

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**

**AUMENTO DE PRODUTIVIDADE INDUSTRIAL (OEE)**  
**ATRAVÉS DA OTIMIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE**  
**VELOCIDADE POR TÉCNICAS DE MODELAGEM DE**  
**REDE DE PETRI COLORIDA (RdP)**

José Hugo de Carvalho Souza

**Itajubá**  
**Março de 2018**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**

José Hugo de Carvalho Souza

**AUMENTO DE PRODUTIVIDADE INDUSTRIAL (OEE) ATRAVÉS DA**  
**OTIMIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE VELOCIDADE POR TÉCNICAS DE**  
**MODELAGEM DE REDE DE PETRI COLORIDA (RdP)**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciência em Engenharia Elétrica

**Área de Concentração:** Automação e Sistemas Elétricos Industriais

**Orientador:** Prof. Dr. Luíz Edival de Souza

**Itajubá**

**Março de 2018**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**

José Hugo de Carvalho Souza

**AUMENTO DE PRODUTIVIDADE INDUSTRIAL (OEE) ATRAVÉS DA**  
**OTIMIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE VELOCIDADE POR TÉCNICAS DE**  
**MODELAGEM DE REDE DE PETRI COLORIDA (RdP)**

Dissertação aprovada por banca  
examinadora em 27 de março de 2018,  
conferindo ao autor o título de **Mestre em**  
**Ciência em Engenharia Elétrica**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Luiz Edival de Souza – UNIFEI  
Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi – UNIFEI  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Cugnasca - USP

**Itajubá**

**Março de 2018**

*Este trabalho é dedicado aos meus pais, Antonio Alves e Ana Maria que sempre me incentivaram, a minha esposa e filha Ana Claudia e Ana Laura, minhas irmãs Beatriz e Monique, e ao Engenheiro e líder Marco Aurelio Matta Machado que me incentivaram e ajudaram a realizar a pós-graduação e estiveram sempre presentes em todos os momentos.*

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelas oportunidades que obtive e que me permitiram chegar onde estou.

Aos meus pais pelo suporte constante em acordar sempre comigo as 04 horas da manhã, nos acompanhamentos das viagens de deslocamento para o mestrado, com paciência, e ainda por me proporcionar as condições necessárias para mais uma conquista.

A minha esposa que sempre esteve ao meu lado, cuidando da nossa filha para que eu me dedicasse a dissertação.

Aos professores Dr. Luíz Edival de Souza e Dr. Carlos Alberto Murari Pinheiro pela confiança, apoio, orientação, amizade, dedicação e ajuda ao longo do desenvolvimento do trabalho e aprendizado no mestrado.

A Votorantim pelo apoio em ceder o tempo necessário para que eu pudesse estar presente na universidade e me ausentando do serviço, principalmente ao engenheiro Marco Aurélio Matta Machado que não mediu esforços para me apoiar.

E a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova abordagem para tratativa de ineficiência operacional industrial que contenha sistemas automatizados. A proposta desta dissertação é realizar estudos para fins de otimização de um sistema distribuído discreto, a partir de dados amostrados no setor industrial, que contenha problemas no sistema de eficiência de velocidade que compõe um dos pilares do *Overall equipment effectiveness* - OEE. Para propor soluções destes problemas, foi realizada a modelagem do sistema distribuído e a análise das propriedades do mesmo através de simulações em computador. A ferramenta que foi utilizada para sistema discreto, é a Rede de Petri Colorida no CPN TOOLS. A partir do modelo RDP obtém-se um sistema de tomada de decisão autônomo para acelerar ou desacelerar o equipamento automaticamente até a velocidade especificada de “*set point*” estabelecida pelo trabalho, eliminando a instabilidade do processo industrial pelos critérios de velocidade. Concluindo o desenvolvimento e implementação do novo modelo lógico de sistema de automação de velocidade, foi possível alcançar 16,62% de aumento de OEE (produtividade total) no processo industrial escolhido (Laminação a Frio). O sistema também possibilitou um melhor entendimento estruturado de lógica de automação e assertividade na implementação do sistema no controlador industrial, não gerando interferências no processo e retrabalhos.

**Palavras-chave:** Sistemas Discretos, CPN tools, Redes de Petri (RdP), Laminação a Frio, Siderurgia

# ABSTRACT

This work presents a new approach for dealing with industrial operational inefficiency that contains automatic systems. The purpose of this dissertation is to perform studies for the purpose of optimizing a discrete distributed system from data sampled in the industrial sector that contains problems in the speed efficiency system that makes up one of the pillars of OEE (Overall equipment effectiveness). In order to propose solutions of these problems, we perform the modeling of the distributed system and the analysis of its properties through computer simulations. The tools that were used for discrete system, is the Colored Petri Net in CPN TOOLS. From the RDP model an autonomous decision-making system is presented to accelerate or brake the equipment automatically up to the specified set point speed established by the work, eliminating the instability of the industrial process by the speed rule. From the development and implementation of the new logic model of speed automation system, it was possible to achieve a 16.62% increase in OEE (total productivity) in the chosen industrial process (Cold Rolling). The system also enabled a better structured understanding of automation logic and assertiveness in the implementation in the industrial controller, not generating interferences in the process and reworking.

**Key-words:** Discrete systems, CPN tools, Petri Nets (RdP), Cold Rolling , Steel

# LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
CLP – Controlador Lógico Programável.  
CPN Tools – Software específico de Redes de Petri  
DB – Bloco de dados  
DMAIC – Definir, medir, analisar, melhorar e controlar  
FB – Blocos Funcionais  
FC – Blocos de Função  
IBA PDA – Software de carta de controle  
IHM's – Interface Homem Máquina  
NBR – Norma Brasileira  
OEE – Eficácia Geral dos equipamentos  
OB – Bloco de Organização  
OP17 – Interface Homem Máquina modelo Siemens  
OP277 – Interface Homem Máquina modelo Siemens  
PDCA – Metodologia (Planejar - Fazer - Checar – Refazer)  
QoS – Qualidade de serviço  
RdP – Redes de Petri  
RPC – Redes de Petri colorida  
SCL – Linguagem de controle estruturado  
Seis sigma – Metodologia  
SFC – Função de controle sequencial  
S7 300 – Controlador da Siemens  
S7400 – Controlador da Siemens  
STL – Linguagem lista declarada  
TPM – Manutenção Produtiva Total



# LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Como calcular OEE
Figura 2	Tempo total para cálculo de OEE
Figura 3	Proposta de ferramentas a utilizar nas etapas DMAIC do LSS
Figura 4	Fase de Definição do DMAIC
Figura 5	Nível atual do processo
Figura 6	Medição da capacidade do processo (Taxa de falha por milhão)
Figura 7	Pareto, BoxPlot, Diagrama de dispersão
Figura 8	Análise X's Potenciais
Figura 9	Matriz Esforço x Impacto
Figura 10	ANOVA
Figura 11	Fluxo Gerencial DMAIC
Figura 12	Fluxograma de uma usina siderúrgica de aços longos
Figura 13	Bobina CA60
Figura 14	Variação das propriedades mecânica no trabalho a frio
Figura 15	Elementos básicos de uma RdP ordinária
Figura 16	Fluxo Rede de Petri (P T I O)
Figura 17	Representação gráfica de rede de Petri Colorida
Figura 18	Ferramentas disponíveis no CPN tools versão 4.0.1
Figura 19	Disparo de transição no <i>CPN tools</i>
Figura 20	Declarações de variáveis no <i>CPN tools</i>
Figura 21	Controlador S7 300
Figura 22	Hardware com cartões S7 300
Figura 23	Software Simatic Manager
Figura 24	Ícones do Simatic Manager
Figura 25	Configurando o Hardware
Figura 26	Blocos possíveis para configurar lógica
Figura 27	Exemplo de programação
Figura 28	Quadro comparativo Linguagens de programa e conversão <i>Ladder x STL</i>
Figura 29	Laminação a Frio de Fio Máquina
Figura 30	Análise online carta de controle do laminador IBA PDA
Figura 31	Análise % Eficiência Operacional do Laminadores e Meta

Figura 32	Histograma – Minitab
Figura 33	<i>Chart of Tempo</i> – Minitab
Figura 34	Pareto – Minitab
Figura 35	Capabilidade – Minitab
Figura 36	Tempo para passagem de solda – Minitab
Figura 37	Tempo de desempenho por turno
Figura 38	Rampas do inversor de frequência
Figura 39	Declarações e variáveis do programa
Figura 40	Tela principal do algoritmo
Figura 41	Sub-página 1 (Abastecimento de insumo CA50)
Figura 42	Sub-página 2 (Ligar/Desligar a Máquina)
Figura 43	Sub-página 3 (Escolha do produto final a ser produzido)
Figura 44	Sub-página 4 (Carregamento dos <i>set points</i> )
Figura 45	Sub-página 5 (Detecção e redução de velocidade para passagem de solda)
Figura 46	Sub-página 6 (Redução de velocidade pelo operador via botão manual)
Figura 47	Sub-página 7 (Comprimento de Set point atingido – bobina CA60 pronta)
Figura 48	Sub-página 8 (Subtração de insumo CA50 no abastecimento após produção da bobina CA60)
Figura 49	Totalizador de produção de bobina CA60
Figura 50	Conversão teórica Rede de Petri x <i>Ladder</i>
Figura 51	Conversão da sub-página 2 (RdP) para <i>Ladder</i> no controlador
Figura 52	Bloco FC1000 sendo chamado na OB1
Figura 53	Proteção para que o operador não altere a bitola com máquina operando e contador
Figura 54	Arquitetura de hardware de automação
Figura 55	Variáveis inseridas na IHM e alarmes sonoro e visual instalado
Figura 56	Instrumentação para automatizar passagem de solda
Figura 57	Curva do processo depois das implementações (IBA)
Figura 58	Gráfico de % de Eficiência depois das implementações
Figura 59	Gráfico Boxplot (Eficiência Antes x Depois)
Figura 60	Capabilidade do processo após implementações
Figura 61	Resultados OEE

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Causas de Perdas de produção
Tabela 2	<i>Lean Manufacturing</i> x Seis Sigma
Tabela 3	Passo a Passo de um projeto no DMAIC
Tabela 4	Produtos fabricados no Laminador a Frio
Tabela 5	NBR 7480

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 Considerações Gerais.....	14
1.2 Objetivos.....	15
1.3 Estrutura do Trabalho .....	15
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>16</b>
2.1 Indicadores Industriais.....	16
2.2 Metodologia DMAIC e <i>Lean</i> Seis Sigma.....	20
2.2.1 Seis Sigma.....	20
2.2.2 DMAIC .....	23
2.2.3 Ciclo DMAIC com ferramentas LEAN SEIS SIGMA.....	23
2.3 Processo Industrial de Laminação a Frio.....	30
2.3.1 Variáveis no processo de laminação a frio. ....	33
2.3.1.1 Encruamento.....	33
2.3.1.2 Propriedades Mecânicas.....	34
2.4 Redes de Petri .....	35
2.4.1 Redes de Petri Colorida.....	37
2.4.2 Redes de Petri Temporizadas .....	38
2.4.3 Software CPN Tools.....	38
2.5 Lógica em Controlador Industrial Siemens S7 300.....	42
<b>3 LAMINADOR A FRIO – ESTUDO DE CASO OEE .....</b>	<b>48</b>
3.1 Considerações Gerais.....	48
3.2 Análise prévia do processo na metodologia DMAIC (IBA).....	49
<b>4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO REDES DE PETRI COLORIDA.....</b>	<b>55</b>
4.1 Aplicando técnica de Redes de Petri Colorida (RdP).....	55
4.2 Etapas da modelagem no CPN Tool.....	56
4.3 Resultados alcançados do modelo .....	67

<b>5 ALTERAÇÃO NA LÓGICA DO CONTROLADOR DA MÁQUINA.....</b>	<b>68</b>
5.1 Conversão do modelo de Redes de Petri e programação para controlador S7 300 existente .....	68
5.2 Alterações de campo necessárias. ....	71
<b>6 RESULTADOS DMAIC .....</b>	<b>73</b>
<b>7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>76</b>
<b>8 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>78</b>
<b>9 ANEXOS .....</b>	<b>82</b>
9.1 ANEXO A - Simulação de análise de espaço de estados do modelo – CPN TOOLS.....	82
9.2 ANEXO B - Programação da FC1000 no controlador (Controle de velocidade, comprimento, alarmes) .....	89
9.3 ANEXO C - UDT1000 – variáveis declaradas no controlador FC1000.....	93
9.4 ANEXO D - ARTIGO PUBLICADO .....	95

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Gerais

Em sistemas industriais o indicador de desempenho normalmente utilizado é o *Overall Equipment Effectiveness (OEE)*. Um dos 4 pilares do OEE, é o índice de eficiência, onde em alguns equipamentos apresentam baixo desempenho ou grande variabilidade de velocidade.

