



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

PMC – 581
PROJETO MECÂNICO II

10 (Dez)

[Handwritten signature]

CONTROLE DE UMA LINHA DE AR COMPRIMIDO A EVENTOS DISCRETOS

Prof. Orientador: Diolino J. dos Santos Filho
Alunos: Carlos Alberto Miserochi de Oliveira
Caio Eduardo Kiss Cezar

Nº 2233612
Nº 2233741

1	- OBJETIVOS DO TRABALHO.....	3
2	- METODOLOGIA DE TRABALHO.....	6
3	- METODOLOGIA DE PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE.....	9
	3.1 - <i>Análise e definição das necessidades</i>	11
	3.1.1 - Identificação do objetivo final do sistema.....	12
	3.1.2 - Descrição do sistema.....	12
	3.1.3 - Estudo do objeto de controle, equipamentos e instalações.....	14
	3.1.3.1- Diagrama esquemático (estrutural) do objeto de controle.....	14
	3.1.3.2 - Lista preliminar dos atuadores	16
	3.1.3.3 - Lista preliminar dos detectores	17
	3.1.3.4 - Lista preliminar dos intertravamentos.....	17
	3.1.3.5 - Lista da infraestrutura necessária	18
	3.1.4 - Organização dos conhecimentos sobre os dispositivos e a instalação.....	19
	3.1.5 - Levantamento e análise das funções de controle.....	23
	3.2 - <i>Projeto do sistema de controle:</i>	27
	3.2.1 - Divisão das funções e definição das interfaces	27
	3.2.2 - Definição e alocação dos sinais de entrada e saída	28
	3.2.3 - Definição da estrutura do programa de controle	33
	3.3 - <i>Projeto e implementação de software de controle:</i>	42
	3.3.1 - Projeto do programa.....	42
	3.3.2 - Simulação.....	63
	3.3.3 - Carregamento do programa na máquina.....	63
	3.4 - <i>Etapa de teste</i>	65
	3.4.1 - Testes finais do sistema.....	96
4	- CONCLUSÕES.....	97
5	- BIBLIOGRAFIA	99

1 - Objetivos do trabalho

A primeira premissa de um projeto a ser definida é o objetivo. Ou seja, o foco do trabalho. Todos os esforços, cálculos, tabelas e conclusões devem tender a um objetivo único.

No presente trabalho o objetivo é projetar um sistema de controle para automatizar uma linha de ar comprimido a eventos discretos. Essa linha é real e já foi implementada na fábrica japonesa do ramo de celulosas Jarí, que está localizada no delta do rio Amazonas, próximos à cidade de Boca do Jarí na divisa do Pará com Amapá.

Normalmente os projetos de sistemas de ar comprimido são feitos utilizando-se sistemas puramente eletropneumáticos, ou seja, sistemas que utilizam apenas válvulas e sensores eletropneumáticos. No entanto, devido às características do projeto em questão, esta metodologia "tradicional" não se mostrou eficiente, tornando o projeto muito difícil de ser executado e muito pouco flexível. Desta forma optou-se por adotar para o projeto uma metodologia de eventos discretos, realizando o projeto de forma a obter um sistema controlado por um CLP.

Ao longo da aplicação dessa metodologia certamente serão detectados erros, e principalmente, possíveis melhorias no processo de controle realizado anteriormente.

Deve ficar claro que o objetivo principal deste trabalho é aplicar uma metodologia de eventos discretos para um tipo de problema onde esta metodologia não costuma ser aplicada, e demonstrar as vantagens que metodologia pode ter sobre a tradicional. E embora tenha sido projetado anteriormente um sistema de controle para esta linha de ar comprimido, o sistema de controle deste trabalho não será simplesmente uma adaptação do projeto original, mas sim um projeto totalmente refeito, utilizando-se a metodologia de eventos discretos.

Para termos uma completa especificação do problema em questão, foi entrado em contato com o engenheiro responsável pela elaboração do projeto e implementação física do sistema original.

Espera-se, portanto, ao longo da aplicação da metodologia obter um sistema de controle onde seja possível identificar quatro benefícios básicos:

- **Reutilização:** caso no futuro a idéia seja ampliar a linha como, por exemplo, com o incremento de mais um compressor ao sistema – com um controle sistematizado fica fácil realizar essa alteração no sistema sem ter que modificar o sistema como um todo. Como o controle está subdividido em caixas pretas, no caso de uma reutilização apenas deve ser alterada a caixa preta que será diretamente afetada com a mudança. Com isso ganha-se tempo e praticidade, além de uma melhor compreensão do sistema como um todo.
- **Atualização:** é possível que com o passar do tempo a demanda da fábrica em relação ao ar comprimido gerado mude. Nesse caso seria necessária a alteração do algoritmo para um outro mais atualizado, que possa realizar funções que antes não eram necessárias. Essa metodologia empregada possibilita essa alteração do algoritmo de maneira extremamente fácil, pois ele considera a padronização de recursos bem como a otimização das ferramentas utilizadas. Trabalhando com funções padrões e que já tem uma pré-disposição para eventuais alterações, o trabalho se torna muito mais ágil e simples de ser realizado.
- **Manutenção:** caso no futuro a idéia seja trocar uma válvula por outra mais eficiente, por exemplo – com um controle sistematizado essa troca se torna simples, basta alterar a parte referente àquela válvula e alterar apenas os controles a ela subordinados, ou seja, os itens em nível inferior a essa. Todos os itens de nível superior não precisam ser alterados, mais uma vez

ganhando-se tempo e praticidade. Se o controle não for sistematizado fica muito complicado deduzir o que vai ser alterado no sistema como um todo com uma troca de uma válvula, pois o sistema não é subdividido e é sempre visto como um todo. Além disso, para a realização de manutenções periódicas, tanto preventivas quanto devido à deterioração dos componentes, a sistematização do controle oferece uma grande rapidez no serviço. Pequenas alterações são feitas, apenas a nível local, sem precisar fazer alterações no controle global. O que não seria da mesma forma com um controle geral sem níveis hierárquicos.

- **Documentação:** a sistematização vai resultar na elaboração de uma documentação clara e concisa do software de controle e interface homem-máquina. Um software bem documentado possibilita fácil entendimento do sistema, mesmo para leigos e também facilita muito o trabalho em caso de futuras alterações. Se não houver documentação adequada, o código seria incompreensível para qualquer pessoa, necessitando então que o próprio programador estivesse presente para realizar as alterações o que muitas vezes torna-se inviável.

2 - Metodologia de trabalho

Antes de se iniciar a aplicação da metodologia é extremamente importante verificar se o sistema pode ser reduzido a um sistema de eventos discretos. É fundamental que o sistema uma vez simulado com variáveis discretas, não perca informações e consiga simular exatamente o sistema real. A princípio pode parecer que o sistema não pode ser tratado como um sistema de eventos discretos, já que é regido por variáveis contínuas, como a pressão na linha. No entanto, o sistema em si não reage continuamente com as variações destas variáveis. No caso da pressão da linha, por exemplo, apenas quando esta atinge certos valores fixos, é que serão tomadas ações pelo sistema de controle. O que mostra que o sistema pode ser tratado como um sistema a eventos discretos.

Uma vez demonstrado que o sistema é discretizável deve-se proceder à aplicação da metodologia.

Inicialmente devemos deixar claro o conceito de sistematização.

Sistematização pode ser definida como a definição de tarefas em cada etapa de desenvolvimento e especificação dos parâmetros de avaliação da qualidade de cada parte dentro de uma visão geral do sistema de controle. Ainda é necessário considerar a padronização dos recursos e a otimização das ferramentas utilizadas para implementar a sistematização e facilitar o gerenciamento do desenvolvimento.

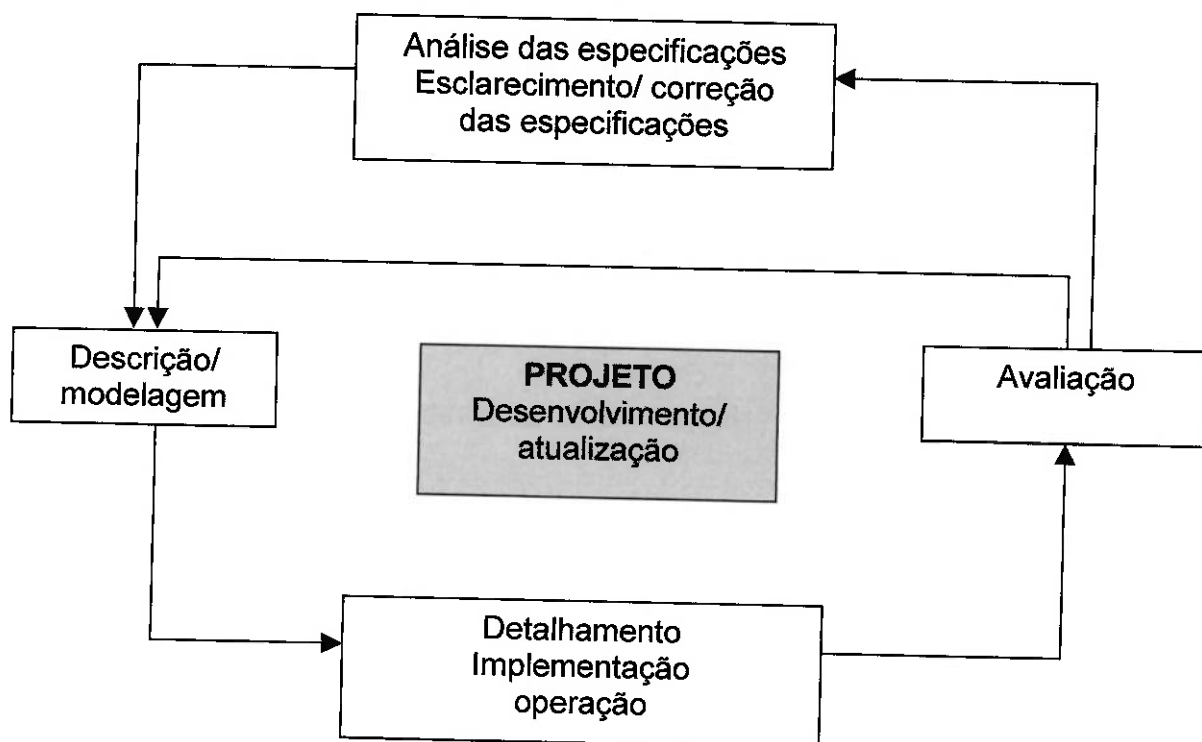
Ao se considerar o desenvolvimento de um sistema de controle surge um conceito fundamental, a modularização.

Os módulos são os sub-sistemas componentes de um sistema maior e funcionalmente envolvem também partes ou dispositivos (ferramentas) que realizam o suporte do desenvolvimento de cada etapa. A correta execução de tarefas deve ser assegurada através de documentação apropriada dos resultados e realização de revisões das etapas anteriores.

Uma grande dificuldade que pode surgir é a realização da etapa da definição das necessidades, pois tais definições não são claras e, além disso, é

muito difícil verificar se as especificações estão de acordo com as necessidades do usuário, operador ou cliente. Existem também outras etapas que geram dificuldades de implementação o que tem demonstrado a impossibilidade prática de um desenvolvimento global seqüencial sem deficiências.

Para se solucionar esse problema as revisões de cada etapa do desenvolvimento e do sistema são formalizadas dentro do conceito de prototipagem. Assim, as revisões de cada etapa do desenvolvimento e do sistema são formalizados dentro do conceito de prototipagem, onde o projeto e desenvolvimento são realizados repetindo-se o seguinte ciclo: concepção (descrição) do protótipo, operação do protótipo e avaliação do protótipo.



O Conceito da prototipagem vai trazer benefícios que não puderam ser adquiridos na ocasião da implementação real do processo, pois utilizando técnicas de simulação das operações em cada etapa do processo, consegue-se detectar

pequenos detalhes no projeto que podem fazer uma grande diferença no sistema como um todo.

A metodologia deve considerar as diferentes abordagens em relação ao tipo do objeto de controle e ao porte do sistema. Devem ser consideradas as técnicas de reutilização, técnicas de simulação das operações na etapa de projeto, técnica de GRAFCET, que possibilitam o projeto estruturado, técnica com entrada gráfica (esquemática) do procedimento de controle das operações da máquina, etc...

O controle e a construção dessa linha de ar comprimido já foi realizado na planta há alguns anos atrás. Porém a metodologia seguida foi do tipo funcional. O foco foi o funcionamento do sistema como um todo. Em todos os passos do projeto a principal preocupação foi como o sistema inteiro se comportaria e funcionaria. Em nenhum momento foram feitas subdivisões, caixas pretas ou mesmo classificação em níveis hierárquicos. Isso torna extremamente complicado qualquer tipo de alteração no sistema, pois fica difícil isolar o sistema e precisar em que partes do sistema as alterações devem ser feitas.

Esse trabalho realizará um controle do tipo estruturado. O controle é subdividido em níveis hierárquicos. Inicialmente em primeiro nível o controle é visto com um todo. Em seguida são feitos refinamentos sucessivos até que se torne viável a implementação do código de controle. As entradas e as saídas são claras para cada módulo. Isso torna o sistema de fácil modificação, pois a divisão em caixas pretas (black-box) possibilita a modificação local sem alterações no sistema como um todo.

3 - Metodologia de projeto de Sistema de Controle

Na análise de controle de SED deve ser considerado o ciclo de vida de todo o projeto e desenvolvimento do sistema de controle.

As fases em ordem são as seguintes:

- Análise e definição das necessidades
- Projeto do sistema de controle
- Projeto e desenvolvimento do software de controle
- Testes

3.1 - Análise e definição das necessidades:

3.1.1 - Identificação do objetivo final do sistema:

3.1.2 - Descrição do sistema

3.1.3 - Compreensão do objeto de controle, instalações e equipamentos.

3.1.4 - Organização dos conhecimentos sobre o sistema de controle (dispositivo de controle, equipamentos e periféricos, etc...)

3.1.5 - Abstração e análise das funções de controle, como os modos de operação e monitoração das instalações e equipamentos.

3.2 - Projeto do sistema de controle:

3.2.1 - Divisão das funções e definição das interfaces

3.2.2 - Definição e alocação dos sinais de entrada e saída

3.2.3 - Definição da estrutura do programa de controle

3.3 – Projeto e desenvolvimento de software de controle:

3.3.1 - Projeto do programa

3.3.2 – Simulação

3.3.3 – Carregamento do programa na máquina

3.4 - Etapa de teste

3.4.1 - Testes finais do sistema

3.1 - Análise e definição das necessidades

Para qualquer projeto, o primeiro e talvez mais importante passo é a minuciosa análise das necessidades, levando a uma detalhada definição das necessidades. Estas etapas, embora possam parecer fáceis, muitas vezes podem se tornar complexas e ambíguas.

Algumas das características destas etapas são:

- Necessidade de organizar as relações humanas, ou seja, é necessário uma forma de agrupar as diferentes informações, exigências, considerações, etc..., provenientes das várias pessoas envolvidas no projeto.
- Necessidade de amplo conhecimento e know-how, ou seja, não é possível fazer uma boa análise do sistema sem um profundo conhecimento do assunto em questão.
- Reconsideração dos conceitos, ou seja, muitas vezes ao longo do projeto percebe-se, por exemplo, que detalhes importantes não haviam sido considerados, logo se deve constantemente reconsiderar os conceitos.
- Final indeterminado, ou seja, no início do projeto pode ser difícil de se determinar até que ponto de detalhamento se quer chegar.

Como resultado final de uma análise de necessidades pode-se documentar a definição das necessidades, através do qual se pode analisar corretamente a aceitação da especificação por parte do usuário operador e cliente, evitando que no futuro se deseje mudar aspectos do projeto. Além disso, facilita a previsão dos custos e do cronograma das atividades.

Esta etapa do projeto pode ser dividida nas seguintes atividades:

3.1.1 - Identificação do objetivo final do sistema

Antes de se analisar as necessidades e características do objeto de controle deve-se identificar e principalmente compreender o objetivo final do sistema, uma vez que em todas as etapas posteriores do projeto, o objetivo final será usado como referência para todas as definições tomadas. Esse objetivo, por sua vez, já foi detalhado anteriormente.

3.1.2 - Descrição do sistema

O sistema consiste na automação e controle, otimizado, de três compressores de ar, responsáveis pelo suprimento de ar comprimido de uma fábrica de celulose.

Inicialmente escolhe-se manualmente na interface com o usuário, qual será o compressor primário e qual será o secundário e o reserva. O sistema checa falhas e caso não haja, o controle pode então ser iniciado. Escolhe-se também o setpoint de pressão da linha.

O primário vai trabalhar neste valor determinado pelo setpoint definido pelo usuário. O secundário vai trabalhar com setpoint 0,5 bar abaixo do principal. Quando a pressão da linha abaixa até o valor definido no setpoint para o compressor secundário, este então entra em operação.

O terceiro compressor, também chamado de reserva tem seu setpoint precisado 1 bar abaixo do principal. Este vai entrar em operação em 2 casos: quando a pressão da linha abaixar do valor de seu setpoint e quando ocorrer falha em qualquer um dos outros compressores, nesse caso ele vai passar a substituir esse. Nesse caso a pressão da linha não precisa estar necessariamente abaixo do seu setpoint para que esse entre em funcionamento. Enquanto esse compressor reserva estiver operando em substituição de outro compressor com falha, reparos podem ser feitos neste sem haver prejuízos na linha.

Cada compressor está comandado para ser desligado quando a pressão exceder em 0,5 bar de seu setpoint correspondente.

Na iniciação do sistema, após ser dado o comando para ligar o motor, em alguns segundos o controle verifica se o motor foi ligado através de sensores de feedback.

Cada compressor é basicamente composto de:

- Um filtro para a entrada de ar
- Um motor trifásico que comanda o funcionamento dos pistões que realizam a compressão
- Um reservatório que vai armazenar o ar que vai para a linha
- Um sistema de pressurização composto por 3 pistões de diâmetros variáveis
- Um sensor de feedback ligado ao motor que confere periodicamente se o motor está em funcionamento
- Um sensor de temperatura ligado ao motor que em caso de temperatura excessiva vai indicar falha no compressor
- Um sensor de sobretensão ligado ao disjuntor de acionamento do motor que em caso de sobretensão na rede vai indicar falha no compressor
- Um sensor de temperatura ligado ao sistema de compressão que em caso de temperatura excessiva vai indicar falha no compressor
- Um sensor de pressão ligado ao reservatório interno do compressor que vai fornecer dados de pressão ao controlador para que o controle possa ser realizado
- Uma válvula de segurança mecânica ligada ao reservatório do compressor
- Uma válvula de escape(alívio) ligada ao reservatório do compressor com um silenciador
- Um acionamento ligado à válvula de escape
- Um acionamento ligado ao disjuntor de acionamento do motor do compressor

Todos esses componentes estão presentes em cada um dos três compressores. As saídas dos 3 compressores estão ligadas e resultam em uma rede de distribuição da linha

Todos os sensores que podem indicar falhas estão ligados ao CLP que por sua vez, aciona um ícone falha na interface com o usuário.

Os sensores de acionamento também indicarão na interface se a válvula ou o motor correspondente está acionado

A válvula de alívio só entrará em operação quando a pressão da linha indicada pelo sensor de pressão passar de 1 bar acima do setpoint do compressor principal.

A válvula de segurança será acionada automaticamente por meio mecânicos em caso de pressurização excessiva. O valor pelo qual essa válvula será acionada pode ser manualmente ajustado na própria válvula.

3.1.3 - Estudo do objeto de controle, equipamentos e instalações.

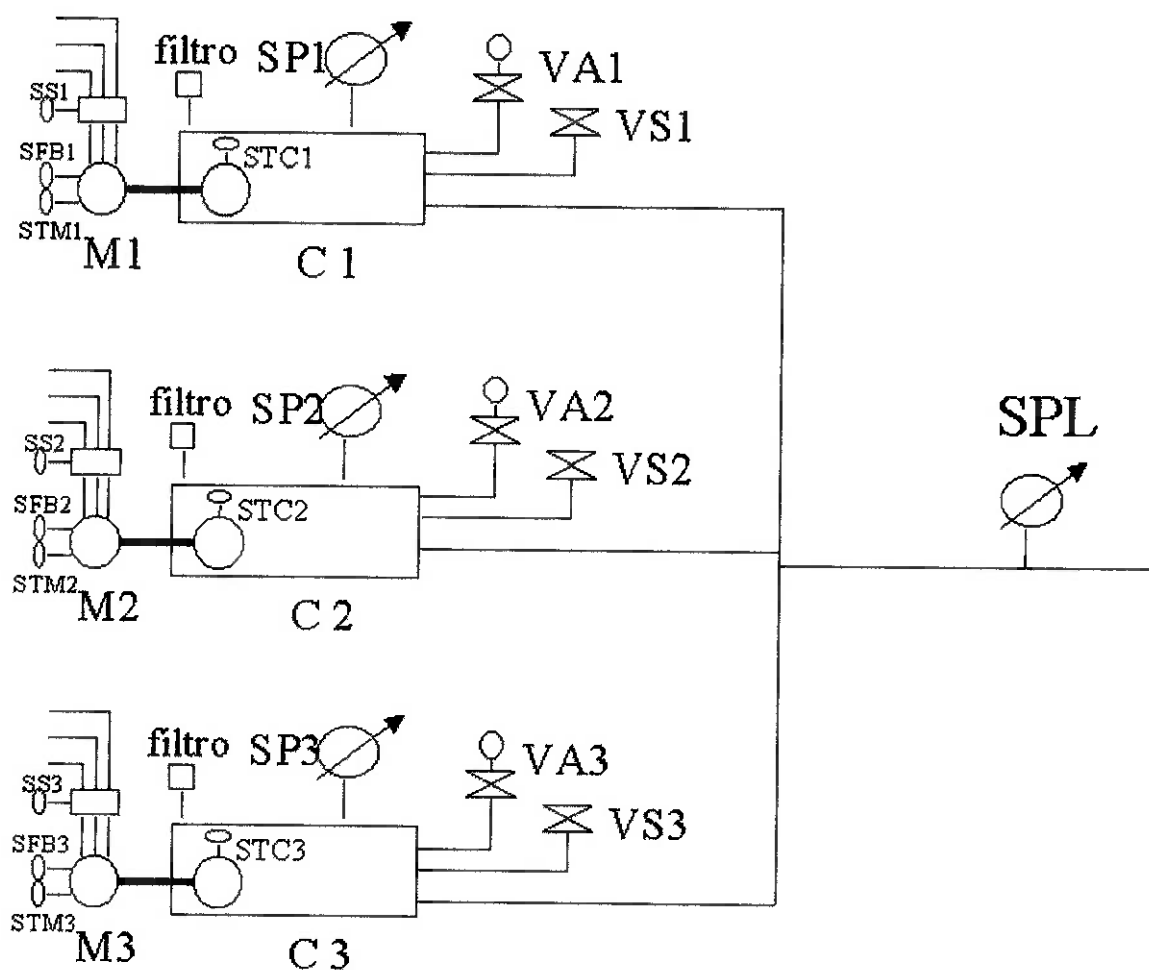
Em um projeto qualquer de engenharia, certamente o objeto de controle será formado por vários elementos, desta forma, a melhor maneira de compreender o objeto de controle é estudar as funções e características de cada elemento separadamente, assim como as interações entre eles.

Para isto devem ser elaborados os seguintes documentos:

3.1.3.1- Diagrama esquemático (estrutural) do objeto de controle

É um diagrama contendo os elementos do objeto de controle, seus elementos de atuação, detectores e os inter-relacionamentos entre eles. Com isto se pode facilmente ter uma boa idéia do funcionamento geral do sistema,

facilitando todas as demais etapas do projeto, além de tornar fácil à compreensão do sistema para novos envolvidos no projeto, por exemplo.



3.1.3.2 - Lista preliminar dos atuadores

É uma lista com todos os atuadores, suas principais especificações, descrição do inter-relacionamento com o sistema mecânico, etc.

Pesquisando-se e analisando-se catálogos técnicos de diversos fornecedores, foram selecionados os seguintes atuadores, de acordo com as necessidades e características do nosso projeto:

Compressores:

Foram selecionados os compressores da Schulz, modelo MSV40, por apresentarem as características de vazão, pressão, potência, etc. desejados.

Segue abaixo a lista preliminar dos compressores:

Código	C1	C2	C3
Descrição	compressor 1	compressor 2	compressor 3
Potência (hp)	10	10	10
Tensão	220 V	220 V	220 V
Pressão (bar)	12	12	12
Vazão (l/min)	1132	1132	1132
Fabricante	Schulz	Schulz	Schulz
Modelo	MSV 40	MSV 40	MSV 40

Deve-se lembrar que durante o ciclo do projeto é possível que se mudem certos parâmetros, o que pode levar a alterações na escolha dos atuadores no futuro.

3.1.3.3 - Lista preliminar dos detectores

É uma lista com todos os detectores, suas principais especificações, descrições, etc. Mais uma vez, analisando-se dados de catálogos técnicos fornecidos por diversos fabricantes, e levando-se em consideração as características e necessidades do nosso projeto, foram selecionados os seguintes detectores:

Sensores de pressão:

Foram selecionados devido as suas características técnicas os sensores de pressão da SensorExpress.

