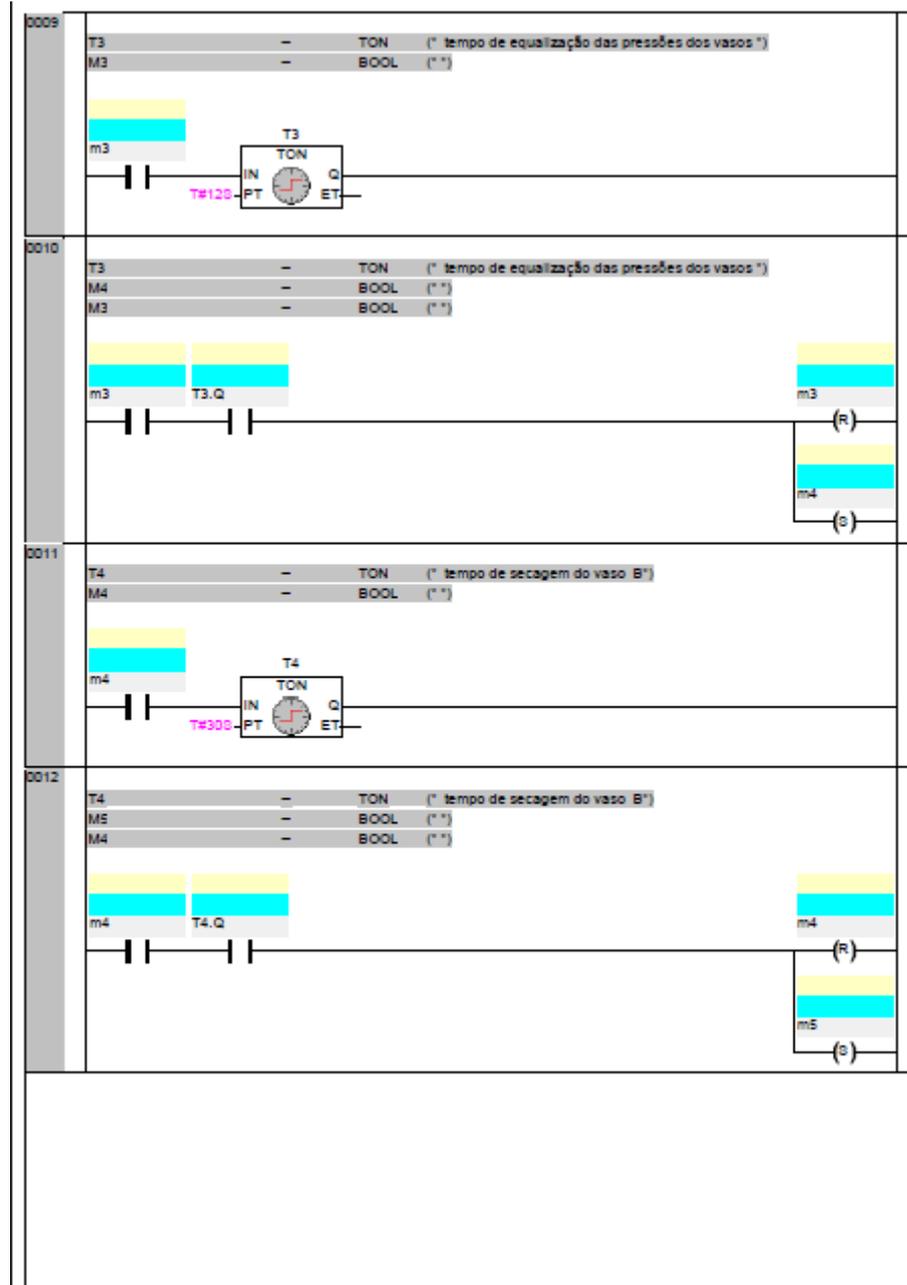

```

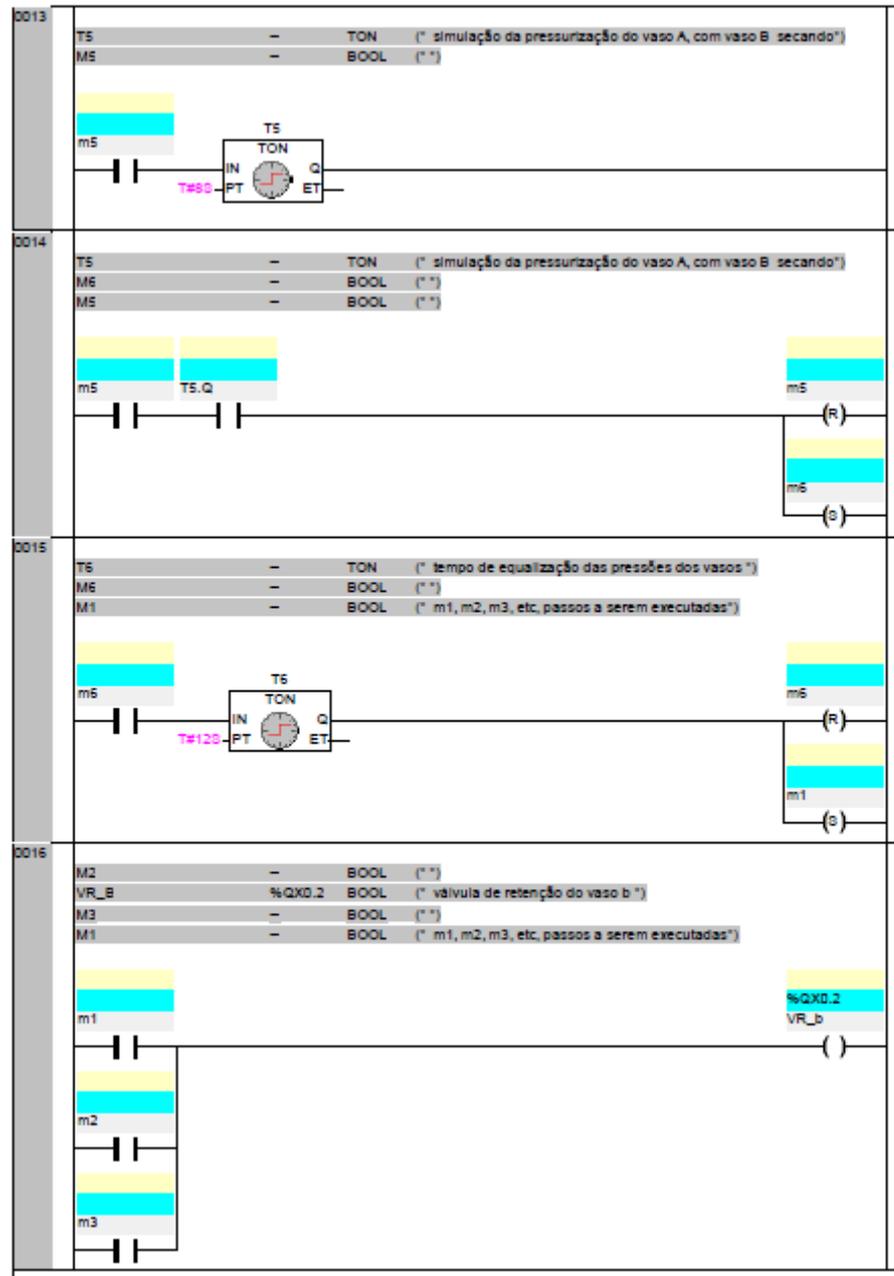
graph TD
    Init[Init] -- TRUE --> Step1[Step1]
    Step1 -- TRUE --> InitCoil((Init))
  
```

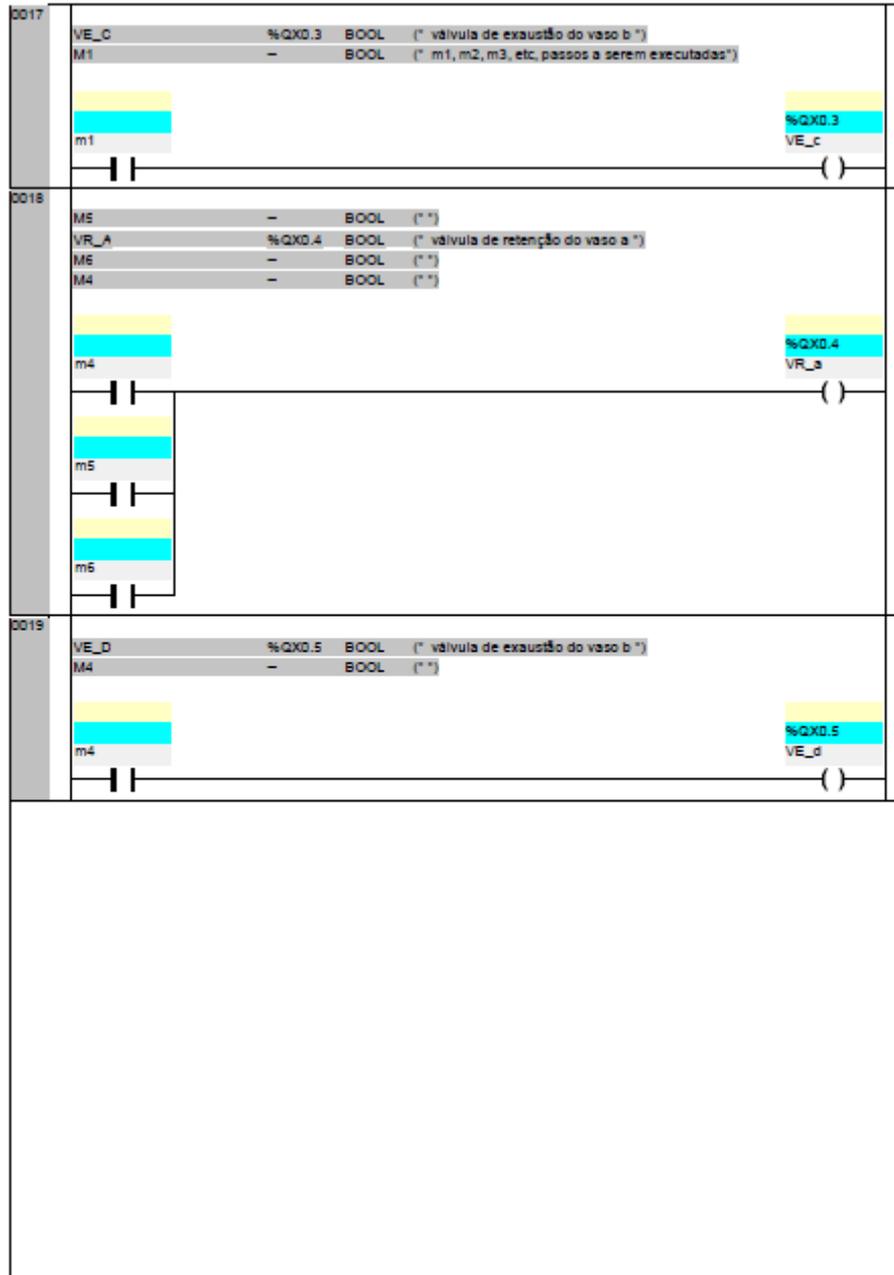

SECADORES (PRG-SFC).AçãoStep1 (LD)			
0001	TORRE_B	-	BOOL (" ")
	TEMP_ENTRADA	%IWS	WORD (" sensor de temperatura do ar de entrada ")
	ORVALHO	%IW4	WORD (" sensor de orvalho do ar de saída ")
	UMID_ALTA	-	BOOL (" ")
	TORRE_A	-	BOOL (" ")
	TEMP_ENTR	-	BOOL (" ")
	MONITOR	-	BOOL (" ")











	Página
Informações do projeto	A
PLC_FRG (PRG-FBD)	2-1
DECADORES (PRG-SFC)	3-1
DECADORES (PRG-SFC).AçãoStep1 (LD)	3-1