Para solucionar tal problema, é necessário aplicar melhorias de lógica de automação. Na maioria dos casos, o engenheiro de automação aplica melhorias diretamente no controlador, sem antes mapear todo o sistema e realizar a simulação de desempenho da lógica aplicada. O entendimento e a revisão teórica da lógica de automação são indispensáveis para atingir os objetivos de aumento de produtividade e para isso existem ferramentas e métodos que possibilitam atingir melhores resultados. Nesta dissertação será aplicado ferramentas e as metodologias Rede de Petri e DMAIC nas partes do processo que contenham problemas de baixo índice de eficiência operacional OEE, usando como exemplo uma máquina de laminação a frio em uma siderúrgica. A Rede de Petri foi utilizada devido a sua característica de capturar a lógica de automação do equipamento, permitindo uma representação gráfica, formalismo matemático e uma análise das propriedades do modelo. O DMAIC foi utilizado devido a sua característica de extrair os reais problemas do processo com confiabilidade e clareza dos principais desvios existentes, além do alto poder de análise estatística das amostras.

O foco de pesquisa e desenvolvimento será o estudo de caso de um problema industrial em uma siderurgia, na qual viu-se a instabilidade de produção nos processos do setor de acabamento de uma unidade da Votorantim Siderurgia, onde fez-se necessário, o entendimento dos indicadores que eram mais impactantes no OEE da planta, constatando-se baixos e instáveis resultados no indicador de eficiência. O estudo consiste em otimização de produção, através de aumento e estabilização de velocidade nos laminadores a frio.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é o aumento de produtividade através da automação em uma máquina que obtenha baixo desempenho de OEE no pilar de eficiência de velocidade. Como objetivos secundários, têm-se de construir um novo método de abordagem para solucionar problemas como este em equipamentos com características de sistema dinâmico discreto, que seja abrangente para produtividade, segurança operacional, preocupando-se também com a otimização e desempenho do controlador lógico programável (CLP): número de passos, utilização da memória, ciclo de *scan*, sem *dead lock*, sem *loop*. Para alcançar os resultados foram usadas as metodologias de análise de cadeiras teóricas de engenharia distintas (Produção x Automação), mostrando nesta dissertação a importância da interação destes setores para o alcance de melhor desempenho de produtividade.

Busca-se também no novo método, realizar implementações no CLP de forma assertiva de uma única vez, sem retrabalhos e interrupção de máquina não programada. O método, busca um sistema de aumento de produtividade, que otimiza os sistemas de velocidade, minimiza *gaps* e através da tecnologia embarcada em CLP's e interface homem máquina (IHM), traz resultados de produtividade significativos em sistemas industriais com baixo custo de investimento. Comprovando-se os ganhos do sistema, é totalmente possível a usabilidade e interação deste método em outros equipamentos industriais compatíveis e que apresentem este problema.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em 7 capítulos:

O primeiro capítulo, contempla a introdução, trazendo o que motivou o estudo, a implementação, resumo e os objetivos que foram traçados.

O segundo capítulo traz toda a fundamentação teórica onde disserta-se sobre os conceitos dos indicadores industriais OEE, a metodologia utilizada DMAIC, conceitua-se um processo de laminação a frio, propriedades metalúrgicas, engenharia de materiais, redes de Petri colorida (RdP), o software de simulação CPN Tools e o controlador S7 300 que receberá todas as implementações estudadas nesta.

O terceiro capítulo apresenta o estudo de caso em uma siderúrgica e apresenta as análises deste processo dentro da metodologia DMAIC, o que justificará a necessidade do método aqui estudado.

O quarto capítulo apresenta o desenvolvimento do modelo em redes de Petri colorida, bem como a simulação do modelo.

O quinto capítulo apresenta a conversão deste modelo simulado para a linguagem de um controlador industrial no caso o S7 300 do fabricante Siemens, além das alterações necessárias de campo.

O sexto capítulo irá checar na metodologia DMAIC, apresentando os resultados após a implementação do modelo.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo serão apresentados os conceitos básicos necessários ao entendimento do trabalho, são eles: Indicadores industriais, metodologias usadas, processo de laminação a frio, Redes de Petri Colorida, software Cpn Tools, lógica em controlador industrial.

### **2.1 Indicadores Industriais**

A implementação do método de manutenção produtiva total (TPM) em gestão de sistemas de manufatura, baseia-se em três principais conceitos: manutenção autônoma que é realizada por operadores, maximização da eficácia dos equipamentos e organização de pequenos grupos de melhoria [4]. Neste contexto, o OEE é utilizado amplamente como um indicador para medição de desempenho global dos equipamentos na manufatura, que ao estruturar a análise das perdas de utilização de sua capacidade, consegue ajudar a direcionar os esforços de melhoria contínua dos pequenos grupos e avaliar o avanço na implementação do TPM na organização. Como indicador de uso gerencial, o OEE é adotado principalmente por indústrias que precisam garantir elevada disponibilidade de seus equipamentos [1]. A gestão das empresas recorre constantemente a um conjunto de indicadores, por isso, é uma das condições básicas de uma gestão eficaz, possuir um conjunto de indicadores representativos e confiáveis do desempenho da fábrica e das operações em geral. Maximizar a operação e o desempenho dos equipamentos em termos de qualidade e eficiência, deve ser o objetivo constante dos gestores das operações das unidades industriais cuja produção depende do bom desempenho dos equipamentos [11].

Baseado nesta análise, sobre os diversos métodos existentes para medir o desempenho dos equipamentos, é reconhecido que um dos principais métodos para ajudar a medir a eficácia dos equipamentos durante o seu funcionamento, é o indicador OEE [3].

O OEE é um indicador que mede o desempenho na maioria dos casos em três principais pilares [5]:



- A disponibilidade de tempo programada que o equipamento tem para produzir;
- A eficiência realizada durante o funcionamento, ou seja, a capacidade de produzir em relação a especificação nominal de projeto;
- A qualidade da produção resultada pelo processo em que o equipamento está inserido.

Em estudo realizado[11], foi considerado que as plantas com melhor desempenho no mundo resultam o índice de 85% de OEE e que em média, os restantes das indústrias resultam um valor de apenas 60%. Isso nos mostra que para uma planta produzindo com OEE em 60%, é possível aumentar a eficiência global utilizando os mesmos equipamentos e os mesmos recursos [11].

A Figura 1 mostra como é realizado o produto para o cálculo do OEE, sendo os 3 principais pilares o índice de utilização/disponibilidade, o índice de eficiência/desempenho no nosso caso medido pela velocidade baseada na velocidade de projeto e o último pilar conceitual sendo o índice de qualidade. Para o caso siderúrgico é adicionado o quarto pilar chamado de índice de rendimento metálico (IRM).

## Como calcular o OEE?



**Índice OEE = Atual cenário da produtividade**

Figura 1: Como calcular OEE [14]

A Tabela 1 abaixo mostra as principais causas de perdas de um valor de OEE na maioria das vezes:

Tabela 1: Causas de Perdas de produção[12]

<b>Principais causas de perdas de produção</b>			
<b>Perdas</b>	<b>Ocorrências</b>	<b>Consequências</b>	<b>Observações</b>
<b>1- Avarias</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avaria mecânica, eléctrica ou de outros sistemas que provoquem a interrupção da produção</li> <li>• Falha geral do equipamento</li> <li>• Quebra de ferramentas</li> <li>• Paragens não planeadas para intervenções de manutenção</li> <li>• Falhas de energia/utilidades</li> </ul>	Reduzem o tempo disponível para o equipamento produzir ou operar	Consideram-se paragens superiores a 5-10 minutos, registadas pelo operador ou automaticamente
<b>2- Mudança, afinação e outras paragens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mudança de produto</li> <li>• Aquecimento/arrefecimento para mudança de ferramentas</li> <li>• Substituição de ferramentas de desgaste</li> <li>• Paragens para limpeza</li> <li>• Falta de materiais</li> <li>• Falta de operador</li> </ul>		
<b>3- Pequenas paragens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpeza e pequenos ajustes</li> <li>• Obstrução no fluxo de produto a montante ou jusante</li> <li>• Falha na alimentação de materiais</li> <li>• Substituição de ferramentas de desgaste pelo operador</li> <li>• Verificação/regulação de parâmetros</li> </ul>	Afectam a eficiência do equipamento, não permitindo que ele funcione no tempo de ciclo nominal	Paragens inferiores a 5 -10 minutos e que não requerem intervenção de pessoal da manutenção, normalmente não registadas pelo operador
<b>4- Redução de velocidade</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Funcionamento abaixo da velocidade especificada</li> <li>• Funcionamento irregular</li> <li>• Incapacidade do operador em garantir o funcionamento regular</li> </ul>		Todas as ocorrências que impossibilitem produzir à velocidade máxima especificada para o produto
<b>5- Defeitos e retrabalho</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sucata</li> <li>• Produto fora de especificação</li> <li>• Retrabalho do produto</li> <li>• Montagem incorrecta</li> <li>• Componente incorrecto</li> <li>• Falta de componentes</li> </ul>	Reduzem a quantidade de produto que cumpre as especificações à primeira	Produto rejeitado durante o funcionamento normal do equipamento
<b>6- Perdas de arranque</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sucata</li> <li>• Produto fora de especificação</li> <li>• Retrabalho do produto</li> </ul>		Produto rejeitado durante a fase de arranque ou paragem do equipamento, devido a causas normais (pré-aquecimento)

No conceito das seis grandes perdas dos equipamentos, não são consideradas as paradas planeadas dos equipamentos, tais como:

- Paradas obrigatórias e tempo para refeições do funcionário;
- Tempo programado para manutenção autónoma pelo operador (Ex.-10 minutos no início de cada turno);
- Tempo programado para manutenção planejada (preventiva, inspeções, corretiva);  
Tempo para formação do operador;
- Tempo programados para reuniões (desde que previstas no plano de produção);
- Testes programados na produção (Ex.: Ensaios de produtos);

- Ausência de programa de produção.

De forma didática explica-se as paradas que não são consideradas através da Figura 2 abaixo:

		<b>Tempo Total</b>		
<b>OEE = Disponibilidade * Performance * Qualidade</b>	<b>Disponibilidade = B / A</b>	<b>A</b>	<b>Tempo Programado</b>	
		<b>B</b>	<b>Tempo Produzindo</b>	<b>Perdas de Disponibilidade:</b> -Quebra de Máquina -Ociosidade -Setup
	<b>Performance = D / C</b>	<b>C</b>	<b>Produção Teórica</b>	
		<b>D</b>	<b>Produção Real</b>	<b>Perdas de Performance:</b> -Velocidade reduzida -Pequenas paradas
	<b>Qualidade = F / E</b>	<b>E</b>	<b>Boas + Ruins</b>	
		<b>F</b>	<b>Boas</b>	<b>Perdas de Qualidade:</b> -Refugos de Partida -Refugos de Produção
		<b>Perdas Totais</b>		Horário de não responsabilidade da equipe de produção
				Horário em que fábrica está com as portas fechadas

**Figura 2: Tempo total para cálculo de OEE[13]**

A Figura 2, apresenta que o tempo disponível para produção é a resultante do tempo total calendário subtraído dos tempos que a fábrica disponibilizou para manutenção preventiva, folga da operação ou desligamento da máquina por não existir necessidade de produzir. Quanto ao desempenho de eficiência está atrelado a velocidade reduzida, ponto a ser desenvolvido nesta dissertação. O índice de qualidade é a subtração de produtos produzido que apresentaram defeito.

## 2.2 Metodologia DMAIC e *Lean Seis Sigma*

### 2.2.1 – Seis Sigma

O Seis Sigma é uma estratégia gerencial matemática e altamente quantitativa, que tem como objetivo aumentar expressivamente o desempenho dos equipamentos, por meio de melhoria da qualidade de produtos e processos e do aumento da satisfação de clientes e consumidores. O Seis Sigma é um modelo de gerenciamento de negócio originalmente desenvolvido pela Motorola, USA em 1981[6].

O Seis Sigma busca aperfeiçoar a qualidade dos outputs dos processos através da identificação e da resolução da causa destes defeitos (erros) e promover a redução da variabilidade nos processos. Esta metodologia utiliza-se de uma diversidade de métodos, incluindo métodos estatísticos, e cria uma estrutura dedicada de organização de funcionários dentro da empresa (“Black Belts”, “Green Belts”, etc.) que são os especialistas nesta metodologia. O projeto Seis Sigma desenvolvido dentro de uma empresa ou instituto segue uma sequência definida de passos e objetivos quantificados. Estes objetivos podem ser financeiros (redução de custos ou aumento de lucros) ou qualquer aspecto que seja crítico ao consumidor final (geração de valor, segurança, durabilidade, etc.). Há alguns anos, os especialistas da metodologia, estão conjugando as ideias do Seis Sigma com as ideias do Lean Manufacturing (Manufatura Enxuta ou Produção Enxuta) para desenvolver uma nova metodologia que estão chamando de Lean Seis Sigma. O Lean Seis Sigma é uma ótima metodologia para aperfeiçoar o desempenho através da eliminação do desperdício e das causas de defeitos nos processos de produção, administrativos, ou de manufatura [14].

