

**DAS** Departamento de Automação e Sistemas  
**CTC** **Centro Tecnológico**  
**UFSC** Universidade Federal de Santa Catarina

# **Supervisão e controle de um processo de impregnação de estatores para motores elétricos**

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito para a aprovação na disciplina  
**DAS 5511: Projeto de Fim de Curso***

***Henrique Salvaro Furtado***

*Florianópolis, fevereiro de 2016*

# **Supervisão e controle de um processo de impregnação de estatores para motores elétricos**

***Henrique Salvaro Furtado***

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina  
**DAS5511: Projeto de Fim de Curso**  
e aprovada na sua forma final pelo  
**Curso de Engenharia de Controle e Automação**

***Prof. Max Hering de Queiroz***

---

Assinatura do Orientador

## Banca Examinadora:

Humphrey Graciosa  
*Orientador na Empresa*

Prof. Max Hering de Queiroz  
*Orientador no Curso*

Marcio Possamai  
*Orientador na Empresa*

Gustavo Peres  
*Orientador na Empresa*

Daniel Martins Lima  
*Avaliador*

Mathieu Granzotto  
Nicholas Roberto Drabowski  
*Debatedores*

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer meus pais, meu irmão e à toda minha família pelo apoio incondicional. Agradeço também a todos aqueles que tive contato dentro da WEG, principalmente aos participantes do grupo de automação de processos, com quem aprendi muito, tanto dentro quanto fora da empresa.

Agradeço a todos os amigos que fiz nesses 6 anos de faculdade, em especial aos amigos da turma 10.1, com quem ingressei na faculdade, e que até hoje se mantém unida em todos os momentos.

E por fim, agradeço a todos os professores do DAS com quem tive contato, são, em muito, responsáveis pela formação de quem sou tanto no aspecto pessoal quanto no aspecto técnico. Agradeço ao prof. Max Hering de Queiroz pela orientação e por ter se mostrado um grande profissional em todos os contatos que tivemos durante esses 6 anos.

## Resumo

O PFC foi realizado no departamento de Engenharia Industrial da WEG, que é responsável por propor ações para reduzir o desperdício e aumentar a produtividade dos processos de fabricação, capacitar/atualizar tecnicamente as unidades fabris, determinar tempos e métodos de fabricação, especificações operacionais, etc. O local físico de desenvolvimento do projeto é o Departamento de Fabricação III, responsável pela montagem dos motores carcaça 280 a 315 (tamanho do chão ao eixo, em milímetros).

Fundada em 1961 a WEG é uma empresa brasileira que atua no desenvolvimento e fabricação de motores elétricos, equipamentos de automação, transmissão e distribuição de energia, tintas, entre outros. Atualmente a WEG figura entre os maiores fabricantes de motores elétricos do mundo, tendo seu maior parque fabril situado na cidade de Jaraguá do Sul - SC. A gama de motores elétricos produzidos pela empresa varia desde pequenos motores utilizados em máquinas de lavar roupa, até motores utilizados na indústria de petróleo e gás e aerogeradores.

O projeto proposto visa aumentar os níveis de controlabilidade e rastreabilidade do processo de impregnação de estatores realizado na Fábrica III, uma vez que o sistema é operado de forma totalmente manual, salvo medições pré e pós processo, visando determinar a aprovação (ou não) dos estatores impregnados. Para tal, objetiva-se desenvolver um sistema responsável por supervisionar o processo em questão (rastreabilidade) e controlar os vários parâmetros envolvidos no processo (controlabilidade), de modo a garantir que o mesmo esteja sendo realizado dentro dos limites especificados em norma e, caso não esteja, ter essas anomalias registradas.

Devido ao tamanho e ao alcance do projeto proposto, foi desenvolvido, inicialmente, um piloto visando comprovar a viabilidade e a eficácia do mesmo. Para tal, foram realizados uma série de ensaios no local, visando levantar e analisar parâmetros envolvidos no processo (tempos, temperaturas, etc). Com estes dados torna-se possível controlar o processo com base no histórico avaliado, histórico esse que, com o aumento da rastreabilidade, tende a se tornar algo mais volumoso e, conseqüentemente, passará a ser mais confiável.

## **Abstract**

The project has as main goals increasing the controllability and traceability levels of the trickle impregnation process of stators, given that nowadays the process is mainly manually operated and has virtually no traceability features, besides two weight measurements taken before and after the process has occurred, those measurements are then used to decide whether the impregnated stator is approved or not. To achieve these goals, a system aiming to supervise and control the aforementioned process is going to be developed, guaranteeing that the process will occur using the standard values and registering the events where that isn't happening.

However, considering the size and reachability of the conceived idea, at first the project had to be tuned down a notch, starting with a smaller implementation to be developed in order to prove the project's viability and effectivity. A handful of tests were done to analyze and find the ideal values of the process's parameters, in order to make viable controlling said parameters and the process itself.

# Sumário

Agradecimentos.....	4
Resumo .....	5
Abstract .....	6
Sumário .....	7
Simbologia.....	10
Capítulo 1: Introdução .....	11
Capítulo 2: Conceitos e descrição do processo.....	13
2.1: Automação industrial.....	13
2.1.1: Controlador Lógico Programável .....	13
2.2: Controle .....	13
2.3: Supervisão .....	14
2.4: Processo de impregnação .....	14
2.4.1: Impregnação por Fluxo Contínuo (IFC; Gotejamento – Trickling) .	16
2.5: Linha de Impregnação .....	19
2.5.1: Instrumentação.....	20
2.5.2: Fluxo de processo .....	24
2.6: Dificuldades.....	25
2.7: Conclusão do capítulo.....	26
Capítulo 3: Análise do processo .....	27
3.1: Parâmetros do processo .....	27
3.1.1: Parâmetros relacionados à máquina .....	27
3.1.2: Parâmetros relacionados ao material .....	28
3.1.3: Parâmetros relacionados à mão-de-obra .....	30
3.1.4: Parâmetros relacionados ao processo .....	30

3.2: Análise dos parâmetros .....	31
3.3: Proposições de melhoria.....	32
3.3.1: Pré-aquecimento .....	32
3.3.2: Cura da resina .....	35
3.4: Conclusão do capítulo.....	36
Capítulo 4: Sistema de supervisão e controle .....	37
4.1: Arquitetura atual.....	37
4.2: Arquitetura proposta.....	40
4.3: Fluxo de informações .....	42
4.4: Conclusão do capítulo.....	42
Capítulo 5: Implementação .....	43
5.1: Campânula piloto .....	43
5.1.1: Programação do CLP .....	43
5.1.2: Interface homem-máquina.....	48
5.2: Instrumentação da campânula .....	50
5.3: Obtenção dos parâmetros de controle .....	50
5.3.1: Ensaios de tempo de gotejamento .....	51
5.3.2: Ensaios de tempo de gelificação da resina .....	51
5.3.3: Levantamento da curva de temperatura dos estatores .....	52
5.4: Conclusão do capítulo.....	53
Capítulo 6: Resultados .....	54
6.1: Campânula piloto .....	54
6.2: Ensaios .....	54
6.2.1: Tempo de gotejamento.....	54
6.2.2: Tempo de gelificação da resina.....	55
6.2.3: Levantamento da curva de temperatura dos estatores .....	57



Capítulo 7: Conclusões e Perspectivas .....	59
Bibliografia:.....	60
Apêndice A .....	61

## **Simbologia**

CLP – Controlador Lógico Programável

IHM – Interface Homem-Máquina

LADDER – Linguagem de programação para CLPs

SAP – Systeme Awendungen Produkt (Sistema de gerenciamento de informações da empresa)

GCF – Sistema de Gerenciamento de Chão de Fábrica

BD – Banco de Dados

Gel time – tempo de gelificação da resina (tempo necessário para que a resina misturada com o catalisador atinja o ponto de gel, esse ponto é seguido de endurecimento)

## Capítulo 1: Introdução

O PFC foi realizado no departamento de Engenharia Industrial da WEG. Este departamento é responsável por propor ações para reduzir a variabilidade dos processos de fabricação, capacitar/atualizar tecnicamente as unidades fabris, determinar tempos e métodos de fabricação, especificações operacionais, avaliar custos, etc.

Com unidades fabris e escritórios em países como Brasil, Argentina, Estados Unidos, Reino Unido, China, Alemanha entre outros, a WEG é uma empresa brasileira que se destaca mundialmente na fabricação de motores elétricos que variam desde as aplicações domésticas até industriais de grande porte. Hoje em dia, a WEG não atua somente no setor de motores, mas também desenvolve e fabrica soluções completas para Automação, Transmissão e Distribuição de Energia, Tintas, Turbinas e Aerogeradores, entre outros. Atualmente a WEG possui ações negociadas no mercado financeiro, tendo, no último ano, recebido o prêmio de melhor empresa brasileira, devido ao seu bom desempenho mundial, sua visão expansionista e à sua saúde financeira.

A WEG não apenas desenvolve seus motores, mas também os fabrica em diversas plantas espalhadas pelo mundo, e é nesse contexto industrial de fabricação que esse projeto está inserido, mais especificamente no departamento de Fabricação III, localizado no Parque Fabril II – Extensão em Jaraguá do Sul - SC.

O departamento de engenharia industrial é responsável por analisar novas tecnologias disponíveis, verificar suas aplicabilidades e avaliar os impactos de modificação dos processos, não sendo, normalmente, responsável pela construção dos equipamentos, nem mesmo pela aplicação técnica deles, como configurar, programar, montar, etc. O procedimento comumente utilizado é o estudo e a avaliação da tecnologia a ser empregada e caso haja viabilidade de implementação é feita uma contratação de uma empresa terceirizada para realização da parte técnica ou é acionado o departamento de ferramentaria da WEG, que é responsável pelo estudo e desenvolvimento de máquinas e soluções para aplicações dentro da própria empresa.

O departamento de fabricação III é responsável pela montagem final dos motores de carcaça 280 a 315 (tamanho em milímetros do chão ao eixo do motor), parte onde são feitas as etapas de bobinagem, bandagem, impregnação de estatores, encaixe de rotor, prensagem de carcaça, entre outras. O projeto aqui descrito está inserido no contexto da etapa de impregnação de estatores, etapa importantíssima na manutenção da vida útil de um motor. Atualmente esta etapa encontra-se com níveis relativamente baixos de rastreabilidade e controlabilidade, tratando-se de um processo altamente dependente dos operadores, sem que haja um registro das informações do processo ao longo do mesmo, que não seja o peso do estator antes do processo e o peso depois de impregnado.

O objetivo é diminuir o número de motores que apresentam falhas em campo decorrentes de uma impregnação inadequada e, uma vez que o motor apresente falha, tornar possível uma melhor análise das possíveis causas do problema, se o processo de impregnação foi realmente realizado de forma correta e se essa realmente foi a causa do problema.

## **Capítulo 2: Conceitos e descrição do processo**

Neste capítulo serão abordados alguns conceitos importantes envolvidos no escopo e na concepção do projeto desenvolvido, além de uma descrição geral do processo de impregnação e um maior detalhamento do processo utilizado dentro da empresa.

### **2.1: Automação industrial**

A automação é “um conjunto de técnicas destinadas a tornar automáticas a realização de tarefas, substituindo o gasto de bio-energia humana, com esforço muscular e mental, por elementos eletromecânicos computáveis” [2]. A automação difere do conceito de mecanização pois visa a utilização de maquinário com funcionamento automático (sem intervenção humana), já a mecanização engloba o emprego de qualquer maquinário com a função de reduzir o esforço humano.

Essas técnicas tem como objetivo o aumento da eficiência, da segurança, da produtividade, a redução dos custos envolvidos nas tarefas realizadas entre outros benefícios.

#### **2.1.1: Controlador Lógico Programável**

O controlador lógico programável (CLP) é “um computador especializado, baseado num microprocessador que desempenha funções de controle - controle de diversos tipos e níveis de complexidade” [3]. Segundo a NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*), é um aparelho eletrônico digital que utiliza uma memória programável para armazenar internamente instruções e para implementar funções específicas, tais como lógica, seqüenciamento, temporização, contagem e aritmética, controlando, por meio de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos. São equipamentos amplamente utilizados na automação industrial.

### **2.2: Controle**

Conjunto de técnicas desenvolvidas para agir sobre um dado sistema de modo a obter um resultado arbitrariamente especificado [5]. No âmbito de controle de

processos industriais, costuma envolver sensores e atuadores. Os sensores são equipamentos capazes de medir as variáveis a serem controladas em um processo (a temperatura em uma estufa, por exemplo). Os atuadores são equipamentos capazes de atuar em cima do processo (uma lâmpada de infravermelho dentro da estufa, por exemplo). Além do controle clássico em que se atua em uma variável de modo que ela atinja um valor especificado, utiliza-se também o controle de sistemas a eventos discretos [6], categoria bastante presente na indústria. Estas técnicas de controle visam dar continuidade ao fluxo de produção, integrando e sincronizando etapas como, por exemplo, ativar uma esteira de movimentação somente quando a máquina seguinte estiver livre.

### **2.3: Supervisão**

A supervisão é uma parte importantíssima na automação e controle de processos industriais. Os sistemas supervisórios “permitem que sejam monitoradas e rastreadas informações de um processo produtivo ou instalação física. Tais informações são coletadas através de equipamentos de aquisição de dados e, em seguida, manipulados, analisados, armazenados e, posteriormente, apresentados ao usuário. Estes sistemas também são chamados de SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition).” [4]

### **2.4: Processo de impregnação**

A impregnação tem por objetivo preencher os espaços vazios entre os fios de estatores ou rotores bobinados. Para isso, são utilizados materiais impregnantes a base de poliéster, epóxi ou silicone, que são geralmente líquidos para facilitar a penetração entre os fios. O impregnante pode ser viscoso, porém é preciso que haja uma adaptação do processo para facilitar o escoamento do produto pelos interstícios do bobinado, como o aquecimento da peça, por exemplo. Durante a impregnação, à medida que o impregnante vai escoando através dos fios, ocorre a expulsão do ar e o preenchimento dos vazios. Assim, após a cura tem-se um conjunto único mecanicamente resistente e, dependendo do processo de impregnação utilizado, resistente a altas variações de tensão, temperatura ou umidade.

A impregnação deve proporcionar ao estator as seguintes características:

- Garantir às bobinas um maior grau de resistência mecânica;
- Aumentar a eficiência de troca térmica, melhorando a condução de calor do centro da bobina para o pacote/carcaça;
- Aumentar a resistência do estator ao intemperismo (umidade, poeira, micro-organismos, etc.);
- Aumentar a isolamento elétrica do bobinado (entre bobinas de diferentes potenciais e entre as bobinas e a carcaça).

Basicamente, o processo de impregnação consiste de três etapas: pré-aquecimento, impregnação e a cura, sendo que com a última etapa é que se obtêm as características citadas acima.

Há uma série de abordagens para se realizar o processo de impregnação, segue um apanhado das atualmente conhecidas com uma breve descrição de funcionamento e em seguida será destacada a técnica utilizada na WEG:

- Imersão (*Dipping*): inicia com a peça sendo mergulhada no banho impregnante, após a saída do ar do bobinado a peça é retirada e aguarda-se a drenagem do excesso de produto, sendo em seguida levada para uma estufa onde ocorrerá a cura. Pode-se pré-aquecer a peça visando facilitar a penetração do impregnante.
- Inundação (*Flooding*): semelhante à imersão, mas neste caso a peça é posicionada num tanque que será inundado com o material impregnante. Ao final o produto é drenado para um tanque de armazenagem.
- “Mergulha e gira” (*Dip Roll*): a peça pré-aquecida é mergulhada horizontalmente numa bandeja com impregnante até que a ranhura esteja abaixo do nível do produto, em seguida a peça é rotacionada. Após o término da impregnação, a peça é aquecida e curada.
- Por pressão à vacuo (VPI): a peça pré-aquecida é colocado em um tanque (autoclave), onde é mantida sob vácuo para eliminar todo o ar e umidade do bobinado. O tanque é inundado com material impregnante até cobrir totalmente a peça e, em seguida, aumenta-se a pressão do

equipamento, forçando a entrada do produto nas ranhuras. A peça é retirada, drenada e levada para uma estufa onde ocorrerá a cura.

- Encapsulamento (*Potting*): cada estator é impregnado separadamente em um vaso onde o material impregnante é alimentado na quantidade exata para envolver toda a peça, sob pressão ou não. À medida que as ranhuras são preenchidas, o ar é removido e ao final do processo a peça está envolta pelo material impregnante. Todo o conjunto (vaso + estator + impregnante) é levado para a cura. Ao final do processo o estator é desmoldado e o vaso volta para o início do processo.
- Autocementação (*Self-bonding*): O material impregnante encontra-se nas últimas camadas do fio esmaltado, que se funde por aquecimento, mantendo unido todo o conjunto após o resfriamento da peça.
- Gelação por pressão automática (APG): a impregnação do estator é realizada em máquinas injetoras (semelhante a injeção de plástico).
- Impregnação por fluxo contínuo (IFC): será detalhada no item seguinte.

#### **2.4.1: Impregnação por Fluxo Contínuo (IFC; Gotejamento – Trickling)**

A peça é pré-aquecida para facilitar a penetração do impregnante pelos fios do bobinado e, em seguida, ela é fixada em um dispositivo onde é inclinada a 15° (Figura 1) e colocada sob rotação para receber o impregnante, que é alimentado de um fluxo contínuo em dois pontos: na cabeça de bobina elevada e no início das ranhuras (Figura 2). Quando a resina atravessa totalmente as ranhuras, a peça é colocada na posição horizontal, passando então a serem impregnadas as duas cabeças de bobina simultaneamente. Terminada a impregnação, a resina é gelificada e curada através do aquecimento da peça em uma estufa. Após a cura, em alguns casos, a peça recebe ainda um acabamento (nova impregnação e cura) nas cabeças de bobina.