Código	SP1	SP2	SP3	SPL
Descrição	Sensor pressão C1	Sensor pressão C2	Sensor pressão C3	Sensor pressão linha
Tensão saída	0~6 V	0~6 V	0~6 V	0~6 V
Pressão (bar)	0~12	0 ~ 12	0 ~ 12	0 ~ 12
Fabricante	SensorExpress	SensorExpress	SensorExpress	SensorExpress

Sensores de temperatura:

Foram escolhidos para medir a temperatura dos motores e compressores os termostatos digitais da Inova, que podem controlar temperaturas entre 0 °C até 255°C, o que está dentro da faixa que desejamos. Esses sensores de temperatura enviam um sinal ao sistema de controle quando a temperatura ultrapassar um certo valor de temperatura escolhido pelo usuário.

3.1.3.4 - Lista preliminar dos intertravamentos

Nesse item é importante definir a lista com todos os intertravamentos entre os elementos, intertravamentos de segurança, etc.

Os intertravamentos podem ser definidos como funções que não permitem qualquer tipo de mudança de estado ou de ação até que outros estados ou ações estejam completadas.

Os principais objetivos dos intertravamentos são garantir a segurança, evitar danos ao equipamento e evitar encadeamento de acidentes. No caso prático, é necessário que uma atenção especial seja dedicada para que os equipamentos não sejam danificados devido a erros de operação ou falhas de funcionamento.

No sistema os intertravamentos vão determinar o sequenciamento de ações e condições para início e continuidade de funcionamento. Com isso é possível concluir que existem intertravamentos de partida, de funcionamento e de processo. No estágio atual de desenvolvimento do projeto é difícil precisar os intertravamentos de funcionamento e processo, então esse é um item a ser concluído nas etapas posteriores do projeto.

Contudo é possível especificar a existência de um intertravamento de partida. Quando o sistema é iniciado, é feito um check up geral das falhas e existe um sensor ligado ao acionamento do motor que vai indicar se realmente o acionamento foi acionado. Também existe um sensor de feedback que vai dar como resposta se o motor passou a funcionar. Com isso pode-se dizer que esses sensores formam um intertravamento de funcionamento, na qual o sistema só começa a funcionar se a saída de todos os sensores não resultar em falha. As especificações desses sensores, bem como as entradas e as saídas serão mais bem detalhadas no próximo item.

3.1.3.5 - Lista da infraestrutura necessária

Conforme o caso pode ser necessário uma infraestrutura para o funcionamento do sistema, seja hidráulica, elétrica, pneumática, etc.

Para o nosso projeto a infraestrutura necessária consiste de:

- Rede elétrica: para o funcionamento dos sistema é necessária uma rede elétrica trifásica, uma vez que os compressores funcionam com motores elétricos trifásicos. Deve-se, portanto ter três fontes de alimentação trifásica na região da fábrica onde forem ser colocados os compressores, uma para cada compressor.

- Tubulação de ar comprimido: não faz parte do presente trabalho o projeto da tubulação para o ar comprimido. Considera-se que essa já deve estar disponível na fábrica, sendo, portanto considerada por nós como infraestrutura necessária, e não parte do sistema a ser projetado. Deve ser uma tubulação que resista a pressão a que desejamos submeter à linha (no máximo 12 bar).

- Tubulação para os sinais de controle: toda a comunicação entre o sistema e o controle é feita através de sinais elétricos que são transmitidos por cabos. Deve-se, portanto ter uma tubulação adequada para que se passem esses cabos, de forma a se evitar que estes sejam danificados, o que causaria erros nas leituras e nos acionamentos, fazendo com que todo o sistema fosse prejudicado.

3.1.4 - Organização dos conhecimentos sobre os dispositivos e a instalação

É importante levantar e organizar de maneira eficiente as informações que o dispositivo de controle necessita considerar com relação aos dispositivos a serem controlados.

Deve-se, portanto levantar todo tipo de informação como capacidade de memória, velocidade de processamento, número de entradas e saídas, funções de interrupção, etc.

Além disso, deve-se levantar os critérios para a definição da fonte de alimentação dos acionamentos, fiação dos sinais, prevenção contra falta de energia, etc.

Existem algumas informações presentes neste item que vão depender de etapas futuras, portanto ainda não podem ser precisados.

O entendimento e estudo do objeto de controle já foram realizado, porém um maior nível de detalhamento quanto ao dispositivos de instalação é necessário, são eles:

- Sensores de pressão (SP1, SP2, SP3, SPL)

–**Entrada:** pressão no ponto de medição

–**Saída:** sinal analógico que indica para o sistema de controle a pressão no ponto

Esses sensores são de fundamental importância para a realização do controle. Através dos sinais enviados por estes sensores, é possível ser feita a realimentação e fechar a malha do controle. Estes sinais de saída vão estar sendo medidos constantemente, e são eles que vão gerar ações para o controlador solicitar o início de operação de um determinado compressor, ou mesmo o desligamento deste.

- Sensores de temperatura (STM1, STM2, STM3, STC1, STC2, STC3)

–**Entrada:** temperatura no ponto de medição

–**Saída:** sinal digital que indica para o sistema de controle quando a temperatura no ponto atinge um certo valor.

Esses sensores são extremamente importantes por questão de segurança. Como o sistema envolve motores e sistema de compressão, que são elementos onde vai haver atividade mecânica intensa, ambos são altamente susceptíveis ao superaquecimento. Qualquer falha no elemento refrigerador do compressor, seja por falta ou vazamento de óleo de refrigeração, ou por obstrução na passagem do ar que vai refrigerar o compressor, pode resultar em elevação em demasia da temperatura. Excesso de temperatura pode ocasionar deterioração dos componentes o que pode resultar em severos prejuízos. Ao se medir a

temperatura nos pontos mais críticos do sistema (motor do compressor e sistema de compressão, onde agem os pistões na compressão), garante-se o total monitoramento de eventuais elevações de temperatura indesejadas. Esses sensores estão ligados ao CLP, que vai ocasionar interrupção do processo em caso de falha. O sistema de controle então vai ser responsável por tomar as ações necessárias para o evento ocorrido

- Sensores de Feedback (SFB1, SFB2, SFB3)

–**Entrada:** corrente elétrica que passa pela fiação do motor

–**Saída:** saída digital que indica para o sistema de controle o correto acionamento do motor.

Esses sensores fazem parte do grupo de sensores que vai indicar na definição do status do sistema. Tanto os sensores de temperatura, como acionamento, feedback e sobretensão são sensores que vão realizar uma análise on-line do sistema e vão indicar para o sistema que controle, onde esse finalmente vai incidir em caso de falha e tomar as devidas providências.

Particularmente esse sensor de feedback não é de fundamental importância, porém é uma segurança a mais que o controle possui.

Seu funcionamento é simples, assim que o sinal é dado pelo controle para acionar o compressor, esse sensor faz a leitura do funcionamento do motor do compressor, para verificar se o acionamento realmente foi efetuado.

- Sensores de sobretensão (SS1, SS2, SS3)

–**Entrada:** corrente elétrica que passa pelo contator na entrada do motor.

–**Saída:** abertura automática do contato, causando corte no fornecimento de energia em caso de sobretensão.

Apesar de também não fazerem parte do controle da pressão diretamente esses sensores são extremamente importantes por questão de segurança. Como o funcionamento do motor de cada compressor está ligado a um a um contator

ligado à rede elétrica existe o risco de ocorrer excesso de corrente passando na linha. Dependendo da rede elétrica disponível no local, ela pode estar sujeita a variações bruscas de tensão gerando picos de corrente que são letais à sensível fiação e aos componentes elétricos presentes na placa de acionamento do motor por onde passa a corrente elétrica. Excesso de corrente pode provocar queima e deterioração dos componentes internos da placa que pode ocasionar em danos irreversíveis aos componentes elétricos.

Com isso a medida é feita em tempo real da corrente que passa pelo contator do motor qualquer saída fora de especificação gera um desligamento do motor, afim de prevenir futuros danos à placa.

- **Válvula de alívio (VA1, VA2, VA3)**

–**Entrada:** sinal vindo do controle

–**Saída:** comando para acionamento interno:

Essa válvula vai funcionar em caso de excesso de pressão gerado pelo compressor. Ela possui um dos lados aberto à atmosfera, onde vai descarregar todo o excesso de ar, afim de eliminar essa pressão residual proveniente do compressor, que vai resultaria em excesso de pressão mesmo após o motor ser desligado. Essa saída está conectada a um silenciador que não vai influir na vazão de saída, mas que vai resultar em conforto para o usuário, pois vai diminuir bastante o nível de ruído ocasionado pela descarga de ar. Caso essa válvula esteja ligada, mas mesmo assim a pressão continuar subindo, a válvula de segurança mecânica entra em ação, pois existe um certo limite de pressão que o reservatório pode suportar. A ASME estabelece limites de pressão recomendados.

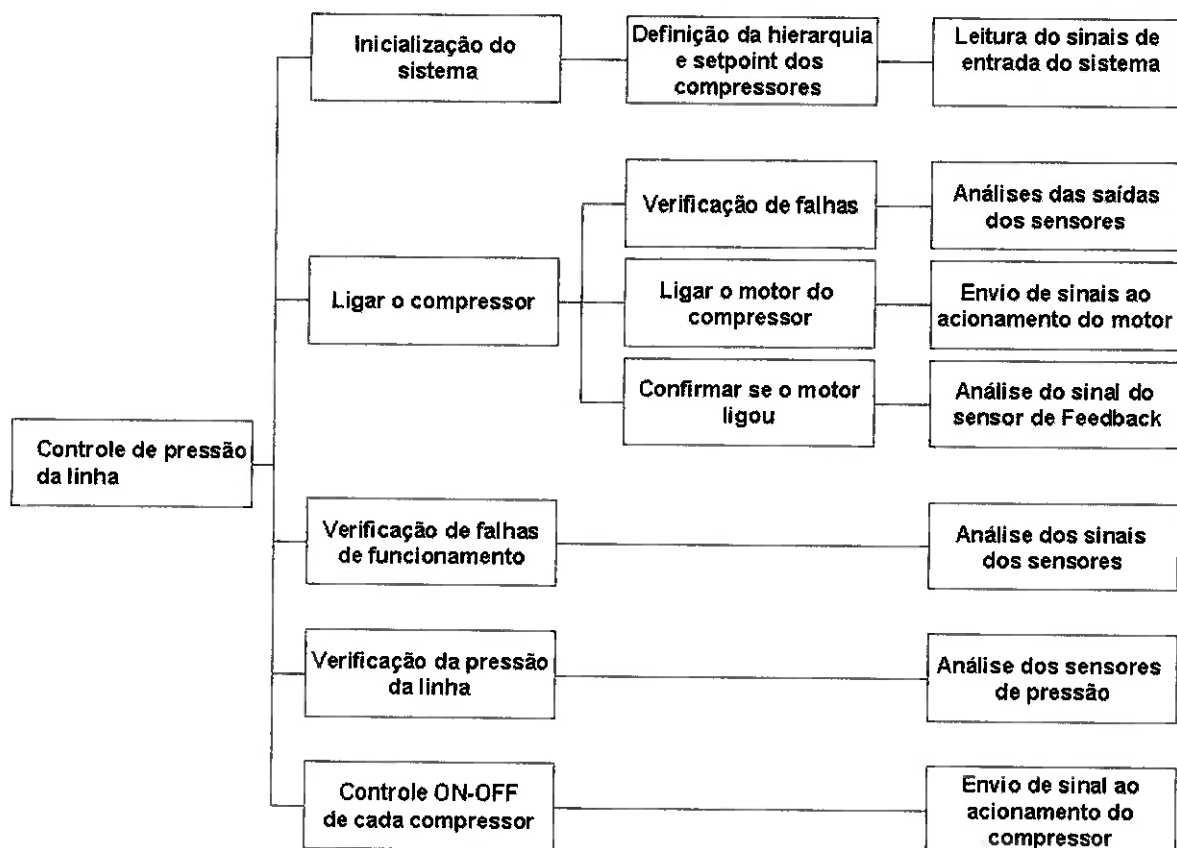
3.1.5 - Levantamento e análise das funções de controle

Deve-se definir exatamente o que o usuário deseja executar para atingir o objetivo final, assim como todo tipo de interface e intervenções deste no sistema. Dentre todas as funções desejadas, deve-se analisar inicialmente as funções físicas que podem ser realizadas por combinação das funções dos elementos que constituem o próprio elemento de controle. Depois se analisam as intervenções que o usuário pode realizar nas funções dos dispositivos. Finalmente é realizada uma avaliação do método de operação, considerando inclusive as medidas a serem tomadas em caso de falha, falta de energia, modo de reinicialização do sistema, prevenção contra erros, segurança, etc.

Após definição das funções, deve-se sistematizar seus inter-relacionamentos através da elaboração do diagrama estrutural de inter-relacionamento das funções. Neste diagrama as funções são relacionadas com uma relação objetivo-método. Desta forma tem-se um diagrama onde as funções se encontram de uma forma estruturada, facilitando a verificação de quais são realmente necessárias, erradas ou dispensáveis, adição das funções que faltam e identificação da natureza e abrangência das funções.

Uma maneira fácil de se criar esse diagrama com as funções de forma hierarquicamente, é partir de uma função mais abrangente e se perguntar: como esta função será realizada? A resposta para esta pergunta é uma série de outras funções, para as quais se pode novamente fazer a mesma pergunta, chegando-se a outras funções e assim por diante. Por fim teremos quais são as funções básicas a serem executadas pelo controle.

Dessa forma chegamos à seguinte estruturação das funções referentes ao nosso sistema:



As funções já definidas serão agora detalhadas e classificadas também. Será elaborada uma lista contendo todas as funções devidamente classificadas com o dispositivo de comando e dispositivo de monitoração referente.

- Função ligar compressor:

Esta função envolve a verificação do sistema de alimentação de energia, ativação dos outros sistemas de infra-estrutura (por exemplo, ativação e verificação das condições de falha do sistema através da análise das saídas dos sensores), iniciação de medidores (por exemplo, ativação e verificação do sensor que confirma a energização do motor, através da análise do sinal do sensor de feedback), operação e indicação de chaves de alimentação do sistema de controle (ativação da chave responsável por ligar o motor do compressor, através do envio de sinais ao acionamento do motor).

- Função de inicialização do sistema:

Envolve o comando das ações do objeto de controle. Esta função faz a escolha da ordem e setpoint dos compressores através da leitura dos sinais de entrada do sistema. Esta escolha do modo de operação é feita manualmente utilizando a interface homem máquina.

- Função de controle ON-OFF de cada compressor:

Essa função realiza o controle de liga/desliga de cada compressor obedecendo a hierarquia e otimizando a utilização dos compressores.

- Verificação da pressão da linha:

Através da análise dos sinais enviados pelos sensores de pressão verifica a pressão da linha fornecendo dados para serem utilizados na funções de atuação.

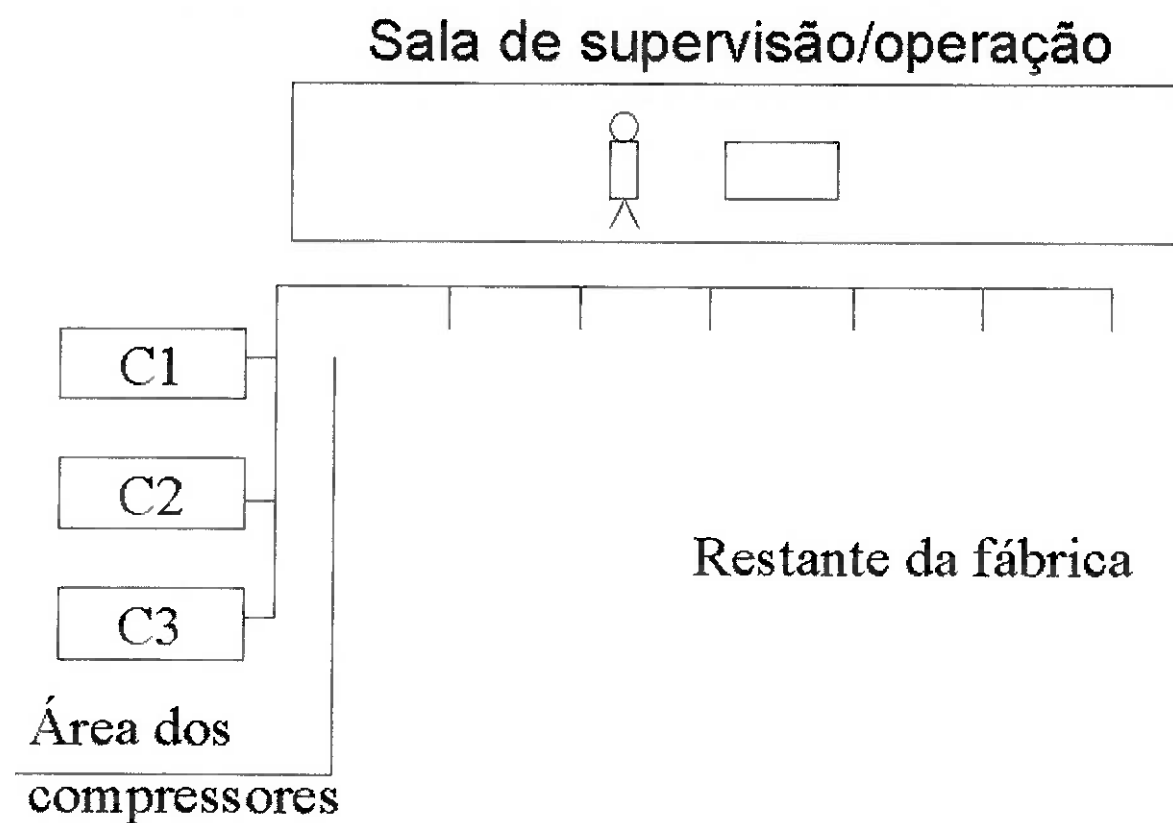
- Função verificação de falhas de funcionamento:

Através da análise dos sinais dos diversos sensores, essa função monitora as possíveis falhas.

As falhas possíveis são: excesso de temperatura no compressor, sobretensão na linha, falha no acionamento e falha no funcionamento do motor.

No	Funções de comando	Dispositivo de comando	Dispositivo de monitoração
1	Inicialização do sistema	Interface homem-maquina	Indicadores de funcionamento
2	Ligar o compressor	Interface homem maquina	Indicadores de funcionamento
3	Verificação de falhas de funcionamento	Sistema de controle	Indicador de falha
4	Verificação da pressão da linha	Sistema de controle	Indicador de pressão
5	Controle ON-OFF de cada compressor	Sistema de controle	Indicador de funcionamento

Por fim apresentamos um plano geral de funcionamento da instalação, quem é um plano contendo a identificação de cada máquina, equipamento, etc., o local físico de operação, operadores, etc.



3.2 – Projeto do sistema de controle:

3.2.1 - Divisão das funções e definição das interfaces

Consiste na definição do tipo e da quantidade de dispositivos de controle a serem utilizados na realização das funções de controle definidas nas etapas anteriores. Aqui também é especificada a interface homem-máquina (IHM) e como funciona o painel de controle que o usuário terá acesso.

A interface homem-máquina é constituída por um painel de controle composto de botões, um potenciômetro e leds.

O dispositivo utilizado foi um CLP MicroLogix 1500 que está conectado ao painel de controle e aos sensores através de cabos.

Os botões são:

B1: botão de start do sistema

B2: botão para desligar o sistema

B3, B4, B5: botões para escolha do compressor primário, auxiliar e principal.

Os leds são:

L1: led que indica compressor 1 em funcionamento

L2: led que indica compressor 2 em funcionamento

L3: led que indica compressor 3 em funcionamento

L4: led que indica falha de temperatura do motor 1

L5: led que indica falha de temperatura do motor 2

L6: led que indica falha de temperatura do motor 3

L7: led que indica falha de temperatura do compressor 1

L8: led que indica falha de temperatura do compressor 2

L9: led que indica falha de temperatura do compressor 3

L10: led que indica falha de acionamento do motor 1

L11: led que indica falha de acionamento do motor 2

L12: led que indica falha de acionamento do motor 3

O potenciômetro é a ferramenta utilizada para se escolher o setpoint de pressão da linha.

3.2.2 - Definição e alocação dos sinais de entrada e saída

Aqui serão definidos os tipos de entrada e saída (I/O) do dispositivo de realização de controle, e as respectivas alocações dos sinais de I/O.

Sensibilidade	Entrada CLP
start	I0
off	I1
condição de pressão 1	I2
condição de pressão 2	I3
condição de pressão 3	I4
condição de pressão 4	I5
sensor de temperatura motor 1	I6
sensor de temperatura motor 2	I7
sensor de temperatura motor 3	I8
sensor de temperatura compressor 1	I9
sensor de temperatura compressor 2	I10
sensor de temperatura compressor 3	I11
sensor de feedback do motor 1	I12
sensor de feedback do motor 2	I13
sensor de feedback do motor 3	I14
botão compressor 1	I15
botão compressor 2	I16
botão compressor 3	I17

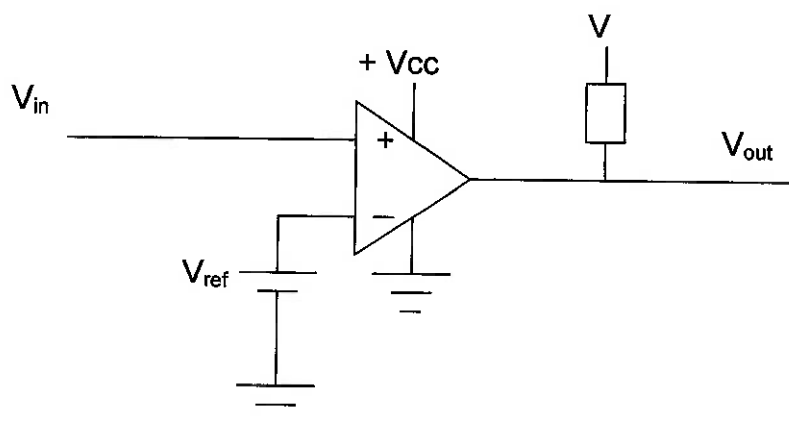
Ação	Saída CLP
Liga M1	Q1
Liga M2	Q2
Liga M3	Q3
indica falha de temperatura motor 1	Q4
indica falha de temperatura motor 2	Q5
indica falha de temperatura motor 3	Q6
indica falha de temperatura compressor 1	Q7
indica falha de temperatura compressor 2	Q8
indica falha de temperatura compressor 3	Q9
indica falha de acionamento motor 1	Q10
indica falha de acionamento motor 2	Q11
indica falha de acionamento motor 3	Q12

Observe que temos definidas, portanto 4 entradas do CLP designadas como Condições de Pressão. Estas condições são função do valor da pressão da linha no instante, e do valor de setpoint escolhido pelo usuário, sendo definidas por:

- CP1 = $SPL \geq \text{Setpoint} + 0.5$
(Condição de pressão que indica que os compressores podem ser desligados)
- CP2 = $\text{Setpoint} + 0.5 < SPL \leq \text{Setpoint} - 0.5\text{bar}$
(Condição de pressão que indica que um compressor deve ser ligado)
- CP3 = $\text{Setpoint} - 0.5\text{bar} < SPL \leq \text{Setpoint} - 1\text{bar}$
(Condição de pressão que indica que 2 compressores devem ser ligados)
- CP4 = $SPL < \text{Setpoint} - 1\text{bar}$
(Condição de pressão que indica que os 3 compressores devem ser ligados)

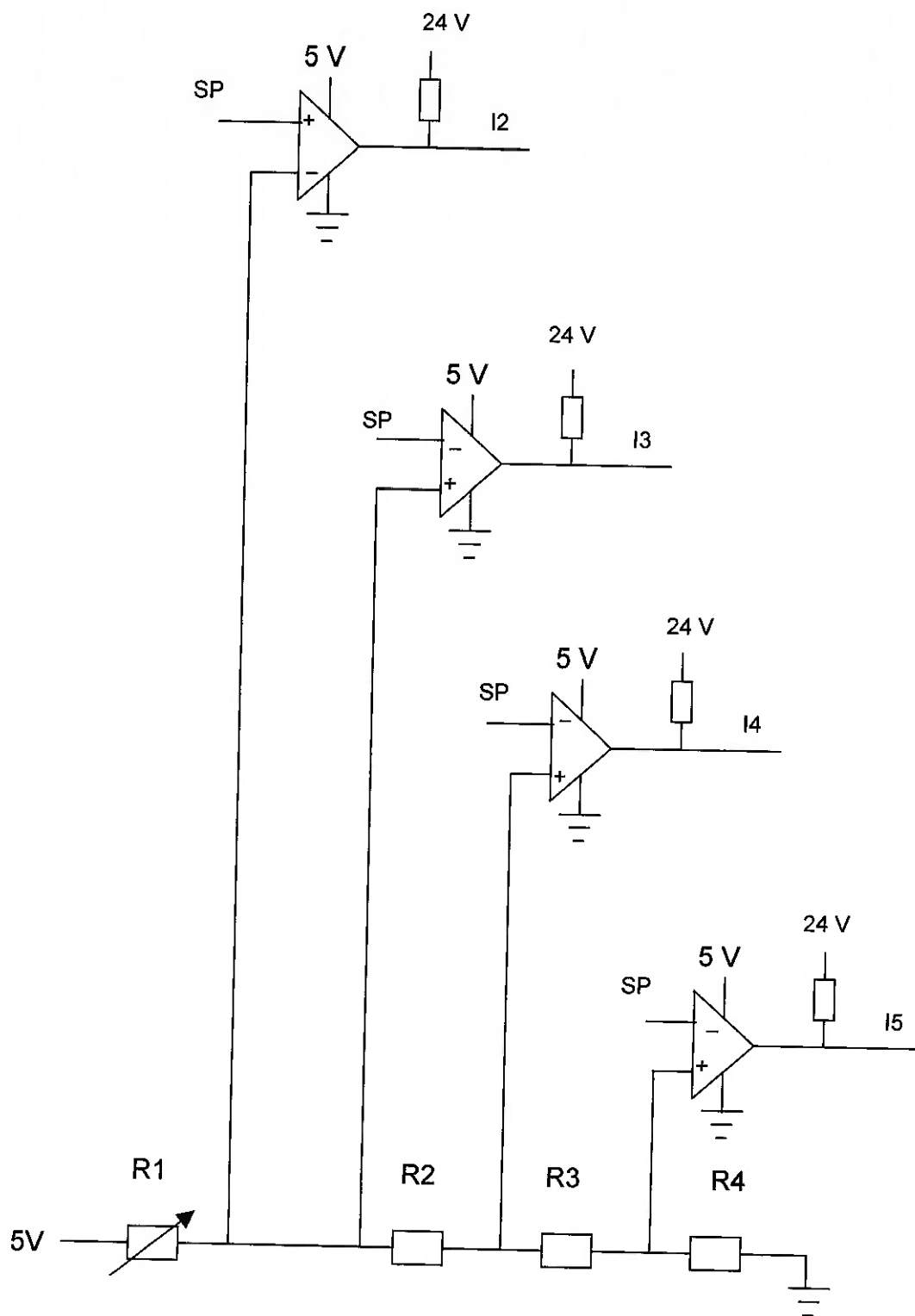
No entanto, temos apenas um sensor de pressão da linha, e que envia um sinal de voltagem, proporcional ao valor de pressão lido. Ou seja, este valor de tensão enviado pelo sensor, deverá ser tratado de forma a ser dividido em quatro sinais que indiquem as condições de pressão, lembrando que o CLP lida apenas com sinais booleanos.