Seis Sigma:

- Foco em enfatizar a necessidade de reconhecer oportunidades de eliminação de defeitos conforme definição dos consumidores;
- Deixa claro que a variabilidade dificulta nossa habilidade de entregar serviços ou produtos com alto índice de qualidade;
- Requer decisões baseada em dados confiáveis e incorpora um conjunto completo de ferramentas de qualidade para efetiva resolução de problemas;

Fornece uma infraestrutura cultural altamente duradoura para obter-se resultados sustentáveis:

Lean:

- Foco em maximizar a velocidade dos processos. É possível ir além do que exista no manual de um projeto, desde que seja estudado todas as propriedades físicas de engenharia dos componentes do sistema.
- Prover ferramentas para análise dos fluxos dos processos e atrasos em cada atividade do processo;
- Centralizada na separação de “valor agregado e “valor não agregado”. Possui diversas ferramentas para resolver a causa raiz das atividades que não agregam valor, bem como seus custos;

Os oito tipos de desperdício / atividades que não agregam valor

- Desperdiçar mão de obra – Perigo de risco de vida para o humano;
- Defeitos – Coisas que estão com avarias e necessitam de manutenção;
- Estoque – Objetos aguardando a necessidade de utilização;
- Superprodução – Coisas em excesso ou produzidas muito cedo;
- Tempo de espera – Pessoas aguardando por coisas chegarem, tendo o serviço interrompido;
- Movimento – Movimento humano desnecessário;
- Transporte – Movimento de pessoas e coisas;
- Desperdícios no processo – Coisas que se faz e que não agregam valor ao produto final ou serviço que estamos prestando; [7]

Na Tabela 2 é apresentada as vantagens das metodologias Lean e Seis Sigma, implementado ambas se tem o ganho percentual de capital investido (ROIC%) mais rápido.

**Tabela 2: Lean Manufacturing x Seis Sigma [Autor]**

Lean Manufacturing	Seis Sigma
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabelecer Metodologia de Melhoria</li> <li>• Concentrar no fluxo de valor para o cliente.</li> <li>• Usar uma implementação baseada num projeto.               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Compreender as condições atuais.</li> <li>• Recolher dados do produto e produção.                   <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Layout</i> atual e fluxo.</li> <li>• Tempo do Processo.</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• Calculara Capacidade do Processo e o <i>Takt Time</i>.</li> <li>• Criar folhas de trabalho standardizado.               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Avaliar as opções.</li> <li>• Novo plano de <i>layouts</i>.</li> <li>• Teste para confirmar melhoria</li> </ul> </li> <li>• Reduzir os tempos de ciclo, defeitos de produtos, falhas de equipamentos, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metodologia de implementação da política.               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Medição dos requisitos do cliente.</li> <li>• Capacidade de gestão de projetos.                   <ul style="list-style-type: none"> <li>• Descoberta de conhecimento.</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• Recolhe. dados e ferramentas de análise.</li> <li>• Mapeamento de processos e fluxogramas.</li> <li>• Planejamento de controle do processo.               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Causa-Efeito, FMEA.</li> </ul> </li> <li>• Capacidade da Equipe. gestão de projetos.</li> <li>• Métodos Estatísticos para comparações válidas.               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramentas de Gestão.</li> </ul> </li> <li>• Ferramentas de Controle de Qualidade.               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Planejamento de Experiências.</li> </ul> </li> </ul>

### 2.2.2 – DMAIC

O DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) tem como objetivo a melhoria dos processos, resultando em melhor qualidade dos produtos. Oriundo do ciclo PDCA (Planejar, Fazer, Conferir, Ajustar) foi criado o modelo DMAIC, sendo considerado por diversos autores como as cinco etapas do Seis Sigma. Em cada etapa do ciclo DMAIC é necessário garantir os melhores resultados possíveis [9].

- **Definir:** definição do problema a partir de opiniões de consumidores, integrantes e objetivos do projeto;
- **Medir:** mensurar e investigar relações de causa e efeito. Garantindo que todos os prováveis fatores foram considerados, determinando quais são as relações. Dentro da investigação, procurar a causa raiz dos defeitos;
- **Analisar:** análise dos dados e o mapeamento para a identificação das causas-raiz dos defeitos e das oportunidades de melhoria;
- **Melhorar:** melhorar, aperfeiçoar e otimizar o processo, baseado na análise dos dados, usando técnicas como desenho de experimentos, prova de erros (*poka-yoke*), padronizar o trabalho para criar um novo modelo do processo, executar projetos pilotos do processo para estabelecer capacidades;
- **Controlar:** controlar o futuro estado de processo após as modificações para assegurar que quaisquer desvios do objetivo, sejam restaurados antes que se tornem em defeitos. Implementar padrões e sistemas de controle, como um controle estatístico de processo ou quadro de produções, e continuamente monitorar os processos.

### 2.2.3 Ciclo DMAIC com ferramentas LEAN SEIS SIGMA

Orienta-se a implementação do Lean Seis Sigma com recurso à aplicação do ciclo DMAIC, incluindo as ferramentas Lean e Seis Sigma nas diferentes etapas do projeto de melhoria[7]. A Figura 3 apresenta uma estrutura exemplo da aplicação do Lean Seis Sigma com ferramentas pertencentes ao Lean e ao Six Sigma, que podem ser usadas para resolver um problema. As setas da Figura 3 com fundo azul são ferramentas Lean Manufacturing, enquanto as setas de fundo vermelho correspondem a ferramentas do Seis Sigma.

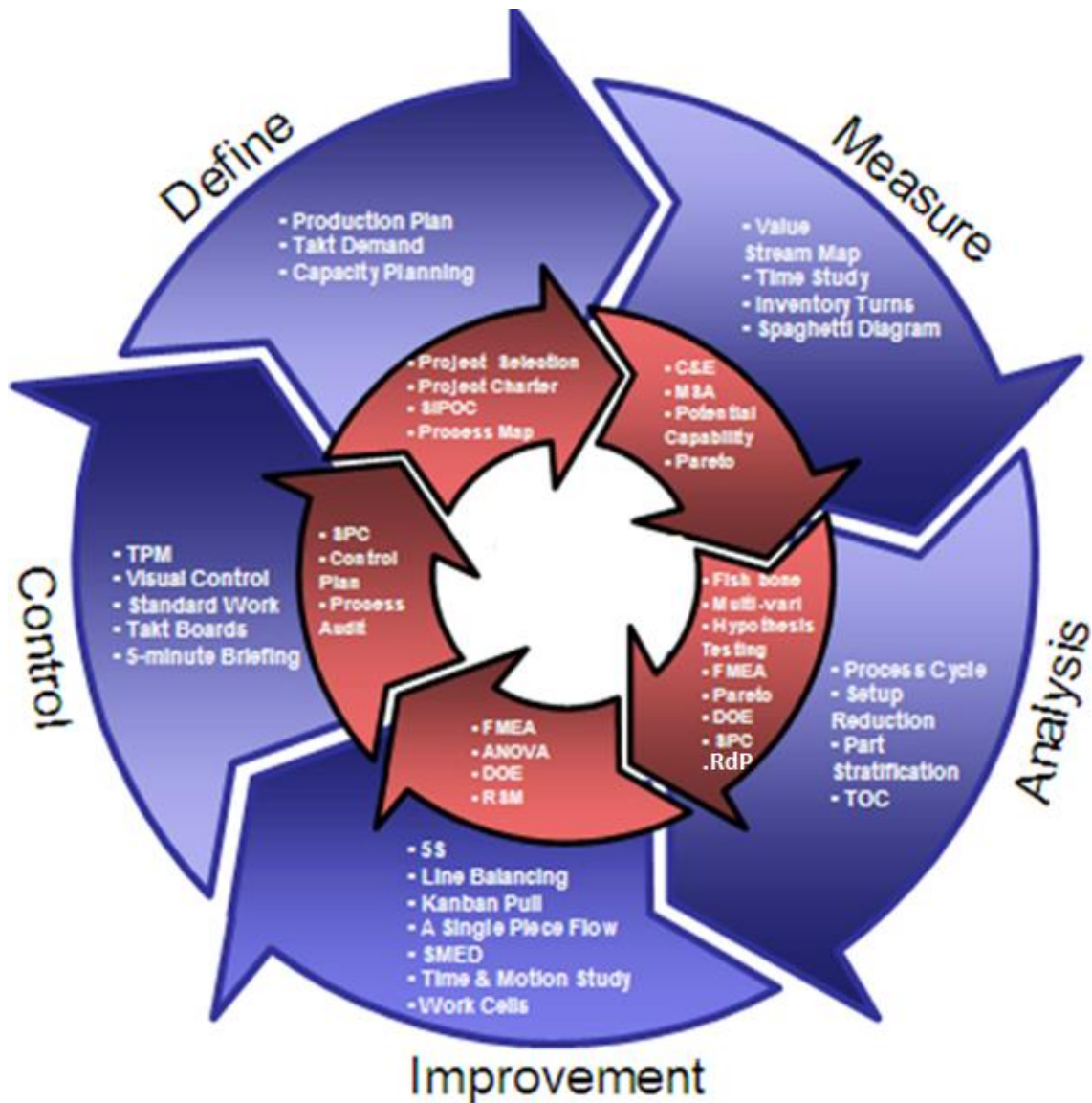


Figura 3: Proposta de ferramentas a utilizar nas etapas DMAIC do LSS[23 –Adaptado pelo Autor]

Na fase de **definição** o Seis Sigma define a seleção do projeto, o diagrama SIPOC e o mapa do processo e fluxo. Esta etapa vai permitir estruturar o projeto, estabelecer limites, metas e ajudar ao entendimento do problema.

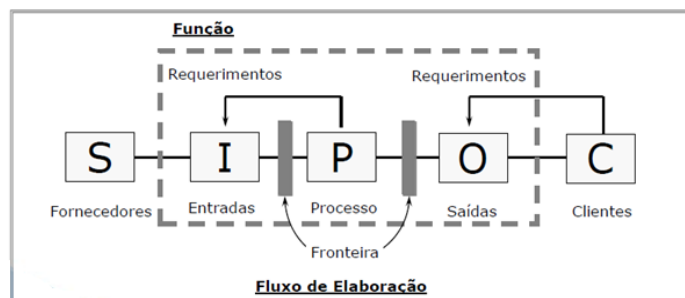


Figura 4: Fase de Definição do DMAIC [7]



Sempre importante estar mencionado a métrica que se deseja alcançar e o que será melhorado. A Figura 5 mostra isso:

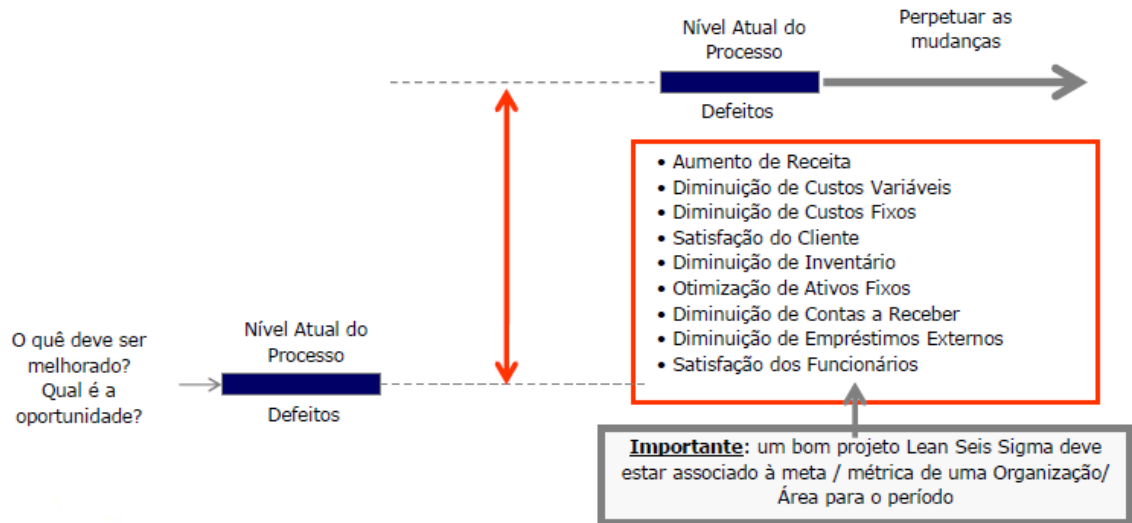


Figura 5: Nível atual do processo[14]

Na fase de **medição**, as técnicas Seis Sigma utilizadas têm como objetivo estruturar o problema, para desta forma entender o que está ocorrendo através da captura de dados para quantificar e validar os problemas. Ferramentas utilizadas como à Análise de Pareto, o cálculo do desempenho Seis Sigma, os gráficos de controle, os diagramas de fluxo, entre outros, permitem o auxílio para executar uma correta medição.