Vantagens:

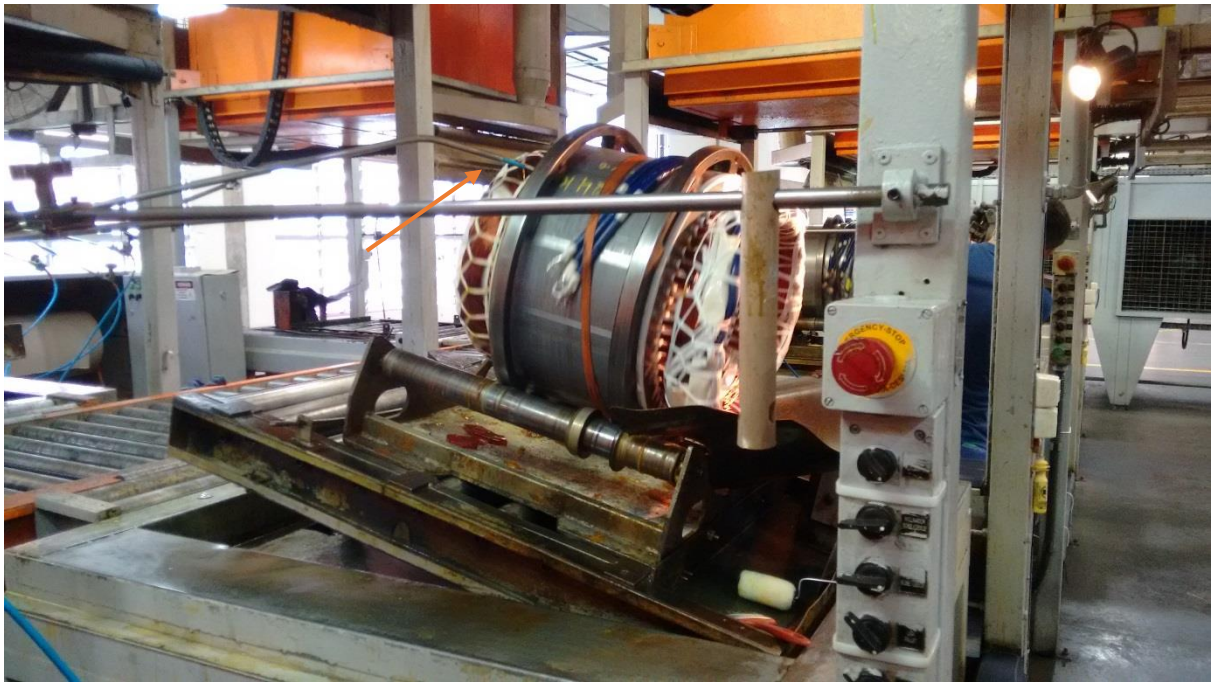
- Baixa drenagem do material impregnante;
- Alto preenchimento das ranhuras;



- Baixa perda de material impregnante;
- Alta aglutinação dos fios da cabeça de bobina;
- A resina só impregna o que é necessário;
- Alta produtividade;
- Exposição do impregnante ao ambiente é controlada.

Desvantagens:

- Custo maior que o dos processos de imersão e inundação;
- Não protege todo o pacote de chapas;
- Necessita de controle de viscosidade e temperatura para evitar a reação espontânea do material;
- Baixa flexibilidade.



*Figura 1 Processo de impregnação, etapa de gotejamento, indicando o bico aplicador de resina*



*Figura 2 Processo de impregnação, etapa de gotejamento*

## 2.5: Linha de Impregnação

A linha de impregnação da Fábrica III possui uma estufa de pré-aquecimento, onde é realizado o **pré-aquecimento** dos estatores, 9 estações de trabalho com estufas campânulas, onde são realizados o **gotejamento e a cura** (com a descida da estufa), as estações e a estufa são conectadas por uma linha de roletes, que contém uma cabine de **resfriamento** ao seu final, além de *buffers* antes e depois da estufa de pré-aquecimento e antes e depois da cabine de resfriamento. A linha também possui **2 balanças**, uma no início (antes da estufa de pré-aquecimento) e uma no final (depois da cabine de resfriamento), as quais são utilizadas para **definir a aprovação ou não** dos estatores, considerando-se a diferença percentual entre o peso pré e pós impregnação, a métrica de aprovação é a quantidade de resina “acumulada” e varia de estator para estator. O layout da linha e as etapas citadas podem ser vistos na Figura 3.

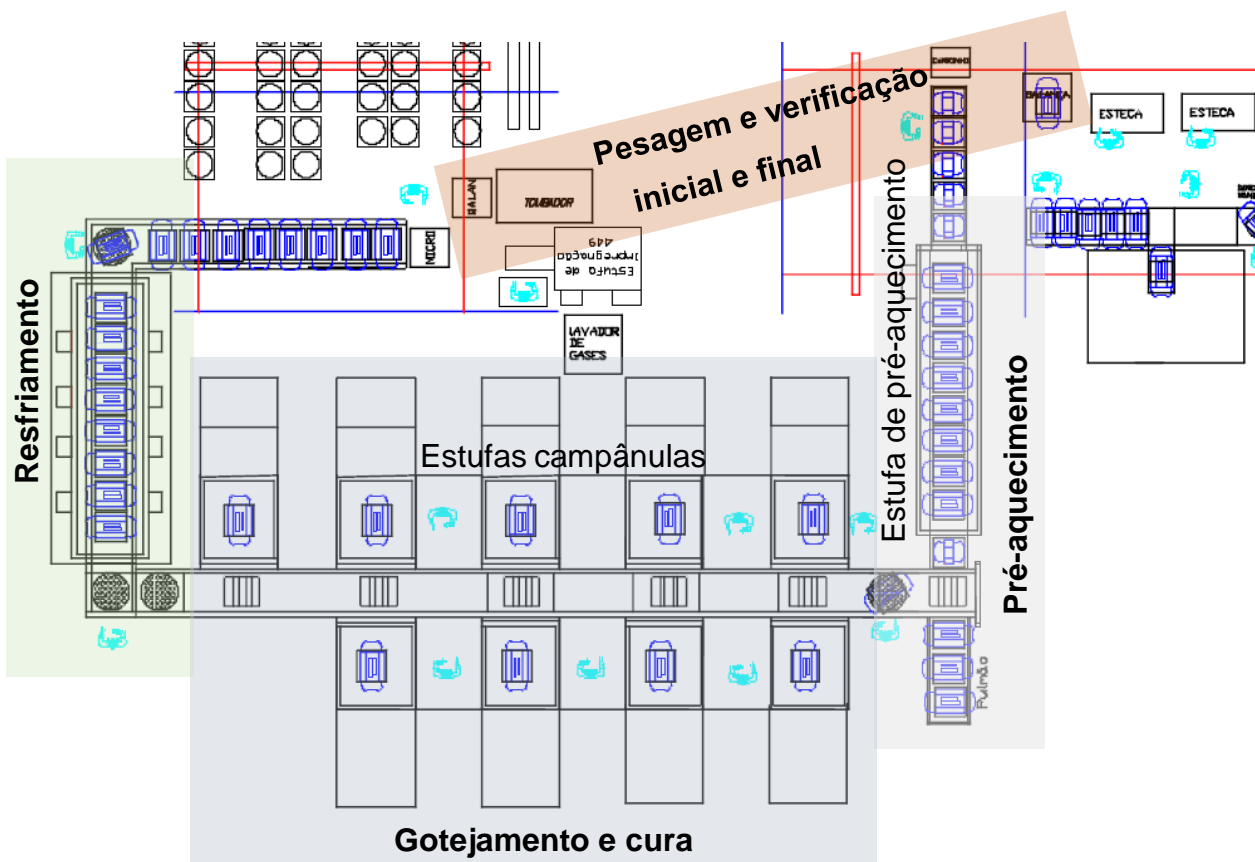


Figura 3 Layout da linha de impregnação B da Fábrica III - Prédio I

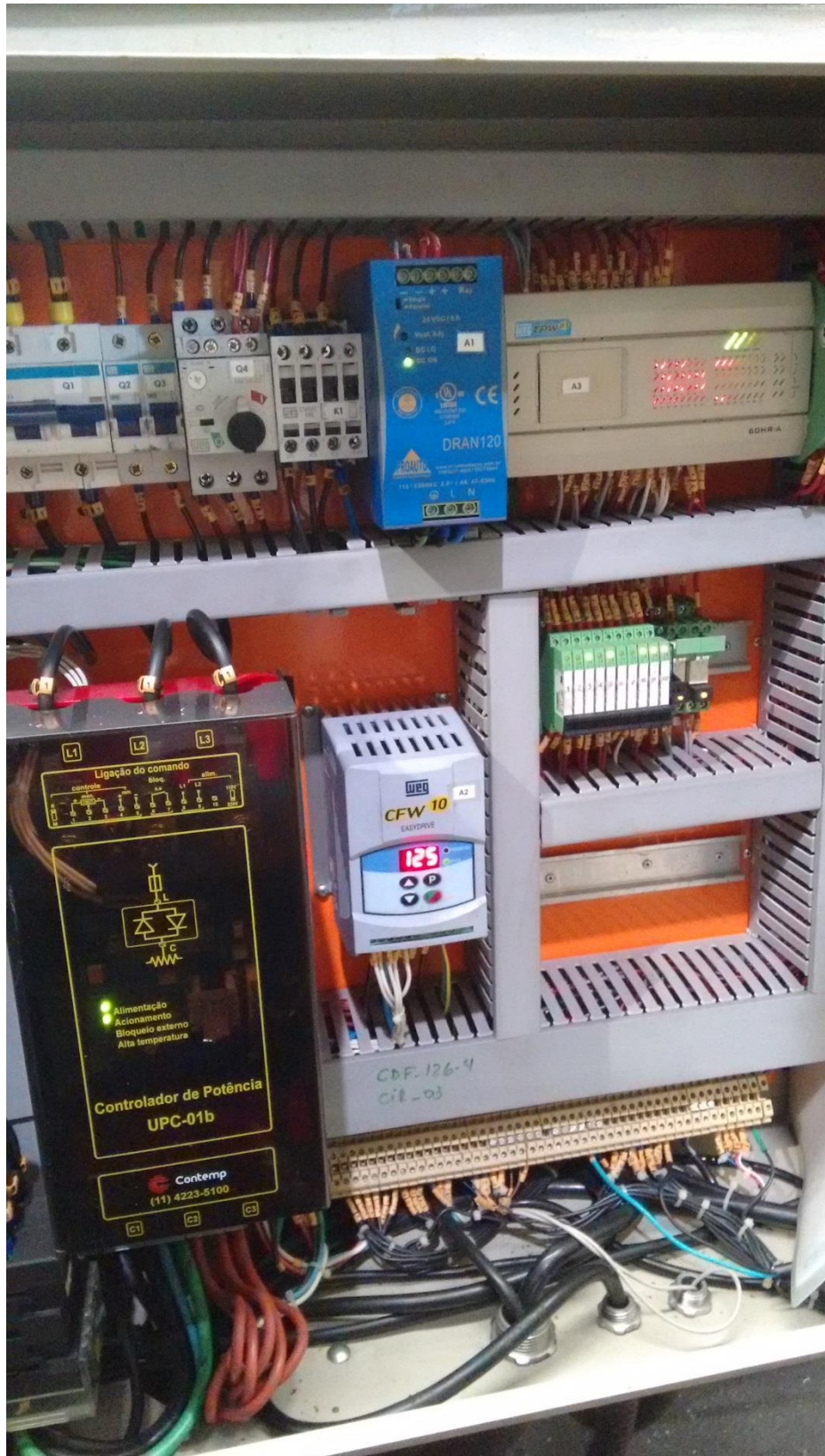
Antes da linha de impregnação, existe uma cabine de testes de tensão do bobinado, onde são impressos selos contendo um código bidimensional referente à ordem de produção e ao número de série de cada estator testado (combinação única para cada motor produzido pela empresa). Um software desenvolvido pela seção de metrologia da empresa é responsável por receber as informações de ambas as balanças, cruzar os dados com os valores mínimos aceitos em norma (que são obtidos através do acesso ao banco de dados interno da empresa utilizando os números de ordem de produção e de série) e emitir a aprovação ou não dentro do sistema. Tais informações ficam armazenadas na ficha de cada estator produzido e podem ser acessadas a qualquer momento, através do SAP (fornece acesso ao banco de dados interno).

### 2.5.1: Instrumentação

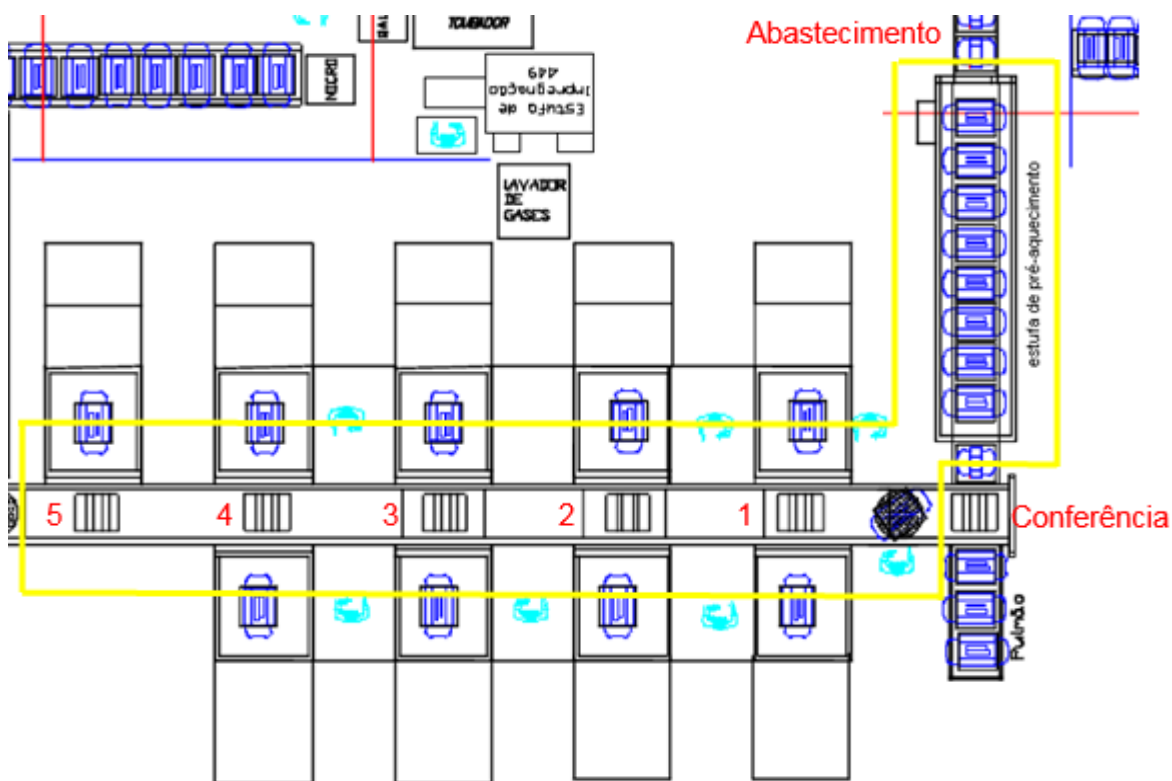
A linha de impregnação possui atualmente 10 CLPs TPW-03 (produto WEG), sendo 1 no painel da estufa de pré-aquecimento, responsável pela distribuição e controle ao longo da linha, e 1 no painel elétrico de cada estufa campânula (Figura 5; mostrando também o inversor responsável por baixar e levantar a estufa, o controlador de potência da bancada de resistências, todos os contatores e relés de proteção do sistema elétrico), responsáveis pelos processos ocorridos em cada uma das campânulas, a única troca de informação existente entre esses equipamentos é um sinal de alerta do CLP da campânula para o da estufa de pré-aquecimento avisando que faltam 3 minutos para o término da cura (esse sinal acende um indicador disponível para o volante da linha; Figura 4).



*Figura 4 Painel com o indicador de que o término da cura está próximo*



*Figura 5 Painel elétrico de uma das campânulas*



*Figura 6 Detalhes do funcionamento dos CLPs*

O CLP da estufa de pré-aquecimento tem como funções e características:

- Controle do pré-aquecimento e posicionamento na linha.
- Movimentação por passos dentro da estufa (para 6 posições).
- Passo controlado por sensores na entrada da estufa.
- Passo automático da estufa: abre a porta de saída e retira um estator para a área de Conferência, caso haja motor na entrada (presença verificada por sensores na parte de Abastecimento antes da porta) abre a porta de entrada e movimenta um estator para dentro da estufa.
- Portas de entrada e saída da estufa possuem sensores de porta fechada e de porta aberta.
- Campânulas enviam sinal quando faltam 3 minutos para o término da cura.
- A linha possui 5 postos de transporte lateral (1 a 5 na Figura 6), com sensores de presença de estator (um em cada posto).

- Sensores de presença ao longo da linha auxiliam na movimentação (e continuação da mesma) da linha de roletes, os sensores encontram-se antes dos postos 1, 2, 3 e 4.
- Os postos de transporte se elevam e empurram o estator para a direita/esquerda.
- Os postos de transporte lateral possuem sensores de fim de curso para as posições alto/baixo.
- A liberação para a direita/esquerda nos postos de transporte é feita por botões.
- O transporte até os postos também é feito por botões (mesmos botões responsáveis por levantar os postos e empurrar os estatores para o lado correto).
- O posto de resfriamento também possui botões para chamar os estatores que saem das campânulas.
- A linha de roletes responsável pelo transporte dos estatores ao longo da linha é comandada pelo CLP da estufa de pré-aquecimento.
- Após realizar uma liberação, a campânula só poderá chamar um estator ao acionamento do sensor de presença do posto de resfriamento (anterior ao posto 5).