Foram então utilizados circuitos eletrônicos com comparadores para realizar a digitalização deste sinal enviado pelo sensor de pressão. Os comparadores foram montados usando-se amplificadores operacionais (LM 339), aplicando-se uma tensão de referência na entrada inversora, e o sinal que se deseja comparar na entrada não inversora.



Desta forma, quando o sinal de tensão do sensor (V_{in}) for maior que V_{ref} , teremos tensão V na saída, que irá alimentar a entrada da CLP. Já quando o sinal de tensão do sensor for menor que V_{ref} , teremos saída nula alimentando a entrada da CLP. Caso troquem-se as entradas inversora e não inversora, temos um comportamento inverso, ou seja, teremos V na saída quando o sinal do sensor for menor que o sinal de referência.

Foi projetado então o seguinte circuito para definir as quatro condições de pressão:



Onde: $R1 = 0 \sim 1000 \, \Omega$

$R2 = 200 \, \Omega$

$R3 = 100 \, \Omega$

$R4 = 1200 \, \Omega$

Pelo circuito projetado, cada comparador terá uma tensão de referência diferente, definida pelos valores das resistências do divisor de tensão ($R1$ a $R4$), ligada a sua entrada não inversora. Já a entrada inversora dos comparadores receberá o sinal de tensão enviado pelo sensor de pressão (SP). Apenas o primeiro dos comparadores tem as entradas invertidas, pois neste deseja-se identificar uma tensão maior que um certo valor. Ou seja, o sinal do sensor será comparado com os quatro valores que definem as condições de pressão, e consequentemente teremos nas saídas dos quatros comparadores, valores booleanos que alimentam as entradas do CLP, indicando as quatro condições de pressão.

Note também que no divisor de tensão, o primeiro resistor ($R1$) é um resistor de tensão variável, através do qual se escolhe o Setpoint de pressão da linha. Regulando-se manualmente a resistência do resistor, alteram-se as tensões de referência dos comparadores, e desta forma altera-se o setpoint de pressão.

Para uma resistência de $500 \, \Omega$ neste resistor temos uma Setpoint de pressão da linha de 7 bar. Para uma resistência de $0 \, \Omega$, temos um Setpoint de 9,3 bar, e para uma resistência de $1000 \, \Omega$, temos um Setpoint de 5,6 bar. Ou seja, através da variação do valor de resistência de $R1$, podemos variar o Setpoint da linha entre 5,6 e 9,3 bar.

3.2.3 - Definição da estrutura do programa de controle

A modelagem em Grafcet é uma ferramenta de grande utilidade para o desenvolvimento de projetos de sistemas a eventos discretos, pois torna de fácil compreensão o comportamento do sistema a ser automatizado, o que não é possível quando se usa unicamente o diagrama ladder.

Diversas técnicas podem ser usadas para descrever comportamentos seqüenciais, tais como fluxogramas, diagramas de variáveis de estado, redes de Petri, Grafcet, etc. Iremos utilizar o Grafcet devido à facilidade de interpretação que apresenta, além de tornar muito fácil a posterior elaboração do diagrama ladder, que será necessário para a programação do CLP.

No entanto deve-se notar que todas as técnicas citadas anteriormente apresentam sua maior facilidade de modelagem para sistemas onde as possíveis seqüências de estados são conhecidas e movidas a variáveis controláveis, tais como manufatura de peças, nas quais se sabe as seqüências de operações que serão feitas em cada tipo de peça por exemplo.

No nosso caso, devido ao fato de lidarmos com uma grande quantidade de variáveis, e algumas não controláveis, a modelagem da maneira tradicional não se apresentou muito eficiente. A modelagem tradicional é feita partindo do estado inicial do sistema e indicando os estados para qual o sistema pode evoluir a partir deste inicial, dependendo dos valores assumidos pelas variáveis de controle. Em seguida, indica-se para quais estados cada um destes estados pode evoluir, novamente dependendo das variáveis de controle.

A modelagem feita desta forma tornou-se rapidamente muito confusa e complexa, visto que houve uma explosão combinatória das variáveis, ou seja, em um determinado estado, poderia-se evoluir para muitos outros, e de cada um destes, novamente para muitos outros, e assim sucessivamente. Isto ocorre com nosso sistema em questão, primeiro por ser um sistema que apresenta uma quantidade muito grande de variáveis, e segundo por ser um sistema na qual existem variáveis, tais como a pressão na linha, que são não controláveis, ou seja, em qualquer momento a pressão pode variar para qualquer valor, independente

do valor que se encontrava antes (Ex: nada impede que todas as máquina que se utilizam da linha de ar comprimido sejam acionadas simultaneamente, levando a uma queda brusca de pressão).

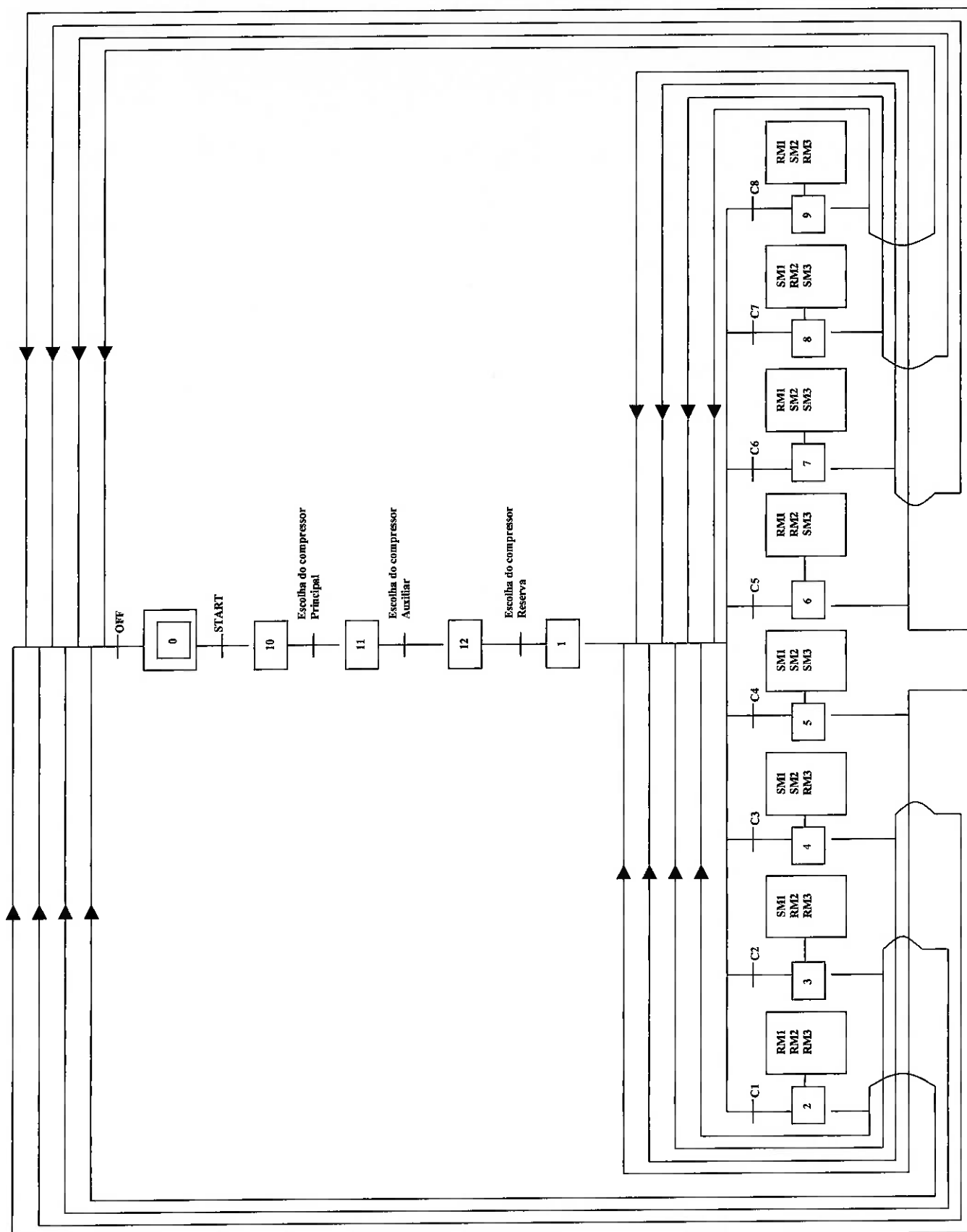
No entanto percebeu-se que a maioria dos estados para qual o sistema evoluía eram estados intermediários, na qual o controle não efetuava ação. Percebeu-se também que o sistema embora apresentasse muitas variáveis, apresentava poucos estados finais, ou seja, estados que realmente interessam para o controle. Desta forma, passando por muitos estados intermediários, o sistema sempre chegaria aos mesmos poucos estados finais.

Foi feito então a modelagem seguindo uma metodologia diferente. Inicialmente foram determinados todos os estados finais possíveis, que são simplesmente as combinações possíveis dos estados dos compressores: 1, 2 e 3 ligados; 1 e 2 ligados, 3 desligado; 1 ligado, 2 e 3 desligados; etc.

Em seguida foram determinadas quais as condições que levam a cada um destes estados. Por exemplo: para que esteja ligado apenas o compressor 1, é necessário que não haja falha neste, e que a pressão na linha exija que apenas um compressor esteja ligado, ou caso a pressão exija mais de um ligado mas haja falha nos outros compressores. Desta forma, com lógica combinacional, determinam-se as transições. Foi feito então, uma espécie de “looping”, para que o sistema esteja sempre variando entre estes estados, dependendo dos valores assumidos pelas variáveis, e até que operador resolva parar a linha, apertando o botão de desligamento.

Esta solução adotada gerou um trabalho maior na definição das transições, no entanto, gerou um modelo final extremamente compacto e simples.

Segue abaixo o modelo final em Grafcet:



Onde:

- $CP1 = SPL \geq \text{Setpoint} + 0.5$
(Condição de pressão que indica que os compressores podem ser desligados)
- $CP2 = \text{Setpoint} + 0.5 < SPL \leq \text{Setpoint} - 0.5\text{bar}$
(Condição de pressão que indica que um compressor deve ser ligado)
- $CP3 = \text{Setpoint} - 0.5\text{bar} < SPL \leq \text{Setpoint} - 1\text{bar}$
(Condição de pressão que indica que 2 compressores devem ser ligados)
- $CP4 = SPL < \text{Setpoint} - 1\text{bar}$
(Condição de pressão que indica que os 3 compressores devem ser ligados)

- $AP = STMP + STCP + SFBP$
(condição de falha do compressor Principal)
- $AA = STMA + STCA + SFBA$
(condição de falha do compressor Auxiliar)
- $AR = STMR + STCR + SFBR$
(condição de falha do compressor Reserva)

- STM = Sensor de temperatura do motor
- STC = sensor de temperatura do compressor
- SFB = sensor de feed-back do motor.
- SPL = sensor de pressão da linha
- Setpoint = Pressão que se deseja ter na linha, definida pelo usuário.

$$- \quad C1 = (CP1 + AP.AA.AR).\overline{OFF}$$

Pois C1 é a transição que leva ao estado 2, onde os 3 compressores são desligados, o que deve ocorrer sempre que a pressão for CP1 (condição de pressão que indica que os compressores podem ser desligados), ou quando todos os compressores apresentarem falha. Resultando então na expressão lógica acima.

$$- \quad C2 = (CP2 + CP3.AA.AR + CP4.AA.AR).\overline{AP}.\overline{OFF}$$

Pois C2 é a transição que leva ao estado 3, onde o compressor principal é ligado e auxiliar e reserva são desligados, o que deve ocorrer a princípio quando tivermos pressão CP2 (condição de pressão que indica que um compressor deve ser ligado) e não houver falha no compressor principal. Mas também devendo ocorrer quando tivermos pressão CP3 (condição de pressão que indica que 2 compressores devem ser ligados), porém ambos os compressores reserva e auxiliar apresentam falha, ou quando tivermos pressão CP4 (condição de pressão que indica que os 3 compressores devem ser ligados) porém ambos os compressores auxiliar e reserva apresentam falha. Resultando então na expressão lógica acima.

$$- \quad C3 = (CP3 + CP4.AR).\overline{AP}.\overline{AA}.\overline{OFF}$$

Pois C3 é a transição que leva ao estado 4, onde os compressores principal e auxiliar são ligados e o reserva é desligado, o que deve ocorrer a princípio quando tivermos pressão CP3 (condição de pressão que indica que 2 compressores devem ser ligados) e não houver falhas nos compressores principal e auxiliar, mas também devendo ocorrer quando tivermos pressão CP4 (condição de pressão que indica que os 3

compressores devem ser ligados) mas há falha no compressor reserva. Resultando então na expressão lógica acima.

$$- \quad C4 = CP4.\overline{AP}.\overline{AA}.\overline{AR}.\overline{OFF}$$

Pois C4 é a transição que leva ao estado 5, onde todos os compressores são ligados, o que deve ocorrer sempre que tivermos a pressão CP4 (condição de pressão que indica que os 3 compressores devem ser ligados) e não houver falha em nenhum compressor.

$$- \quad C5 = (CP2.AP + CP3.AP.AA + CP4.AP.AA).\overline{AR}.\overline{OFF}$$

Pois C5 é a transição que leva ao estado 6, onde o compressor reserva é ligado, e os compressores principal e auxiliar são desligados. O que deve ocorrer a princípio quando tivermos pressão CP2 (condição de pressão que indica que um compressor deve ser ligado), mas o compressor principal apresentar falha. No entanto devendo ocorrer também quando tivermos condição de pressão CP3 (condição de pressão que indica que 2 compressores devem ser ligados) ou CP4 (Condição de pressão que indica que os 3 compressores devem ser ligados) porem ambos os compressores principal e auxiliar apresentam falha. Resultando então na expressão lógica acima.

$$- \quad C6 = (CP3.AP + CP4.AP).\overline{AA}.\overline{AR}.\overline{OFF}$$

Pois C6 é a transição que leva ao estado 7, onde o compressor principal é desligado e os compressores auxiliar e reserva são ligados, o que deve ocorrer a princípio quando tivermos CP3 (Condição de pressão

que indica que 2 compressores devem ser ligados) e houver falha no compressor principal, no entanto devendo ocorrer também quando tivermos CP4 (condição de pressão que indica que os 3 compressores devem ser ligados) mas o compressor principal apresenta falha. Resultando então na expressão lógica acima.

$$- \quad C7 = (CP3.AA + CP4.AA).\overline{AP}.\overline{AR}.\overline{OFF}$$

Pois C7 é a transição que leva ao estado 8, onde os compressores principal e reserva são ligados, enquanto o auxiliar é desligado, o que deve ocorrer a princípio quando tivermos CP3 (condição de pressão que indica que 2 compressores devem ser ligados) e há falha no compressor auxiliar, mas devendo ocorrer também quando tivermos CP4 (condição de pressão que indica que os 3 compressores devem ser ligados) mas há falha no compressor auxiliar. Resultando então na expressão lógica acima.

$$- \quad C8 = (CP2.AP.AR + CP3.AP.AR + CP4.AP.AR).\overline{AA}.\overline{OFF}$$

Pois C8 é a transição que leva ao estado 9, onde o compressor auxiliar é ligado e os compressores principal e reserva são desligados, devendo ocorrer quando tivermos CP2 (condição de pressão que indica que um compressor deve ser ligado), CP3 (Condição de pressão que indica que 2 compressores devem ser ligados) ou CP4 (condição de pressão que indica que os 3 compressores devem ser ligados), mas houver falha nos compressores principal e reserva. Resultando então na expressão lógica acima.

Em todas as expressões lógicas há o termo $\overline{\text{OFF}}$, pois em qualquer um dos estados, se o botão OFF for acionado o sistema deve evoluir para o estado 0, independente das outras condições.

Uma maneira eficiente para verificar se as expressões lógicas estão corretas e não geram nenhum tipo de conflito é através da tabela da verdade:

Tabela da verdade

Cp1	Cp2	Cp3	Cp4	A1	A2	A3	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Na tabela verifica-se que a lógica está correta. As transições C1 até C8 não podem ser válidas simultaneamente para as diversas situações de entrada. Além disso uma delas deve ser sempre válida. Essa condição foi obedecida e pode ser observada na tabela.

Isso caracteriza um novo intertravamento do sistema, o intertravamento de não simultaneidade das transições. Esse intertravamento só pode ser detectado nessa fase do projeto e é extremamente importante para evitar incoerências na interface com o usuário

Segue-se agora, uma explicação detalhada do Grafcet elaborado.

De acordo com a modelagem, o sistema inicia com os compressores desligados (estado 0), até que se aperte o botão de partida. No estado seguinte (estado 10), o operador escolhe, através de botões, qual dos compressores será o principal. No próximo estado (estado 11) escolhe-se qual será o compressor auxiliar e no seguinte (estado 12) qual será o reserva.

Neste instante o sistema vai para uma divergência em ou, onde dependendo da situação de pressão na linha e falhas dos compressores (condições C1 a C8), somente uma das transições será válida, evoluindo então para somente um dos estados de 2 a 9, onde uma combinação de compressores é acionada.

De qualquer um desses estados, se o botão off for acionado pelo operador, o sistema irá retornar para o estado 0, onde os compressores são desligados. Caso contrário, como todos os estados retornam para a convergência em ou, o sistema permanece no mesmo estado até que outra das transições C1 a C8 seja válida, evoluindo então para o estado correspondente. Ou seja, o sistema estará sempre evoluindo entre os estados 2 a 9; até que o operador desligue o sistema, quando o sistema voltaria para o estado 0.

O fato de haver uma quebra na seqüência dos estados, já que os estados 10, 11 e 12 estão entre os estados 0 e 1, não altera em nada o correto funcionamento do modelo, apenas foi colocado desta forma, pois numa primeira elaboração do projeto, não foi levado em conta a possibilidade da escolha dos compressores, ou, seja, inicialmente não haviam os estados 10, 11 e 12.

Posteriormente decidiu-se por acrescentar no projeto a escolha dos compressores, a fim de tornar o sistema mais completo e flexível. Para isto, acrescentou-se estes estados ao sistema original, o que resultou em apenas algumas linhas a mais e outras modificadas no diagrama ladder, sem que houvessem quaisquer tipos de problemas, o que mostra que o projeto, da forma como foi elaborado, torna muito fácil modificações no sistema.

Percebe-se que ao se elaborar o Grafcet da maneira como foi feita houve perda da sequenciação dos estados do sistema, ou seja, vendo o estado atual do sistema é impossível determinar os estados anteriores por qual o sistema passou anteriormente, no entanto este inconveniente é amplamente compensado pela vantagem de se ter um sistema de controle muito mais enxuto e eficiente.

Note que para o correto funcionamento do sistema, nunca duas das condições C1 a C8 podem ser válidas simultaneamente, e caso off não seja pressionado, sempre uma delas deve ser verdadeira. Desta forma, em qualquer estado haverá sempre uma e somente uma transição válida. Estas condições são satisfeitas pelas lógicas combinacionais que definem as transições.

3.3 – Projeto e implementação de software de controle:

É importante destacar que tendo-se o sistema de controle já modelado em Grafcet, o projeto de implementação do software de controle torna-se uma tarefa muito simples.

3.3.1 - Projeto do programa

O programa utilizado foi o Trilogi versão 5.0 para Windows. Este programa é muito eficiente para simular diagrama de relês. Foi implementado o diagrama de relês no ambiente desse software, baseado no Grafcet. Através da simulação no

diagrama de relés pode-se perceber o comportamento e evolução do estados e transições do Grafcet.

A modelagem na solução de um problema via Grafcet e a respectiva implantação do programa de controle em PLC são tarefas equivalentes à análise do sistema e à programação de computador, amplamente utilizadas em informática. Uma vez tendo chegado à solução final do primeiro, o último é apenas uma consequência daquele.

A grande vantagem dos diagrama de relés atuais em relação à antigamente é que não há mais limitação quanto ao número de contatos NA e NF pois o contato no software simulador é apenas uma operação de leitura de memória fazendo com que a antiga preocupação em relação à otimização econômica do projeto, principalmente por meio da máxima redução possível de circuitos fosse deixada de lado dando lugar a uma maior importância à manutenção, flexibilidade e documentação, não importando se para isso a solução implementada não fosse exatamente a de menor extensão em termos de ocupação de memória.

Com isso percebe-se a importância de passar a modelagem via Grafcet para a modelagem em diagrama de relés. Para isso existe uma metodologia simples e eficiente de conversão.

Na estrutura de um Grafcet, observa-se claramente a existência de três elementos básicos: as transições, as etapas e as ações. Assim, se cada um desses elementos for corretamente especificado na programação do PLC, obter-se-á como resultado uma implementação isenta de erros. Ou seja, as dificuldades inerentes à formação da sequência lógica na programação tornam-se transparentes, obtendo-se rapidamente uma implementação prática e funcional;

Cada uma dessas partes pode ser facilmente obtida a partir do Grafcet. As etapas equivalem aos estados que o sistema pode adquirir, representado por um quadrado no Grafcet. As Transições são as condições para qual um etapa deve cumprir para migrar para a etapa seguinte representada por um pequeno traço entre duas etapas no diagrama. E finalmente as ações, ou seja, todas as ações a serem tomadas em uma determinada etapa representadas por um retângulo situado ao lado das etapas no diagrama.

Com isso é possível definir uma tabela que relacione as sensibilidades e ações do processo com as entradas e saídas do PLC.