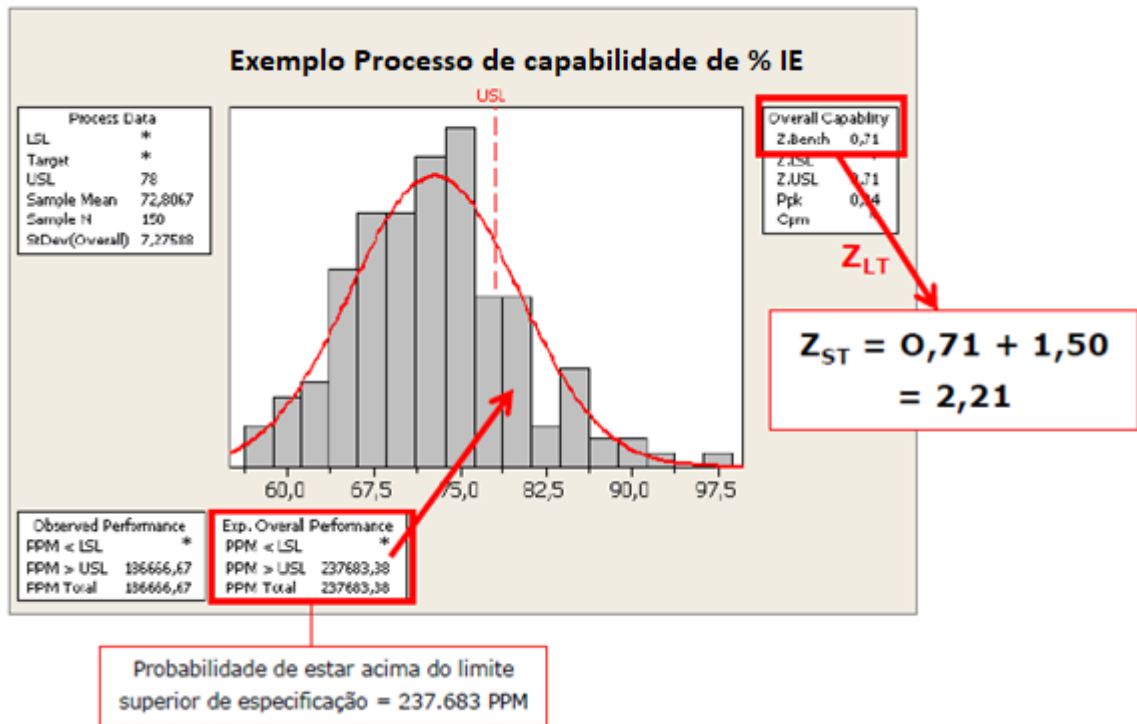


Figura 6: Medição da capacidade do processo (Taxa de falha por milhão) [14]

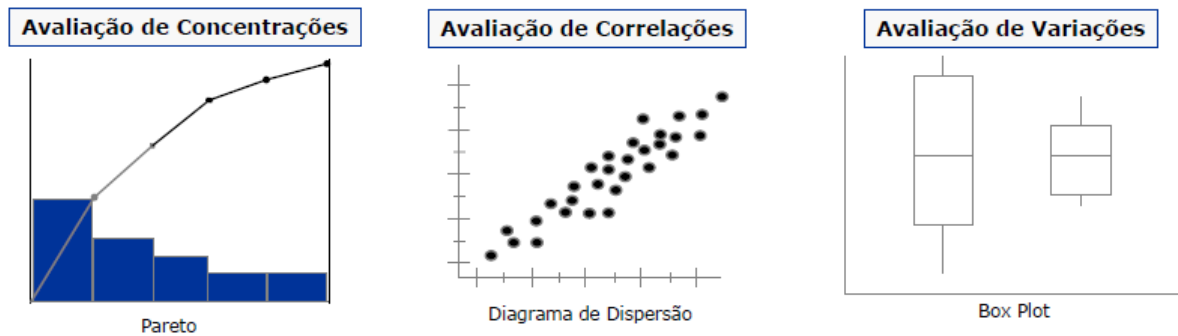


Figura 7: Pareto, BoxPlot, Diagrama de dispersão[6]

Na etapa da **análise** do projeto Lean Seis Sigma, determina-se as causas raiz de cada problema com relevância e avaliando indicadores para identificar lacunas e priorizar oportunidades de melhorias, as técnicas Seis Sigma aplicadas nesta fase são diversas, sendo da responsabilidade da equipe, a escolha de ferramentas adequadas dentro da metodologia. O diagrama causa-efeito, o planejamento, o teste de experiências, o brainstorming, a regressão e o 5WH1 são ferramentas associadas ao Seis Sigma. [14] . A técnica de modelagem de redes de petri colorida (RdP) foi escolhida como uma das ferramentas de análise para esta fase do DMAIC conforme Figura 3.

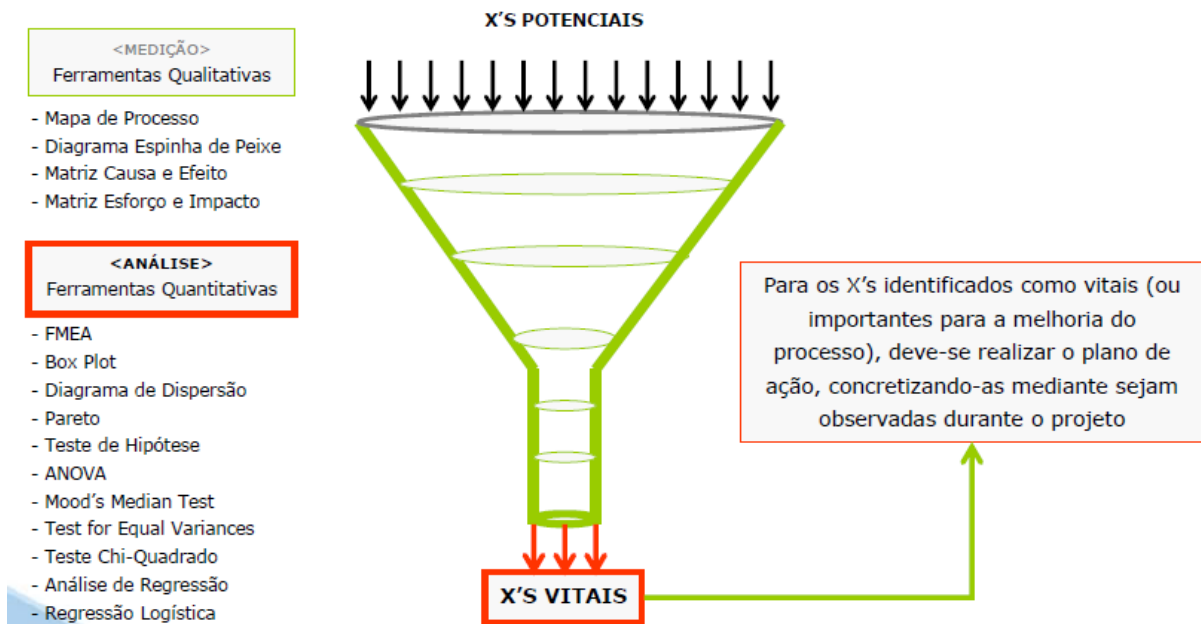


Figura 8: Analise X's Potenciais[14]

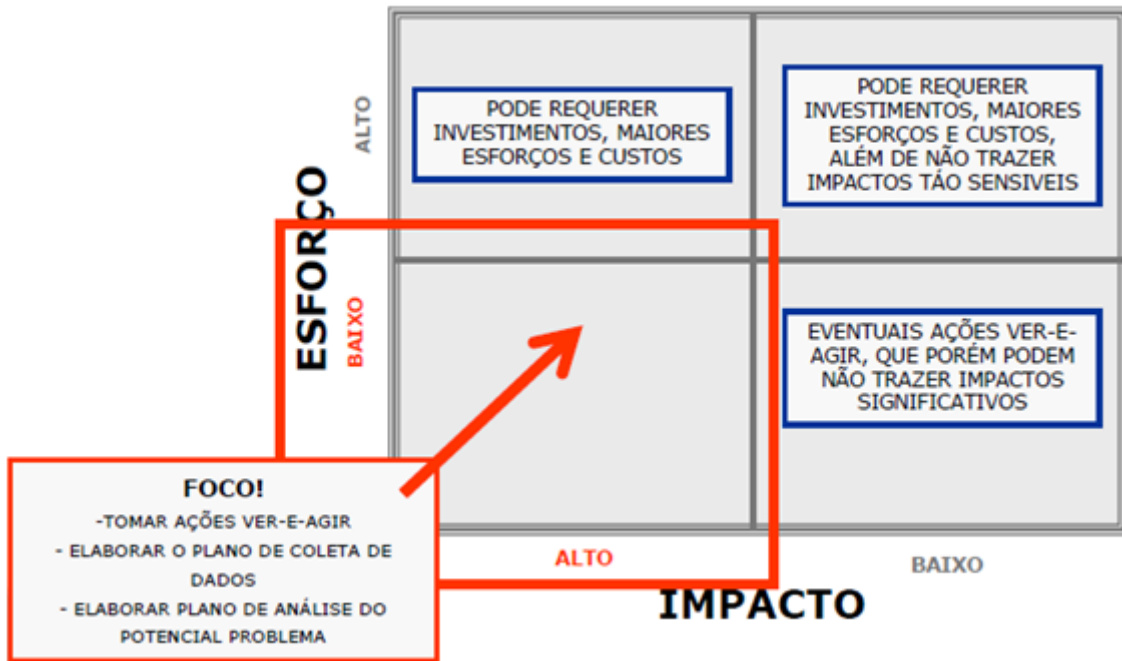


Figura 9: Matriz Esforço x Impacto[14]

Na etapa de **melhoria**, são realizadas as ações que terão reflexo sobre as causas que na fase de análise, foram consideradas como influentes no incorreto funcionamento do processo. Relacionado às ferramentas Seis Sigma, várias técnicas estatísticas podem ser utilizadas no transcorrer das experiências (FMEA, ANOVA), exemplo conforme Figura 10. A aplicação das ferramentas Lean nesta fase, está interligada ao efeito que se pretende obter. [7]

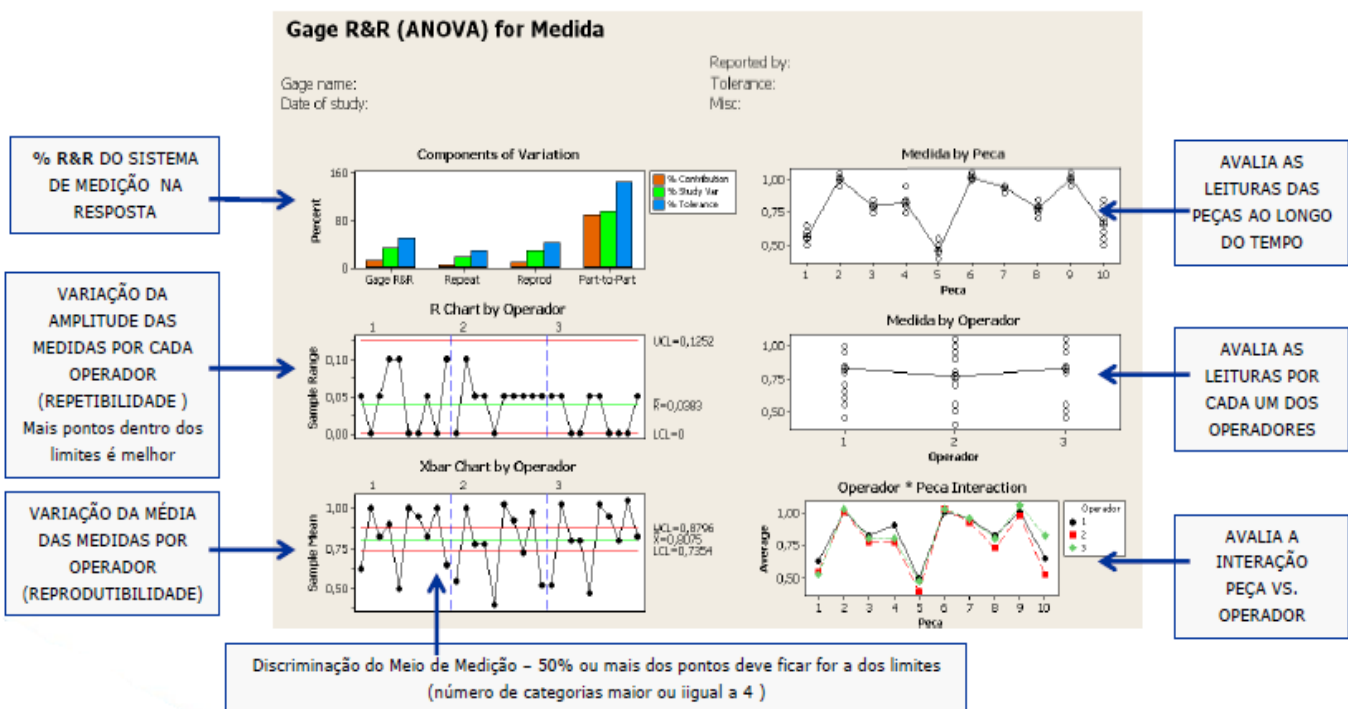
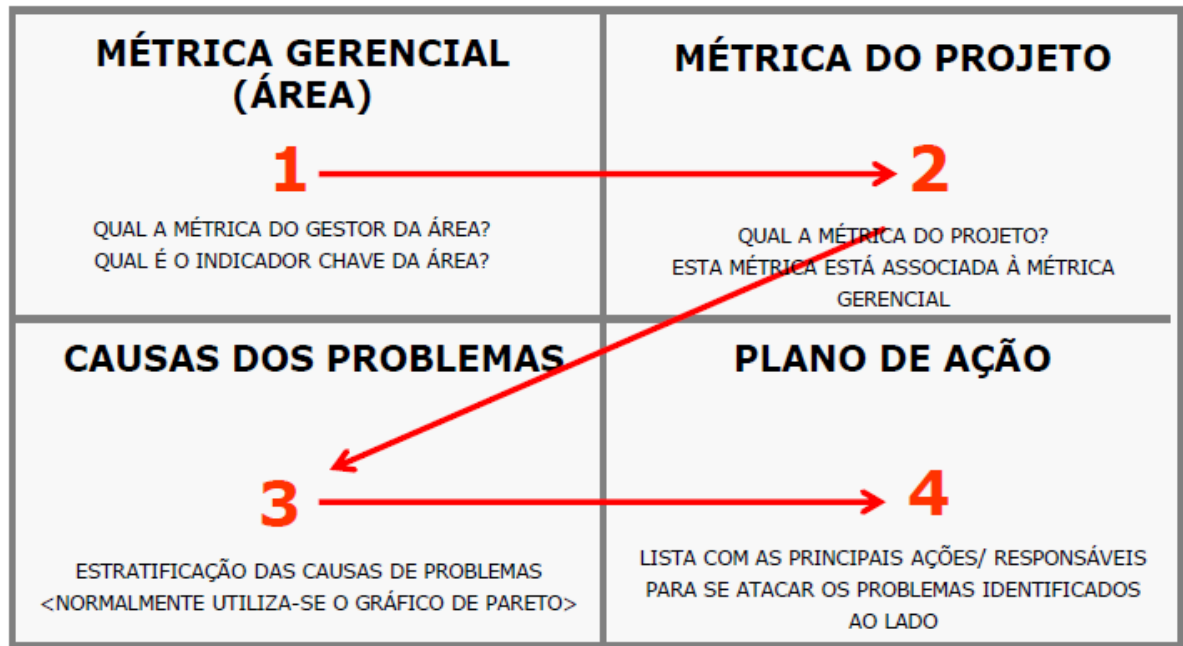