Os CLPs das campânulas desempenham papel mais simples, sendo responsáveis somente por permitir/inibir a operação das funções de cada estação, como: atuar o inclinador, iniciar a rotação do pallet, descer/subir a campânula, dar início ao processo de cura (única parte automática do processo).

## 2.5.2: Fluxo de processo

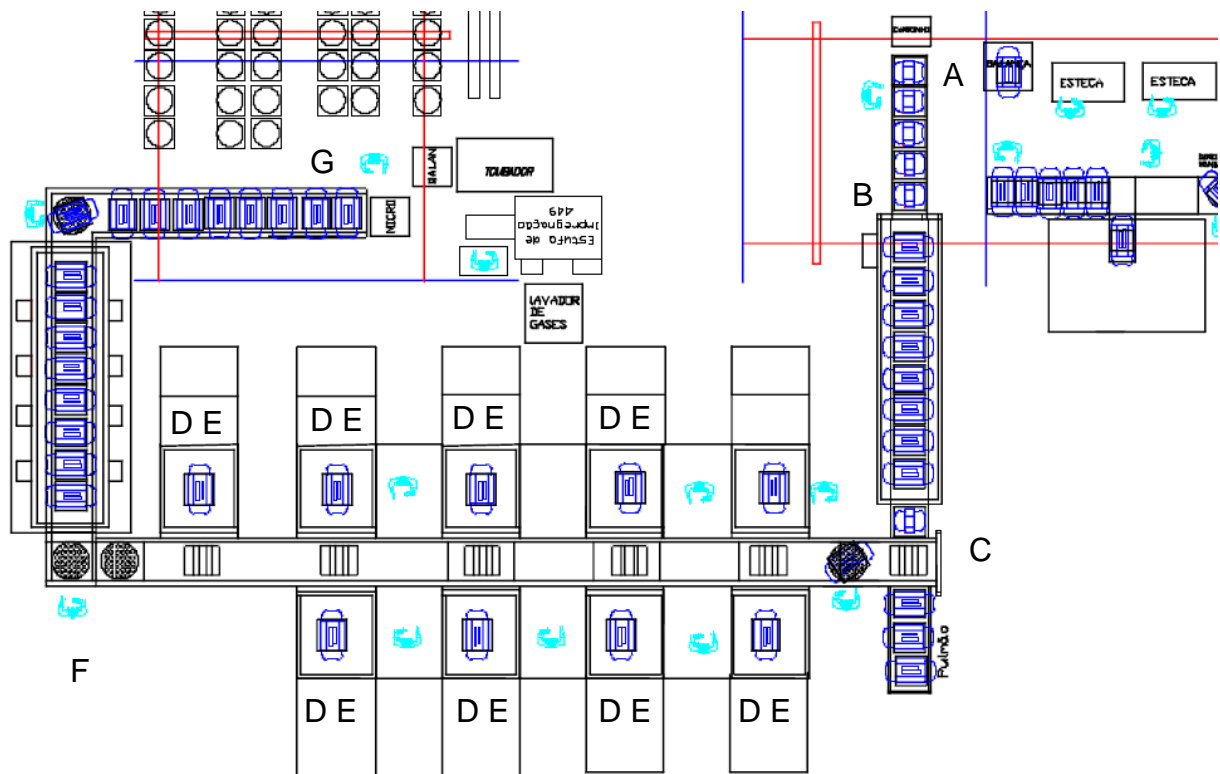


Figura 7 Linha de impregnação com o processo detalhado

A Figura 7 detalha as etapas por qual um estator deve passar durante a linha de impregnação, conforme norma técnica operacional da empresa. A descrição das etapas é:

- A.** É realizada a pesagem do estator (o peso é armazenado em um banco de dados), os anéis de rolamento são colocados e fixados com auxílio de uma parafusadeira pneumática. Prende-se então os cabos no diâmetro externo do estator e posiciona-se o estator na entrada da estufa de pré-aquecimento.
- B.** O estator entra na estufa de pré-aquecimento, onde deve ficar até atingir uma temperatura na faixa de  $80 \pm 5^\circ\text{C}$ .
- C.** O operador deve retirar o estator quando o mesmo estiver na faixa adequada de temperatura, anotar a temperatura na lateral da chapa do estator, conferir o estado dos cabos amarrados e, caso estejam danificados, repassar o motor para o *buffer*, onde o mesmo aguardará ser recolhido para a seção de recuperação da fábrica.



- D.** O operador deve medir a temperatura, de modo que só é permitido o início do gotejamento caso o mesmo esteja na faixa adequada. O gotejamento acontece com o estator inclinado a 15°, com um bico no diâmetro externo e outro no diâmetro interno da cabeça de bobina mais elevada, a vazão da resina catalisada deve ser baixa e constante (impregnação por fluxo contínuo). Ao constatar que a resina atravessou todas as ranhuras do estator, o operador deve garantir que os diâmetros internos de ambas as cabeças de bobina estejam bem impregnados, para tal utiliza-se de rolos e pincéis aplicados diretamente na região desejada.
- E.** Ao constatar que ambas as cabeças de bobinas e seus diâmetros estão devidamente impregnados pela resina e que todas as ranhuras foram preenchidas, o operador deve dar início ao processo de gelificação e cura da resina, escolhendo o tempo desejado (16, 18 ou 20 minutos) através de uma chave seletora. A estufa então é abaixada e assim permanece durante o tempo selecionado. Ao final do tempo, o operador deve raspar a resina que por acaso tenha se acumulado no interior do estator com uma faca industrial.
- F.** O operador retira o parafuso dos anéis de rolamento utilizando a parafusadeira pneumática, verifica a integridade dos cabos (caso estejam danificados, deve preencher um cartão de aviso de recuperação) e envia o estator para a cabine de resfriamento.
- G.** O operador testa a resistência de aquecimento e o sensor de temperatura do estator (caso o mesmo as possua), retira os anéis de rolamento e pesa o estator impregnado. Esse peso final também é armazenado em um banco de dados e, pela diferença de peso, aprova-se ou não o estator.

## **2.6: Dificuldades**

O processo, atualmente, possui como única característica rastreável o aumento no peso do estator, que indica a quantidade de resina acumulada, o que por si só, na

verdade, não garante que o estator tenha sido impregnado de forma satisfatória, essa determinação hoje em dia é um desafio para todas as empresas no mercado de motores elétricos, sendo que o corte e a verificação visual de cada ranhura é o único método garantido. Tal problemática é resolvida de outras maneiras, principalmente através da garantia de que o processo ocorra com seus parâmetros dentro dos limites especificados.

Da maneira como é realizado atualmente, o controle inteiro do processo depende dos operadores, diminuindo os níveis de robustez e confiabilidade, além da perda de produtividade em casos onde, por exemplo, o estator é retirado da estufa de pré-aquecimento a uma temperatura muito maior ou menor que a faixa desejada. No primeiro caso é necessário esperar que a temperatura diminua (normalmente utiliza-se um ventilador para auxiliar nessa diminuição), já no segundo caso faz-se necessário enviar o estator a uma estação de trabalho, onde a estufa campânula deverá ser acionada antes do gotejamento, até que o estator atinja a temperatura de impregnação. Casos de esquecimento de estatores durante o processo (seja por distração, horário de almoço, ginástica laboral, etc) acontecem e podem interferir no resultado do processo, que por vezes pode ser mascarado pelo uso apenas do peso como indicador. Casos onde os estatores ficam por tempo insuficiente (ou excessivo) no gotejamento e/ou na cura também são possíveis. Atualmente não há registro dessas informações.

## **2.7: Conclusão do capítulo**

Neste capítulo foi realizada uma descrição do processo de impregnação por si só, bem como uma descrição detalhada das etapas realizadas e do funcionamento do processo utilizado na linha de impregnação estudada de fato. Os problemas relacionados à linha são de grande importância e servem de motivação para a realização desse projeto e de embasamento para a concepção dos capítulos seguintes.

## **Capítulo 3: Análise do processo**

Neste capítulo será realizada uma análise do processo, abordando os principais parâmetros envolvidos, bem como as primeiras ideias de possíveis soluções para as dificuldades envolvidas no mesmo. Tais informações são resultado de discussões sobre o assunto com os analistas e técnicos responsáveis pelo processo dentro do departamento de fabricação III.

### **3.1: Parâmetros do processo**

Visando um maior entendimento tanto do processo quanto do que seria possível almejar como soluções dos problemas citados, realizou-se um levantamento dos parâmetros envolvidos no processo, com o objetivo de se identificar características quanto ao impacto do parâmetro no processo, situação atual de controlabilidade, consequências de valores fora das faixas especificadas, robustez e impacto da variação com o tipo (tamanho) do estator impregnado.

#### **3.1.1: Parâmetros relacionados à máquina**

Relacionados à estufa de cura (campânula), o processo possui os seguintes parâmetros:

1. Tempo de cura:
  - a. Abaixo do especificado: Resina não cura por completo;
  - b. Acima do especificado: Perda de produtividade;
  - c. Controle atual: Controlado (tempo fixo);
  - d. Robustez: Robusto;
  - e. Variação em função do estator: Sim.
2. Velocidade de rotação:
  - a. Abaixo do especificado: Resina escorre e não molha suficientemente os fios;
  - b. Acima do especificado: Centrifuga a resina para o fundo da ranhura;
  - c. Controle atual: Controlado;

- d. Robustez: Robusto;
  - e. Variação em função do estator: Não.
3. Inclinação:
- a. Abaixo do especificado: Aumenta o tempo de impregnação, resina passa mais lentamente de um lado para outro;
  - b. Acima do especificado: Resina passa rapidamente pelo estator sem preenchimento adequado;
  - c. Controle atual: Manual (o operador controla a inclinação);
  - d. Robustez: Robusto;
  - e. Variação em função do estator: Sim (existem casos de alguns estatores com pacotes pequenos que podem tombar caso seja utilizada a inclinação recomendada).

### **3.1.2: Parâmetros relacionados ao material**

#### **3.1.2.1: Resina**

Relacionados à resina, o processo possui os seguintes parâmetros:

- 1. Viscosidade
  - a. Abaixo do especificado: Baixa retenção, fragilidade da resina na cura;
  - b. Acima do especificado: Dificulta o fluxo de resina na ranhura, a gelificação pode acontecer antes da hora;
  - c. Controle atual: Controlado;
  - d. Robustez: Não robusto;
  - e. Variação em função do estator: Não.
- 2. Vazão
  - a. Abaixo do especificado: Baixa retenção;
  - b. Acima do especificado: Precipita a passagem da resina pela ranhura, sem garantir o preenchimento;
  - c. Controle atual: Não controlado;
  - d. Robustez: Não robusto;
  - e. Variação em função do estator: Não.
- 3. Quantidade retida

- a. Abaixo do especificado: Fios soltos, aumento de descargas parciais (presença de vazios), aumento da temperatura do motor;
  - b. Acima do especificado: Não interfere no processo;
  - c. Controle atual: Controlado;
  - d. Robustez: Robusto;
  - e. Variação em função do estator: Sim.
4. Ponto de aplicação
- a. Abaixo do especificado: Impregnação inadequada;
  - b. Acima do especificado: Consumo excessivo de resina;
  - c. Controle atual: Manual;
  - d. Robustez: Não robusto;
  - e. Variação em função do estator: Relativamente, não. Absolutamente, sim.

### **3.1.2.2: Relacionados ao estator:**

1. Tipo de fio
- a. Consequência da variação: Dificuldade de retenção e molhamento pela resina;
  - b. Controle atual: Não se aplica;
  - c. Robustez: Não se aplica;
  - d. Variação em função do estator: Sim.
2. Comprimento dos materiais isolantes
- a. Abaixo do especificado: Não interfere no processo;
  - b. Acima do especificado: Fechamentos de ranhura que ultrapassem o comprimento especificado ou deslocados dificultam o fluxo da resina nas ranhuras e o molhamento dos fios;
  - c. Controle atual: Não controlado;
  - d. Robustez: Não robusto;
  - e. Variação em função do estator: Sim.
3. Polaridade
- a. Consequência da variação: Menor polaridade leva a um maior tempo de impregnação (gotejamento), pois o estator possui maiores cabeças de bobina e áreas de ranhura;

- b. Controle atual: Não se aplica;
- c. Robustez: Não se aplica;
- d. Variação em função do estator: Sim.

#### 4. Enchimento

- a. Abaixo do especificado: Fios soltos e baixa qualidade de impregnação;
- b. Acima do especificado: Resina não penetra pelos fios;
- c. Controle atual: Não controlado;
- d. Robustez: Não robusto;
- e. Variação em função do estator: Sim.

### **3.1.3: Parâmetros relacionados à mão-de-obra**

Os parâmetros levantados relacionados aos operadores das máquinas foram:

#### 1. Número de operadores

- a. Abaixo do especificado: Incapacidade de acompanhar o processo, perda de qualidade;
- b. Acima do especificado: Elevação de custo, baixa produtividade;
- c. Controle atual: Não controlado;
- d. Robustez: Não robusto;
- e. Variação em função do estator: Não.

#### 2. Treinamento dos operadores

- a. Abaixo do especificado: Perda de qualidade;
- b. Acima do especificado: -;
- c. Controle atual: Controlado;
- d. Robustez: Não robusto;
- e. Variação em função do estator: Não.

### **3.1.4: Parâmetros relacionados ao processo**

O parâmetro principal de processo levantado:

#### 1. Temperatura do estator

- a. Abaixo do especificado: O gotejamento é realizado de forma incorreta (dificuldade em atravessar as ranhuras);

- b. Acima do especificado: A resina pode gelificar antes do término do gotejamento;
- c. Controle atual: Manualmente, em algumas etapas do processo;
- d. Robustez: Não robusto;
- e. Variação em função do estator: Não.

### **3.2: Análise dos parâmetros**

Dos parâmetros relacionados à máquina, escolheu-se atuar no tempo de cura, uma vez que é um parâmetro importantíssimo do processo e que, atualmente, é utilizado um esquema de tempos fixos (3 tempos: 16, 18 e 20 minutos), variando-os através de uma chave seletora dependendo da polaridade do estator sendo impregnado. Além disso, percebeu-se que hoje em dia o único tempo utilizado é o de 20 minutos, independente da polaridade, devido à ocorrência de casos de gelificação não completa durante a etapa de cura. A velocidade de rotação é controlada pelo CLP e por um inversor e varia ao longo do processo, dependendo em qual etapa o processo se encontra. Quanto à inclinação do estator, decidiu-se tirar do operador a responsabilidade de definir a angulação, passando a utilizar o sensor de fim de curso do cilindro pneumático responsável por realizar essa inclinação.

Quanto aos parâmetros relacionados ao material, especificamente à resina, escolheu-se não propor melhorias, pois a viscosidade da resina já é verificada durante a preparação dos tonéis, a quantidade de resina retida é algo que varia com o tipo do estator e o controle é feito com a pesagem do mesmo em duas etapas, os pontos de aplicação são definidos em norma (cabendo ao operador segui-la), e a vazão de resina faz parte de outra solução do plano de ação da fábrica, que envolve a troca de tubulações e bombas. Quanto aos parâmetros referentes ao estator, são características inerentes de cada motor a ser produzido e serão utilizados na definição de valores ótimos para os outros parâmetros envolvidos no processo. Os relacionados à mão de obra também se encontram fora do escopo do projeto, sendo a quantidade de operadores e o treinamento responsabilidades do gerente e das chefias da fábrica. Como parâmetro global e mais importante do processo, tem-se a temperatura do estator ao longo do processo, que como apontado acima, apresentando valores fora do especificado podem gerar problemas durante e após o gotejamento.

Ou seja, optou-se por ter como objetivos principais do projeto um maior controle e uma maior rastreabilidade relacionados ao tempo de cura e às temperaturas do estator durante as etapas do processo.

### **3.3: Proposições de melhoria**

Os maiores problemas encontrados na execução do processo estão intensamente ligados às etapas de pré-aquecimento, que é responsável por garantir que o gotejamento e a impregnação ocorram de forma adequada (fator intimamente ligado à temperatura da ranhura), e de cura da resina, mais especificamente à duração dessa etapa, que é responsável por garantir que a gelificação da resina dentro das ranhuras aconteça de forma satisfatória, garantindo que os tempos de gelificação sejam devidamente atendidos. Baseando-se nisso, foram levantadas e analisadas hipóteses, referentes a cada etapa, de possíveis soluções e/ou melhorias para o processo.

#### **3.3.1: Pré-aquecimento**

O procedimento atual ocorre da seguinte maneira: o operador retira o estator pré-aquecido e faz as verificações necessárias, incluindo a medição da temperatura do mesmo. A faixa de operação da temperatura é de  $80 \pm 5^\circ\text{C}$ . Caso o estator esteja fora desta faixa, o operador utiliza um ventilador próximo à saída da estufa (caso esteja acima da faixa) e tem as opções de enviar o estator de volta para a estufa (algo nem sempre possível) ou de avisar os responsáveis pelo gotejamento e solicitar que os mesmos utilizem a estufa de suas unidades para dar continuidade ao pré-aquecimento do estator.

Os principais problemas são os tempos extra de espera quando o resfriamento ou o aquecimento se fazem necessários e as consequências de se realizar o gotejamento fora da faixa de operação (impregnação inadequada, aumentando as chances de ocorrerem falhas em campo).

Ponto importantíssimo na manutenção da temperatura analisada é a variação no tamanho dos estatores que passam pela estufa, diâmetros variando de 560 a 620mm, comprimentos variando de 160 a 660mm, a quantidade de cobre interna também varia com o estator (fator de enchimento, polaridade, etc). Com essas



variações, deve-se ter em mente que a estufa comporta até 6 estatores, em fila, e que não há espaço hábil para se realizar o reposicionamento dos mesmos. Isto é, existirão casos onde, ao retirar um estator 80°C, o próximo estator já estará acima da faixa de temperatura, caso sejam estatores de 160 e 660mm de comprimento, por exemplo.