Sensibilidade	Entrada CLP
start	I0
off	I1
condição de pressão 1	I2
condição de pressão 2	I3
condição de pressão 3	I4
condição de pressão 4	I5
sensor de temperatura motor 1	I6
sensor de temperatura motor 2	I7
sensor de temperatura motor 3	I8
sensor de temperatura compressor 1	I9
sensor de temperatura compressor 2	I10
sensor de temperatura compressor 3	I11
sensor de feedback do motor 1	I12
sensor de feedback do motor 2	I13
sensor de feedback do motor 3	I14
botão compressor 1	I15
botão compressor 2	I16
botão compressor 3	I17

Ação	Saída CLP
Liga M1	Q1
Liga M2	Q2
Liga M3	Q3
indica falha de temperatura motor 1	Q4
indica falha de temperatura motor 2	Q5
indica falha de temperatura motor 3	Q6
indica falha de temperatura compressor 1	Q7
indica falha de temperatura compressor 2	Q8
indica falha de temperatura compressor 3	Q9
indica falha de acionamento motor 1	Q10
indica falha de acionamento motor 2	Q11
indica falha de acionamento motor 3	Q12

Igualmente, definem-se tabelas para memorização interna do PLC de cada uma das etapas, bem como cada uma das Transições:

Etapas	Memória CLP
Etapa 0	F0
Etapa 1	F1
Etapa 2	F2
Etapa 3	F3
Etapa 4	F4
Etapa 5	F5
Etapa 6	F6
Etapa 7	F7
Etapa 8	F8
Etapa 9	F9
Etapa 10	F10
Etapa 11	F11
Etapa 12	F12

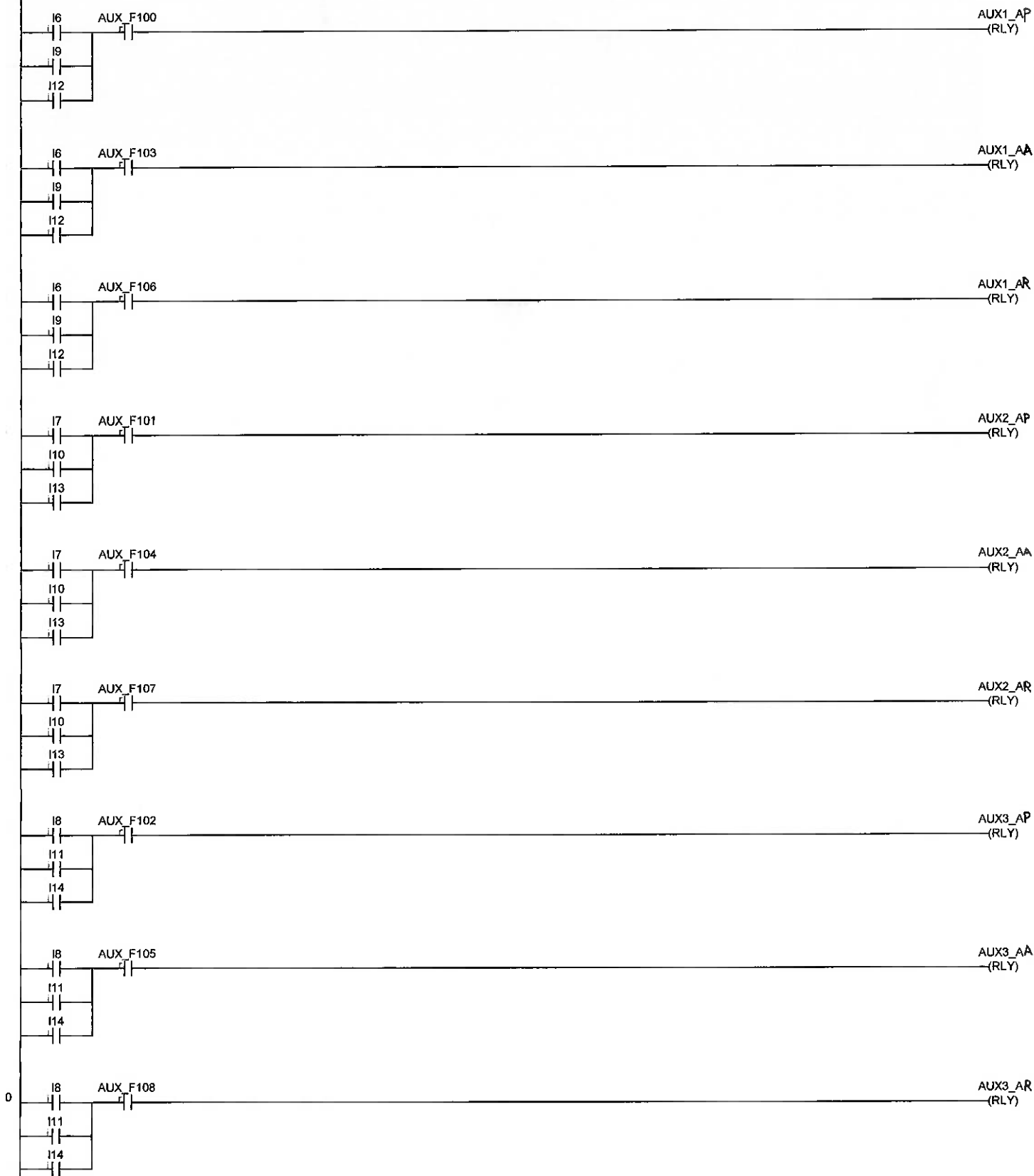
Transição	Memória CLP
Entre etapas 0 e 10	F010
Entre etapas 1 e 2	F12
Entre etapas 1 e 3	F13
Entre etapas 1 e 4	F14
Entre etapas 1 e 5	F15
Entre etapas 1 e 6	F16
Entre etapas 1 e 7	F17
Entre etapas 1 e 8	F18
Entre etapas 1 e 9	F19
Entre etapas 2 e 0	F20
Entre etapas 2 e 3	F23
Entre etapas 2 e 4	F24
Entre etapas 2 e 5	F25
Entre etapas 2 e 6	F26
Entre etapas 2 e 7	F27
Entre etapas 2 e 8	F28
Entre etapas 2 e 9	F29
Entre etapas 3 e 0	F30

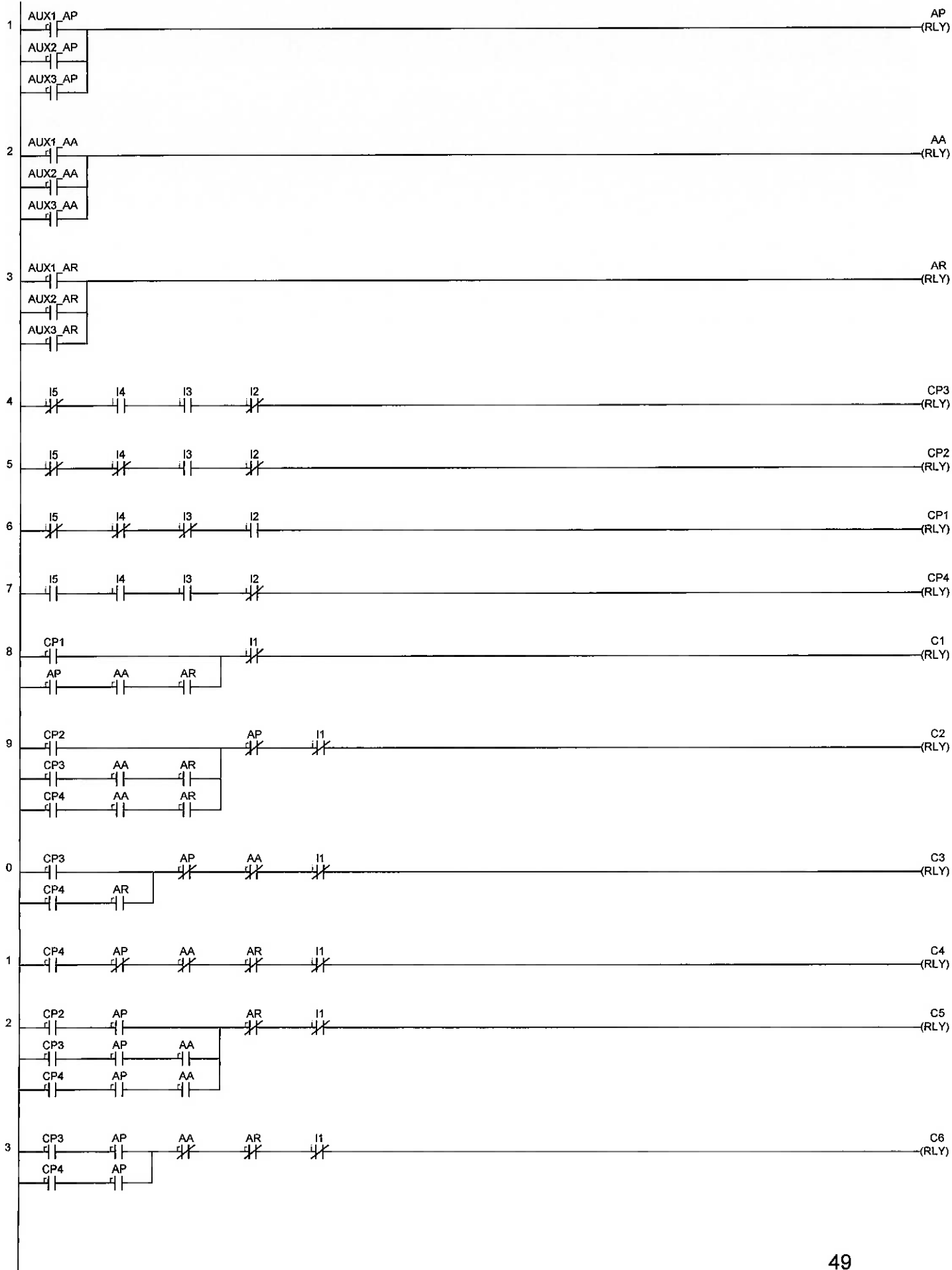
Entre etapas 3 e 2	F32
Entre etapas 3 e 4	F34
Entre etapas 3 e 5	F35
Entre etapas 3 e 6	F36
Entre etapas 3 e 7	F37
Entre etapas 3 e 8	F38
Entre etapas 3 e 9	F39
Entre etapas 4 e 0	F40
Entre etapas 4 e 2	F42
Entre etapas 4 e 3	F43
Entre etapas 4 e 5	F45
Entre etapas 4 e 6	F46
Entre etapas 4 e 7	F47
Entre etapas 4 e 8	F48
Entre etapas 4 e 9	F49
Entre etapas 5 e 0	F50
Entre etapas 5 e 2	F52
Entre etapas 5 e 3	F53
Entre etapas 5 e 4	F54
Entre etapas 5 e 6	F56
Entre etapas 5 e 7	F57
Entre etapas 5 e 8	F58
Entre etapas 5 e 9	F59
Entre etapas 6 e 0	F60
Entre etapas 6 e 2	F62
Entre etapas 6 e 3	F63
Entre etapas 6 e 4	F64
Entre etapas 6 e 5	F65
Entre etapas 6 e 7	F67
Entre etapas 6 e 8	F68
Entre etapas 6 e 9	F69
Entre etapas 7 e 0	F70
Entre etapas 7 e 2	F72
Entre etapas 7 e 3	F73
Entre etapas 7 e 4	F74
Entre etapas 7 e 5	F75
Entre etapas 7 e 6	F76
Entre etapas 7 e 8	F78
Entre etapas 7 e 9	F79
Entre etapas 8 e 0	F80
Entre etapas 8 e 2	F82
Entre etapas 8 e 3	F83

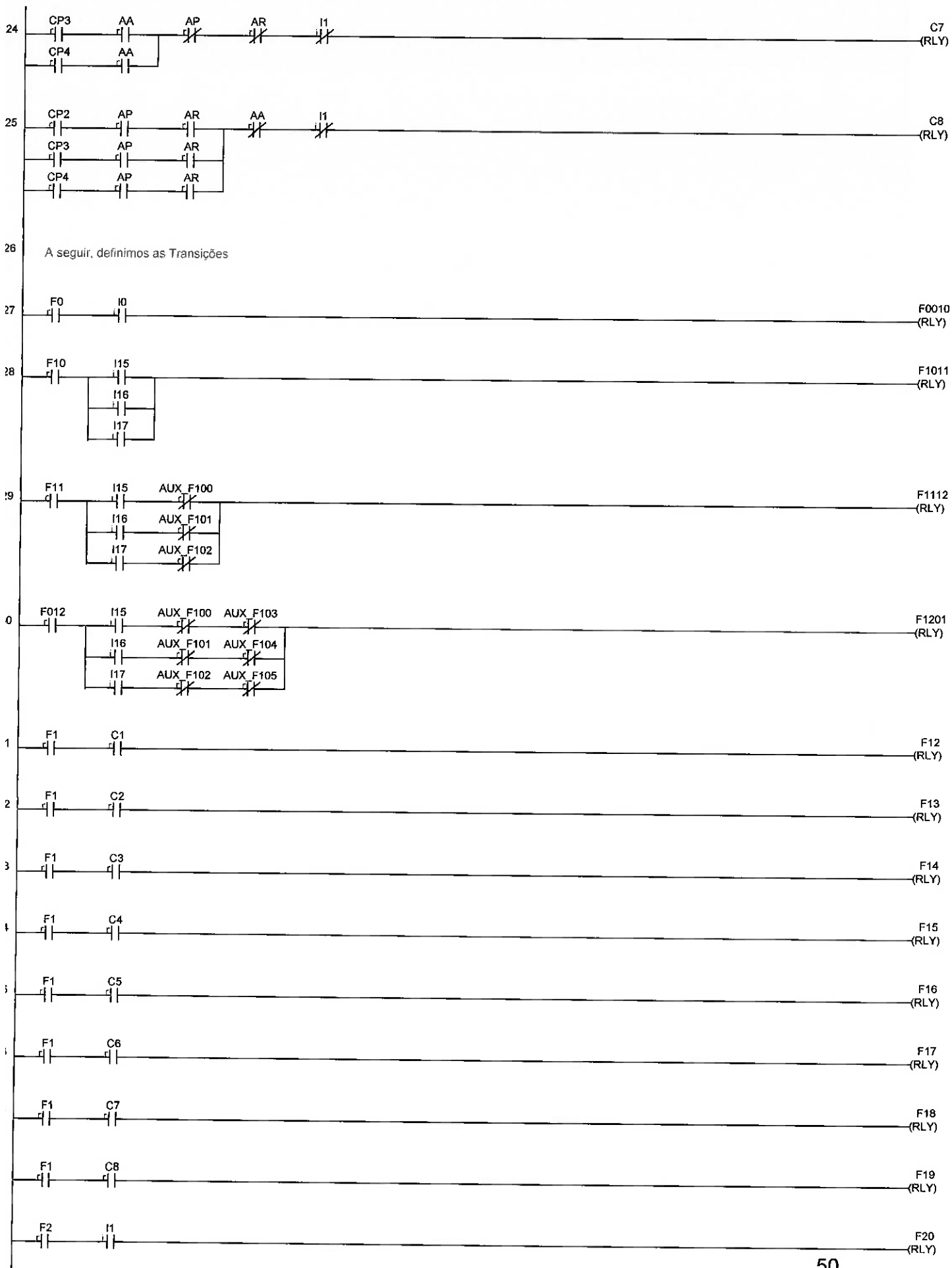
Entre etapas 8 e 4	F84
Entre etapas 8 e 5	F85
Entre etapas 8 e 6	F86
Entre etapas 8 e 7	F87
Entre etapas 8 e 9	F89
Entre etapas 9 e 0	F90
Entre etapas 9 e 2	F92
Entre etapas 9 e 3	F93
Entre etapas 9 e 4	F94
Entre etapas 9 e 5	F95
Entre etapas 9 e 6	F96
Entre etapas 9 e 7	F97
Entre etapas 9 e 8	F98
Entre etapas 10 e 11	F1011
Entre etapas 11 e 12	F1112
Entre etapas 12 e 1	F1201

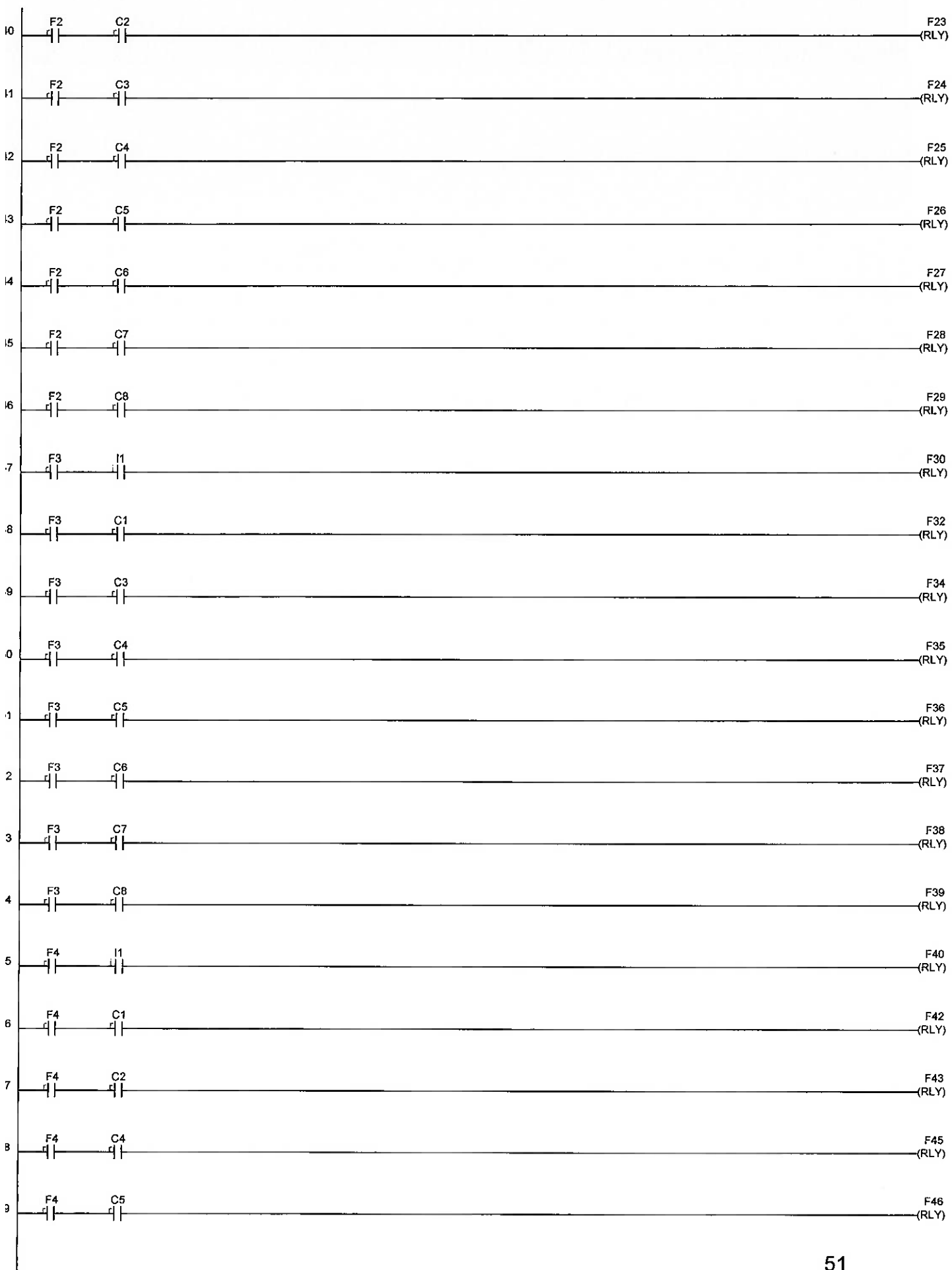
E assim pode-se elaborar o diagrama de relé no software por etapas, iniciando-se pelas transições, seguido pelas etapas e por últimos pelas ações.

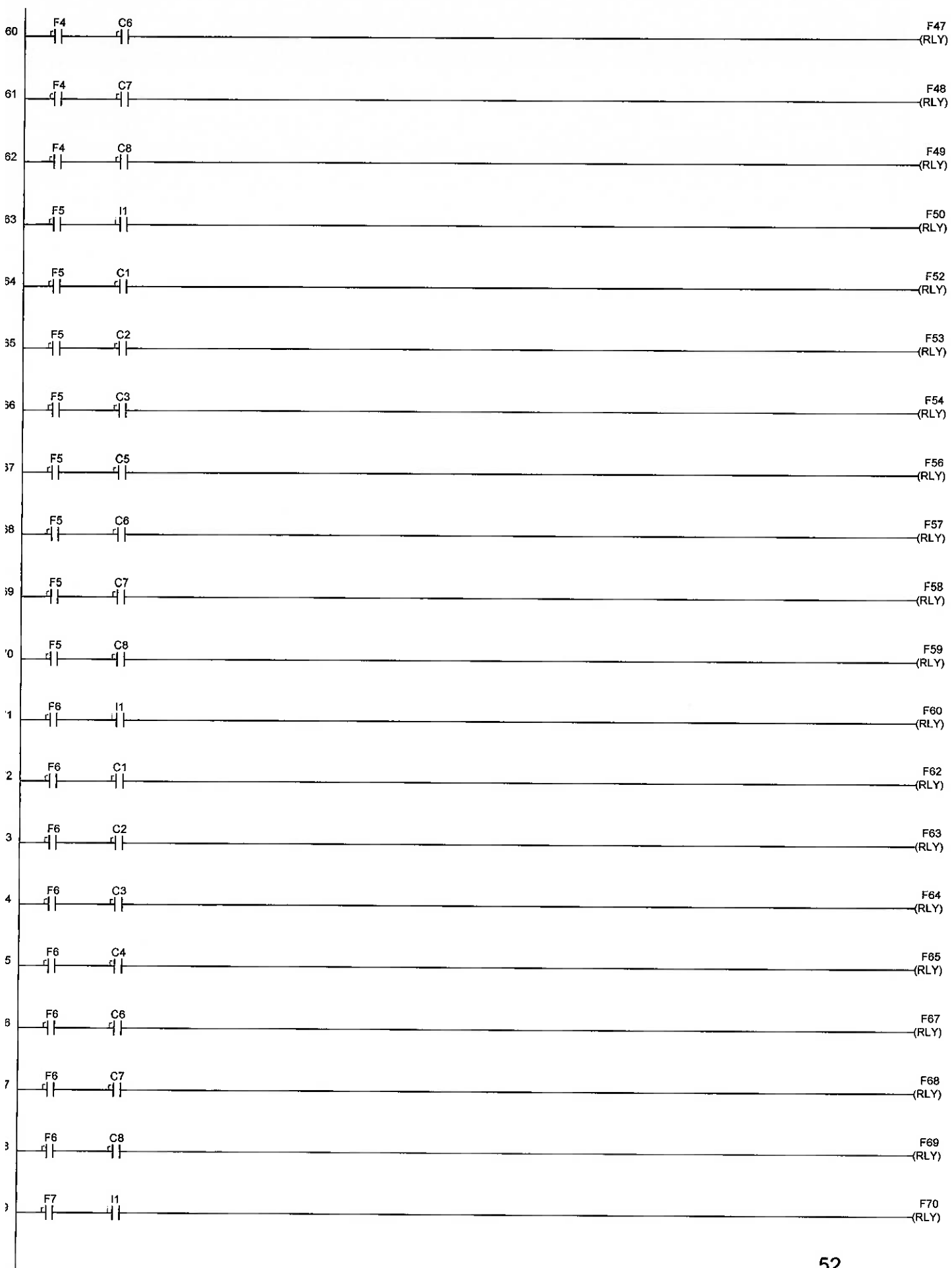
Iniciamos definindo as variáveis AP, AA, AR, C1,...,C8 a partir das entradas.