Figura 10: ANOVA[14]

Na etapa de **controle**, para as melhorias serem consolidadas e avaliadas, são traçadas estratégias de monitoramento. Esta fase permitirá o desenvolvimento de planos com o intuito de que a repetição de problemas seja reduzida. Para que o acompanhamento tenha sucesso, técnicas Lean como o *Standard Work* (trabalho normalizado), TPM e reuniões com elementos da equipe do projeto, ajudarão a perceber se o que foi desenvolvido e o que foi implementado houve resultado no aumento da qualidade e produtividade do processo, ou o aparecimento de novos problemas.

**Tabela 3: Passo a Passo de um projeto no DMAIC[7]**

1. Determinar os escopos e limites do processo a ser controlado.
2. Identificar e listar os requisitos mais importantes a serem avaliados.
3. Listar os resultados de saída como indicadores associados com os requisitos críticos.
4. Designar o processo que gera as saídas críticas. Colocar todas as atividades e etapas na seqüência apropriada.
5. Selecionar os indicadores do processo que causam as respostas. Indicar onde as medições serão coletadas e/ou plano de coleta de dados.
6. Definir as especificações e objetivos para cada indicador que esteja associado os requerimentos que impactam o cliente final.
7. Descrever o quê, quando e quem serão os responsáveis pelos indicadores.
8. Definir os demais elementos a serem incluídos no sistema de controle de processos.
9. Avaliar o sistema de controle de processos e analisar os potenciais problemas.
10. Definir o plano de contingência para responder aos níveis esperados de performance do processo.
11. Melhorar o processo e implementar as soluções.



**Figura 11: Fluxo Gerencial DMAIC[14]**

O ciclo DMAIC desenvolvido em um projeto de melhoria, define o problema e a oportunidade de melhoria, mede o processo existente, analisa o desempenho atual e causas raiz, melhora o processo e controla o novo processo. O intuito da sua aplicação com as técnicas Lean e Seis Sigma, atingi elevada produtividade com zero defeitos, o que se torna complexo quando existem variáveis de difícil controle. Por isso, o ciclo DMAIC possibilita a melhoria contínua, objetivando adquirir nova informação sobre as causas já detectadas. Os novos dados coletados são tratados com recurso e técnicas que poderão fornecer novas respostas. São planejadas as ações de melhorias para que o problema que originou o projeto, melhore e a criação de padrões sejam concluídas para que tudo aconteça conforme o esperado. O uso do ciclo DMAIC em um projeto Lean Seis Sigma irá disponibilizar diversas ferramentas, que ajudarão a melhorar o processo, atingindo um produto com maior valor para o cliente e com menor custo para o produtor[7].

## 2.3 Processo Industrial de Laminação a Frio

Os processos de conformação mecânica aplicam a deformação plástica em um corpo metálico, mantendo sua massa e integridade. A conformação de peças na forma definitiva ou produtos semi-acabados podem ser realizados a quente ou a frio. Na conformação a frio, o metal está encruado ou parcialmente encruado, dependendo das forças envolvidas no processo e da temperatura de recristalização. Na conformação a quente o metal é aquecido além de sua temperatura de recristalização [15].

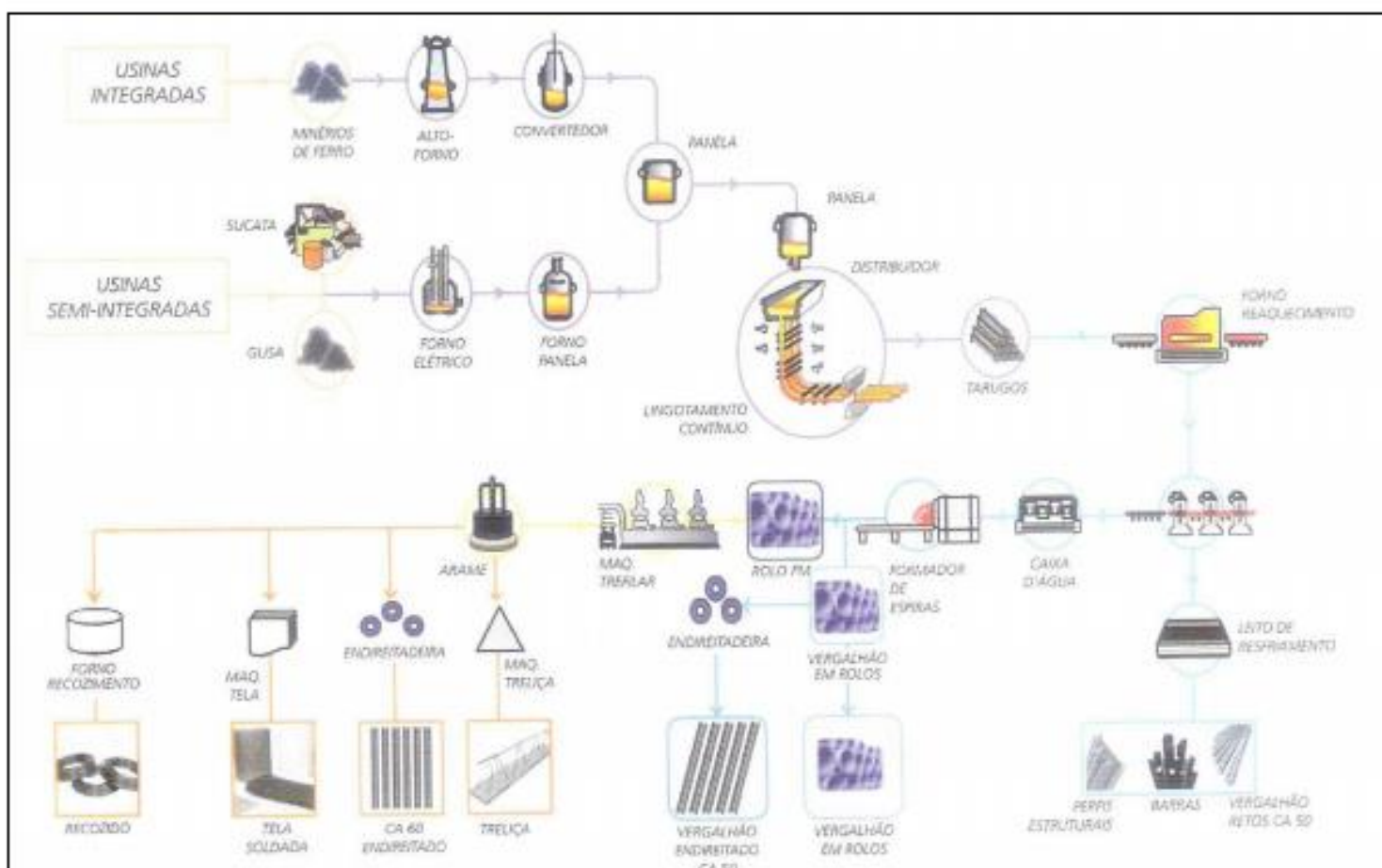


Figura 12: Fluxograma de uma usina siderúrgica de aços longos(Autor)

O fio máquina, resultante através de laminação a quente, é deformado a frio no processo de trefilação ou laminação a frio. Durante o processo, este material obtém alterações em sua microestrutura (encruamento de grãos). Esta alteração impacta na resistência do material, elevando suas propriedades mecânicas e reduzindo de maneira controlada, o alongamento e a ductilidade.

Para a fabricação de CA60, o processo utilizado aplicado pode ser o de trefilação ou a laminação a frio. A matéria prima utilizada neste processo é um fio-máquina em rolo, produzido por laminação a quente. O CA60 é liso e tem baixo teor de carbono. O rolo de fio máquina é colocado em um desbobinador, “*payoff*”, e puxado por uma de suas pontas, sofrendo uma redução de diâmetro através da passagem por fieiras, no caso da trefilação, ou através de roletes/cassetes, no caso da laminação a frio. A redução total poderá ser feita através da passagem por duas, três ou mais fieiras de diâmetros diferentes, ou através da passagem por dois, três ou mais conjuntos de roletes. Após todas as reduções necessárias, o material, no seu diâmetro final, passa por um sistema de roletes, para à gravação dos entalhes superficiais, conforme exigido por norma. Na saída deste equipamento, há um sistema formador de rolos, os quais são posteriormente amarrados. Este produto pode ser comercializado em rolos, em barras retas ou dobradas, ou em “spiders”, sendo estes últimos normalmente destinados às indústrias. Durante o processo de fabricação são recolhidas amostras do material, que levadas ao Laboratório Físico, tem suas propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência e alongamento) capturados. Outro ponto observado durante a produção, é o desgaste das fieiras, pois à medida que a mesma se desgasta o material fica com um diâmetro maior e ocorre aumento de massa linear, o que exige atenção. Toda vez que é trocada uma fieira é feita a verificação da massa linear para o atendimento aos valores da norma.



**Figura 13: Bobina CA60[Autor]**

Produtos fabricados no laminador a frio baseado na norma ABNT NBR7480 2007:

**Tabela 4: Produtos fabricados no Laminador a Frio [ABNT NBR7480 2007]**

<b>Produtos fabricados no Laminador a Frio</b>				
<b>Bitola (mm)</b>	<b>Massa Nominal (Kg/m)</b>	<b>Máxima variação permitida para massa nominal (%)</b>	<b>Massa nominal mínima (kg/m)</b>	<b>Massa nominal máxima (kg/m)</b>
2,4	0,036	± 6%	0,034	0,038
3,4	0,071	± 6%	0,067	0,075
3,8	0,089	± 6%	0,084	0,094
4,2	0,109	± 6%	0,102	0,116
4,6	0,130	± 6%	0,122	0,138
5,0	0,154	± 6%	0,145	0,163
5,5	0,187	± 6%	0,176	0,198
6,0	0,222	± 6%	0,209	0,235
6,4	0,253	± 6%	0,238	0,268
7,0	0,302	± 6%	0,284	0,320
8,0	0,395	± 6%	0,371	0,419
9,5	0,558	± 6%	0,525	0,591
10,0	0,617	± 6%	0,580	0,654

Após a produção, o produto passa pelo teste de qualidade, que é um dos pilares do OEE conforme mencionado anteriormente. Na Tabela 5 consta os limites de resistência exigidos pela norma NBR 7480.