As possíveis soluções levantadas e suas dificuldades:

- a. **Medição interna por contato:** utilizando um sistema de atuação que posicione o sensor de temperatura (um Pt100, por exemplo) numa posição adequada do estator.
  - (1) O problema é a influência da temperatura interna da estufa nessa medição, a variação de tamanho dos estatores que por ali passam, além do sistema inteiro ter que resistir ao ambiente (180°C).
- b. **Medição interna por infravermelho:** utilizando um instrumento capaz de realizar medições de temperatura por infravermelho (um pirômetro, por exemplo), com um sistema de posicionamento interno na estufa.
  - (1) O problema está na influência da temperatura do ambiente na medição do sensor utilizado, além de ser necessário utilizar um sensor que suporte a temperatura interna da estufa (custo elevado), correndo o risco de que ocorra a evaporação de restos da resina misturada dos pallets, podendo encurtar bastante a vida útil do sensor. Além disso, a temperatura interna pode causar alterações na emissividade das peças medidas.
- c. **Medição externa por infravermelho:** utilizando um instrumento capaz de realizar medições de temperatura por infravermelho, com uma solução envolvendo um sistema de posicionamento externo e utilização de uma superfície que permita, com poucas interferências, a passagem de infravermelho (uma janela de quartzo, por exemplo).
  - (1) Os problemas relacionam-se ao custo de desenvolvimento de soluções deste tipo, à manutenção constante da janela desenvolvida e às possíveis alterações nas emissividades dos materiais devido a temperatura interna da estufa.

- d. **Medição externa por contato:** utilizando um sensor de temperatura (Pt100, por exemplo) com o auxílio de um gabarito, de modo a padronizar as medições e torná-las mais confiáveis.
- (1) O problema está relacionado principalmente à ineficácia da solução no que tange o problema chave, que é a retirada do estator fora da faixa adequada. Além disso, para efeito de comparação, realizou-se medidas com vários termopares tipo K e com as pistolas laser atualmente utilizadas e notou-se que, quando utilizadas corretamente, as pistolas apresentam um tempo de resposta massivamente menor e diferenças ínfimas nas medidas.
- e. **Controlar o tempo de permanência dos estatores na estufa de pré-aquecimento:** identificando o tipo do estator e utilizando essa informação na programação do CLP. A estufa de pré-aquecimento já dispõe de um CLP. Esse tipo de abordagem facilitaria a integração completa dos processos da fábrica, pensando em trabalhos futuros.
- (1) Ainda que essa ação viabilize um maior acompanhamento dos estatores que passam pela estufa de pré-aquecimento (tendo em mãos a curva de temperatura de cada estator, por exemplo, é possível, a partir da temperatura inicial, estimar o tempo necessário para cada estator atingir a temperatura ideal de gotejamento), o fato de existirem grandes variações de tamanhos entre estatores apresentaria um grande desafio de organização e esperas no processo para garantir que todos os estatores saiam com a temperatura ideal, uma vez que não há como reposicionar os mesmos dentro da estufa. Seria necessário um algoritmo de sequenciamento que equilibrasse esses detalhes. A maior dificuldade, porém, está no fato de que não há documentação digital do código utilizado no controlador da estufa de pré-aquecimento e nem dos diagramas elétricos, existindo apenas o arquivo de código (sem nenhum tipo de comentário) e as cópias físicas do diagrama elétrico (que sofreu várias alterações e adições ao longo dos anos), pois trata-se de um equipamento bastante antigo. Antes de se realizar qualquer tipo de controle nessa estufa, seria necessário ou um retrofit completo da linha ou uma reprogramação.

### 3.3.2: Cura da resina

O procedimento atual ocorre da seguinte maneira: o operador, após terminar o gotejamento, seleciona uma opção de tempo de cura (16, 18 ou 20 minutos), seleciona o modo automático de operação e utiliza um botão para iniciar a operação. O procedimento automático abre a porta, desce a estufa e passa a contar o tempo selecionado. A estufa é aberta ao final do tempo. Não há uma interação significativa entre o controlador de temperatura da campânula e o CLP.

Os problemas existentes nessa etapa do processo estão relacionados aos tempos pré-definidos não serem necessariamente suficientes para que a cura da resina seja realizada de maneira correta, além disso, detalhes referentes à queda considerável de temperatura dentro da estufa durante a descida da mesma e possíveis defeitos no banco de resistências responsável por realizar o aquecimento.

As possíveis soluções levantadas e suas dificuldades:

- a. **Medição de temperatura das ranhuras por contato:** utilizando um sistema de atuação que posicione o sensor de temperatura (um Pt100, por exemplo) no estator.
  - (1) O problema está na rotação constante do estator durante o processo, a alta temperatura interna da estufa (180°C) e, principalmente, ao escorrimento e à gelificação da resina justamente por dentro das ranhuras onde a temperatura é medida.
- b. **Medição de temperatura das ranhuras por infravermelho:** utilizando um instrumento capaz de realizar medições de temperatura por infravermelho (um pirômetro, por exemplo), com um sistema de posicionamento interno à estufa.
  - (1) O problema está na rotação constante do estator (inviabilizando a medição de um ponto específico desejado), a temperatura da estufa (sensores de medição à laser que resistam a esses níveis de temperatura apresentam valores bastante elevados) e, principalmente, à evaporação de líquidos envolvidos no processo (solvente, por

exemplo), que pode levar a uma grande diminuição da vida útil de sensores desse tipo.

- c. **Alterar a forma de controle utilizado (tempo fixo a partir do momento em que o operador aperta o botão “Operar”):** Utilizar um controle que espere a estufa atingir novamente a sua temperatura de referência e, ao atingir o valor desejado, passe a contar o tempo de fato. Isto pode ser realizado com uma reprogramação do controlador Novus, utilizando o sistema de alarme diferencial disponível (sinal de alarme emitido quando a variável do processo se encontra dentro de uma faixa de operação a ser definida por analistas da fábrica) e uma alteração no programa do CLP, utilizando esse sinal emitido para dar início à contagem de uma quantidade de tempo a ser definida. Os valores de referência poderiam ser configuráveis até certo limite sem que seja necessário realizar quaisquer tipos de mudanças no CLP utilizado, uma vez que existem algumas entradas livres. Essa configuração poderia ser feita através da identificação do estator a ser curado, informação utilizada para selecionar tempos pré-definidos internamente, ou utilizando uma IHM que permita definir os valores.

- (1) O problema está relacionado à dificuldade de se realizar esse trabalho de forma satisfatória, uma vez que não haverá medição de temperatura ao longo do processo (somente no início e no término, por exemplo), tornando-se necessário um levantamento confiável dos tempos envolvidos para cada estator.

### **3.4: Conclusão do capítulo**

Neste capítulo foi realizada uma análise e uma escolha dos principais parâmetros envolvidos no processo, bem como o levantamento de soluções de melhoria para o mesmo. É importante ater-se aos parâmetros escolhidos e também às soluções propostas, principalmente a de alterar a forma de controle utilizado na contagem de tempo de cura, uma vez que os próximos capítulos utilizam essa abordagem.

## **Capítulo 4: Sistema de supervisão e controle**

Baseado na análise do processo realizada anteriormente, optou-se por não atuar, ainda, na etapa de pré-aquecimento, devido às dificuldades previamente citadas, sendo essa uma medida a ser tomada futuramente como um outro projeto (dentro do mesmo plano de ação) da empresa.

Escolheu-se atuar na etapa de gotejamento e impregnação, tendo em vista que grande parte da estrutura necessária para a implantação das ideias levantadas no capítulo anterior já existem no processo (bem como toda a documentação referente a software, instalação elétrica e pneumática).

Neste capítulo será abordada a concepção global do projeto a ser realizado na linha de impregnação, partindo da descrição da arquitetura atual de funcionamento do processo para a descrição da nova arquitetura proposta.

### **4.1: Arquitetura atual**

Conforme mencionado em capítulos anteriores, a linha de impregnação B possui um software responsável pelo armazenamento dos pesos inicial e final de cada estator, informações adquiridas com o uso de dois leitores de código bidimensional e duas balanças digitais, dispostos no início e no final do processo. O software armazena essas informações num banco de dados localizado na rede interna da WEG e é responsável pela aprovação ou não do processo de impregnação baseado na quantidade percentual de resina acumulada.

A lógica de controle interna dos CLPs é alheia a quaisquer informações externas que não sejam os botões utilizados pelo operador, realizando o ciclo programado de 16, 18 ou 20 minutos, dependendo da posição da chave seletora (Figura 8).



*Figura 8 Painel de controle de uma estufa campânula*

A Fábrica III (Prédio I) possui 9 campânulas com um CLP cada, recebendo sinais dos operadores (através de botões; Figura 9) e enviando um sinal de aviso ao CLP localizado na estufa de pré-aquecimento, que é responsável por coordenar toda a linha do processo, decidindo para qual campânula o estator irá, esse mesmo CLP recebe sinais do volante da linha (também através de botões).



*Figura 9 Botões disponíveis na estufa campânula*

A arquitetura atual de funcionamento do sistema existente na linha de impregnação B, bem como o fluxo de informações do mesmo, pode ser visto na Figura 10.

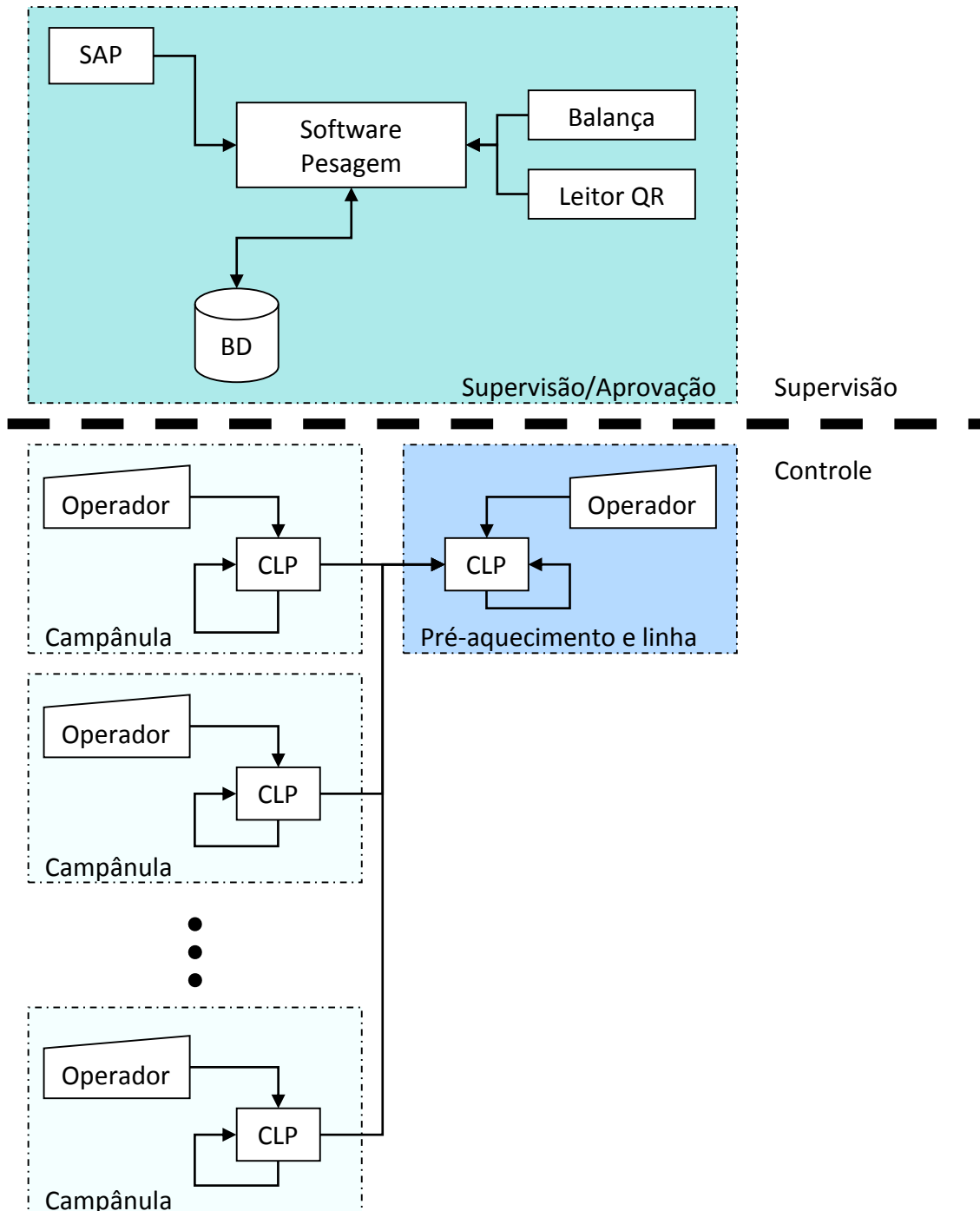


Figura 10 Arquitetura do funcionamento atual da linha de impregnação B

## 4.2: Arquitetura proposta

A ideia principal de mudança é transformar o software existente em um sistema supervisor e de controle, expandindo-o para realizar a coleta de dados ao longo do processo, além da requisição, armazenamento de mais informações do SAP (material do estator, por exemplo) e distribuição dessas informações ao longo da linha para os CLPs, utilizando um protocolo de comunicação para realizar esse envio e recebimento de informações dos mesmos.

Os CLPs deverão utilizar as informações para realizar um controle (de tempo de cura, por exemplo) específico baseado no modelo (ou em características físicas que serão relacionadas com o modelo) do estator, além de fornecer dados do processo por ele controlado (tempo total de cura, valores de temperatura, paradas realizadas, anomalias no processo, etc). Os parâmetros de controle (tempos), diante da impossibilidade/inviabilidade de se sensorar a linha de forma ideal, serão estimados a partir de ensaios de temperatura realizados para cada estator/material que passa pelo processo, visando levantar as curvas de temperatura dos mesmos, uma vez que a variável acessível do processo é a temperatura interna da estufa e não a temperatura alvo (ranhura do estator).

A proposta é feita já tendo em mente o futuro, de forma a ser desenvolvida deixando portas abertas para o uso do sistema de gerenciamento de chão de fábrica da própria empresa (GCF), que faz a coleta automática de informações (indicadores) de máquinas e de processos.

A nova arquitetura proposta para funcionamento da expansão do sistema atual existente na linha de impregnação B, bem como o fluxo de informações decorrente dessa expansão, pode ser visto na Figura 11.



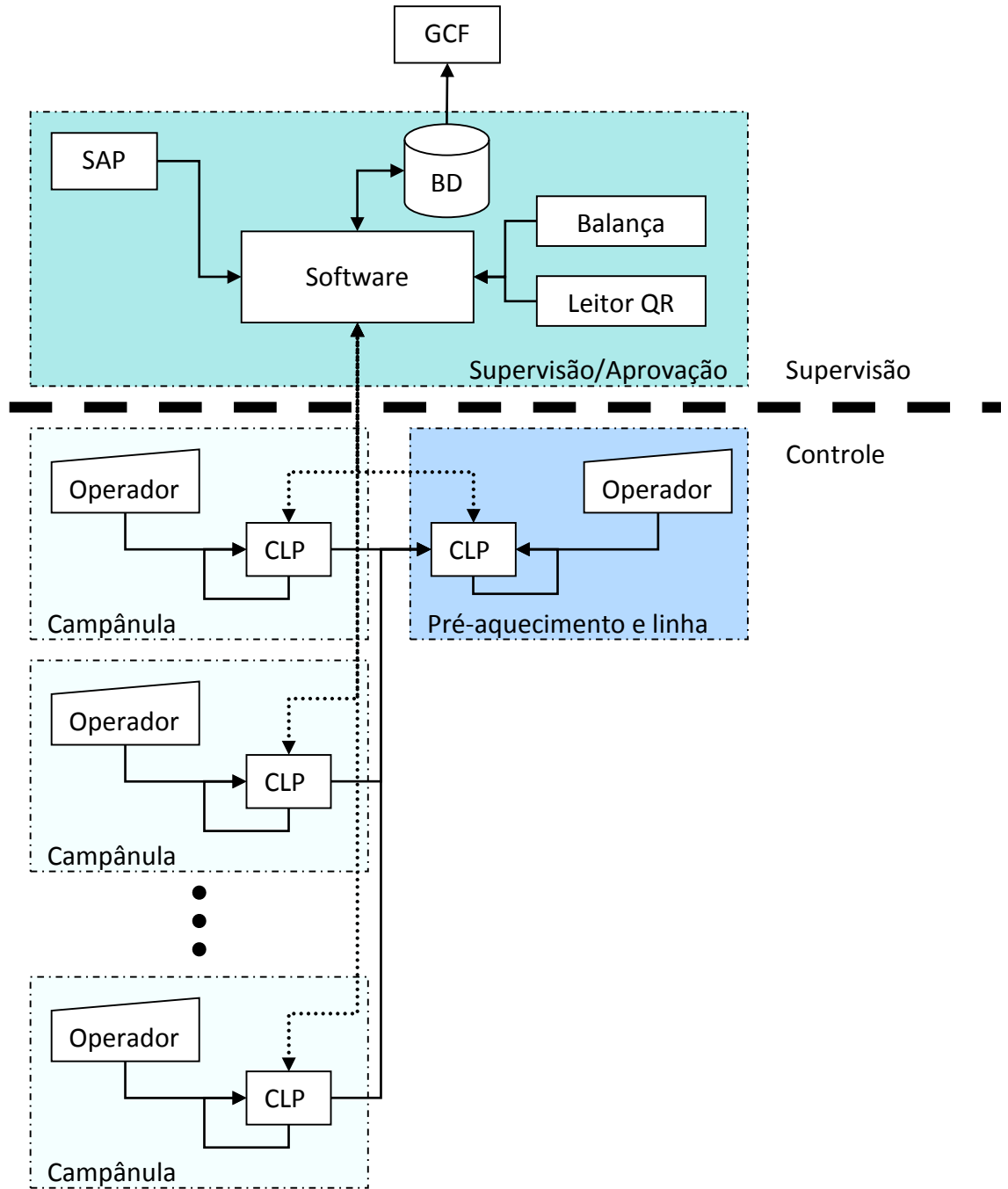


Figura 11 Arquitetura proposta para o sistema de supervisão e controle

### **4.3: Fluxo de informações**

O software será responsável por informar ao CLP da estufa de pré-aquecimento (que também comanda a linha) o estator que acaba de entrar na linha (número da ordem de produção e número do motor, combinação única para cada motor produzido pela empresa), e aos CLPs das campânulas da linha. Desta forma, cada campânula deverá ter “ciência” do estator que passará por ela, selecionando os parâmetros do processo referentes àquele tipo de material, como, por exemplo, tempos de cura.