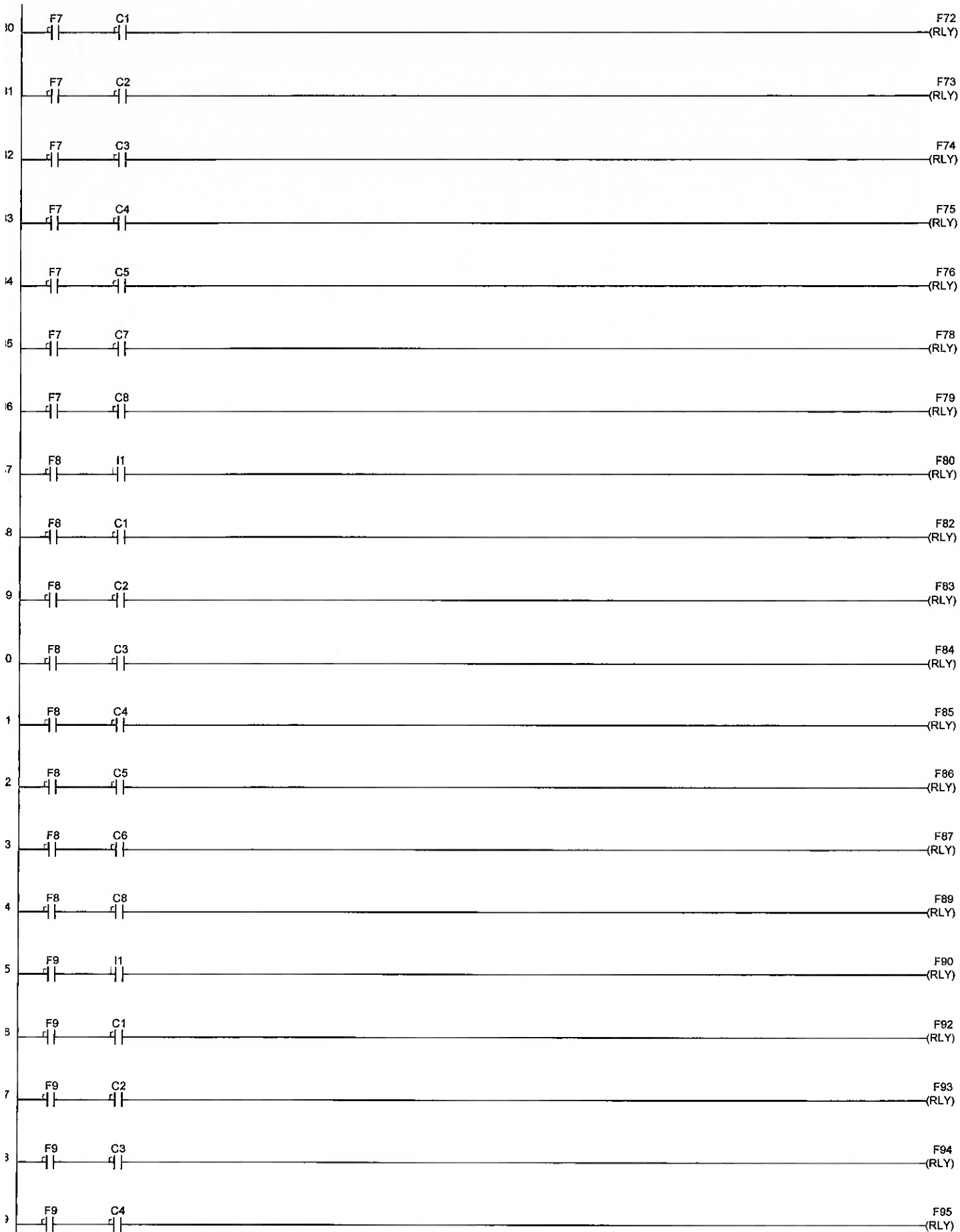


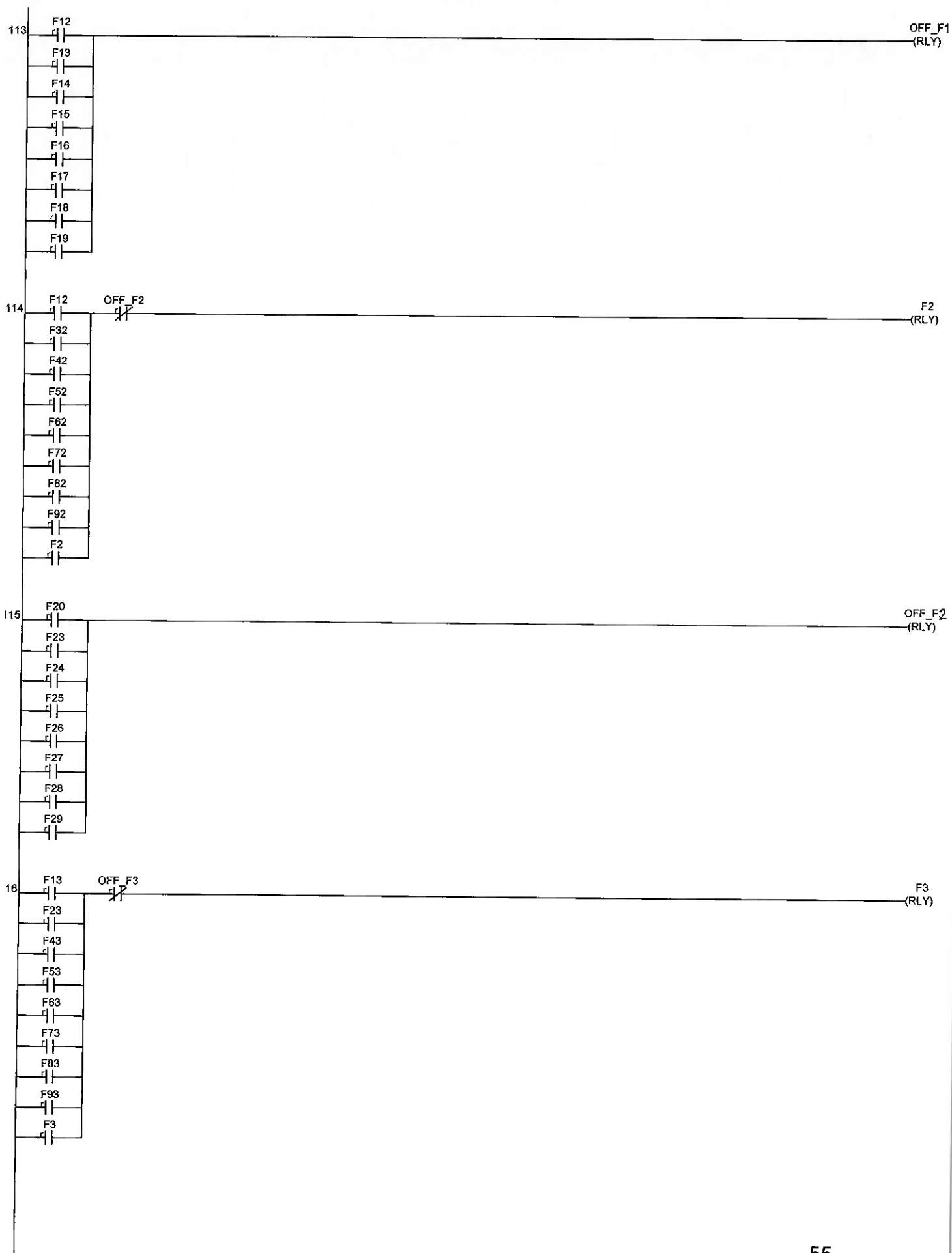


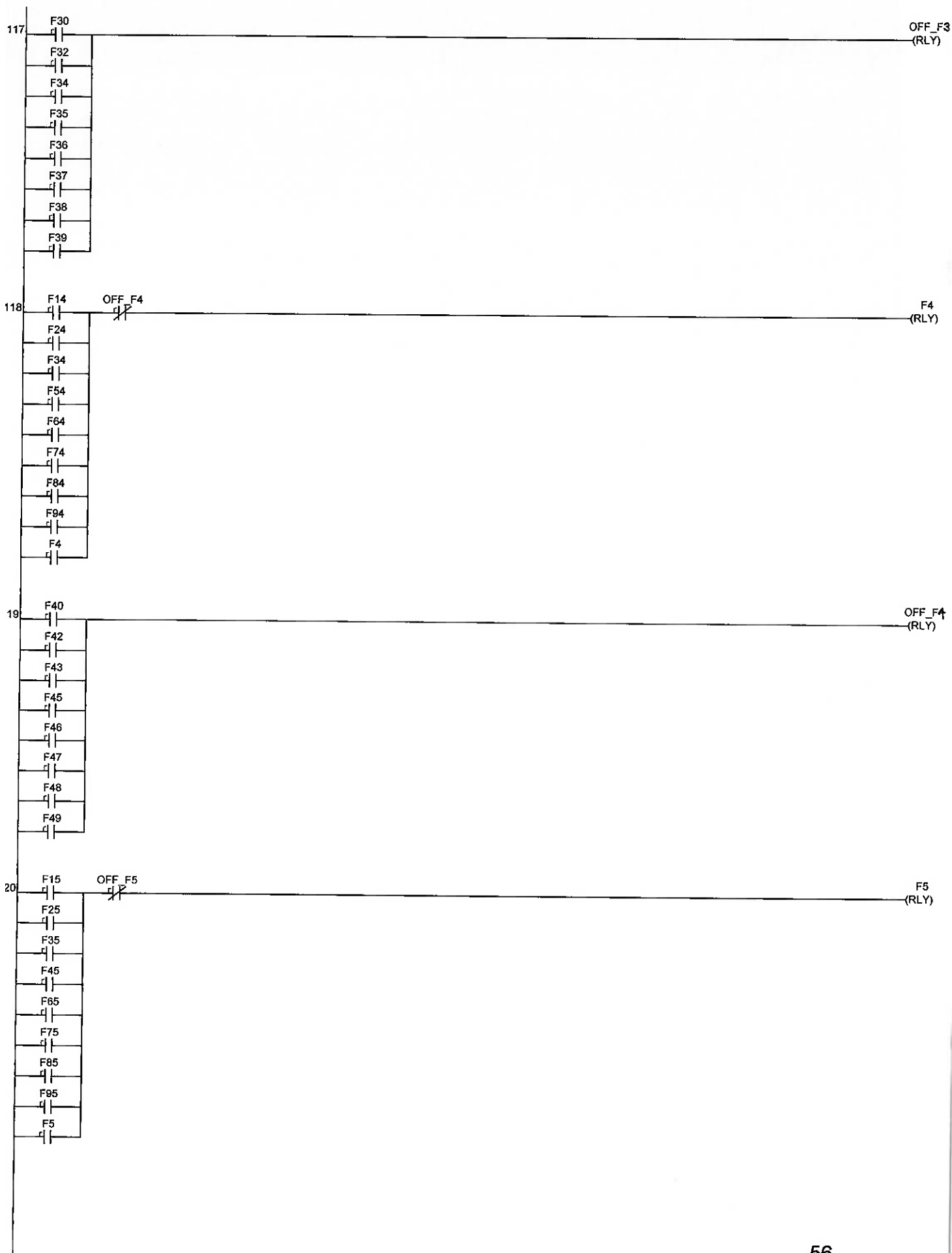


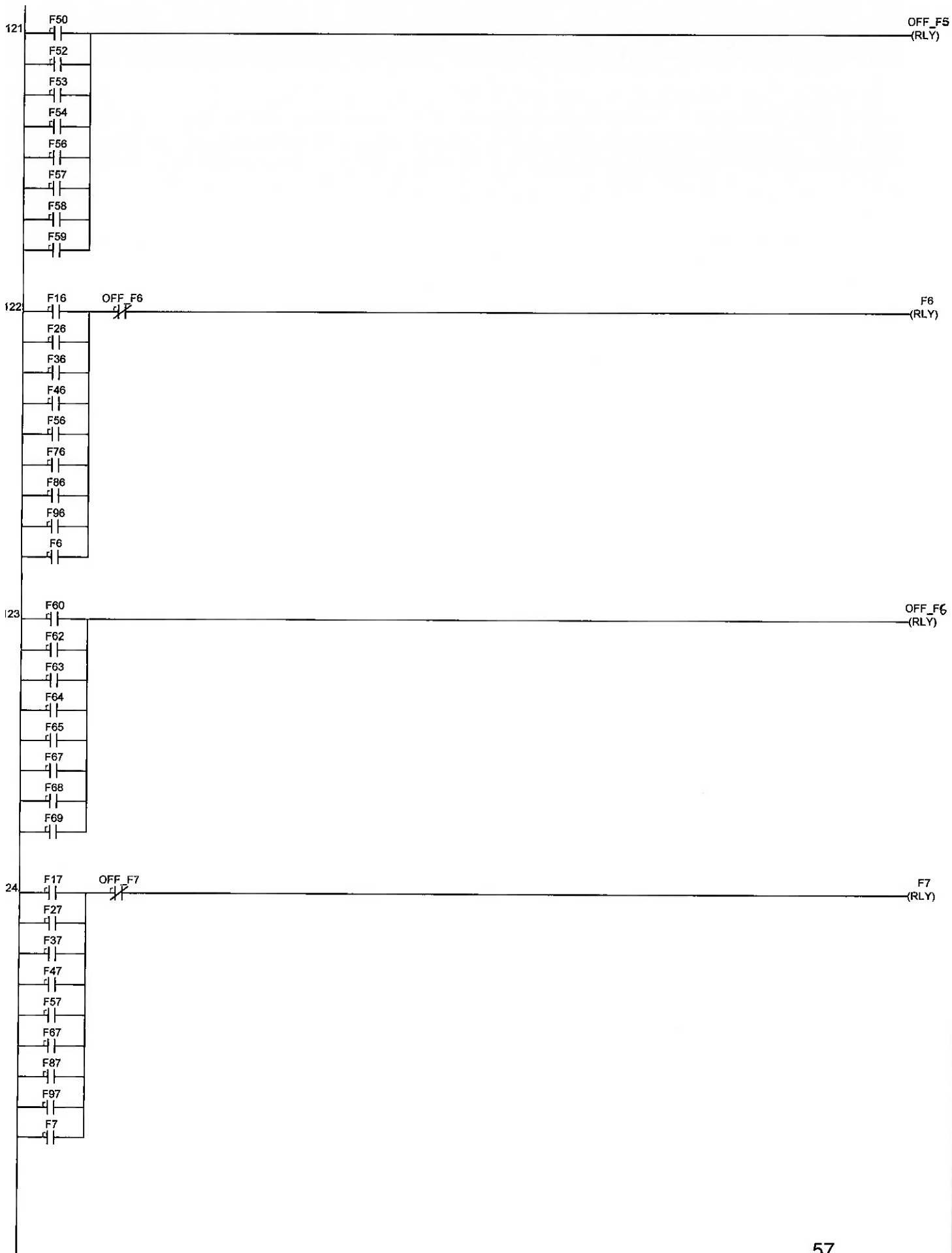


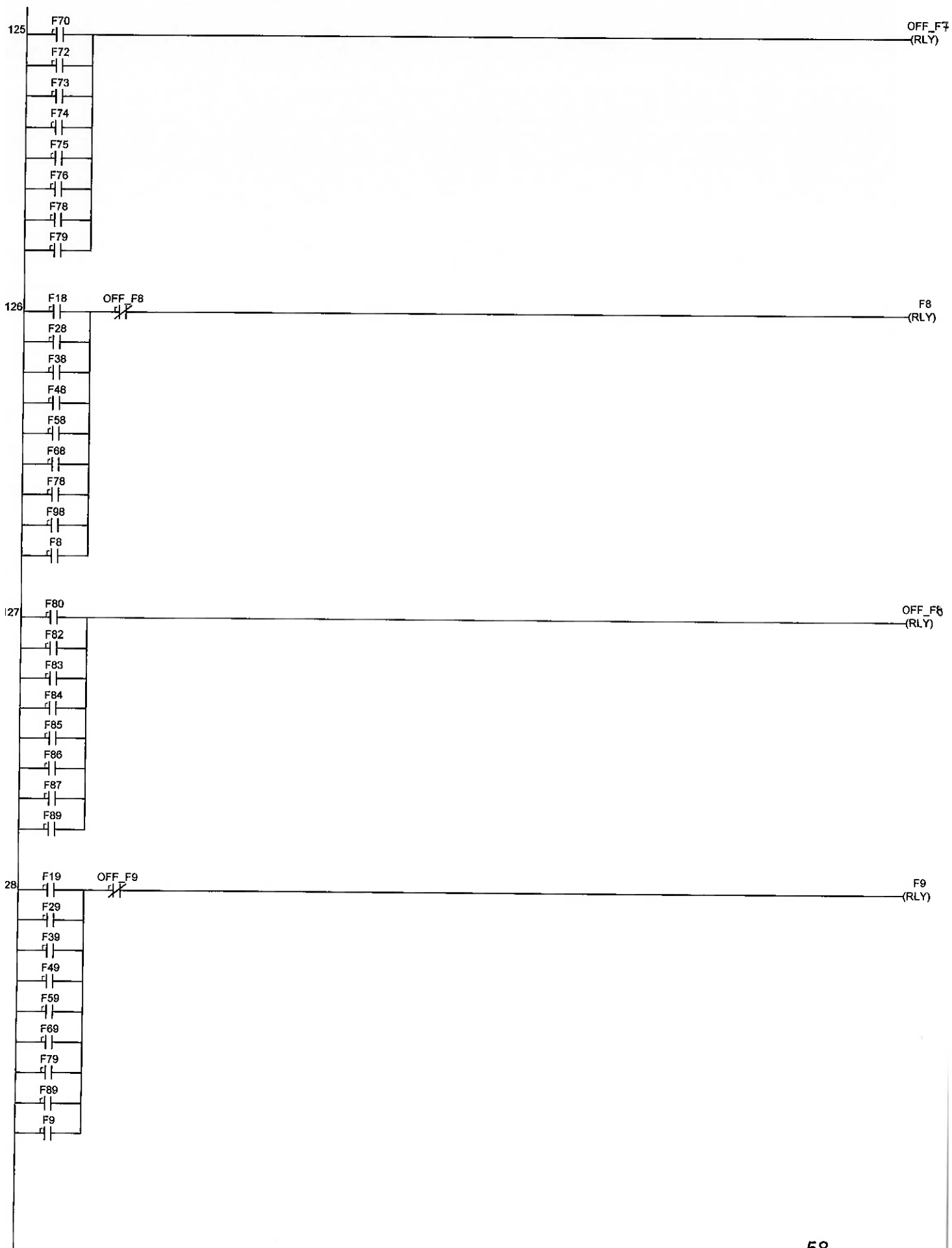


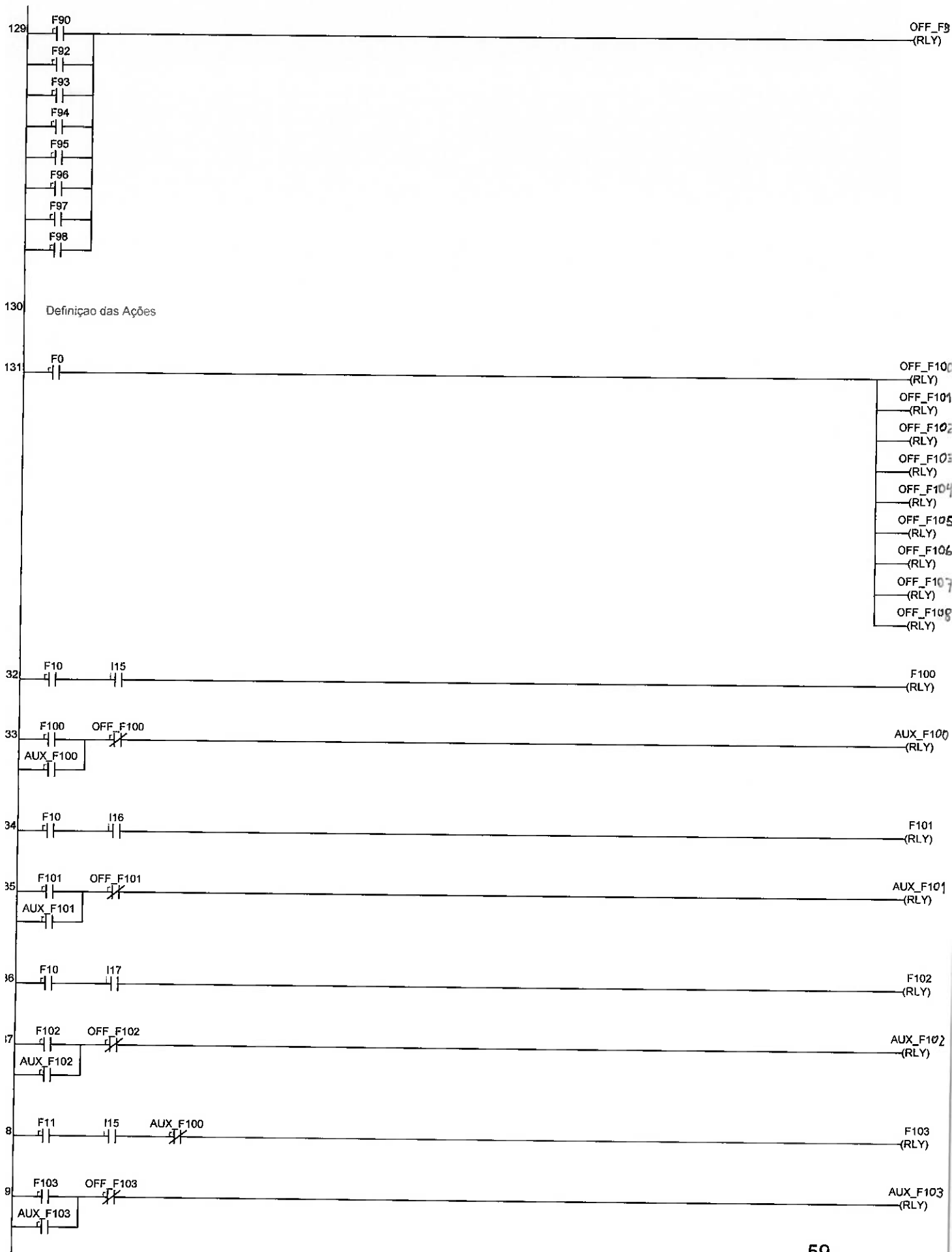


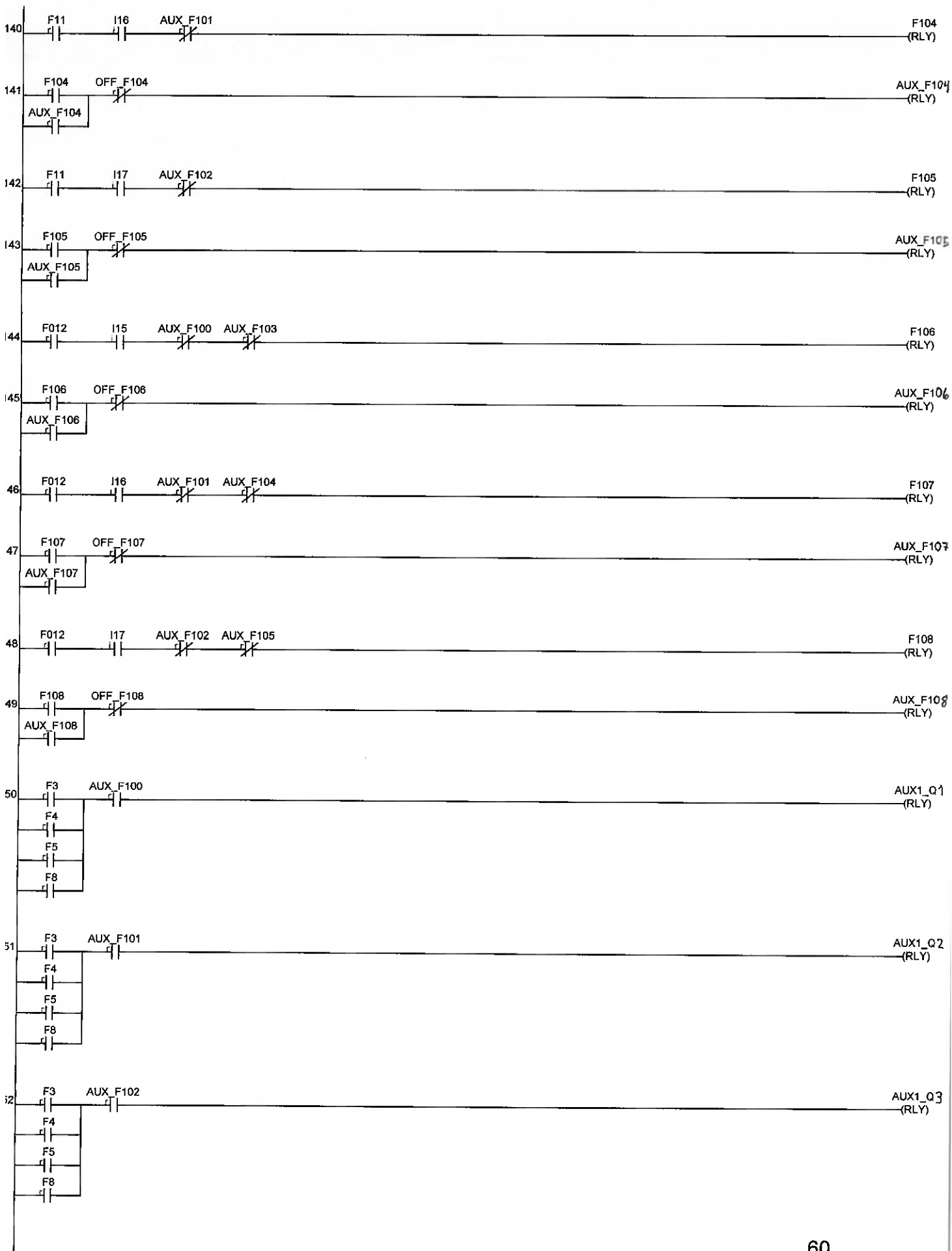


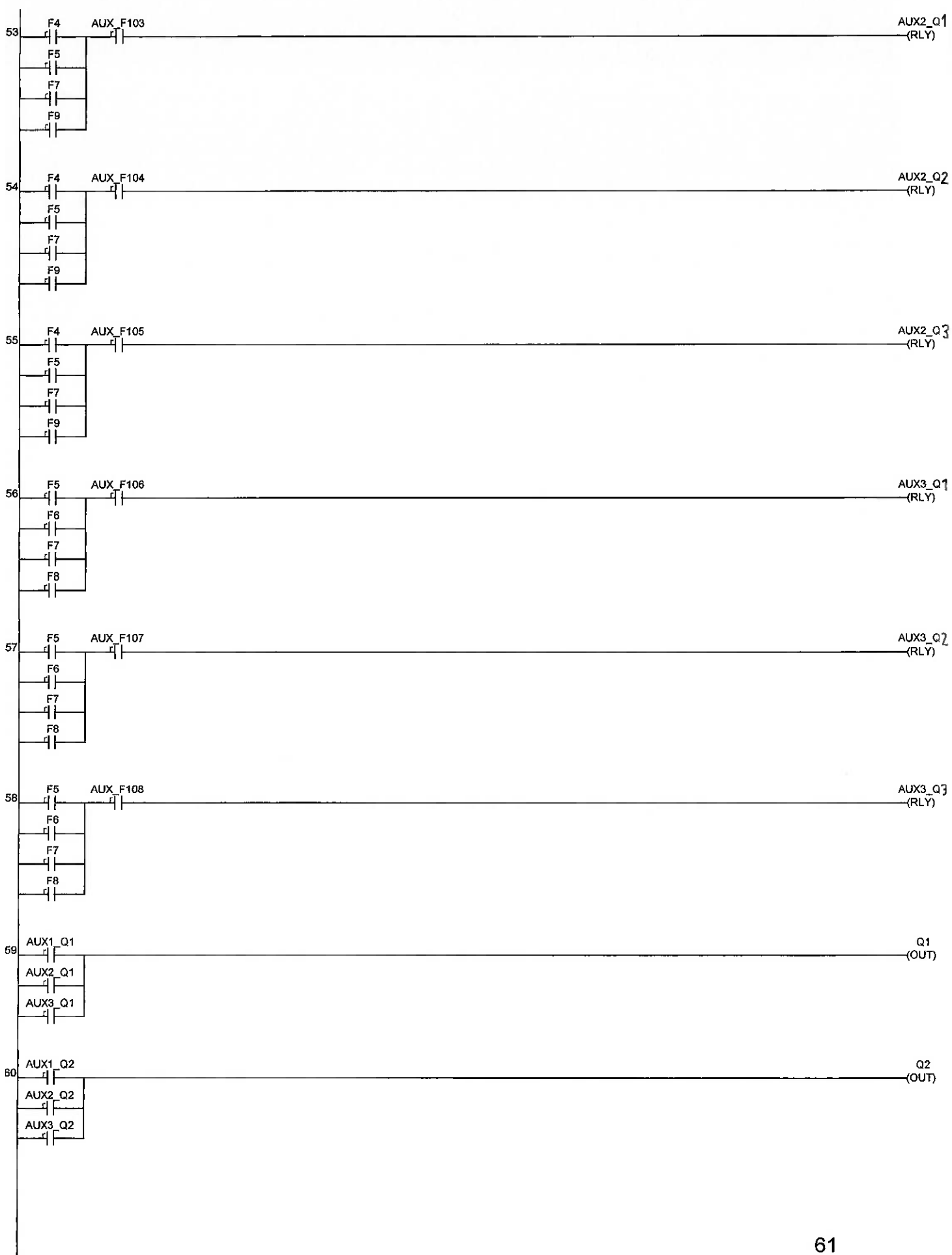


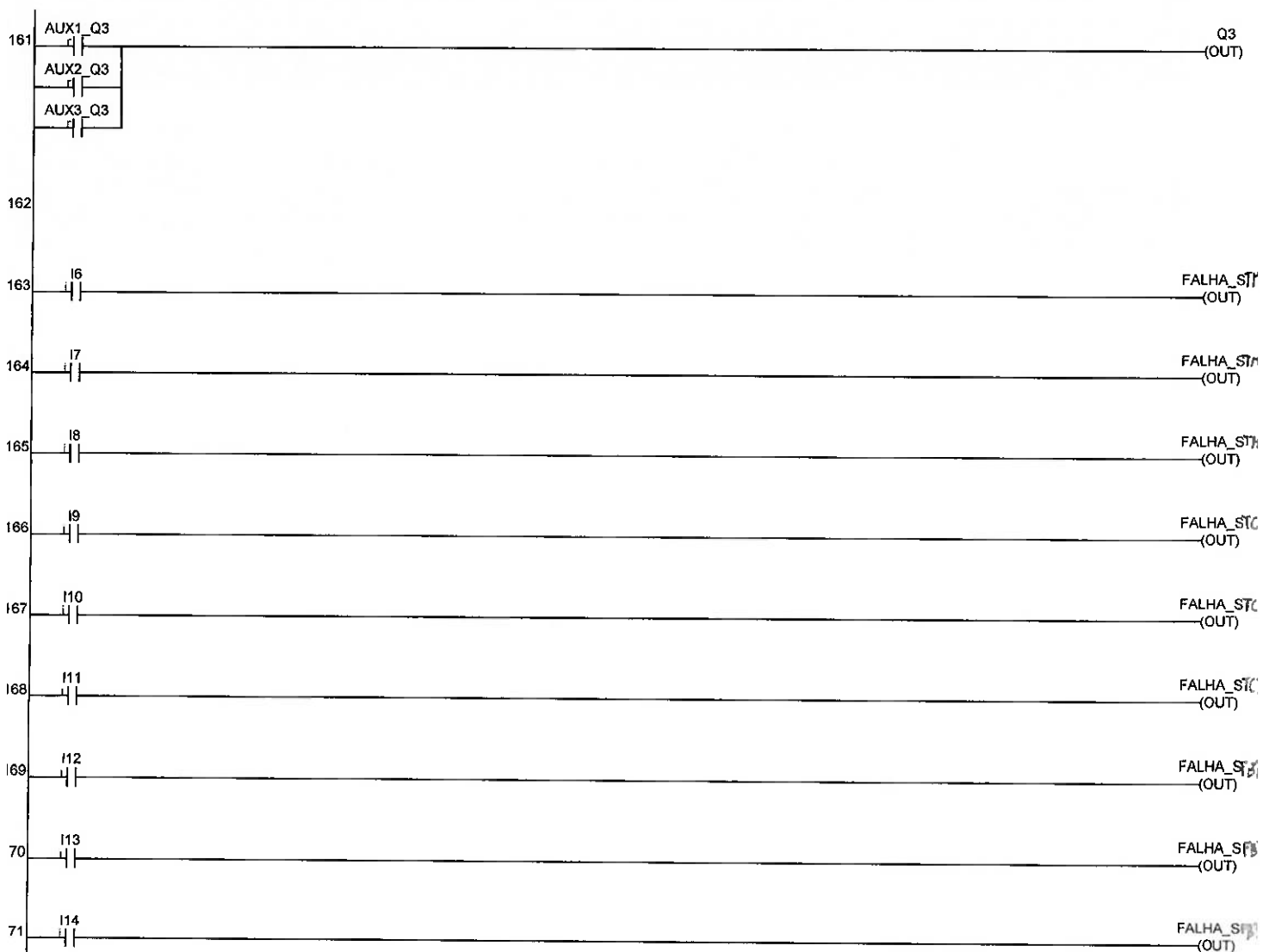












3.3.2 – Simulação

Uma vez desenhado o diagrama de relé no software Trilogi deve se proceder à etapa seguinte, a simulação do mesmo. Uma vez dado o comando RUN o sistema vai checar as falhas, caso não haja vai mostrar um janela com a evolução em tempo real das entradas, temporizadores, contadores, relés e saídas. Cada um destes elementos que foram definidos serão mostrados na janela que vai indicar se o mesmo vai assumir o estado ativo (valor 1) ou inativo (valor 0). Pelo comando do mouse, clicando-se nas entradas consegue modificar-se o estado de ativo para inativo ou vice-versa. Com isso é possível observar o comportamento do sistema incluindo a evolução das etapas para cada entrada desejada em separado ou combinadas. O programa também mostra qual contato está sendo ativado e qual bobina esta sendo energizada para cada instante.

A simulação mostrou que as saídas ficaram exatamente como esperado e que não houve nenhum tipo de conflito no sistema, habilitando o projeto a ser carregado no CLP.

3.3.3 – Carregamento do programa na máquina

Uma vez elaborado e simulado o programa em ladder, o próximo passo é o carregamento do mesmo na máquina. Deve-se portanto traduzir o programa feito anteriormente para a linguagem de programação do CLP. Esta linguagem de programação varia de acordo com o fabricante do CLP.

Alguns CLPs devem ser programados utilizando-se linguagens de programação propriamente ditas, outros podem ser programados utilizando-se diagramas ladder, e outros utilizando-se o próprio diagrama de Grafcet, o que é possível, já que, como já foi mostrado anteriormente, obter um diagrama ladder partindo-se de um Grafcet é uma tarefa simples e automática.

Para o CLP usado, o Micrologix 1500, a programação deve ser feita através do próprio diagrama ladder. Desta forma, devemos apenas reescrever o diagrama

ladder feito anteriormente, usando o software que acompanha o CLP e que pode ser executado em qualquer PC. E então, utilizando este mesmo software, carregar o programa no CLP, através da porta serial do PC.

Não é possível utilizar o mesmo diagrama ladder já digitado anteriormente, para a simulação no RSLogix, pois o RSLogix é um programa usado exclusivamente para a simulação de ladders, não sendo possível a programação de um CLP utilizando este programa. Da mesma forma, o software do Logix 1500 serve exclusivamente para a programação do CLP, não sendo possível fazer simulações nele.

No entanto as duas etapas são de extrema importância, pois a simulação é fundamental para a detecção de erros e possíveis melhoras no programa. Desta forma, embora haja um trabalho duplo de digitação, é importante que seja feita antes a simulação no Trilogi, caso contrário, seria muito difícil a detecção de erros.

A digitação do diagrama ladder para o software do CLP não apresenta nenhuma diferença significativa em relação ao Trilogi quanto à sintaxe, já a interface com o usuário é muito mais prática e eficiente, tornando muito simples esta etapa do projeto.

3.4 - Etapa de teste

Utilizando-se o CLP disponível no laboratório da Universidade, o Micrologix 1500, foi possível simular o funcionamento final de nosso sistema de controle. Evidentemente diversas adaptações e simplificações foram necessárias, já que não temos disponíveis o sistema completo, com os compressores de ar e sensores.