**Tabela 5: NBR 7480 [ABNT NBR7480 2007]**

#### VALORES MÍNIMOS EXIGIDOS PELA ABNT NBR 7480 TABELA B.3

<b>Categoria</b>	<b>Limite de escoamento kgf/mm<sup>2</sup> Mpa</b>	<b>Limite de resistência MPa</b>	<b>Alongamento em 10 Φ (%)</b>
CA-25	25 (250)	1,20 x L.E.	18
CA-50	50 (500)	1,08 x L.E.	8
CA-60	60 (600)	1,05 x L.E.	5



## **2.3.1 – Variáveis no processo de laminação a frio.**

### **2.3.1.1 - Encruamento**

O encruamento de um metal é definido como o endurecimento por deformação plástica a frio. Ele é um importante processo industrial que é utilizado para endurecer ligas metálicas.

Sua taxa pode ser observada pela inclinação da curva de escoamento.

Inicialmente no processo de deformação plástica, a tensão para provocar a deformação é relativamente pequena. À medida que ocorre o processo, multiplicam-se as discordâncias, aumentando sua densidade no cristal e acentuando o efeito de interação entre elas[21]. Isto dificulta a movimentação das discordâncias, exigindo, portanto, níveis de tensão mais elevados, para provocar a deformação. Esse fenômeno é caracterizado pelo aumento da intensidade da tensão, para provocar a deformação plástica. Nos metais, ele ocorre na região da deformação plástica, pelo movimento das discordâncias que interagem entre si, com outras imperfeições do metal, ou indiretamente com o campo de tensões internas, que funcionam como obstáculos. Estas interações induzem a uma redução da mobilidade das discordâncias e conseqüentemente, tensões maiores para provocar mais deformação plástica. Diversos processos podem contribuir para o encruamento do material: refino de grão, falhas de empilhamento, transformações de fase, multiplicação de discordâncias, entre outros. Um alto coeficiente de encruamento implica em várias discordâncias deslizantes, nos sistemas que se interceptam mutuamente. Isso pode ocorrer por meio das interações dos seus campos de tensão e formação das discordâncias bloqueadas e ainda, por meio da formação de degraus de discordâncias. A deformação a frio provoca o encruamento dos grãos e como consequência aumenta o limite de resistência. Ela prejudica as propriedades relacionadas com a ductilidade e tenacidade.

### 2.3.1.2 – Propriedades Mecânicas

O controle das propriedades mecânicas do aço durante a laminação, contribui para a redução de custos devido à menor necessidade de adição de elementos de liga no refino do aço e redução de tratamentos térmicos posteriores, visando melhores propriedades mecânicas. O encruamento e a recristalização causam alterações micro estruturais, que provocam sensíveis mudanças nas propriedades mecânicas. Os ensaios mecânicos podem indicar o estado micro estrutural do material, uma vez que o encruamento de um metal aumenta os seus limites de escoamento e de resistência, diminuindo o alongamento, enquanto que, a recuperação e a recristalização, recuperam essas propriedades. A obrigatoriedade ao atendimento as normas é uma garantia ao consumidor da qualidade do material produzido[18]. As propriedades mecânicas do vergalhão, como resistência a tração e tensão de escoamento, aumentam no processo de laminação a frio, conforme aumenta o encruamento causado pela redução de área nos sucessivos passes. Em compensação o alongamento e a estrição diminuem, conforme pode ser visto na Figura 14 abaixo:

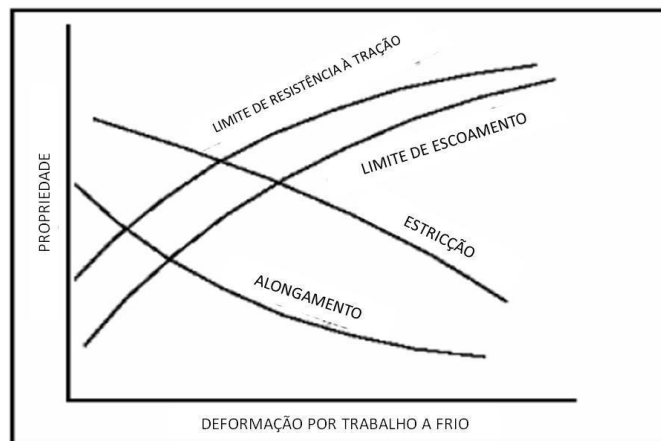


Figura 14: Variação das propriedades mecânica no trabalho a frio. [20]

A propriedade que fornece a máxima resistência que um vergalhão pode sofrer em serviço, é o limite de escoamento. O vergalhão em uma estrutura de concreto deve possuir resistência adequada para aguentar as cargas as quais será submetido.

O alongamento é uma medida da capacidade de suportar deformação antes da ruptura. A ductilidade está diretamente ligada ao alongamento do material e em geral, há uma relação inversa entre resistência e ductilidade.

A relação elástica, o limite de escoamento (LR/LE) e a relação limite de resistência do vergalhão é uma medida da capacidade do material em suportar cargas, antes de sofrer deformações plásticas. Um valor alto desta propriedade significa uma maior capacidade de absorção de energia antes da falha

## 2.4 Redes de Petri

Uma rede de Petri como uma linguagem de modelagem é um grafo bipartido, com interpretação gráfica, formada por dois conjuntos: transição e lugar. A representação é como mostrada na Figura 15, na qual os lugares são os círculos e as transições são os retângulos finos. Estes dois componentes, também são chamados de nós e são interconectados por arcos dirigidos [17].



Figura 15: Elementos básicos de uma RdP [8]

Redes de Petri permite um formalismo matemático que pode ser obtido em várias publicações [17], [8]. Os conceitos e propriedades de Redes de Petri utilizados nesta dissertação podem ser obtidos com mais detalhes nestas referências.

Para a modelagem e melhor interpretação de sistemas, utilizam-se marcas ou fichas “tokens” atribuídas aos lugares, que permitem representar a situação do estado do sistema. A movimentação das marcas, através de regras bem definidas, representa a dinâmica do sistema.

A Figura 16 apresenta uma sequência de disparo de transições habilitadas. No quadro 1 observa-se a transição  $t_1$  habilitada em vermelho, o disparo desta transição coloca uma ficha no lugar  $p_2$  conforme ilustra o quadro 2. No quadro 2 a transição  $t_2$  é habilitada, o disparo desta transição coloca uma ficha no lugar  $p_3$ . No quadro 3 tem-se 2 fichas no lugar  $p_3$  e como o peso do arco que liga  $p_3$  a  $t_3$  é igual a 2 a transição  $t_3$  é habilitada.

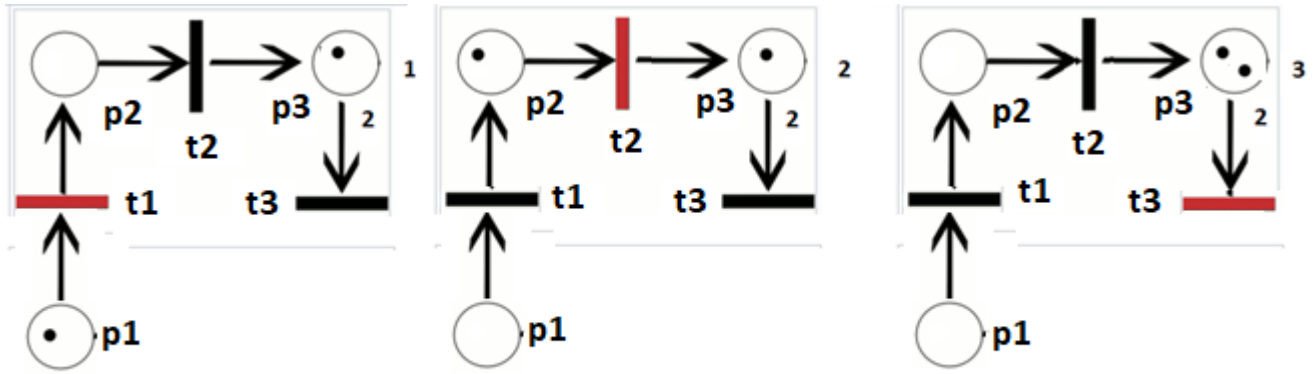


Figura 16: Fluxo Rede de Petri (P T I O) (Autor)

São três os elementos básicos que formam a estrutura topológica das redes de Petri, quais sejam: estados, ações e relação de fluxo.

Estes elementos, bem como alguns conceitos relacionados a eles, são discutidos nesta seção.

**Estados** são usados para modelar os componentes passivos dos sistemas, isto é, correspondem às suas variáveis de estado, formando um conjunto  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ .

**Ações** são usadas para modelar os componentes ativos dos sistemas, ou seja, os eventos que levam o sistema de um estado a outro, formando um conjunto  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ .

- **Relação de fluxo** é usada para especificar como se dá a transformação de um estado em outro pela ocorrência das ações no sistema. Esta relação é representada pelo conjunto  $F = \{(x,y) \in E \times A \cup A \times E\}$ .

Então a estrutura topológica de uma rede é dada por uma tripla  $R = (E, A, F)$ , que define um grafo bipartido, dirigido e conexo. [22]

## 2.4.1 Redes de Petri Colorida

A Rede de Petri Colorida (Color Petri Net – CPN), é uma extensão da Redes de Petri (RdP) que inclui uma linguagem de programação. A linguagem de programação permite declarar variáveis e tipos, os quais carregam informações para melhor representar a dinâmica do processo que está sendo modelado. Desta forma, os lugares e as transições são tipificados. Os lugares possuem fichas que por razões históricas, são ditas “coloridas” mas representam valores variáveis do tipo, inteiro, string, produtos, listas e outros definidos pela linguagem. As transições possuem inscrições que podem ser variáveis ou funções que retiram e adicionam fichas coloridas nos lugares associados. Por exemplo, lugares que suportam “cores” do tipo inteiro, não suportam “cores” do tipo real. Na analogia com as linguagens orientadas a objeto, diz-se que, as “cores” são as classes dos objetos.[10]

Transições em CPN, podem avaliar as informações contidas nas fichas vindas dos seus lugares de entrada. Uma vez que a transição dispara, ela pode modificar a informação da ficha e carregá-la para o lugar de saída. [16]

Na figura 17, é demonstrado o funcionamento de uma rede de petri colorida. A transição  $t_0$  é habilitada quando se tem a ficha de tipo b no lugar  $P_0$  e a ficha de tipo a no lugar  $P_1$ . Com essa condição satisfatória, estas fichas serão removidas dos respectivos lugares e será carregado uma ficha de tipo b no lugar  $P_3$  [23].

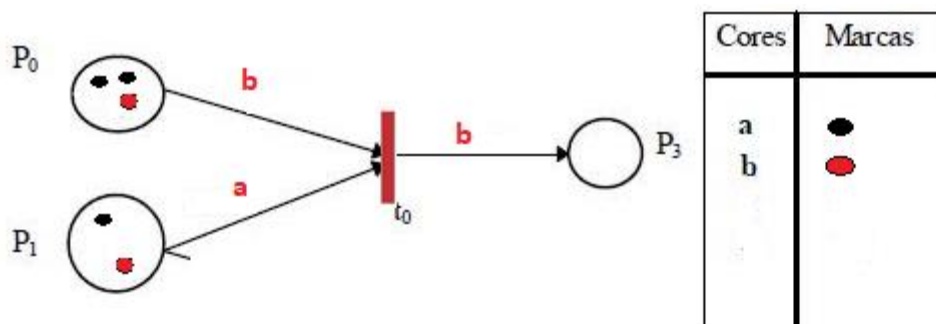


Figura 17: Representação Gráfica de rede de Petri Colorida[Autor]

Outro ponto importante, é que Redes de Petri, possui o recurso de modelagem que permite a hierarquia de redes. Este recurso é usado para modelar sistemas complexos quando é necessário agrupar parte dos modelos em módulos (subsistemas) e será explicado com maiores detalhes no capítulo 4.

## 2.4.2 Redes de Petri Temporizadas

Redes de Petri Coloridas temporizadas tem uma propriedade adicional que pode ser usada para diferentes tipos de análise de desempenho[16]. Em redes de Petri ordinárias, tem-se que o disparo é instantâneo. Uma vez que sistemas reais possuem tempos envolvidos, as fichas temporizadas carregam mais uma informação, que é a estampa de tempo “*times-tamp*”. A estampa de tempo é a informação de quando a ficha estará disponível, ou seja, em que espaço de tempo a transição está habilitada. Isto permite avaliar tempo de trânsito de mensagem, disponibilidade de recursos e garantir uma análise estocástica do sistema.

Quando associado às marcas, elas carregam uma informação indicando quando estará disponível, sendo considerada para a habilitação de transições.