O software também deve ler dos CLPs informações referentes ao processo (tempo efetivo de cura, possíveis paradas, etc) e associá-las ao estator. Com a adição de um leitor QR integrado com um medidor de temperatura (termômetro digital, por exemplo), pode-se estimar o tempo de pré-aquecimento e a temperatura do estator antes de ser realizado o gotejamento, o software deverá ser capaz de aglutinar todas essas informações. O mesmo dispositivo pode ser utilizado ao longo do processo, proporcionando uma maior rastreabilidade dos estatores, como, por exemplo, utilizar um leitor QR antes e depois do processo de gotejamento e/ou antes e depois do processo de cura, possivelmente medindo a temperatura das ranhuras do estator.

Tal comunicação pode ser realizada utilizando um protocolo de comunicação, como MODBUS por exemplo, para escrever e ler de registradores designados para conter os parâmetros envolvidos no processo (em cada CLP).

Todas as informações armazenadas pelo software devem ser repassadas ao banco de dados interno da empresa, tornando possível rastrear detalhes referente ao processo de impregnação realizado em cada estator que tenha passado pela linha.

### **4.4: Conclusão do capítulo**

Neste capítulo descreveu-se a arquitetura e o fluxo de funcionamento atuais do sistema e em seguida fez-se o mesmo com o novo sistema proposto, utilizando os parâmetros e as soluções mencionadas nos capítulos anteriores, visando resolver os problemas mencionados no Capítulo 2. No próximo capítulo será mostrado o desenvolvimento dessa nova arquitetura proposta.

## Capítulo 5: Implementação

Tendo em mente a concepção global do projeto, de se criar um sistema de supervisão e controle do processo, e a estrutura já existente, desejou-se expandir o software existente de pesagem, desenvolvido utilizando LabVIEW. Infelizmente, a seção da empresa responsável pelo desenvolvimento do mesmo não autorizou a alteração do software, alegando que uma aplicação rodando paralelamente ao que já existe seria capaz de realizar o projeto.

Essa não autorização dificultou a implementação do projeto, uma vez que a seção também informou não ser possível utilizar a licença que eles possuem do software de desenvolvimento, inviabilizando a criação da aplicação paralela. Além disso, sem o acesso ao software de pesagem, torna-se necessário requisitar um novo acesso ao banco de dados interno da empresa, outro processo bastante demorado, burocrático e custoso.

Deste modo, afim de se validar a ideia do projeto, propôs-se a implementação do projeto em uma escala menor, utilizando somente uma das campânulas da linha.

### 5.1: Campânula piloto

A ideia é implementar os novos métodos de controle e de rastreamento do processo em uma das campânulas da linha. Abaixo serão abordadas as alterações a serem realizadas na campânula piloto, de modo a implementar as ideias propostas anteriormente.

#### 5.1.1: Programação do CLP

O intuito é alterar o funcionamento do programa atual do CLP da campânula de modo que o tempo de cura passe a ser controlado de maneira variável, de acordo com o material/tipo do estator dentro da campânula.

Para tal será necessário realizar modificações na programação do controlador de temperatura Novus e do CLP TPW03, além de criar novas conexões físicas entre os dois.

A abordagem de controle que será utilizada está dividida em 3 estágios:

- I. Retorno da temperatura da estufa ao valor de referência da mesma;
- II. Tempo necessário para que o estator chegue aos 90°C, esse valor será estimado através de testes realizados com estatores daquele modelo e o CLP deve ser capaz de identificar o material/tipo e utilizar esse valor estimado. O funcionamento do programa pressupõe que o estator estava numa faixa adequada de temperatura ao início do gotejamento.
- III. Tempo adequado para que o estator fique acima de 90°C e que seja realizada corretamente a cura da resina.

### 1) Modificar a programação do controlador de temperatura:

Alterar os parâmetros de ajuste para adicionar o uso da saída I/O1 como Alarme 1, configurado no modo “Alarme de Valor Diferencial”, com valor de variação de faixa a ser definido.

Parâmetros a serem adicionados:

**SPA1** 180

**FUA1** dIF

**Io1** A1

### 2) Criar novas conexões físicas:

Conectar fisicamente a saída do controlador de temperatura referente ao sinal do Alarme 1 a uma entrada do CLP. As portas do controlador referentes ao Alarme 1 são as portas 5 e 6.

*Tabela 1 Conexões entre o controlador de temperatura da estufa campânula e o CLP*

<b>Novus</b>	<b>CLP</b>
Porta 5	24Vcc
Porta 6	X024

### **3) Modificar a programação do CLP TPW03:**

Alterar o programa de modo a incluir a nova abordagem de controle, baseando se nos 3 estágios mencionados anteriormente. Para tal o CLP deve ser capaz de enviar e receber informações do “software supervisor” (simulado para efeitos de implementação do piloto), via MODBUS, acerca do material/tipo do estator e também deve possuir uma tabela interna onde constam, para cada tipo de estator, os parâmetros de controle utilizados.

O CLP dará início ao processo de cura da resina, descendo a estufa campânula e aguardando até que a mesma atinja novamente seu valor de referência de temperatura. Ao receber o sinal do controlador, o programa irá iniciar a contagem, utilizando o valor de tempo referente ao material/tipo do estator sendo curado, e aguardar até que a temperatura de 90°C seja atingida pelas estimções. Essa temperatura de 90°C foi definida por testes realizados e analisados pelos analistas responsáveis pelo processo na empresa (a análise indica que a 90°C, a resina utilizada precisa de pelo menos 8 minutos para que a gelificação ocorra de forma satisfatória). Após isso, o programa entrará no seu terceiro e último estágio, onde será iniciada a contagem para realização da cura, novamente com um valor de tempo armazenado dentro do CLP, ao término da contagem a campânula é levantada e o processo seguirá normalmente. Um fluxograma do funcionamento do processo pode ser visto na Figura 13.

Informações referentes aos tempos de fato utilizados (levando em consideração possíveis paradas e anomalias do processo) devem ser armazenadas em registradores do CLP, os quais futuramente deverão ser acessados pelo software supervisor visando armazená-las.

Os CLPs TPW-03 da WEG, utilizados no processo, possuem uma porta RS-232 e uma RS-485, tendo a opção de se adicionar um cartão de expansão contendo uma porta RS-232 extra ou uma RS-485. Eles também já contam com instruções implementadas referentes ao protocolo MODBUS, bastando especificar as ações (escrita, leitura, etc) e os endereços de destino e origem. A configuração das portas é facilmente realizada movendo-se valores contendo os detalhes da configuração (Figura 12) para o registrador referente a cada porta.

Bit	Descrição	Conteúdo	
		0 (OFF)	1 (ON)
B0	Data bits	7 bit	8 bit
B1 B2	Paridade	B2,B1 (0,0): nenhum (0,1): IMPAR (1,0): PAR	
B3	Stop bits	1 bit	2 bit
B4 B5 B6 B7	Baud rate (bps)	B7,B6,B5,B4 (0,1,1,1):9.600 (1,0,0,0):19.200 (1,0,0,1):38.400 (1,0,1,0):57.600 (1,0,1,1):76.800	B7,B6,B5,B4 (1,1,0,0):128.000 (1,1,0,1):153.600 (1,1,1,0):307.200
B8~B12 *1	Reservado		
B13	Modo Modbus	(0) : Modo RTU	(1) : Modo ASCII
B14~B15*1	Reservado		

*Figura 12 Descrição dos bits de configuração das portas de comunicação do CLP TPW03*

O número de identificação do estator utilizado é o número do material (diferente do proposto no projeto, que seria o número de série), pois é o que será utilizado para definir os tempos designados do processo. O número do material é algo altamente específico, ainda que não seja único, pois inclui todas as características construtivas de um estator (tamanho de pacote, de carcaça, polaridade, etc), a programação do CLP foi realizada utilizando 2 registradores, o que possibilita a futura utilização do número de série.

O código desenvolvido pode ser visto no Apêndice A.

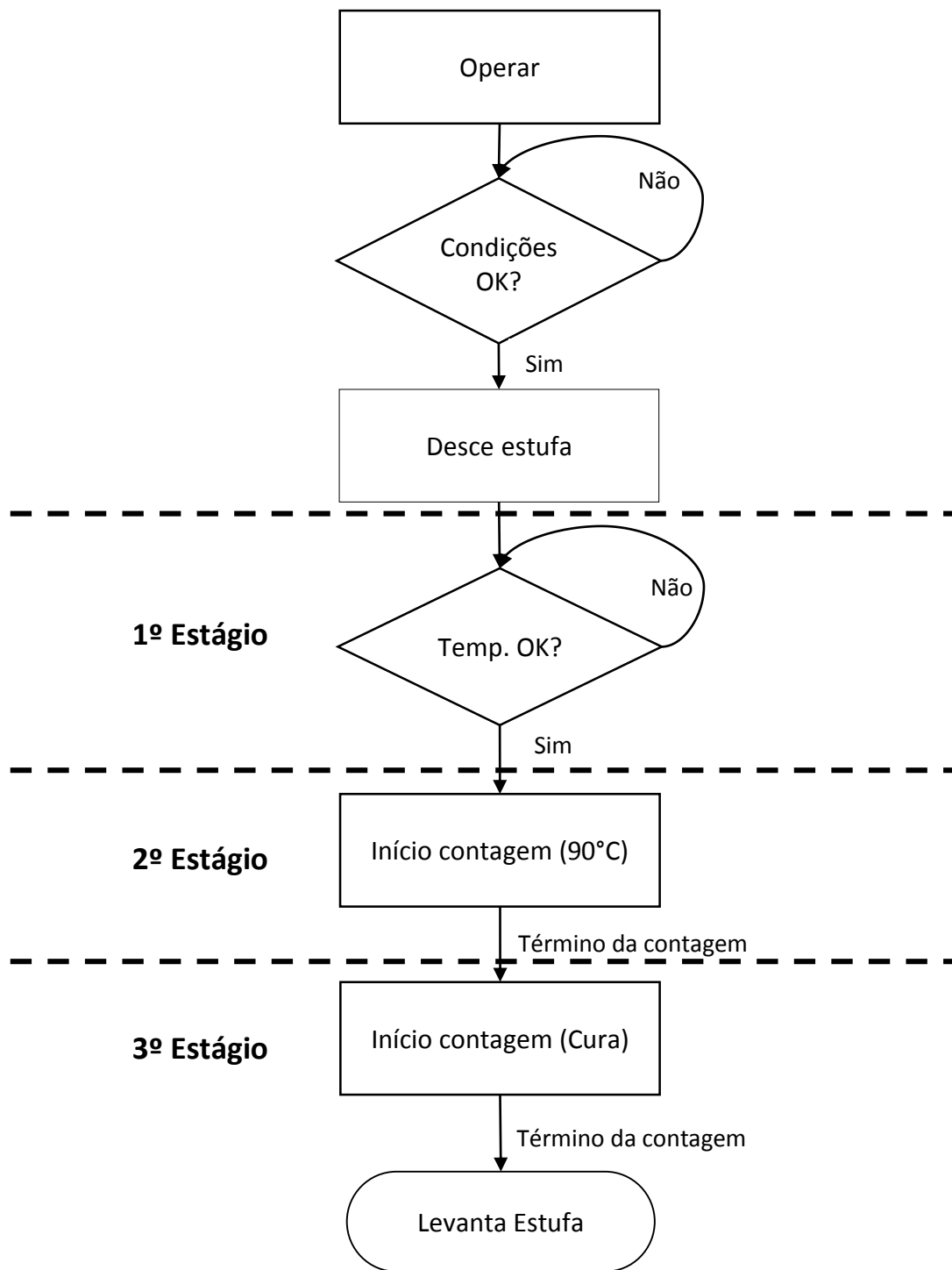


Figura 13 Novo fluxo de funcionamento da etapa de cura do processo

Além das alterações realizadas referentes a etapa de cura, também adicionou-se a “emulação” do sistema supervisório para o projeto piloto, que nada mais é do que uma IHM. Para permitir essa emulação, adicionou-se ao programa do CLP as tabelas com as informações (tempo de cura, inclinação da curva de aquecimento) referentes a cada número de material, um relógio interno utilizando o marcador interno de 1s que será utilizado para contagem do tempo utilizado em cada estágio da etapa de cura. E, para questões de rastreabilidade, adicionou-se uma tabela com os últimos 10 estatores impregnados na campânula e informações do mesmo, a qual será mostrada em telas da IHM.

### **5.1.2: Interface homem-máquina**

A fim de se emular o sistema supervisório, desenvolveu-se uma pequena aplicação para uma IHM modelo PWS6400 (produto desenvolvido pela empresa).

A aplicação visa possibilitar que o operador entre com as informações referentes ao estator que passará pela etapa de cura do processo de impregnação. As informações são o número do material (informado via teclado numérico na tela, acessado a partir do botão abaixo de “Adicionar estator” na tela de informações do estator) e a temperatura inicial do estator (informação utilizada para estimar o tempo necessário para que o estator atinja os 90°C).

A mesma também permite que o processo seja acompanhado, na tela de informações do processo, tempo decorrido do processo, se o gotejamento está acontecendo, se o estator está sendo rotacionado, se o estator está inclinado e se o processo de cura está acontecendo. Também disponibiliza uma tabela com os dados dos 10 últimos estatores impregnados, mostrando informações de tempo decorrido, temperatura inicial e se houve ou não interferência no processo.

A interface desenvolvida pode ser vista na Figura 14.



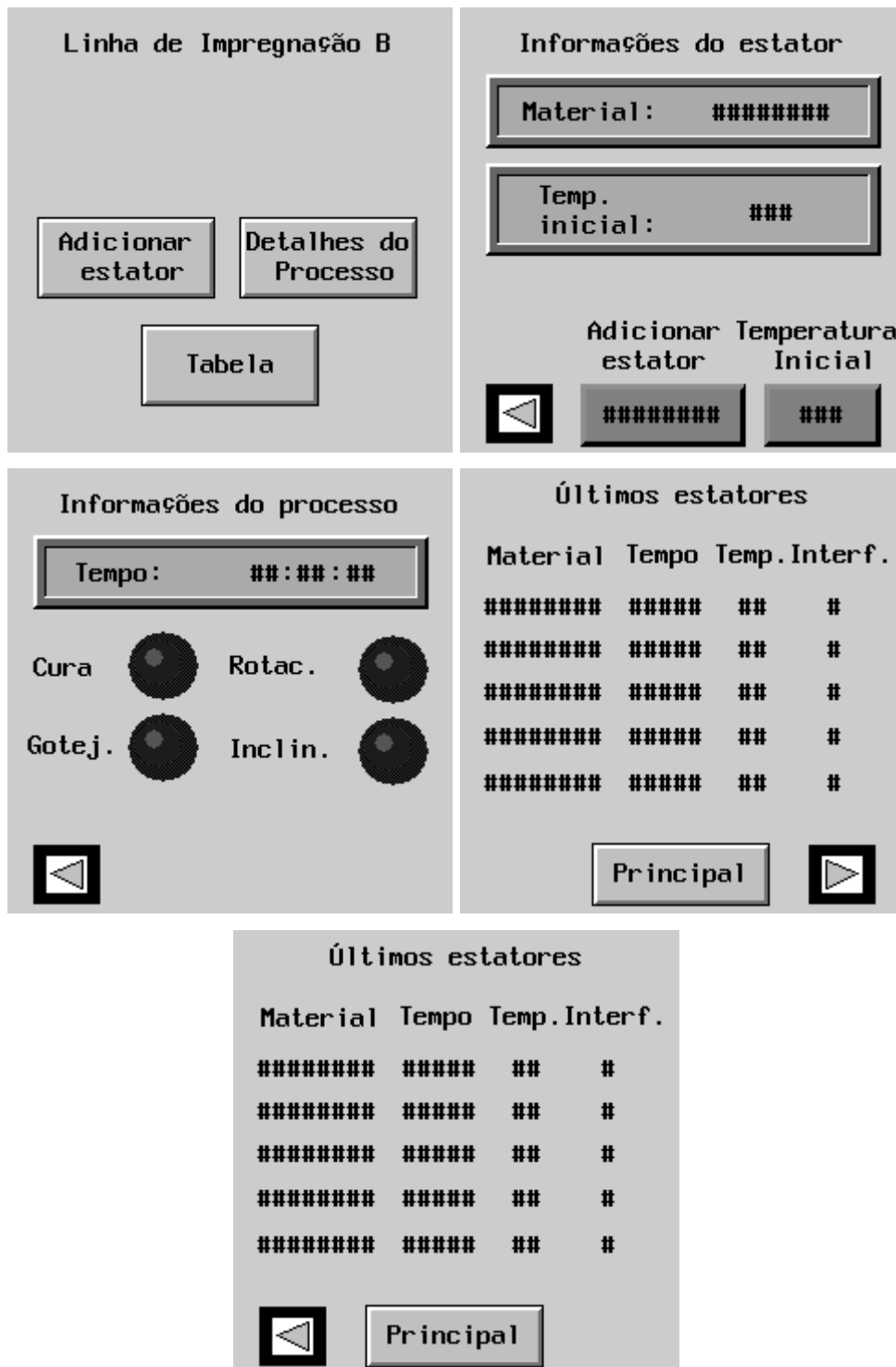


Figura 14 Telas da IHM utilizada

## **5.2: Instrumentação da campânula**

Deve-se adicionar um sensor de posição intermediário no cilindro pneumático responsável por inclinar o estator, visto que durante as semanas de acompanhamento do processo, descobriu-se que existem alguns estatores com pequenos comprimentos que podem tombar durante o gotejamento caso seja utilizada a inclinação completa do cilindro.