Além disso, a CLP disponível dispõe de apenas 12 entradas e 12 saídas, o que não é suficiente para o nosso sistema.

Desta forma, para tornar possível a simulação no CLP, as seguintes simplificações e adaptações foram feitas:

- No projeto original temos 3 sensores de erro para cada compressor, na simulação teremos apenas 1 para cada compressor, o que não altera o funcionamento do sistema, já que no caso de qualquer um dos sensores indicar falha, o compressor seria desligado, portanto a simplificação seria apenas quanto à monitoração, pois haverá a indicação de erro no compressor, sem especificar o tipo de erro.
- O acionamento das válvulas de alívio dos compressores foi ignorado, assim como as leituras de pressão destes, o que também não altera o funcionamento do sistema, pois estes acionamentos funcionam apenas como segurança do compressor e não tem influência no sistema de controle de pressão da linha.
- As condições de pressão são obtidas através do sensor de pressão na linha (SPL), este sensor fornece um sinal elétrico, analógico e proporcional à pressão, este sinal deveria ser então digitalizado em quatro bits (CP1, CP2, CP3 e CP4) , através de circuitos comparadores. Para a simulação, usaremos 4 sensores magnéticos, representando as quatro condições de pressão, esses sensores são acionados pela aproximação de qualquer objeto metálico. Deve-se lembrar que essas condições de pressão jamais ocorreriam simultaneamente no caso real, portanto, para que a simulação seja feita corretamente deve-se tomar o cuidado

de jamais acionar mais de um desses sensores magnéticos simultaneamente. Mais uma vez temos uma simplificação que não compromete em nada o sistema.

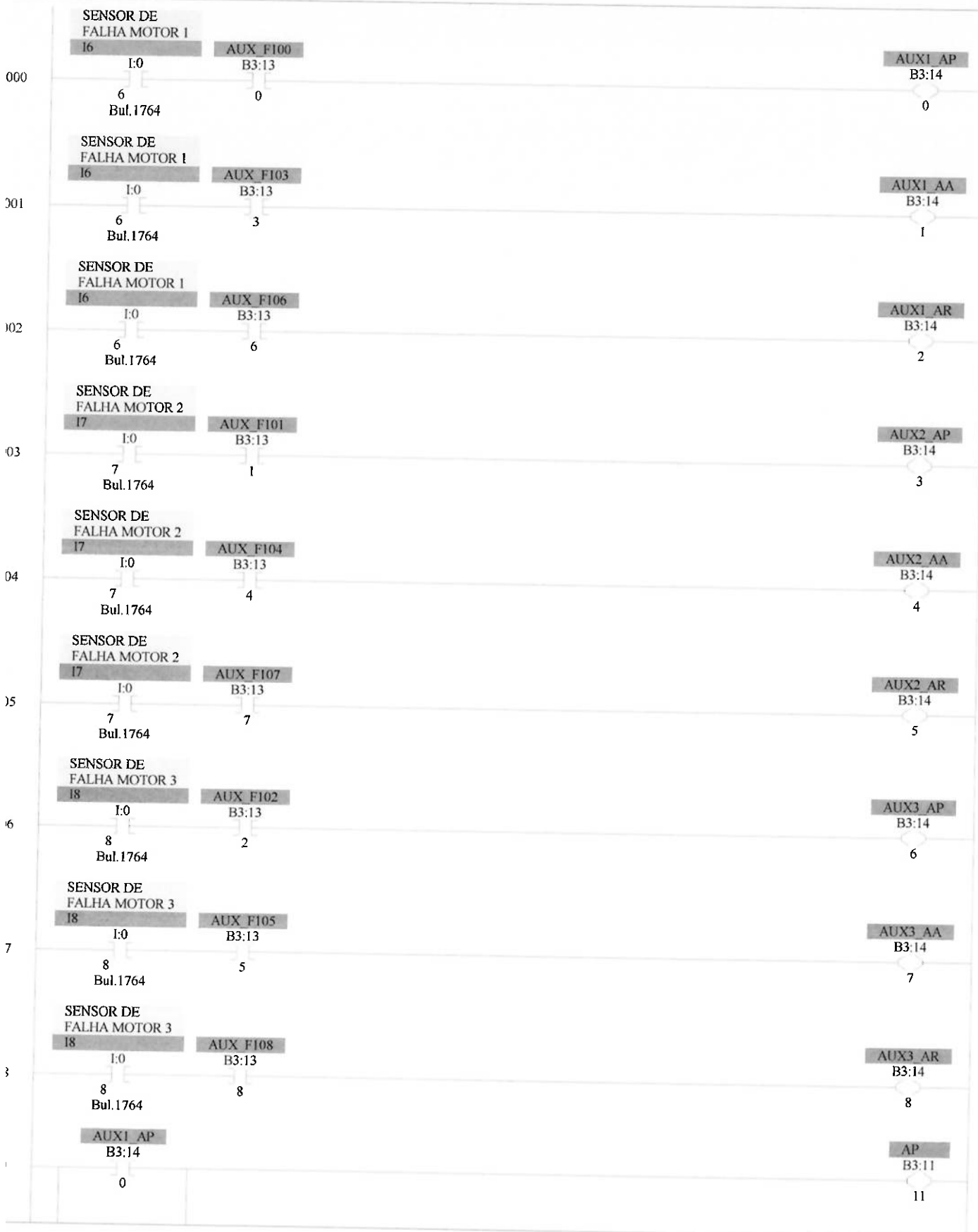
- Como não temos disponíveis sensores de temperatura, esses serão simulados por outros sensores magnéticos, aproximando um objeto metálico destes sensores fazemos com que eles emitam um sinal ao CLP, simulando assim uma falha de temperatura detectada pelo sensor de temperatura.

- Os sinais emitidos pelo CLP responsáveis pelo acionamento dos motores, serão ligados a LEDs, desta forma, veremos no painel de controle quais compressores estariam ligados em cada momento.

Teremos portanto para a simulação os seguintes sinais de entrada e saída:

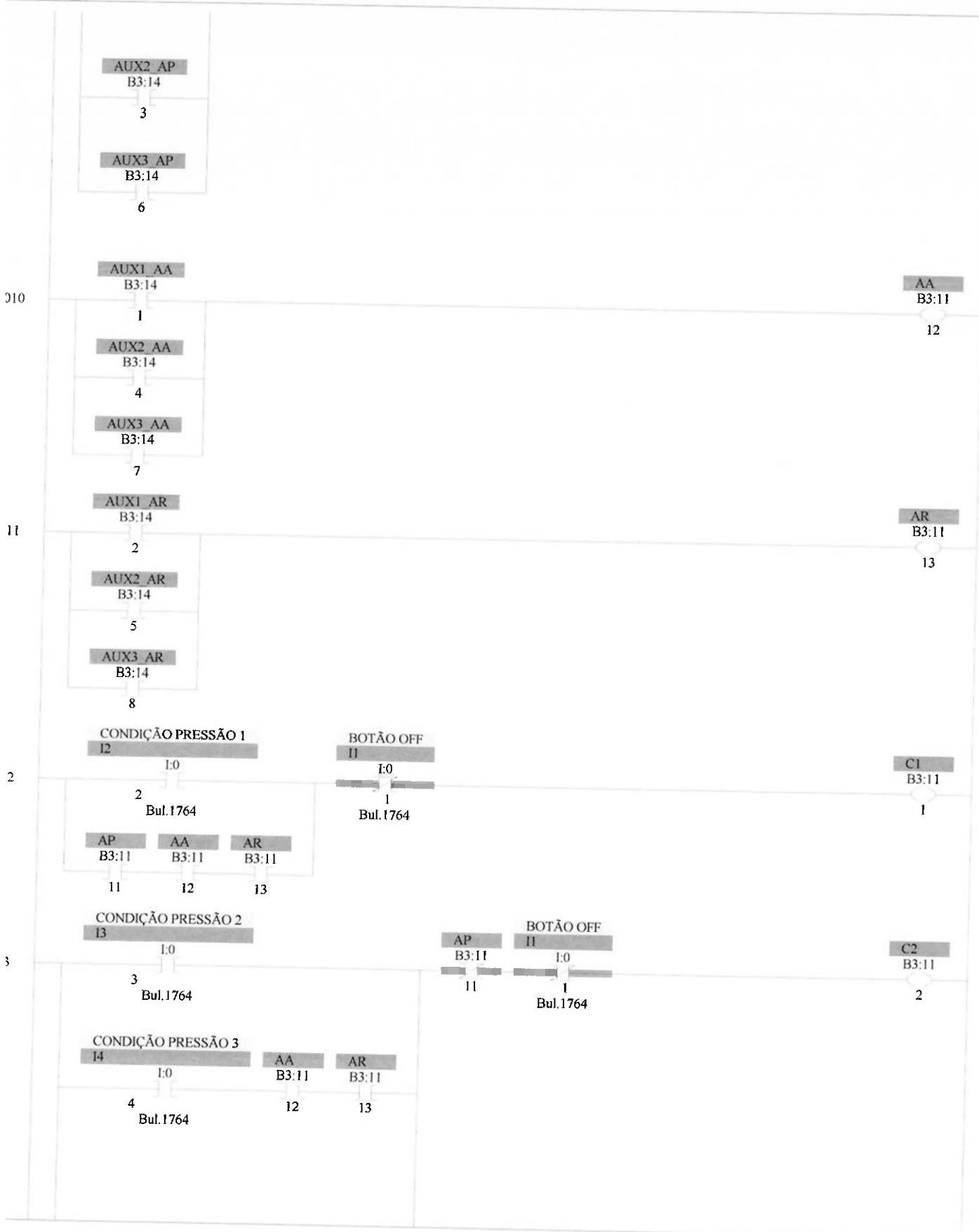
- Botão START, usado para iniciar o sistema. Conectado à entrada I0 do CLP.
- Botão OFF, usado para desligar o sistema, retornando para o estado inicial. Conectado à entrada I1 do CLP.
- 4 sensores magnéticos CP1, CP2, CP3 e CP4, simulando as condições de pressão 1 a 4. Conectados às entradas I2 a I5 do CLP.
- 3 sensores magnéticos Falha 1, Falha2 e Falha3, simulando os sensores de falhas dos compressores. Conectados às entradas I6 a I8 do CLP.
- Botões Compressor1, Compressor2 e Compressor3, usados para a escolha dos compressores principal, auxiliar e reserva. Conectados as entradas I9 a I11 do CLP.
- Leds Motor1, Motor2 e Motor3, indicando o acionamento dos compressores. Conectados as saídas O1 a O3 do CLP.
- Leds Falha1, Falha2 e Falha3, indicando quando há falha em algum compressor. Conectados as saídas O4 a O6 do CLP.

Temos portanto o seguinte programa final a ser carregado no CLP:

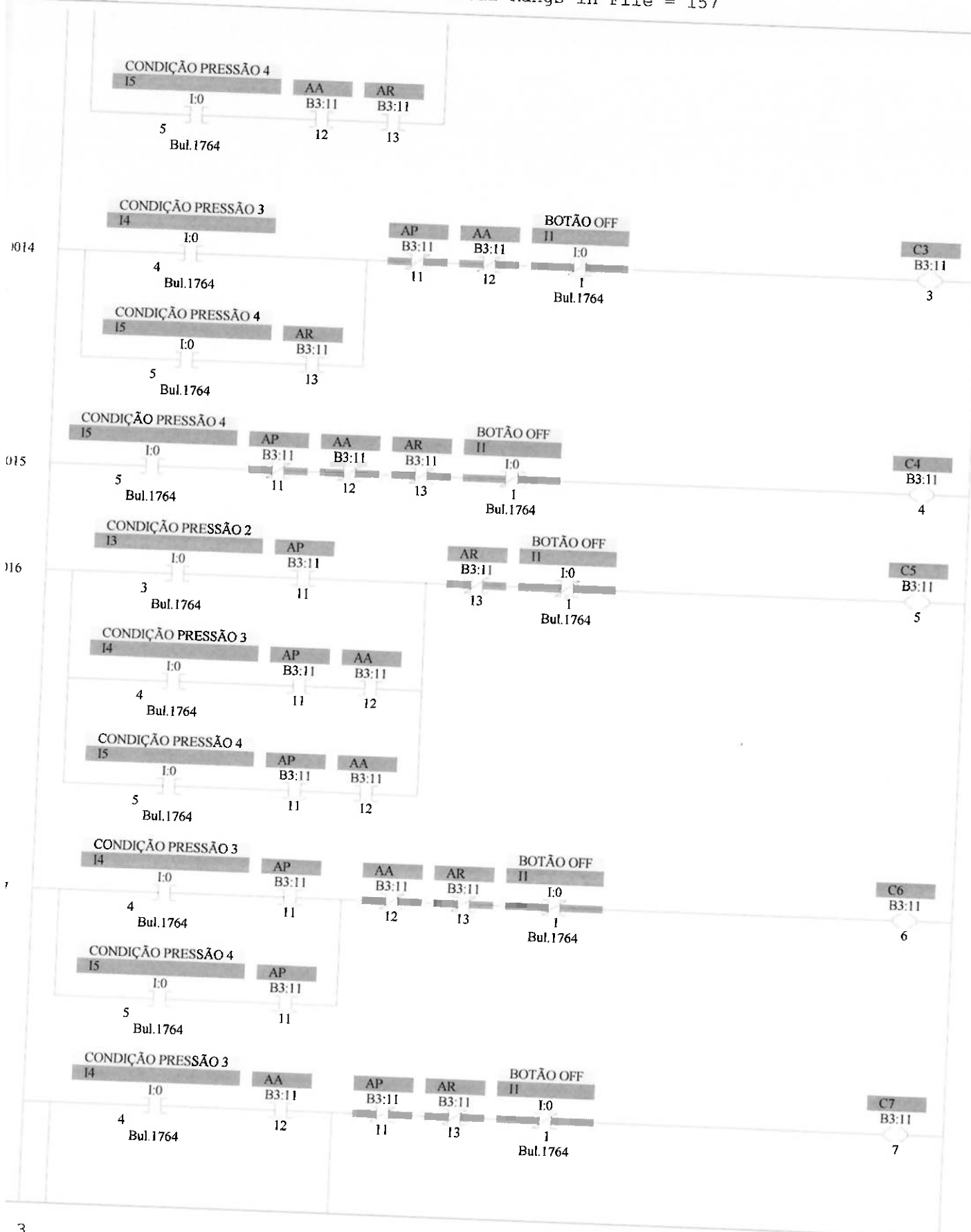


e 1

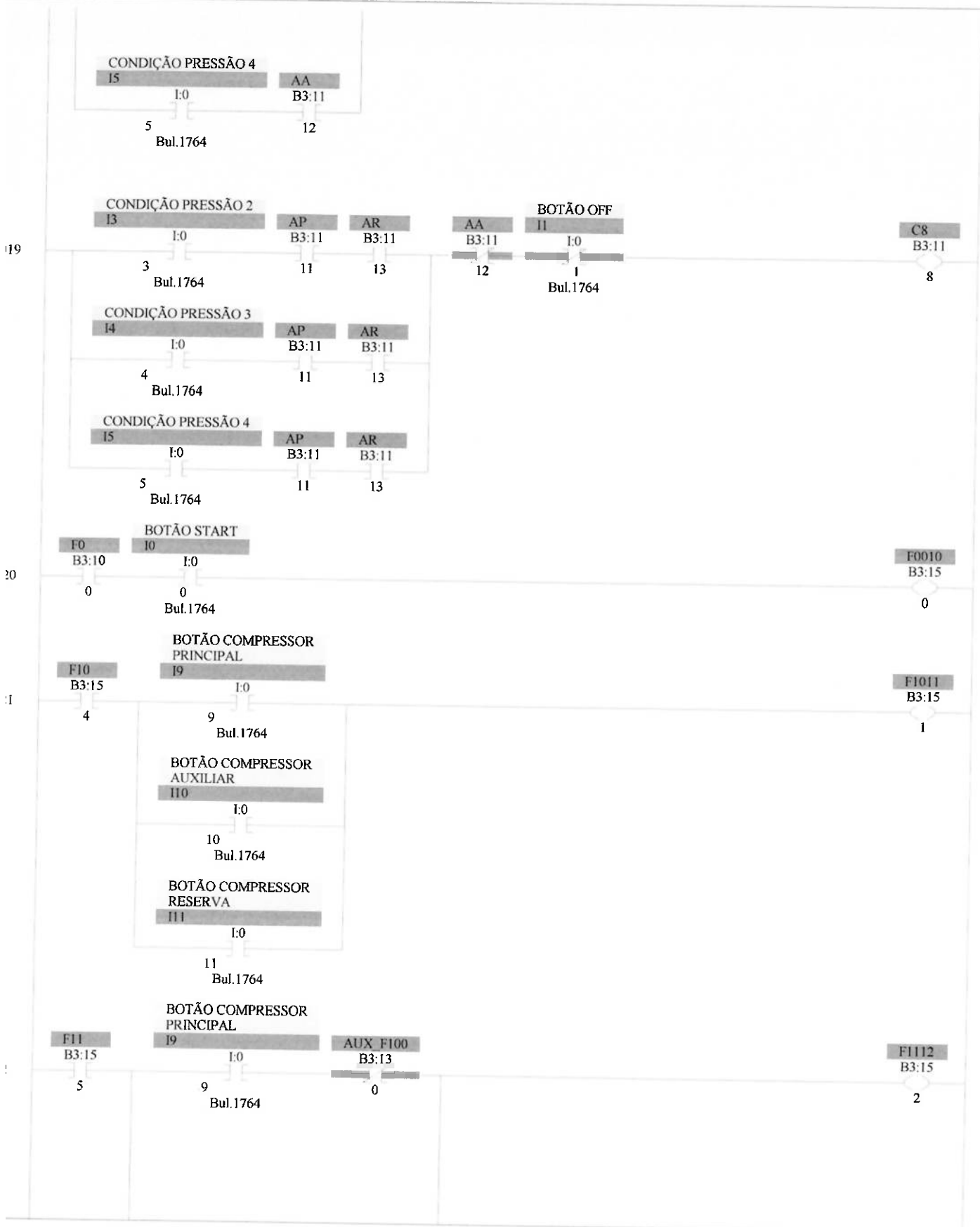
Friday, May 24, 2002 - 12:21:39



Friday, May 24, 2002 - 12:21:48



Friday, May 24, 2002 - 12:21:48



Friday, May 24, 2002 - 12:21:48

23

4

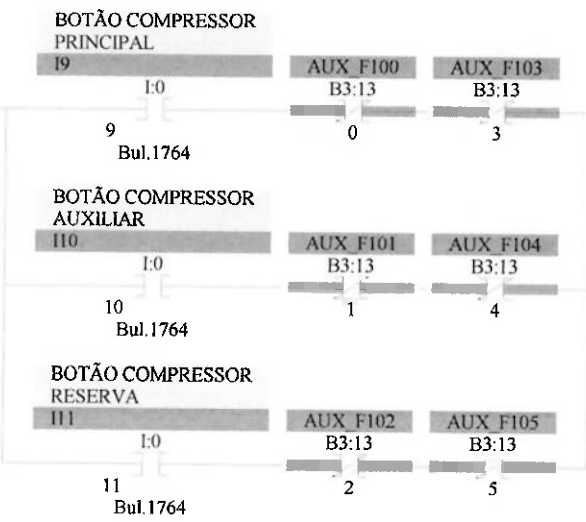
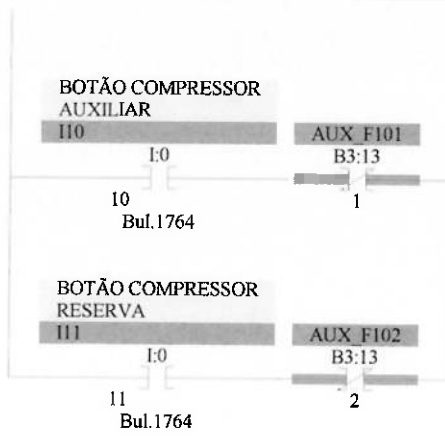
5

6

7

8

9



F012
B3:15
6

F1201
B3:15
3

F1
B3:10
1

C1
B3:11
1

F1
B3:10
1

C2
B3:11
2

F1
B3:10
1

C3
B3:11
3

F1
B3:10
1

C4
B3:11
4

F1
B3:10
1

C5
B3:11
5

F1
B3:10
1

C6
B3:11
6

F12
B3:1
2

F13
B3:1
3

F14
B3:1
4

F15
B3:1
5

F16
B3:1
6

F17
B3:1
7

ve 5

Friday, May 24, 2002 - 12:21:48

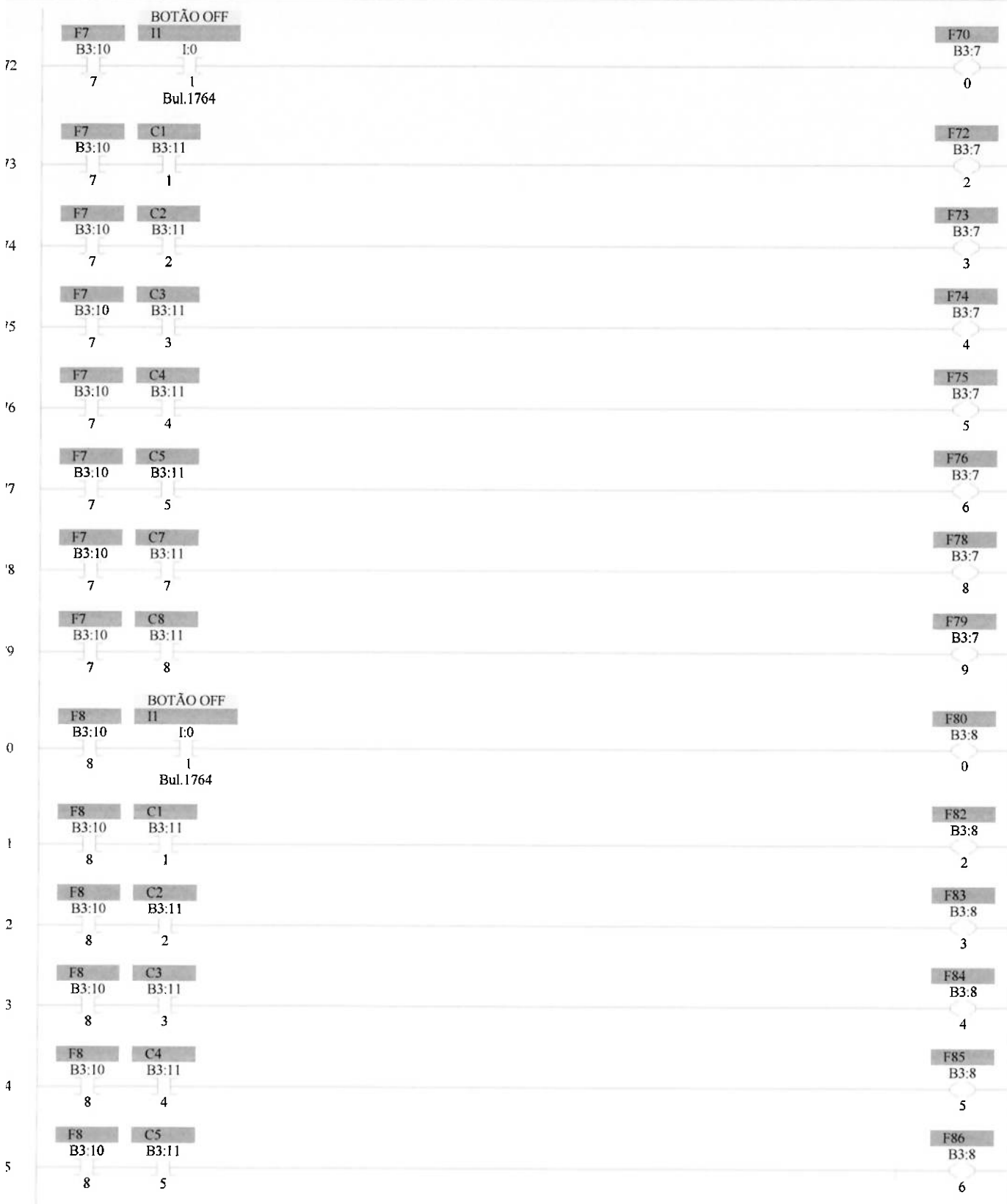




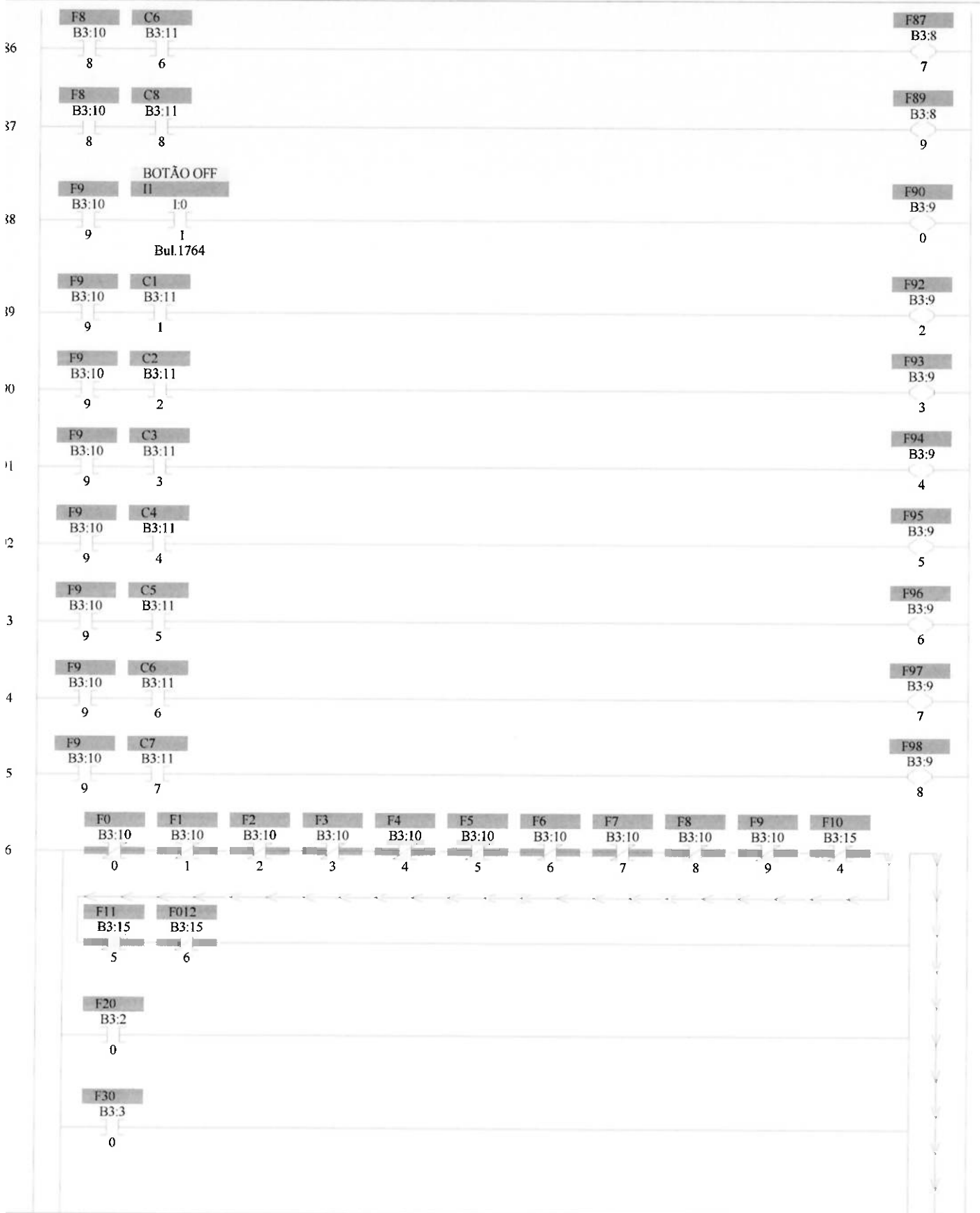
LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157

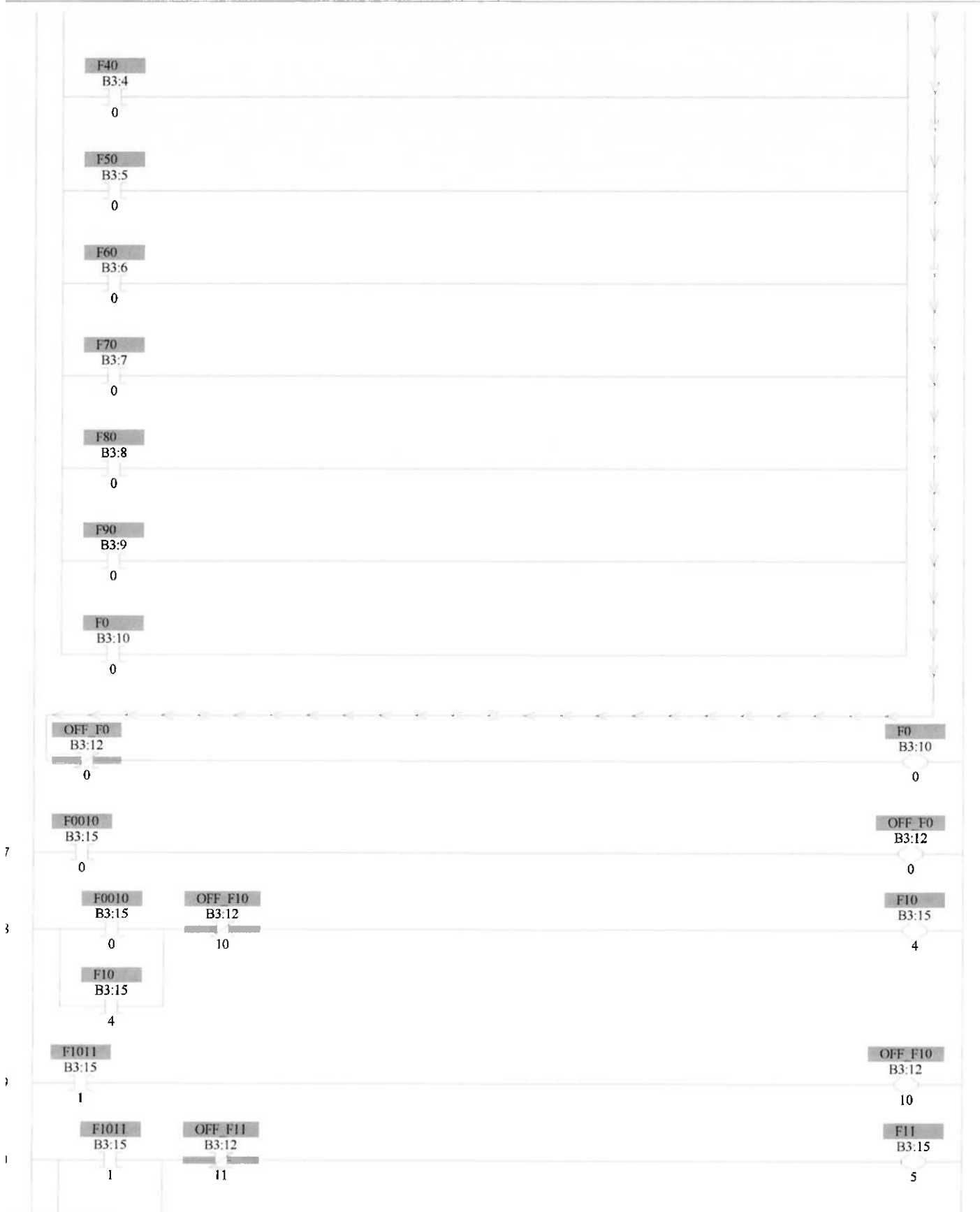


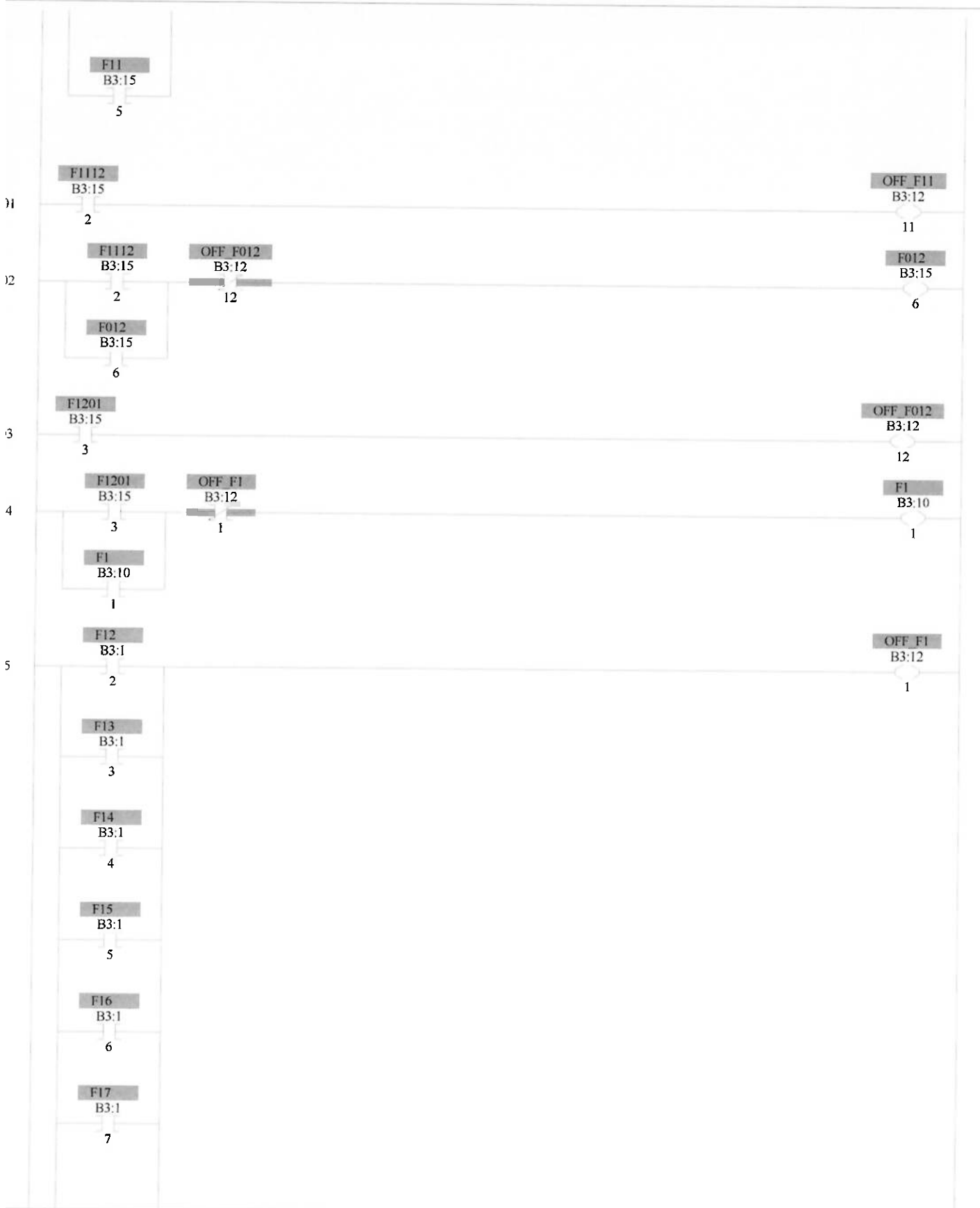
LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157



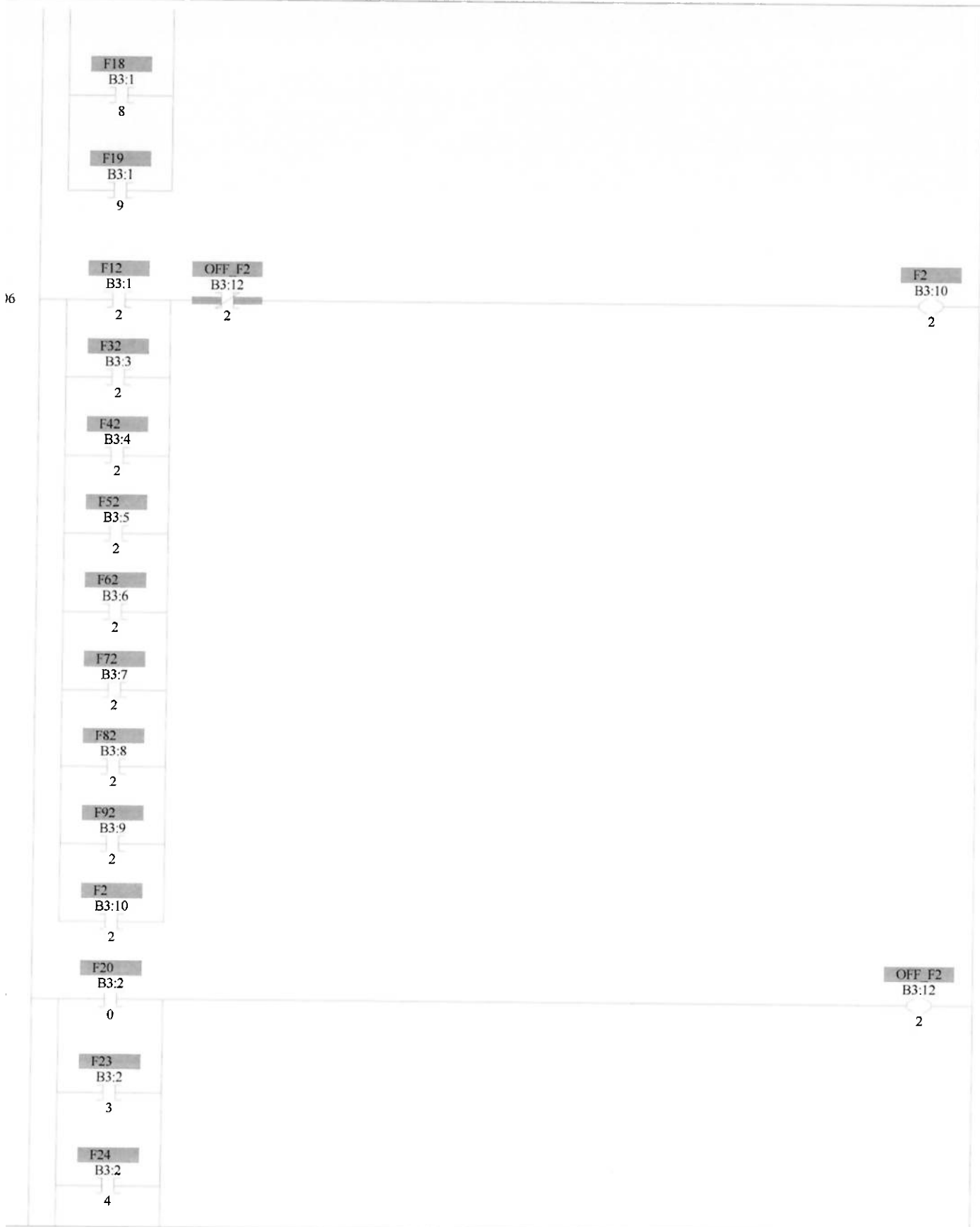
LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157





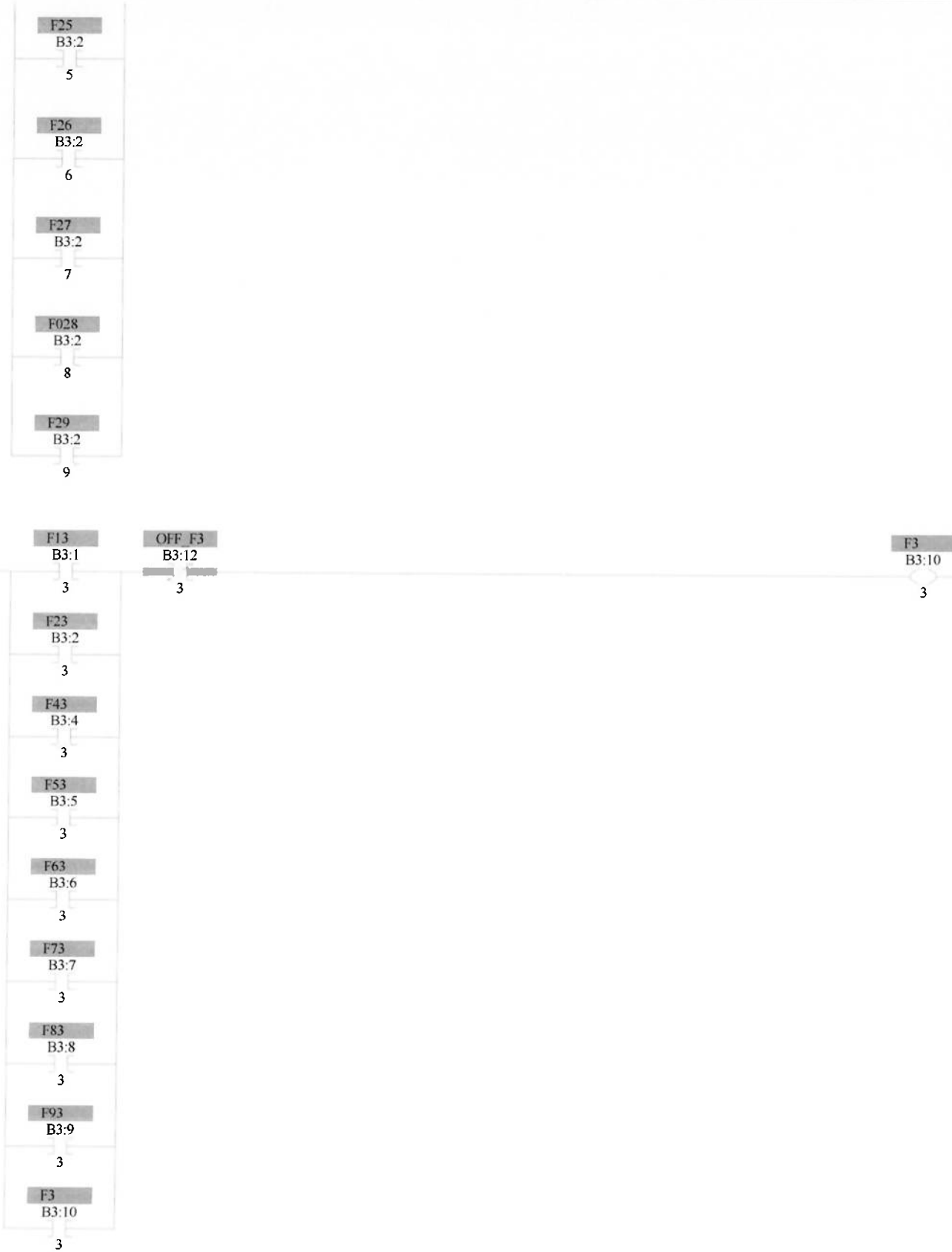


LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157



LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157

8



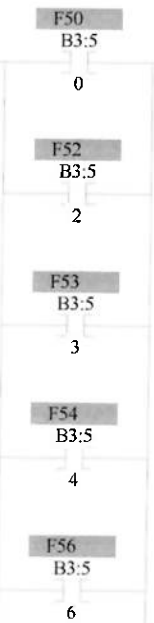
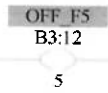
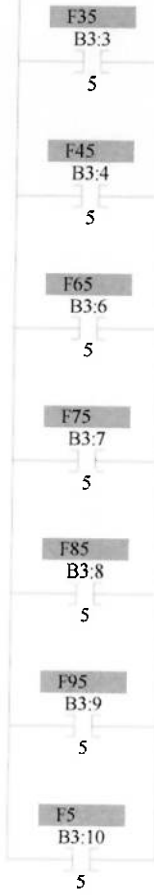
e 14