A instalação de um sensor de vazão na tubulação de resina permitiria a contagem de tempo de gotejamento, bem como a informação momentânea de que o gotejamento está ou não ocorrendo.


## **5.3: Obtenção dos parâmetros de controle**

Os parâmetros de controle do processo serão obtidos através da estimação/extrapolação de ensaios realizados para cada grupo de estatores, os quais serão agrupados baseando-se em suas características dimensionais, como raio, comprimento e peso.

Serão levantadas as inclinações das retas de aquecimento de cada grupo de estator, tanto dentro da estufa de pré-aquecimento quanto das campânulas. As médias dos resultados desses ensaios serão utilizadas para estimar os parâmetros. Uma medição mais apurada na saída da estufa de pré-aquecimento em conjunto com o tempo baseado nos ensaios dará uma maior confiabilidade ao processo.

Também será analisado o comportamento dos estatores na etapa de gotejamento, através de ensaios nos quais os operadores marcarão a duração do gotejamento e a temperatura inicial e final, afim de levantar dados do comportamento da temperatura ao longo do processo.

### 5.3.1: Ensaios de tempo de gotejamento

	<b>Fábrica III - Linha de Impregnação B</b> <b>Ensaios de tempo de gotejamento</b>	<b>Data:</b>				
	<b>Ordem e Série</b>	<b>Horário Início</b>	<b>Temperatura Início</b>	<b>Horário Término</b>	<b>Temperatura Término</b>	<b>Nº</b>
1						
31						
Observação: <u>Marcar horário e temperatura</u> no <b>início</b> do gotejamento e <b>antes</b> de baixar a campânula para cura. Nº - relativo ao número da campânula na qual o gotejamento foi realizado.						

*Tabela 2 Tabela utilizada no processo para coletar a variação de temperatura durante o processo de gotejamento de cada tipo de estator, bem como o tempo de gotejamento dos mesmos*

A *Tabela 2* foi disponibilizada aos colaboradores da linha de impregnação B, responsáveis pelas etapas de gotejamento e cura dos estatores, durante algumas semanas, visando adquirir as informações de tempo de gotejamento e curva de temperatura do maior número possível de estatores. É necessário que um volume grande de dados seja compilado, devido à alta variabilidade dos estatores produzidos pela fábrica.

Tais dados serão úteis não só para a implementação do projeto, mas também para os analistas da fábrica, uma vez que informações de quanto tempo cada estator leva para ser devidamente gotejado não haviam sido efetivamente contabilizadas anteriormente.

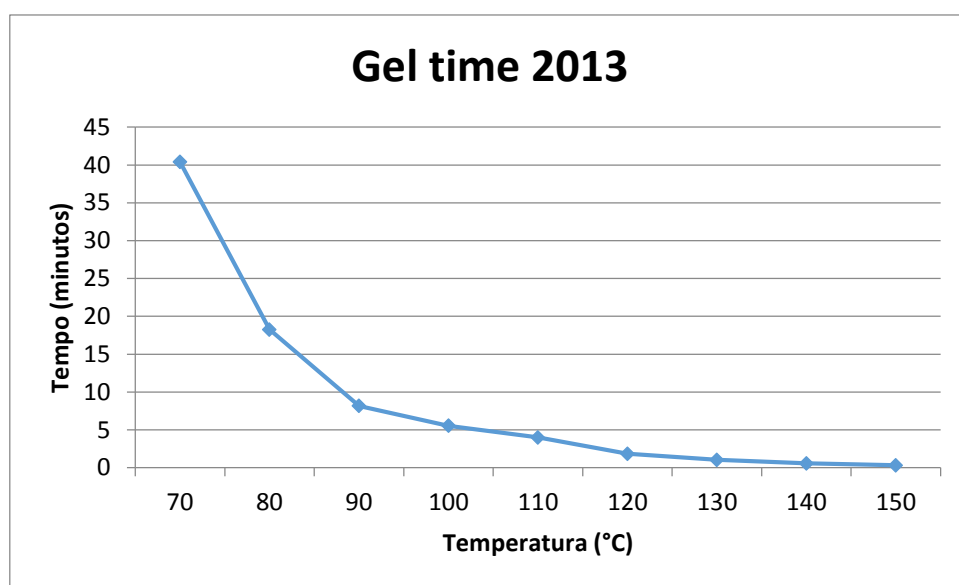
Os resultados desse ensaio serão mostrados e analisados no próximo capítulo.

### 5.3.2: Ensaios de tempo de gelificação da resina

Os testes de gelificação serão realizados utilizando um equipamento destinado à determinação do *Gel time* de resinas. O teste funciona utilizando um tubo de ensaio, onde são despejados 19g de resina e uma haste metálica, fixa-se a haste e o tubo de

ensaio no equipamento, que passará a agitar o conteúdo do tubo de ensaio com a haste a uma velocidade constante e a contar o tempo. Quando a gelificação ocorre, a haste metálica não é mais capaz de agitar o conteúdo, passando a mover o tubo de ensaio junto com a haste. O equipamento detecta essa movimentação do tubo e para o cronômetro.

Esses testes já foram realizados anteriormente, mas novos testes serão realizados afim de corroborar (ou contestar) os resultados obtidos nos testes antigos (Figura 15).



*Figura 15 Resultado do teste de Gel time realizado em 2013*

Foi a partir desse teste que o tempo de gelificação da resina a 90°C mencionado em capítulos anteriormente foi determinado (8 minutos).

Os resultados dos novos testes serão apresentados no próximo capítulo.

### **5.3.3: Levantamento da curva de temperatura dos estatores**

O levantamento da curva de temperatura será realizado utilizando o equipamento EasyTrack 2 Insight da DataPAQ, um datalogger remoto que possui uma embalagem resistente à altas temperaturas, oferecendo suporte a 6 termopares do tipo J/K.

Os ensaios serão realizados através do posicionamento dos termopares em pontos específicos do estator e passando esses estatores pela linha de impregnação.

Tais ensaios também foram realizados anteriormente, mas no outro prédio do departamento de fabricação III (onde são produzidos motores menores) e em campânulas diferentes. A ideia é realizar esses ensaios na campânula a qual será utilizada para a implementação do piloto, com estatores de tamanhos variados.

Os resultados dos ensaios serão analisados no capítulo seguinte.

#### **5.4: Conclusão do capítulo**

Neste capítulo explorou-se as etapas de desenvolvimento do projeto, envolvendo tanto o desenvolvimento propriamente dito de códigos e telas de supervisão, quanto como a definição dos ensaios e dos parâmetros a serem alimentados para o sistema. A utilização dos parâmetros levantados nos ensaios é de extrema importância para o funcionamento do sistema da maneira que o mesmo foi proposto.

## Capítulo 6: Resultados

### 6.1: Campânula piloto

O código LADDER e o programa da IHM foram implementados e testados com um CLP igual ao existente na campânula e com uma IHM PWS6400. Devido ao aumento súbito na produção no mês de dezembro, não houve a possibilidade de implantação dos programas desenvolvidos na campânula que serviria de piloto, pois a linha estava trabalhando com 100% da sua capacidade, nos 3 turnos da fábrica, e a implantação envolveria parar uma máquina, realizar as alterações necessárias e testar e garantir o funcionamento antes de se liberar o uso da mesma.

### 6.2: Ensaios

#### 6.2.1: Tempo de gotejamento

Foram compilados cerca de 2 semanas de dados (a anotação dos dados, porém, dependia da boa vontade dos colaboradores responsáveis pela etapa de gotejamento e cura resina), e separou-se os resultados em 3 categorias construtivas: o tipo da carcaça (280 ou 315), a polaridade (2, 4, 6 ou 8) e o tamanho do pacote (160 a 660mm). Um exemplo de gráfico resultante dessa compilação e separação pode ser observado na Figura 16.

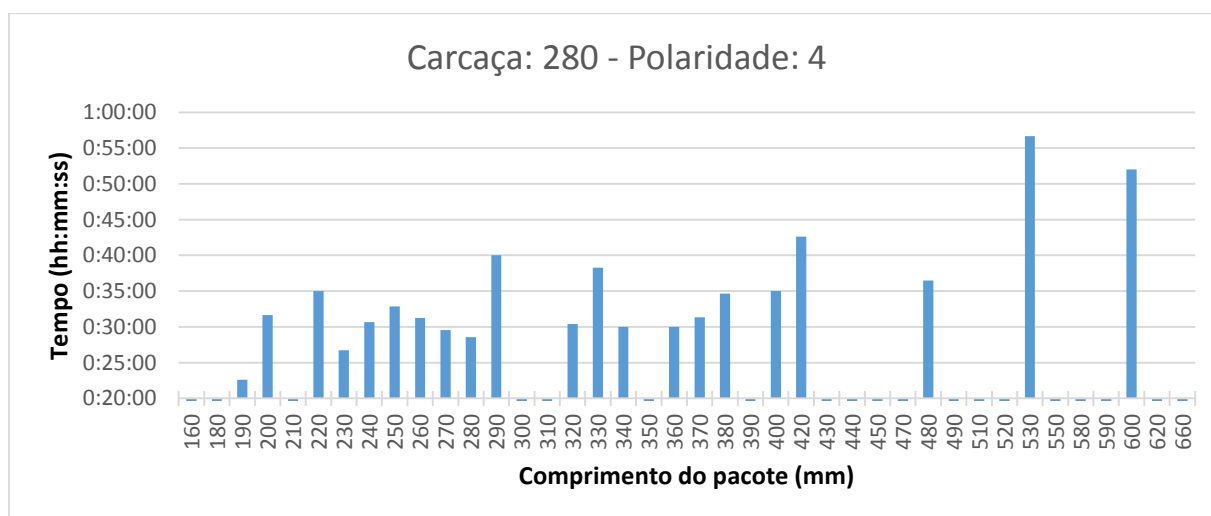


Figura 16 Tempos de gotejamento para estatores de carcaça 280, 4 polos

### 6.2.1.1: Perda de calor durante o gotejamento

Juntamente com o levantamento dos tempos, foram coletadas as temperaturas inicial e final do gotejamento, afim de encontrar o valor da queda de temperatura por minuto dos estatores, divididos novamente nas 3 categorias mencionadas anteriormente. Essa curva auxiliaria no posterior aumento dos níveis de automatização da linha, possibilitando estimar, sem que haja a medição no final do gotejamento, a temperatura do estator no início da cura, utilizando o tempo decorrido de gotejamento. Um exemplo de gráfico obtido através dessa análise pode ser observado na Figura 17.

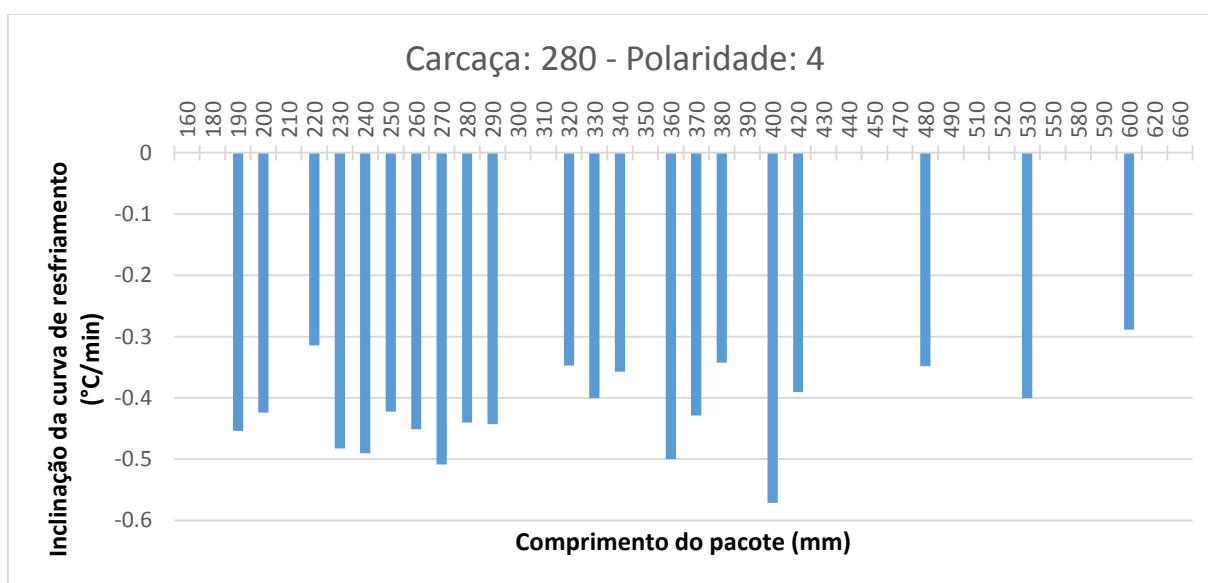


Figura 17 Inclinação da curva de resfriamento dos estatores de carcaça 280, 4 polos

### 6.2.2: Tempo de gelificação da resina

Foram realizados ensaios em 3 intervalos diferentes.

O primeiro ensaio utilizou uma amostra de um lote de resina preparado no próprio dia (A) e uma amostra de um lote preparado há 3 dias (B), para essas amostras obteve-se, para a temperatura alvo de 90°C, tempos de gelificação de 15 minutos (A) e 12 minutos e 46 segundos (B).

O segundo ensaio foi realizado 2 dias após o primeiro, utilizando a mesma amostra de resina (A), estando então preparada há 3 dias. O tempo de gelificação, à 90°C, foi de 12 minutos e 14 segundos, o que se mostrou condizente com os ensaios

realizados anteriormente, uma vez que quanto mais tempo a resina ficar misturada com o catalisador, mais rápida tende a ser a gelificação da mesma.

O terceiro ensaio foi realizado 10 dias após o primeiro, utilizando uma amostra de um lote preparado há 3 dias (D; a amostra foi coletada 2 dias antes) e duas amostras preparadas no dia, mas misturadas em tambores diferentes (E e F). Obteve-se tempos de gelificação, à 90°C, de 15 minutos e 33 segundos (D), 19 minutos e 2 segundos (E) e 18 minutos e 37 segundos (F). A variação de tempo entre as amostras preparadas no dia e a preparada há 3 dias novamente se mostrou condizente com o esperado.

Os ensaios revelaram, além da diferença entre os resultados obtidos com aqueles obtidos no ensaio realizado em 2013 (onde definiu-se o tempo de gelificação de 8 minutos a 90°C), um problema que pode afetar diretamente o funcionamento do projeto, a alta variação (entre 3 e 4 minutos) do tempo de gelificação para a resina produzida lotes diferentes pelo fornecedor. Essa alta variação pode prejudicar a realização da cura da resina de forma satisfatória, podendo resultar em estatores que teriam que passar por processos de recuperação, atrapalhando a produção da fábrica. A causa dessa variação ainda é incerta, podendo ser algo relacionado à fabricação da resina em si, ao armazenamento incorreto da mesma ou à mistura de forma incorreta da resina com o catalisador. Os analistas responsáveis pelo processo já iniciaram a busca pelas causas.

Tendo isso em mente, uma possibilidade é passar a trabalhar com o estator a uma temperatura mais alta durante a cura. Infelizmente isso pode acarretar perda de



produtividade devido ao aumento dos tempos envolvidos. Os resultados dos ensaios podem ser observados na Figura 18

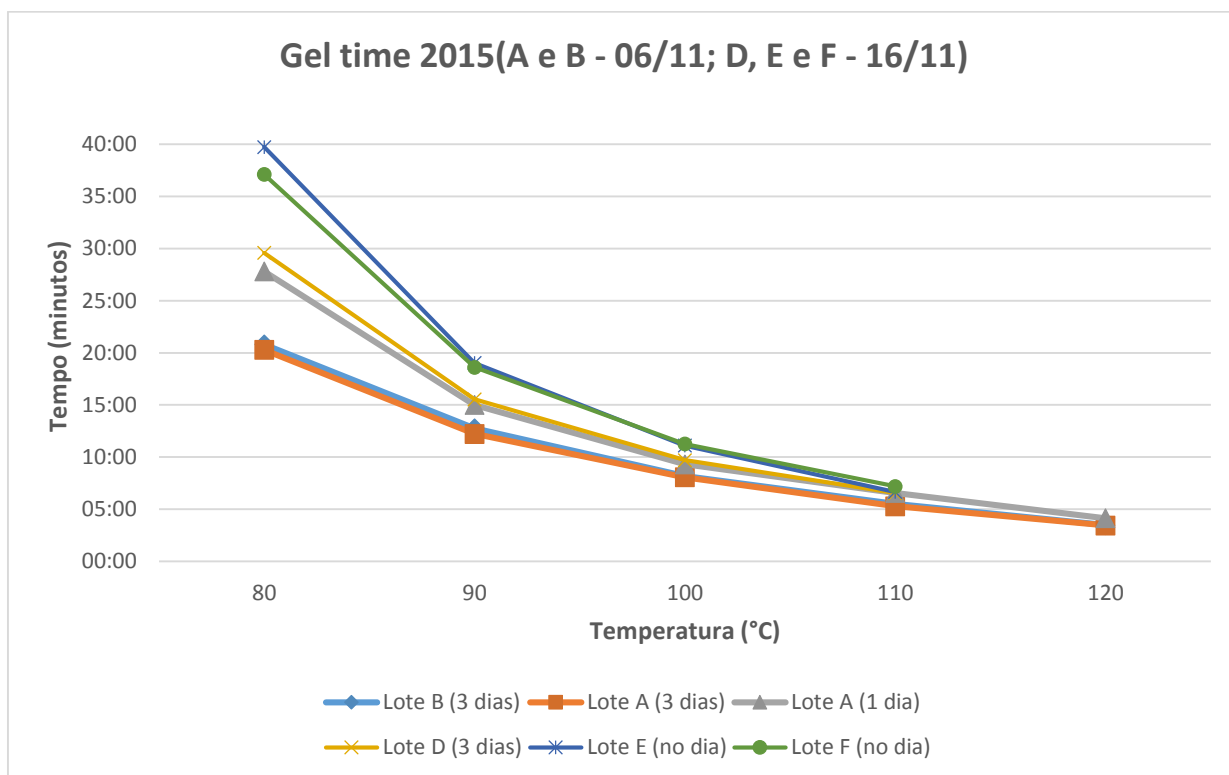


Figura 18 Resultados dos ensaios de tempo de gelificação da resina

### 6.2.3: Levantamento da curva de temperatura dos estatores

Os ensaios não puderam ser realizados pois envolveriam a parada de uma máquina durante o pico de produção, além do retrabalho resultante do ensaio, pois os estatores testados devem ser reintroduzidos na linha para serem impregnados (o ensaio é realizado sem a impregnação, para não danificar o *datalogger*). Outro agravante é a disponibilidade do aparelho de medição, pois trata-se de um aparelho emprestado por outra área da empresa.