Friday, May 24, 2002 - 12:21:49



LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157





LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157



e 18

Friday, May 24, 2002 - 12:21:49

LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157



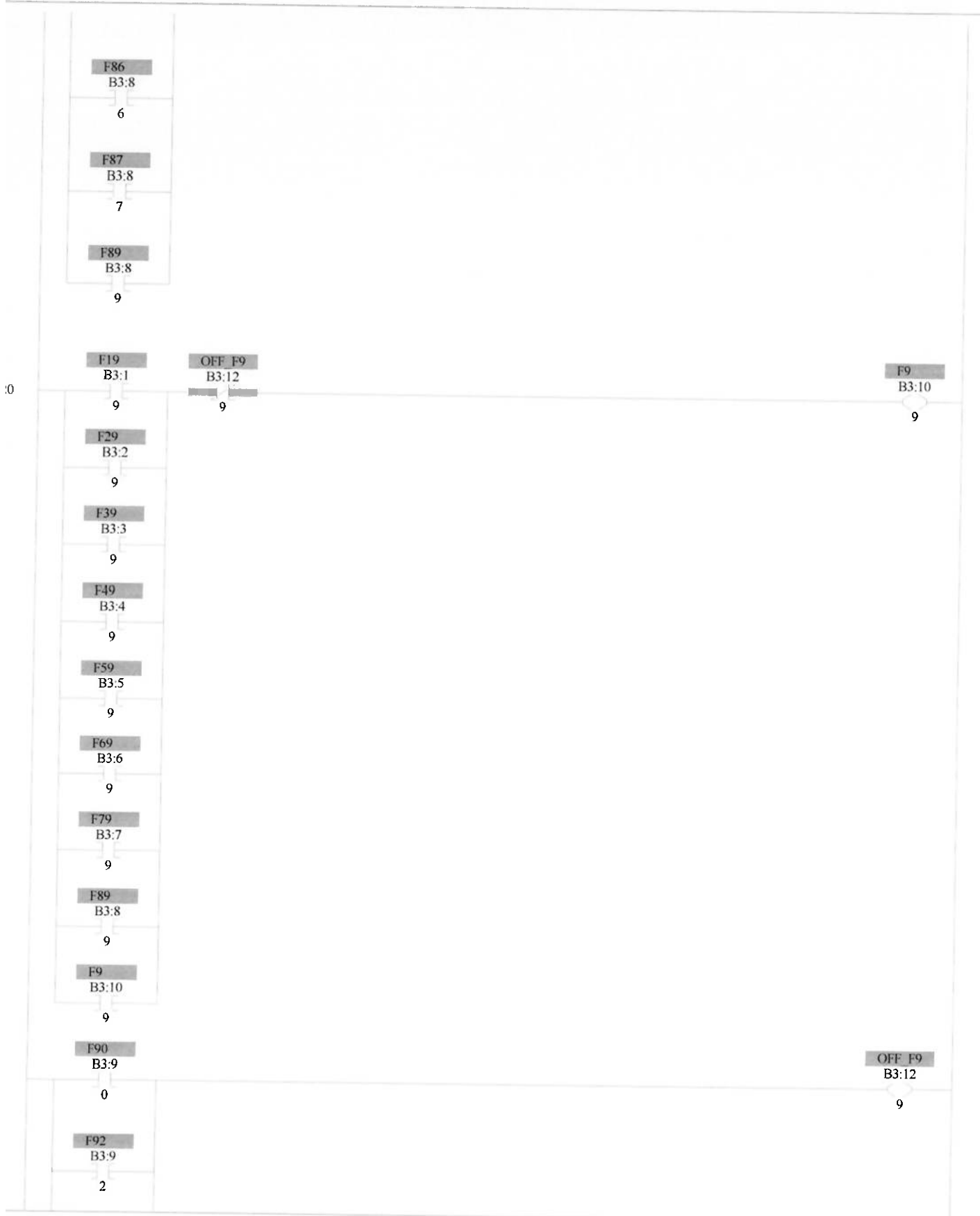
LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157



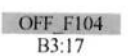
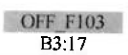
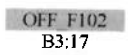
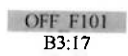
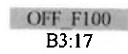
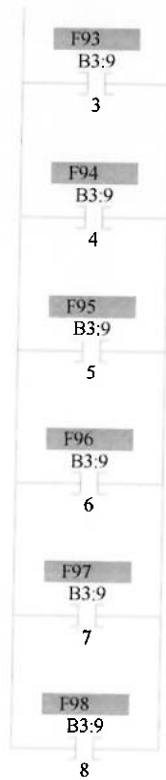
LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157



LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157



LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157

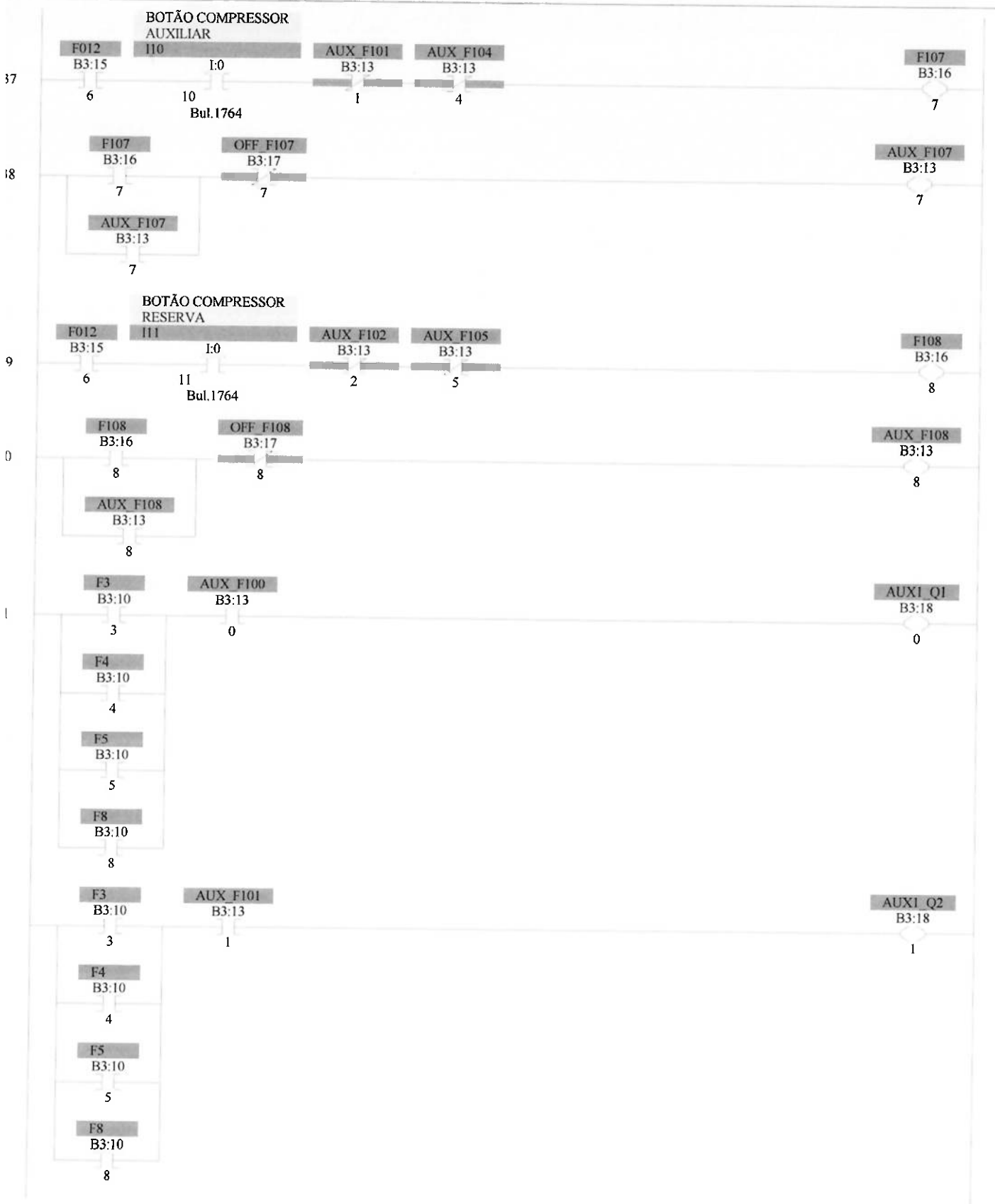




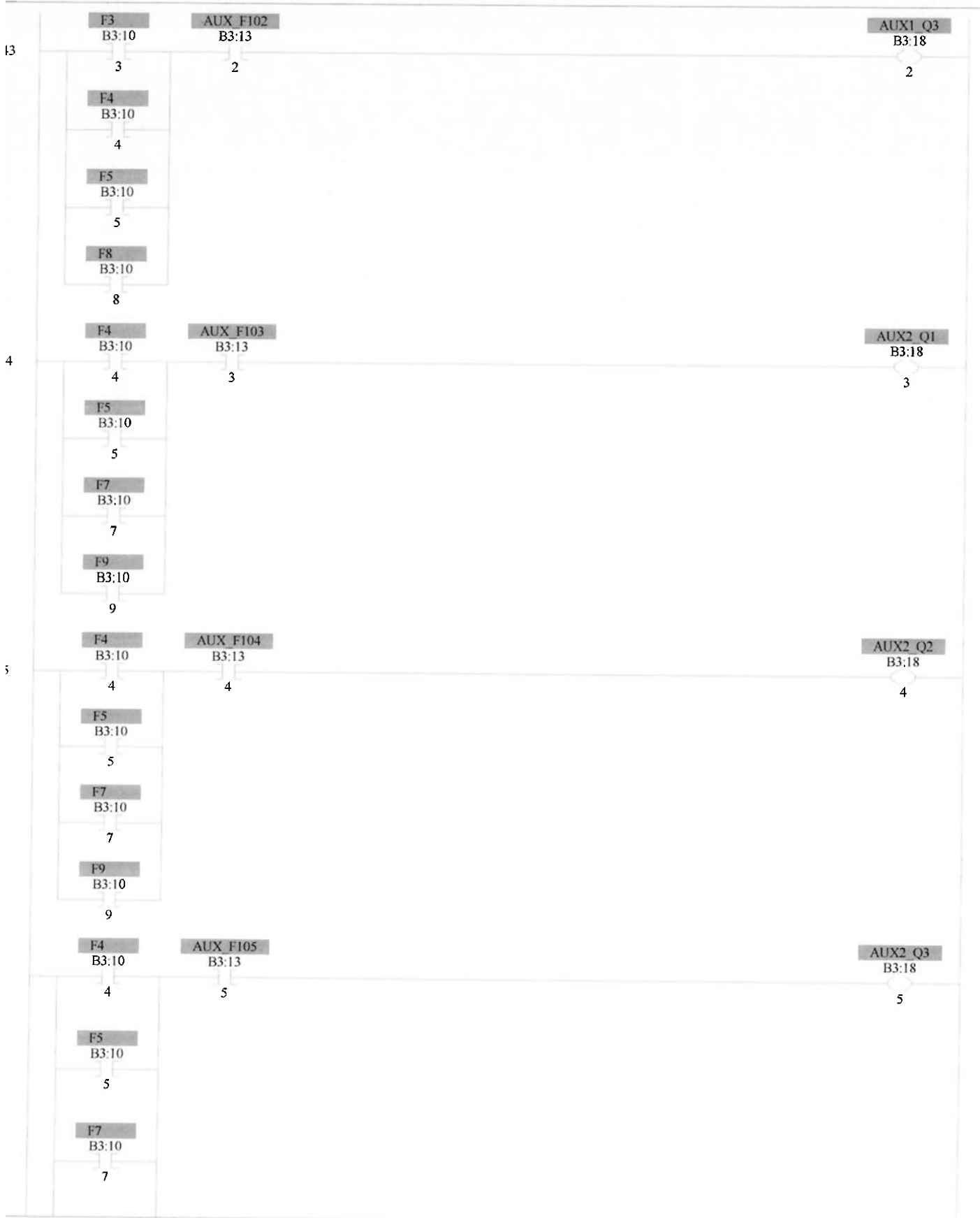
LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157



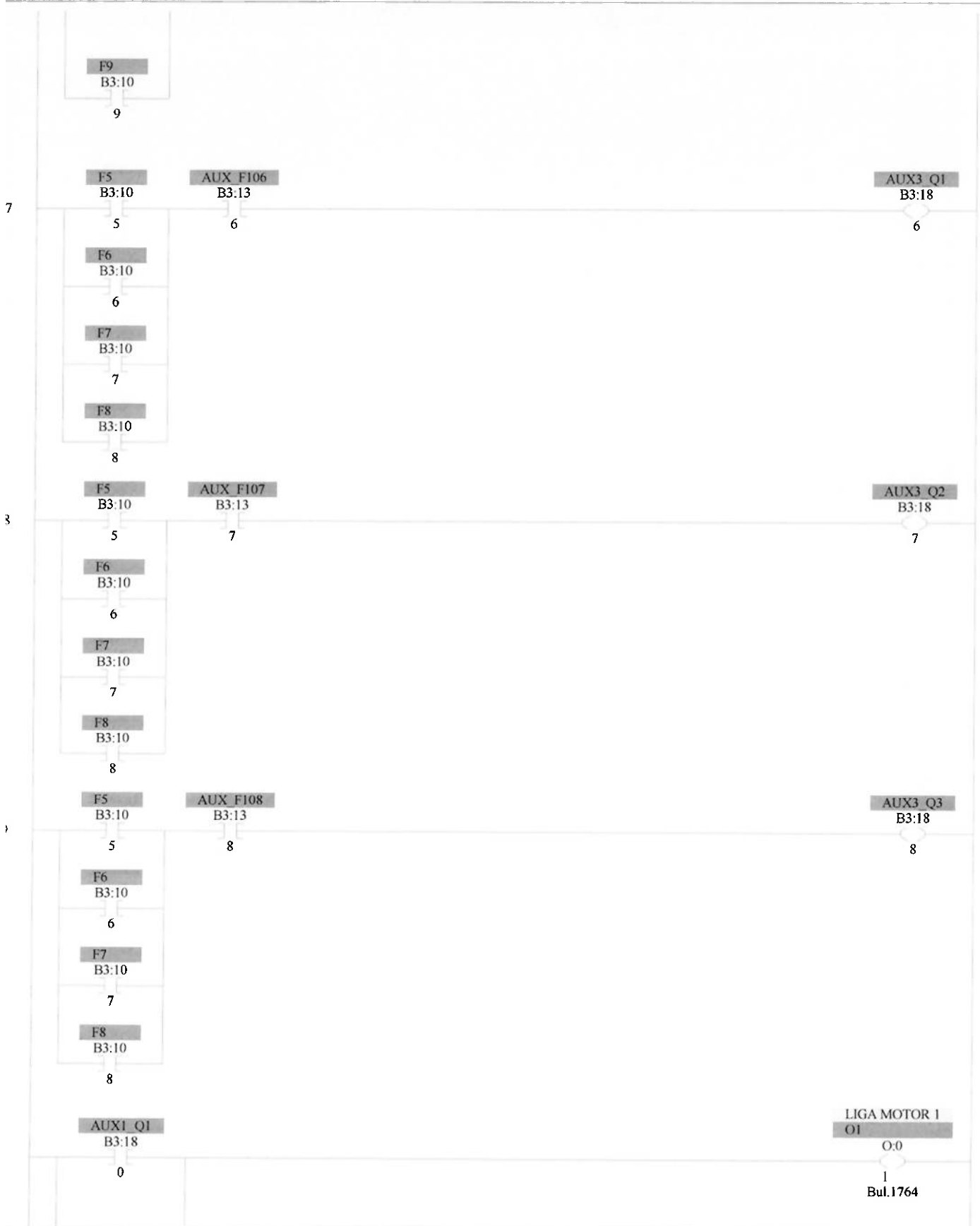
LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157



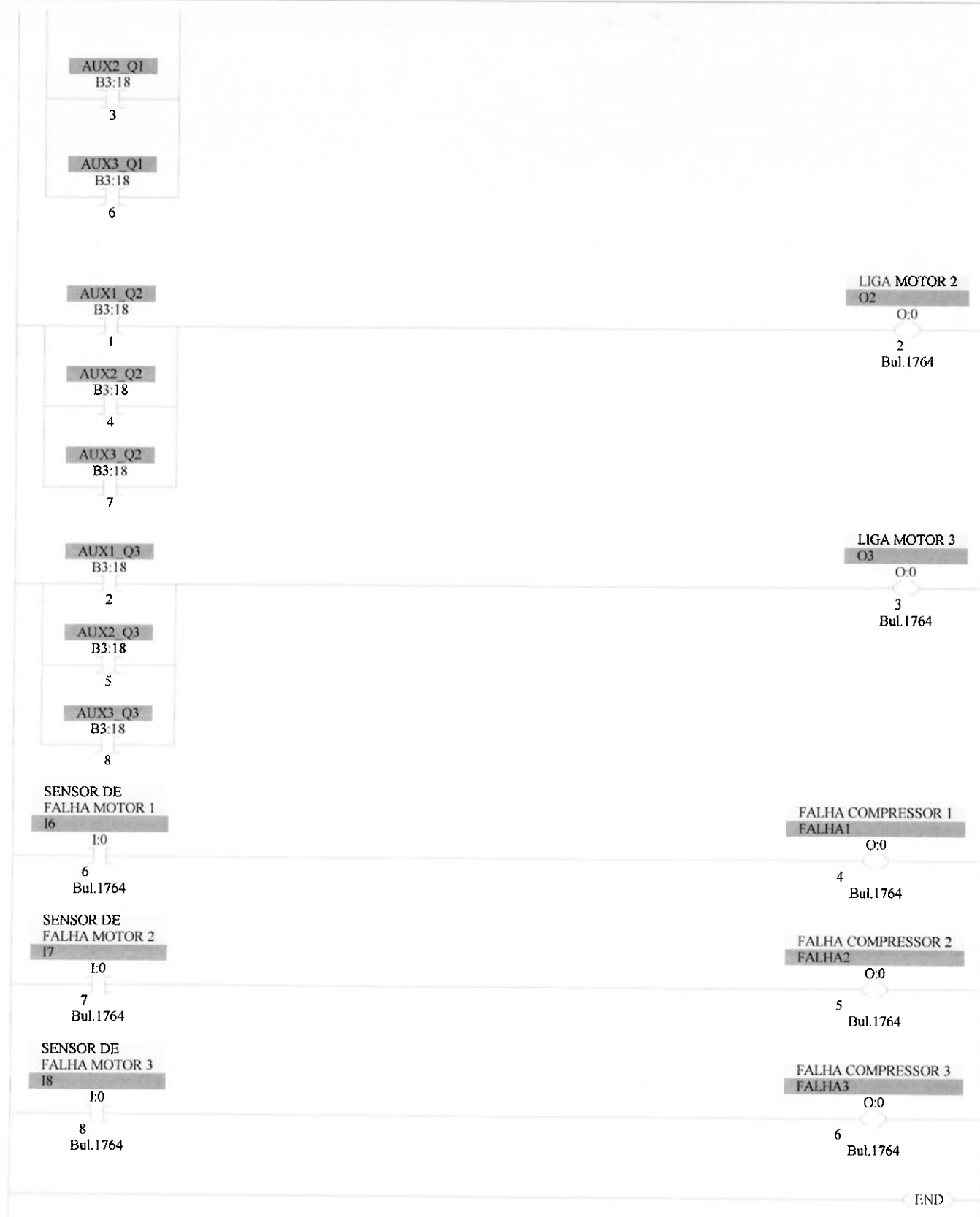
LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157



LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157



LAD 2 - --- Total Rungs in File = 157



3.4.1 - Testes finais do sistema

Foi montado o aparato de testes composto pela CPL e pelos sensores, botões e Leds, conforme explicado anteriormente. Seguiu-se então a simulação do sistema de forma a simular todas as possíveis situações do sistema real.

Todas as possíveis passagens de condição de pressão foram testadas, e sempre foram acionados os compressores que se esperava. Em seguida os mesmos testes foram repetidos, desta vez incluindo-se situações de falha em um ou mais compressores, e mais uma vez os resultados esperados foram encontrados.

Por fim finalizou-se o processo, através do botão OFF e em seguida reiniciou-se, pelo botão START, a fim de se verificar se o sistema estava sendo corretamente reinicializado, e novamente o sistema funcionou perfeitamente.

4 - Conclusões

A metodologia utilizada mostrou-se muito eficaz, gerando um sistema de controle final eficiente, flexível e ao mesmo tempo de fácil compreensão. Portanto, ficou evidente que a utilização de métodos não tradicionalmente usados para o controle de sistemas pneumáticos, como o Grafcet, podem ser utilizados, evidentemente após mostrar que o sistema pode ser considerado um sistema a eventos discretos, obtendo-se resultados satisfatórios.

Além disso, a utilização da metodologia, que visava obter vantagens tais como reutilização e manutenção, também se mostrou muito eficiente. Durante a elaboração do projeto foi necessário mais de uma vez, fazer alterações em requisitos do projeto, e isto acabou sendo feito com relativa facilidade.

Um exemplo foi o caso da escolha de qual compressor seria o principal, o auxiliar e o reserva. Inicialmente, o sistema de controle foi projetado sem que se pudesse escolher os compressores e, aparentemente, esta mudança poderia causar grandes alterações no projeto. No entanto apenas foi necessário incluir alguns estados no Grafcet (estados 10, 11 e 12), e conseqüentemente mudar e adicionar algumas linhas no diagrama de reles.

Conforme declaração do próprio engenheiro responsável pelo projeto original, uma alteração destas seria extremamente difícil de ser realizada no sistema original. Já para um engenheiro que não estivesse sido envolvido neste projeto original, devido a não existência de uma documentação adequada, seria praticamente impossível.

Deve-se ressaltar também que o sistema projetado apresenta vantagens em relação ao sistema que foi projetado para a fabrica real. Por exemplo, no projeto original, caso um compressor falhe, o reserva entra em operação, mas caso este também falhe, nada acontece. Já para o presente projeto, ocorrendo a falha o auxiliar iria entrar em funcionamento, ou seja, o sistema foi otimizado, de forma a priorizar sempre o objetivo principal do sistema, ou seja, manter a pressão da linha próxima do setpoint.

Outro ponto interessante a ser ressaltado é as alterações que foram feitas no sistema ao longo da concepção do projeto. A idéia inicial foi mantida, porém, alguns pontos que se imaginava estarem corretos necessitaram alterações. Essas alterações ao longo do projeto só se tornaram possíveis devido às realimentações constantes do projeto. O projeto final mostrou-se perfeitamente possível de ser implementado e os benefícios desejados foram adquiridos.

5 - Bibliografia

- Miyagi, P.E.: Controle Programável - Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1996, reimpr. 1997.
- Silveira, P. R. e Santos, W. E.: Automação e Controle Discreto, Editora Érica, São Paulo, 1998.
- Natale, F.: Automação Industrial, Editora Érica, São Paulo, 1995.
- Oliveira, J.C.P.: Controlador Programável, Makron Books Editora, São Paulo, 1993.
- Cardoso, J. e Valette, R.: Redes de Petri, Editora da UFSC, Florianópolis, 1997.
- Paulo R. da Silveira e Winderson E. Santos : Automação e controle Discreto, Editora Érica, São Paulo 1998.
- Taub, Hernert: Circuitos Digitais e Microprocessadores, Editora McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1984
- Notas de aula do curso de PMC-329 – Simulação e Modelagem de Sistemas a Eventos Discretos
- Malvino, Albert Paul: Eletrônica, Editora Makron Books, São Paulo, 1995.
- www.schneider.com.br
- www.schulz.com.br
- www.aircompressoronline.com
- www.atlascopco.compressors-usa.com
- www.sensorexpress.com.br
- www.chinawebs.com/huadong
- www.certecpressostato.com.br
- www.danfoss.com
- www.wahler.com.br
- www.trilogi.com

▪ **Contatos:**

- Engenheiro André Cavaleiro Tel: (013)9775-6620 – engenheiro responsável pela implementação real do sistema na planta
- Prof. Dr. Diolino J. dos Santos Filho Tel: (011)9135-1397 – orientador do trabalho