O ensaios que já haviam sido realizados na empresa corroboram com a utilização da estratégica de 3 estágios de cura. Pois durante o período onde a temperatura da estufa sofre uma queda até a volta ao valor de referência, a temperatura do estator subiu de forma lenta e não linear, passando a se comportar de forma aproximadamente linear durante o resto do processo. Espera-se que a

realização dos ensaios com estatores de variados tamanhos forneça um bom resultado para a estimação da inclinação da curva de aquecimento de cada categoria de estator.

## Capítulo 7: Conclusões e Perspectivas

O objetivo inicial do trabalho infelizmente não chegou a ser atingido, devido às circunstâncias de aumento súbito de produção, indisponibilidade de equipamentos, entre outros detalhes que tornaram a implementação do projeto concebido inviável no momento. Porém, ainda que a implementação de fato não tenha sido realizada, a estrutura desenvolvida deverá atender sem dificuldades os quesitos de aumento de rastreabilidade e de repetibilidade/confiabilidade do processo.

Os resultados dos ensaios realizados também foram importantes para o levantamento de dados que, por mais que fossem de conhecimento geral do pessoal envolvido no processo, ainda não haviam sido registrados efetivamente. Os testes de tempo de gelificação da resina se mostraram importantes por revelarem comportamentos díspares entre as preparações de datas diferentes, fator importantíssimo para a realização correta do processo, além de ser um requisito extremamente necessário para a automatização do processo, pois afeta diretamente os tempos envolvidos e a qualidade da impregnação.

Como atividades pendentes e futuras, faltam os ensaios referentes ao levantamento da curva de temperatura de estatores de tamanhos variados dentro da campânula escolhida para ser o projeto piloto, a análise desses ensaios e a implementação de fato do piloto.

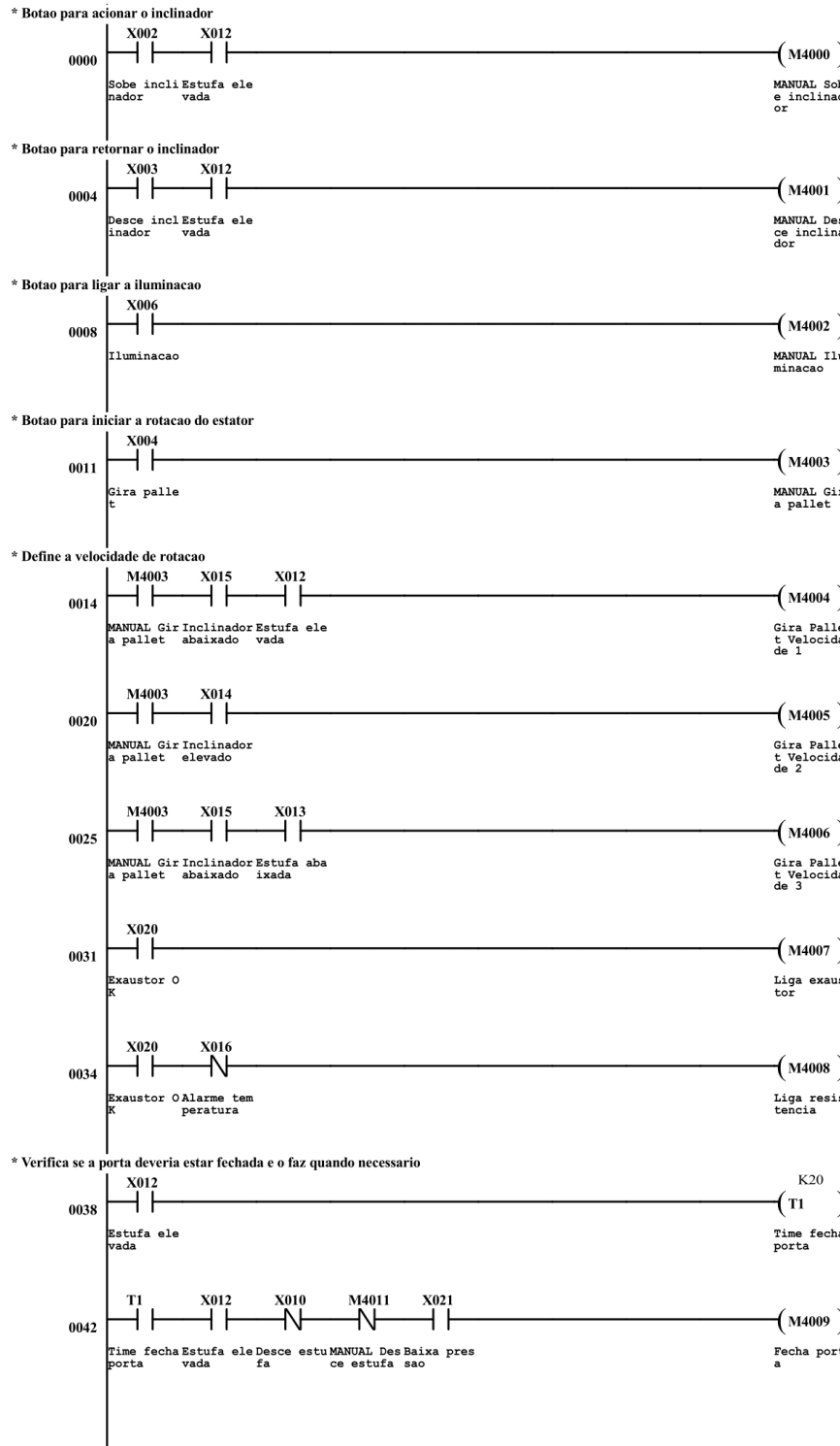
Confia-se que o piloto apresentará bons resultados, devido às informações apresentadas anteriormente, e que, uma vez validado o projeto, dar-se-á início à especificação detalhada e ao desenvolvimento do sistema de supervisão inicialmente proposto.

## Bibliografia:

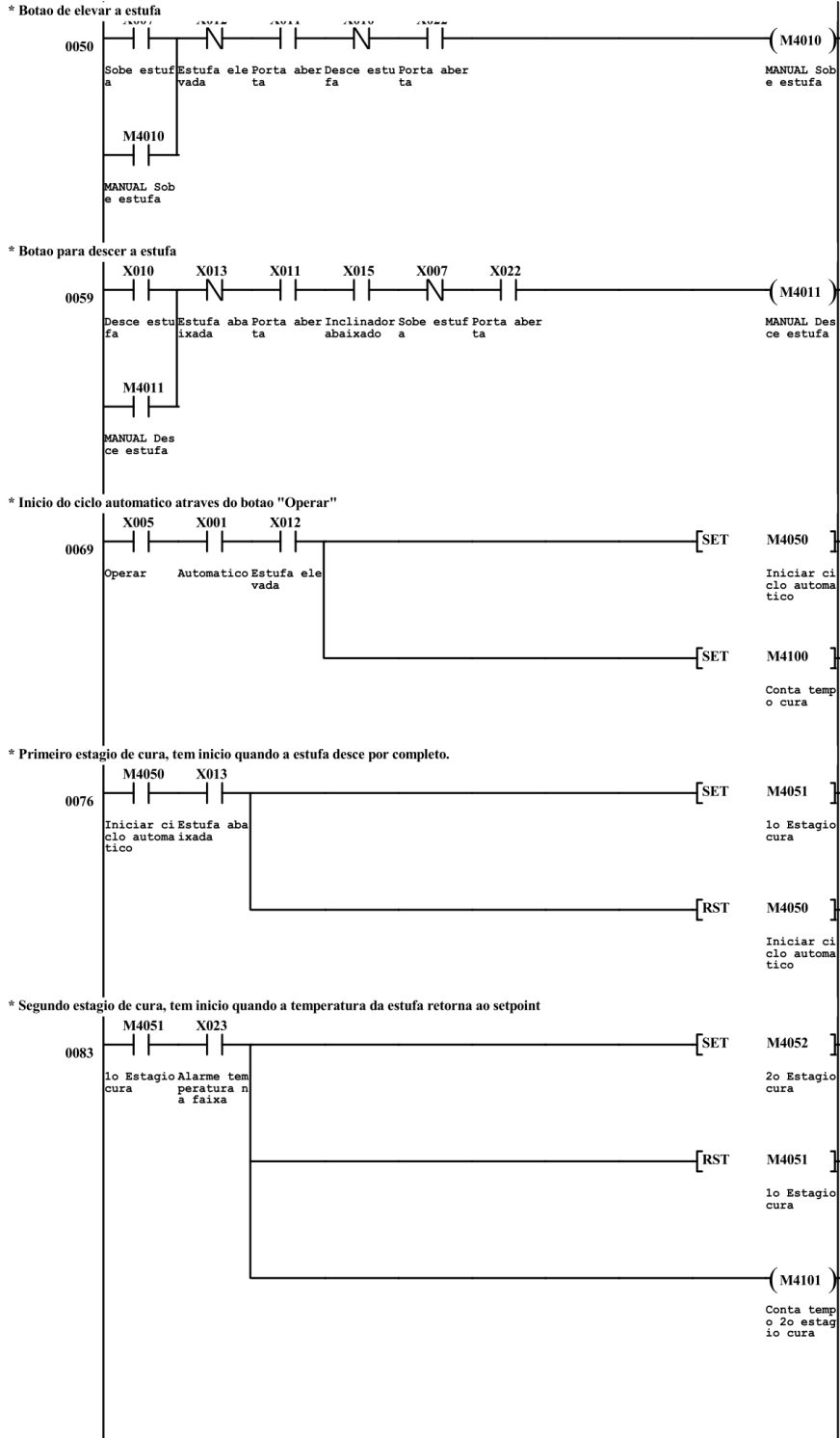
- [1] “TPW-03 – Controlador Programável – Programação”, WEG, 2008, <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-tpw-03-controlador-programavel-programacao-manual-portugues-br.pdf>
- [2] SILVEIRA & LIMA “Um breve histórico conceitual da Automação Industrial e Redes para Automação Industrial”, PPgEE-UFRN, 2003, [http://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA447/trabalho1/trabalho1\\_13.pdf](http://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA447/trabalho1/trabalho1_13.pdf)
- [3] DA SILVA MELLO, M. “CLP – Controlador Lógico Programável”, [http://www.ice.edu.br/TNX/encontrocomputacao/artigos-internos/aluno\\_marilourdes\\_silva\\_clp.pdf](http://www.ice.edu.br/TNX/encontrocomputacao/artigos-internos/aluno_marilourdes_silva_clp.pdf)
- [4] DA SILVA, A. P. & SALVADOR, M. “O que são sistemas supervisórios?”, 2004, [http://www.wectrus.com.br/artigos/sist\\_superv.pdf](http://www.wectrus.com.br/artigos/sist_superv.pdf)
- [5] “Sistemas de Controle I” UFRN, Depto. De Eng. De Computação e Automação, 2003, [http://www.netsoft.inf.br/aulas/7\\_EAC\\_Sistemas\\_Realimentados/8\\_resumo\\_sistemas\\_controle.pdf](http://www.netsoft.inf.br/aulas/7_EAC_Sistemas_Realimentados/8_resumo_sistemas_controle.pdf)
- [6] CURY, J. E. R. “Teoria de Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos”, UFSC, Depto. De Automação e Sistemas, 2001, <http://user.das.ufsc.br/~cury/cursos/apostila.pdf>

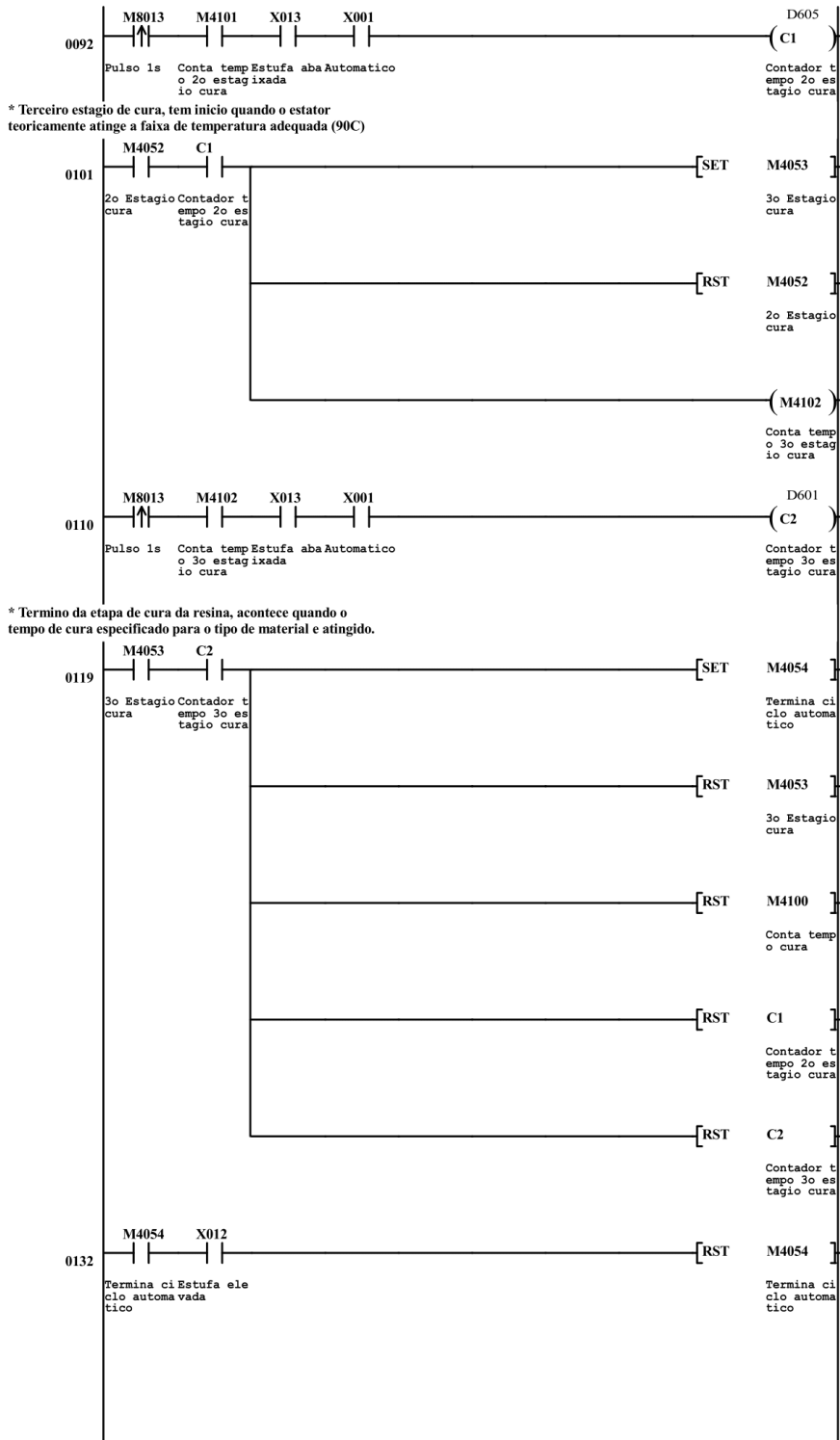
# Apêndice A

Processo:

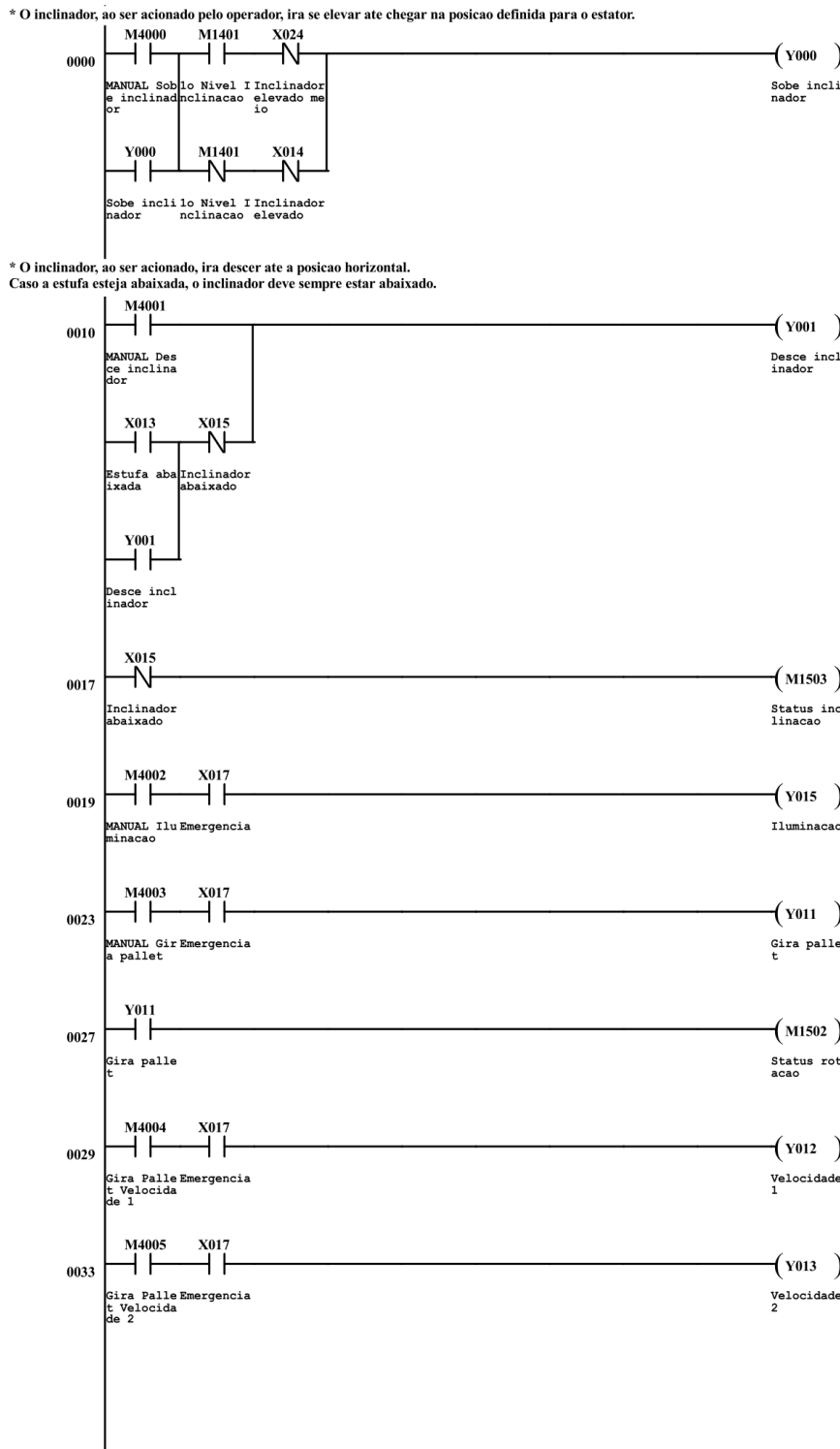


PAGE 1

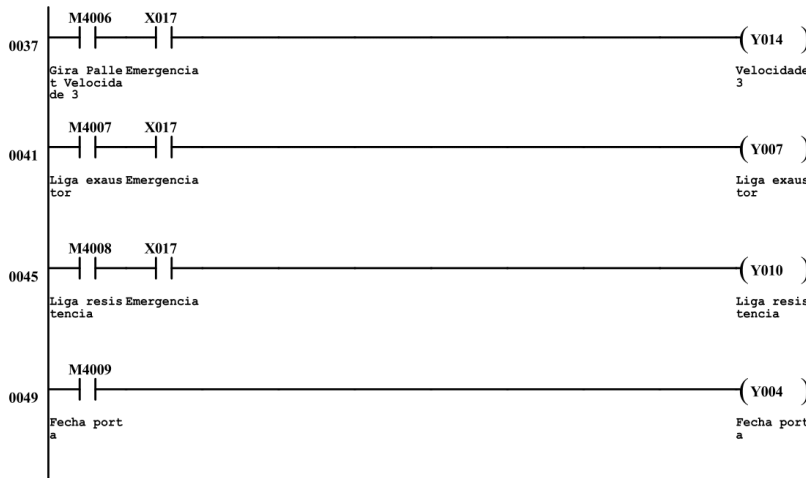




Saídas:







\* Aciona o comando de subir a estufa, caso o botao seja pressioando e esteja em modo manual, ou caso seja termino de ciclo do processo de cura e esteja no modo automatico.



\* Aciona o comando de descer a estufa, caso o botao seja pressionado e esteja em modo manual, ou caso seja inicio de ciclo do processo de cura e esteja no modo automatico.



\* Caso as etapas do processo de cura da resina estejam ativos, ativa o marcador referente ao status da cura.





3o Estagio  
cura

\* Compara o tempo de cura passado com o tempo de cura definido,  
caso faltem menos de 3 minutos, um alarme de aviso e acionado.

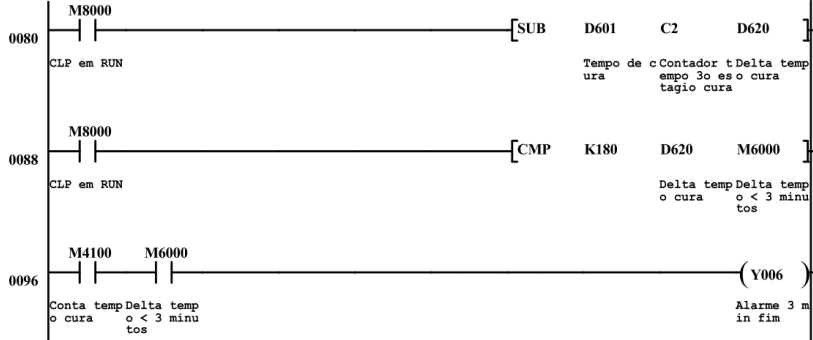
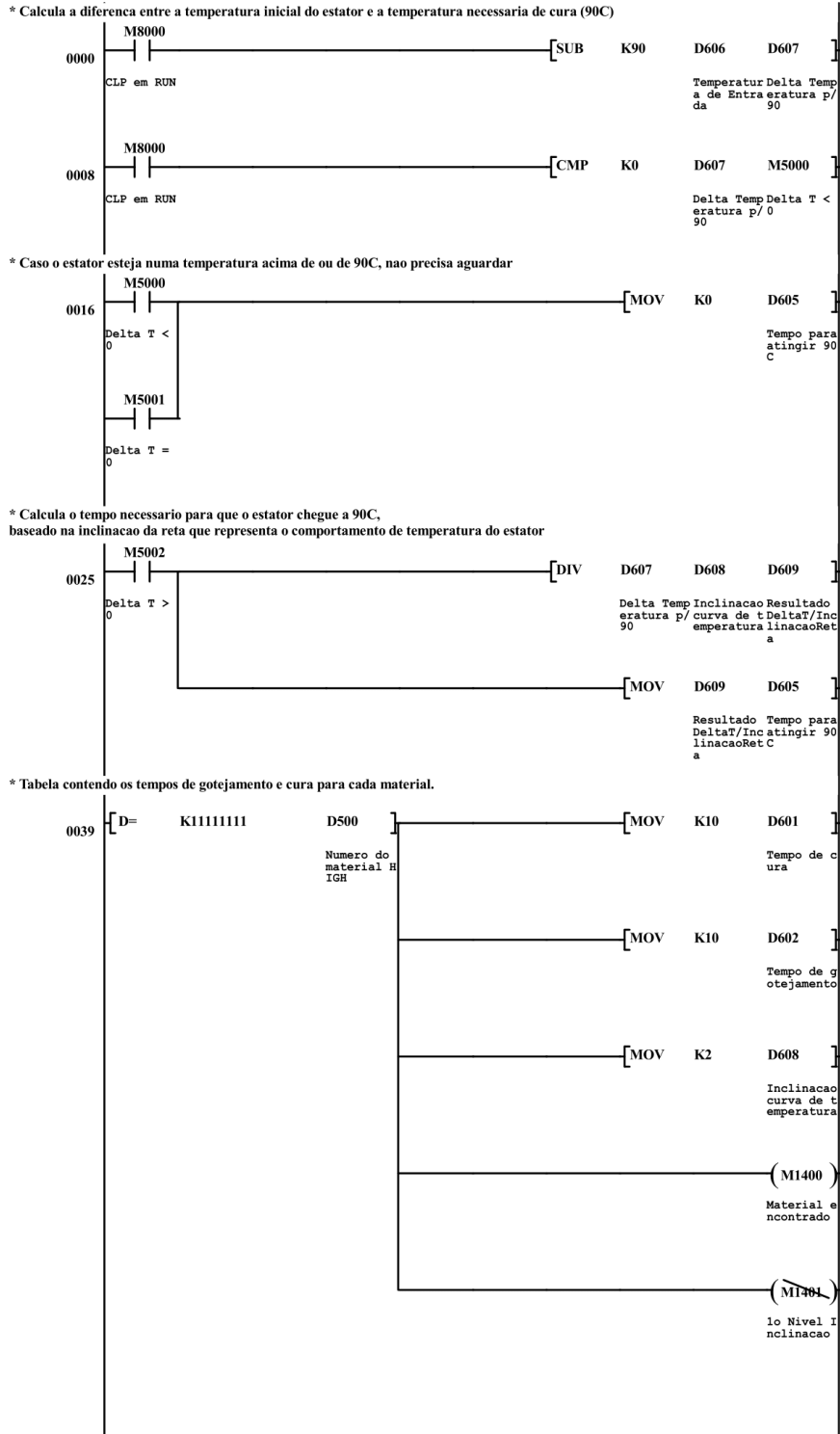


Tabela:



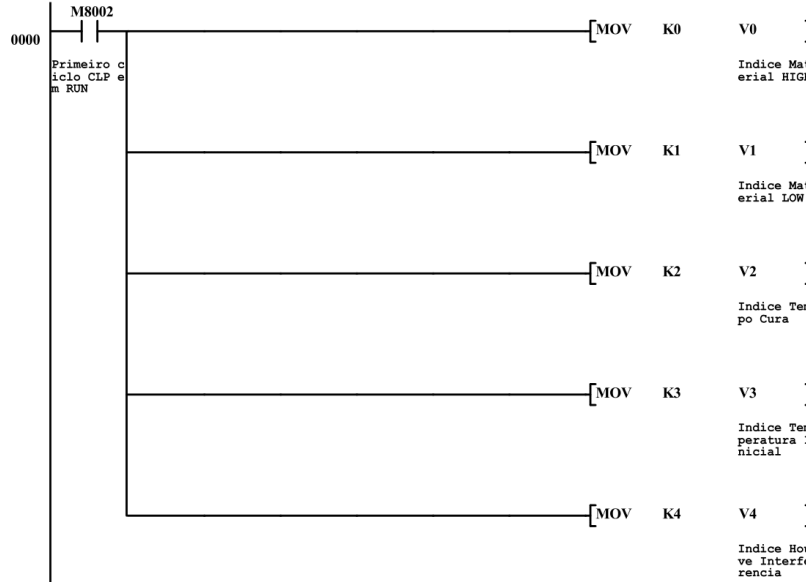
\* Caso o material informado nao seja encontrado, usa tempos padroes para cura e gotejamento.

0066	Material encontrado	[MOV K20 D601]	Tempo de cura
		[MOV K20 D602]	Tempo de gotejamento
		[MOV K30 D608]	Inclinacao curva de temperatura
		(MI461)	1o Nivel Inclinacao

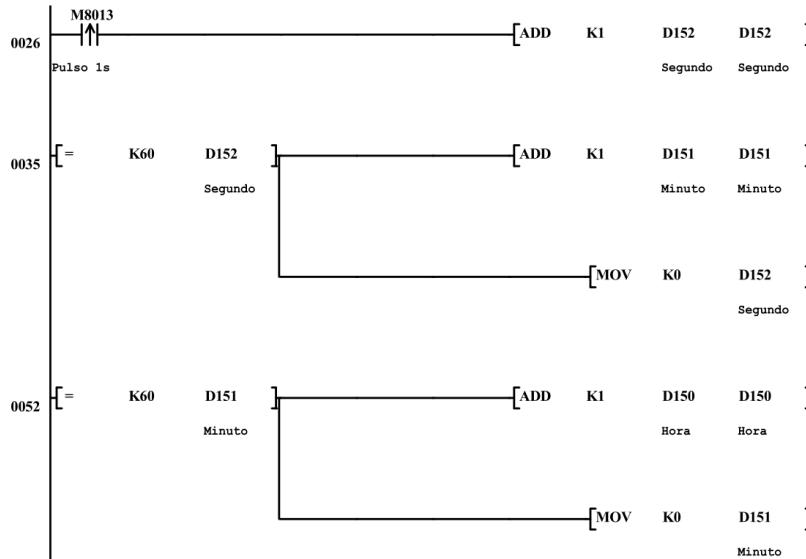
Acompanhamento:

PAGE 1

\* No primeiro ciclo do CLP, os valores dos registradores de indice sao inicializados.



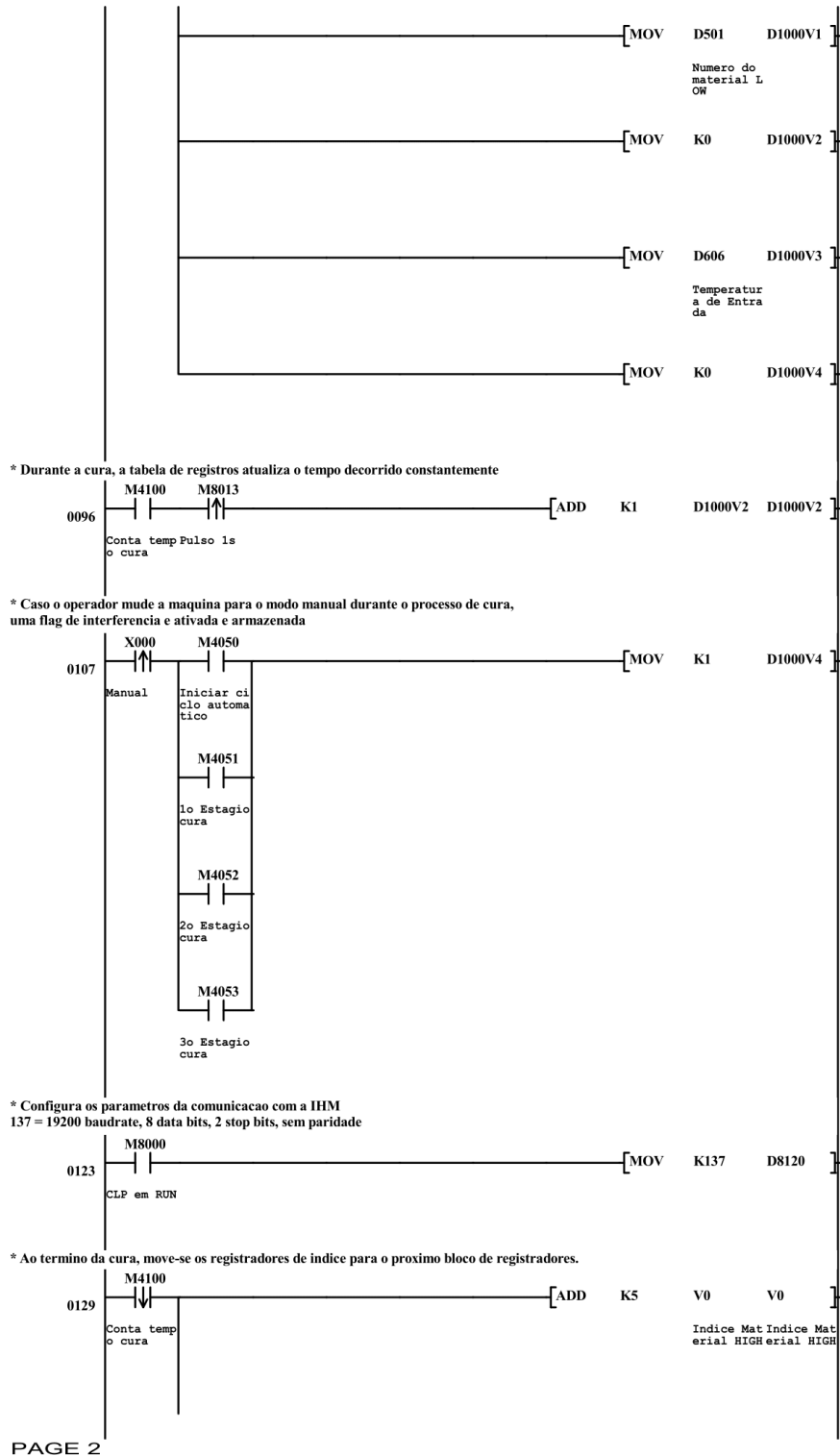
\* Relogio interno.

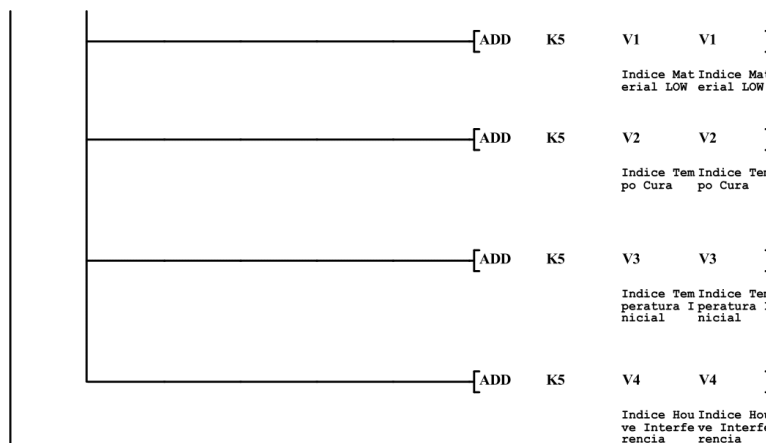


\* No inicio da cura, o numero do material e transferido para a tabela de registros interna e os outros campos da tabela sao zerados.



PAGE 1





\* Caso o bloco de registradores (10 blocos) chegue ao final, retorna os registradores de indice para o inicio