Quando a informação de tempo está associada aos arcos, a cada arco é associado um tempo de disparo. Quando a informação de tempo está associada aos lugares, usualmente, corresponde a uma indicação do tempo, que a marca deve permanecer naquele lugar, antes de ser utilizada para a habilitação das transições sucessoras do lugar em questão. Finalmente, quando o tempo é associado às transições, a indicação refere-se de modo geral, ao tempo que a ação leva para ser executada. [2]

## 2.4.3 Software CPN Tools

O CPN Tools é uma ferramenta para edição, simulação e análise de redes de Petri de alto nível. Ele suporta redes de Petri básicas mais redes de Petri temporizadas e redes de Petri coloridas. Possui um simulador e uma ferramenta de análise de espaço estatal está incluída.

O CPN Tools é capaz de simular tanto Redes de Petri ordinária, como Redes de Petri Coloridas complexas. Este software usa a linguagem CPN Markup Language (CPN ML) o qual é baseado na linguagem de programação ML. Usando CPN ML é possível definir estruturas com dados complexos, e funções para lidar com estas estruturas.

No CPN tools, existe a possibilidade de o desenvolvedor realizar a geração do código enquanto o modelo é desenvolvido e realizar sua respectiva análise de sintaxe. Isto significa que é possível simular e analisar as partes do modelo sintaticamente corretos, enquanto as partes erradas ou incorretas são ignoradas. Uma ferramenta de simulação eficiente é implementada podendo simular modelos temporizados e/ou não temporizados. Outra ferramenta inserida neste programa, permite a análise de espaço de estados emitindo um relatório com o gráfico de alcançabilidade do modelo CPN, indicando bloqueios e vivacidade da rede. É permitido ainda criar blocos monitores que avaliam as condições da simulação, como formação

de filas, disparo de transições e outras funções que avaliam as condições de lugares e transições. [16].

As funções básicas no CPN Tools consistem em:

- Criação e edição de um modelo;
- Análise do comportamento do modelo através de simulação;
- Criação e análise do espaço de estados do modelo.

Para a criação de modelos, é fornecido um editor gráfico especial de redes de Petri coloridas.

O editor permite que se desenhe uma rede de Petri na tela do computador, bem como, se escreva os atributos dos elementos da rede e declarações adicionais, escritas na linguagem CPN ML, como mencionado anteriormente. O modelo pode ser constituído de várias páginas.

Estas páginas são conectadas para fornecer a estrutura hierárquica. Para modelos muito simples, a geração de seu espaço de estados completo (gráfico de alcançabilidade) é possível.

O CPN Tools fornece um relatório do espaço de estados gerados, com as conclusões das propriedades padrão das redes de Petri, tais como: limitação “*boundedness*” e vivacidade “*liveness*”. Além disso, é fornecida uma linguagem especial, baseada em CPN ML, para a descrição de consultas sobre propriedades não padrão do espaço, de estados em que o usuário esteja interessado. Infelizmente, para modelos mais complexos, o espaço de estados pode ser muito grande e sua criação ser impraticável. A única forma de análise de modelos mais complexos é a simulação do comportamento dos mesmos. O CPN Tools fornece simulação passo-a-passo para depuração do modelo, bem como simulação automática com um certo número de passos. Simulação em grandes intervalos de tempo, é uma forma de se fazer uma análise estatística do comportamento do modelo. Ela é útil para a estimação de características de taxa de transferência e QoS. [10]

Abaixo é mostrada todas as ferramentas disponíveis no CPN tools tanto para criação configuração da rede, quanto para simulação e relatórios.

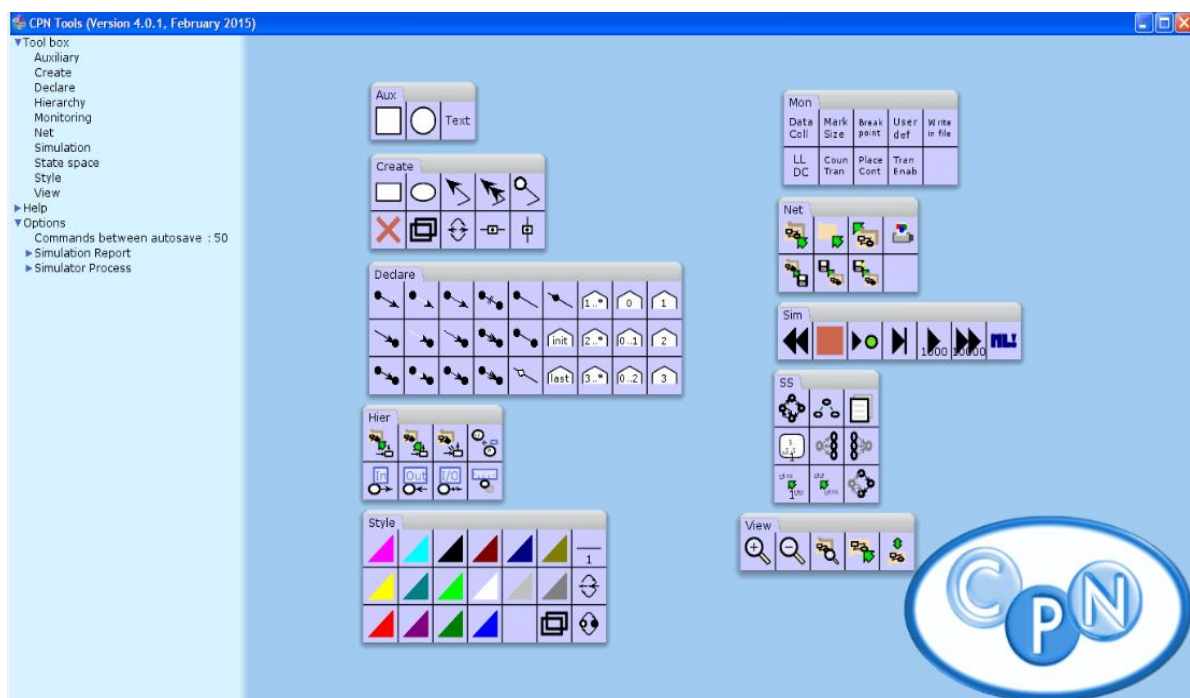


Figura 18: Ferramentas disponíveis no CPN tools versão 4.0.1[Autor]

Como exemplo, a Figura 19 demonstra no CPN tools a marcação de fichas antes do disparo da transição e depois do disparo. As variáveis X e Y declaradas como inteiro usadas no arco de saída dos lugares P1 e P2, ao serem disparadas efetuam a operação de soma declarada no arco de entrada do lugar P3, somando assim  $3 + 4$  (valores das fichas), resultando em 9 no lugar P3.

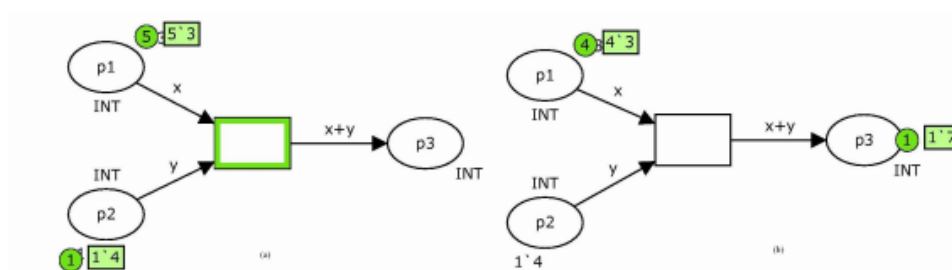


Figura 19: Disparo de Transição no CPN tools[10]



Na aba do menu “*Declarations*” é onde declara-se as variáveis de um programa:



**Figura 20: Declarações de variáveis no CPN tools[Autor]**

## 2.5 Lógica em Controlador Industrial Siemens S7 300

O S7-300 é o CLP de pequeno porte do fabricante Siemens da família SIMATIC S7, porém totalmente modular. O mesmo possibilita a montagem com CPU's de diferentes capacidades, é extensivo a diferente espectro de módulos, podendo ser expandido em até 32 módulos. (Cartão de rede, fonte, cartões de IO, etc). A configuração do mesmo se dá via software STEP 7[19].



Figura 21: Controlador S7 300[Autor]

A título de exemplo, segue abaixo uma formatação de Hardware desse modelo:

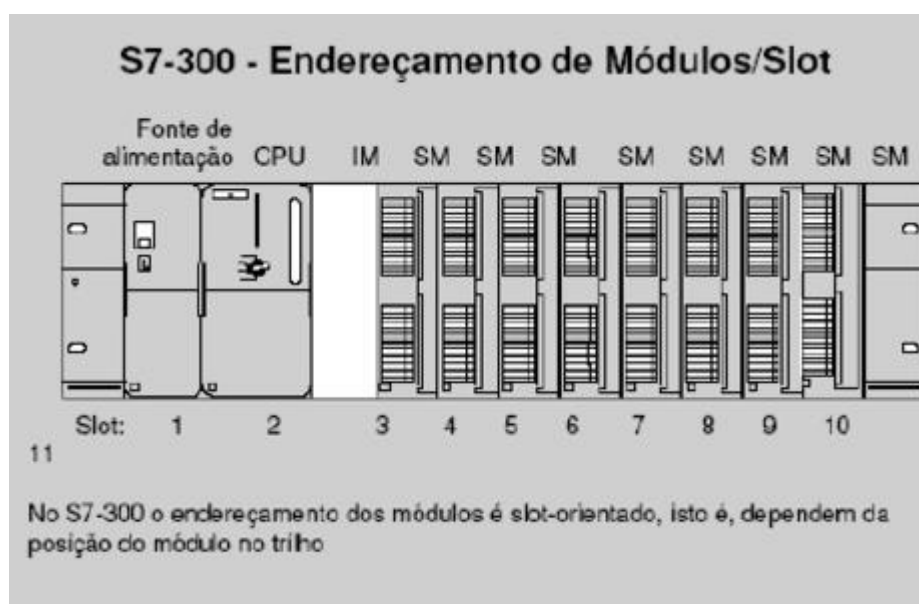


Figura 22: Hardware com cartões S7 300[19]

A partir de um projeto definido de Hardware, é necessário configurar este no programa STEP7 (SIMATIC MANAGER). O SIMATIC Manager é uma interface gráfica com o usuário, para a edição “*online/off-line*” de objetos S7 (projetos, arquivos de programa do usuário, blocos, estações de hardware e ferramentas). Com o SIMATIC Manager é possível:

administrar projetos e bibliotecas; ativar as ferramentas STEP 7, acessar online o PLC e editar módulos de memórias [19].

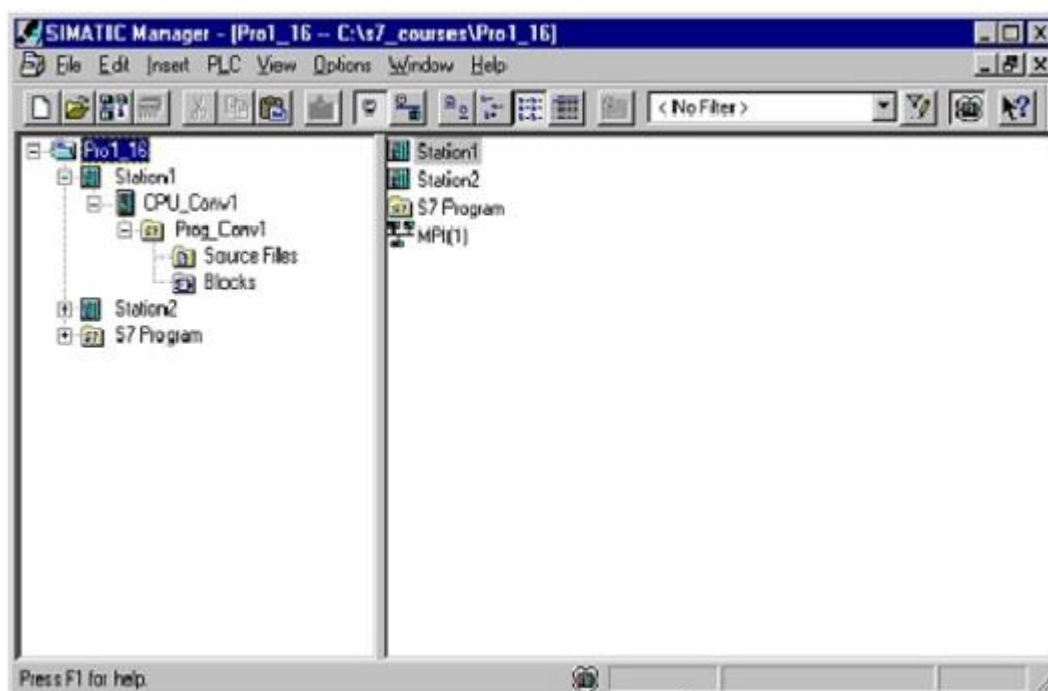


Figura 23: Software SIMATIC MANAGER[19]

De forma resumida, a Figura 24 abaixo apresenta a função de cada ícone na janela do Simatic Manager:

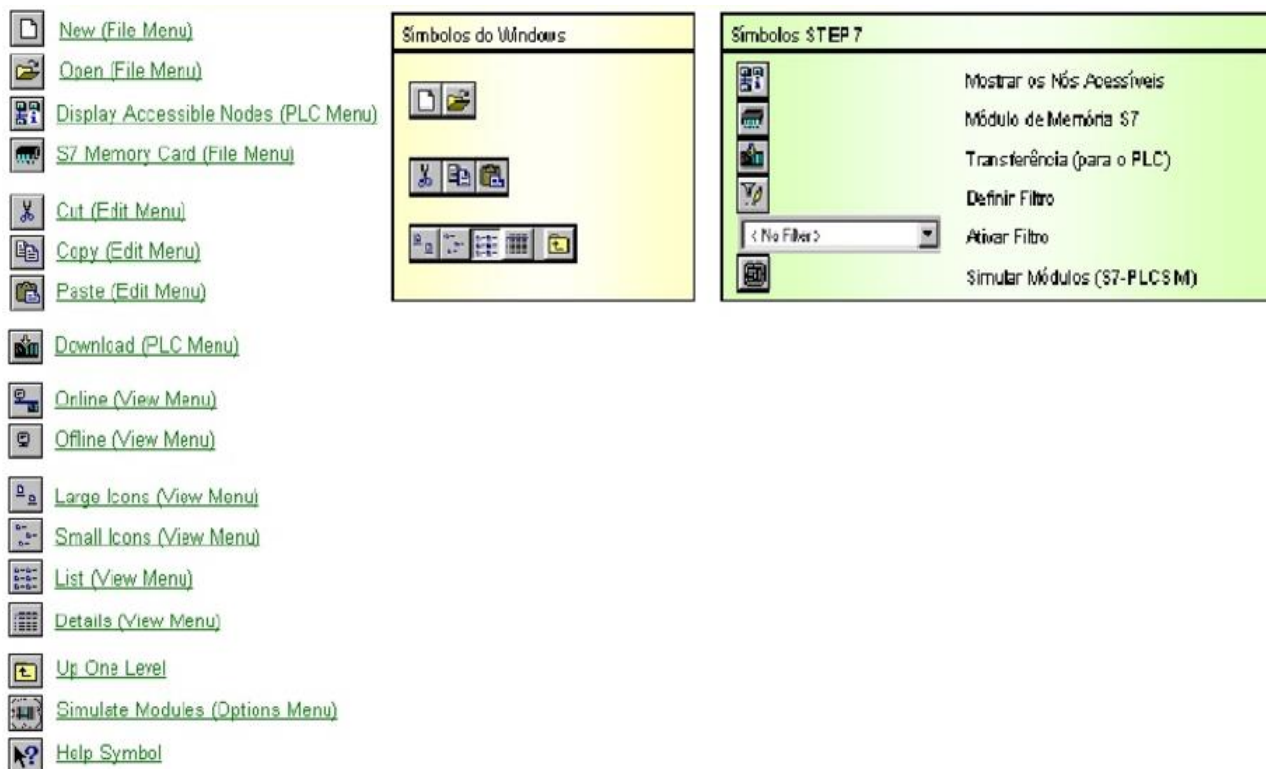


Figura 24: Ícones do Simatic Manager[19]

A primeira etapa de um programa após a criação do projeto é a configuração do hardware. Para tal no layout de hardware, deve ser inserido através da biblioteca exatamente os hardwares que se encontram no físico, lembrando que existem alguns requisitos básicos a serem respeitados, que constam no manual do equipamento como por exemplo, a fonte de alimentação, que deverá ficar sempre no *slot* 1 do RACK, a CPU no *slot* 2, o módulo de interface da comunicação/rede no *slot* 3 e a partir do slot 4, pode-se inserir os módulos de IO.

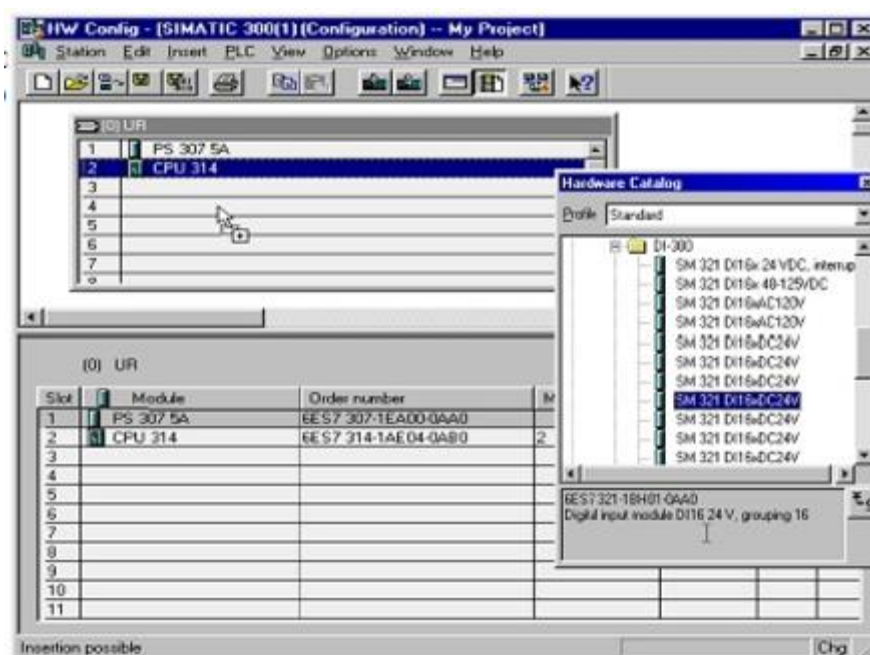


Figura 25: Configurando o Hardware[19]

Após a configuração de Hardware ser realizada, feito o download, é necessário realizar a programação da lógica. No SIMATIC, a árvore de programa é subdividida em Blocos, sendo os principais (OB, DB, FB, FC).

Uma função (FC), consiste em uma parte funcional do programa. É possível programar funções de modo que sejam parametrizáveis. Com isso, as funções são adequadas para serem reutilizadas no programa e para realizarem tarefas complexas como cálculos. Funções de sistema (SFC), são funções parametrizáveis integradas ao sistema operacional da CPU. Seu número e funcionalidade são fixos. Já os blocos de função, oferecem as mesmas possibilidades que as funções. Adicionalmente, os blocos de função têm sua própria área de memória, sob a forma de blocos de dados *instance (instance datablocks)*. Com isso as funções são adequadas para serem reutilizadas no programa e para realizarem tarefas complexas como controle em malha fechada. Os Blocos de Dados (DB), são áreas de dados do programa do usuário nas

quais os dados relativos ao mesmo, são gerenciados de maneira estruturada. A utilização de todas as operações é possível em todos os blocos (FB, FC e OB). Os blocos tipo OB são os responsáveis pela organização do programa do usuário. Tem-se blocos de organização para o processamento cíclico do programa, para o processamento comandado por tempo e por interrupções. Os procedimentos de partida da CPU e sua reação em caso de falhas, podem ser também influenciados pela programação de OB's especiais. É possível dizer que o bloco de organização mais importante é o OB1, pois é o responsável pelo processamento cíclico do programa. O bloco de organização OB1 é chamado pelo sistema operacional da CPU. Assim que a instrução JU (salto incondicional) ou JC (salto condicional) é encontrada, o programa linear é deixado, passando a ser executado o bloco chamado pelas instruções de salto. No término da execução deste bloco, temos o retorno a instrução seguinte no OB1, que originou o salto. A OB será chamada ciclicamente pelo sistema operacional, ou seja, os blocos de aplicação devem ser chamados dentro de uma OB (Organization Block) para serem executados. Uma FB ou FC, não irá fazer nada se não for chamada por uma OB. [19]

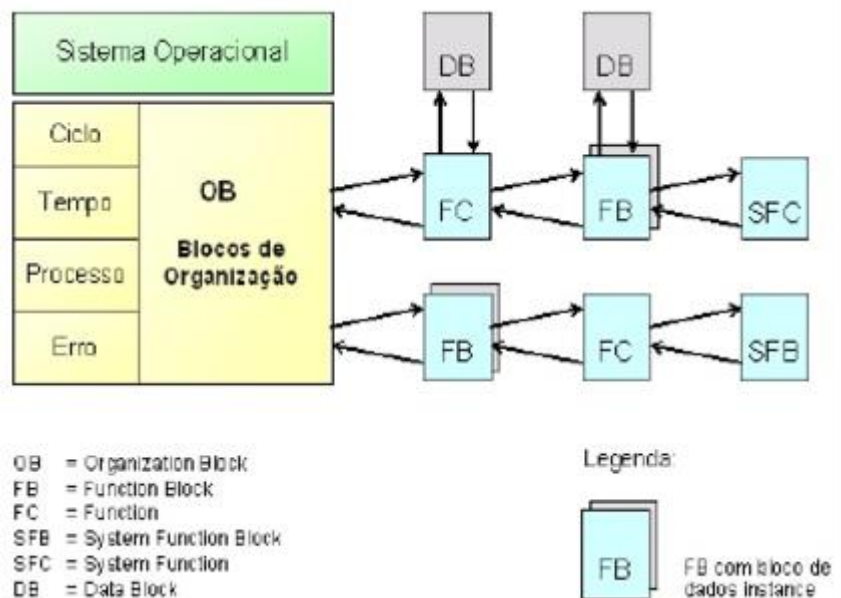


Figura 26: Blocos possíveis para configurar lógica[19]

A programação no SIMATIC pode ser realizada em várias linguagens, sendo as principais FBD, STL e LADDER. A linguagem LADDER, a mais comum delas, é feita através de representação em Diagrama de Contatos. É muito similar a um diagrama de circuito elétrico. São utilizados símbolos como contatos e bobinas. A linguagem STL é a Lista de Instruções composta por instruções STEP 7. Pode-se programar de uma forma praticamente livre em STL (algumas vezes ao ponto de já não conseguir seguir mais o programa). O Diagrama de Blocos de Funções, utiliza “caixas” para as funções individuais. O caractere na caixa, indica a função (por ex. Temporizadores). [19]

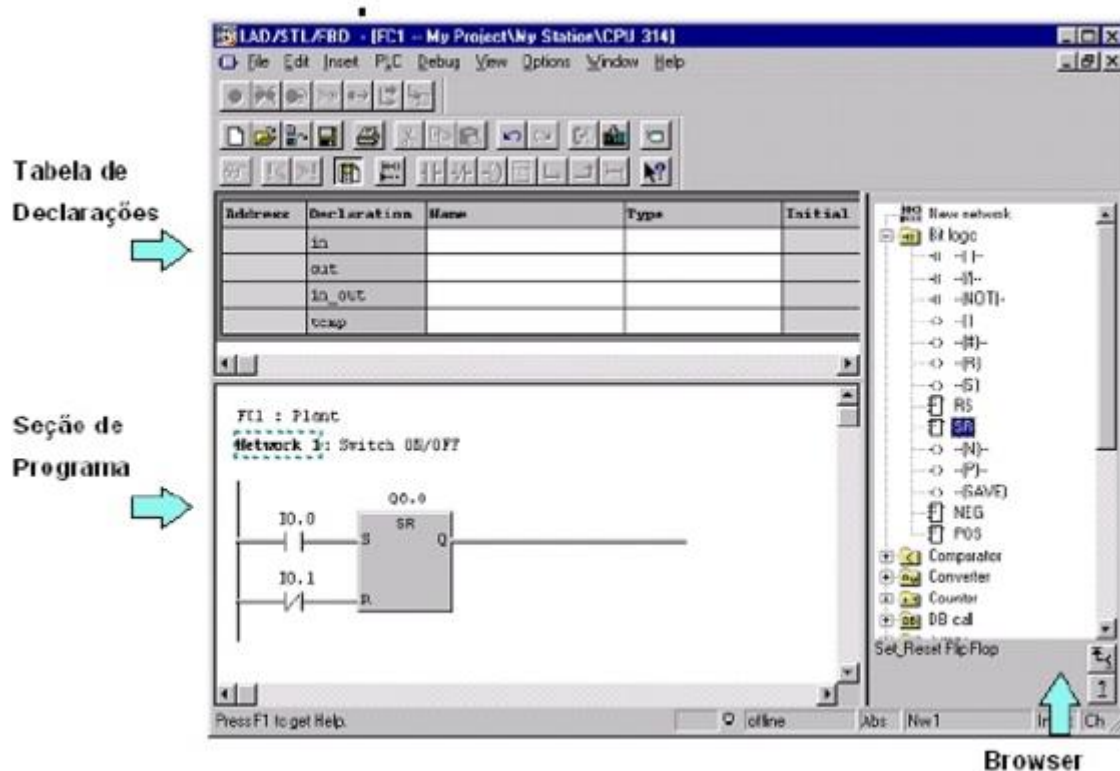


Figura 27: Exemplo de programação[19]

Instruções de BIT			
Instrução	LAD	FBD	STL
Scan para Sinal "1"	I 1.0 	I 1.0	A I 1.0
Scan para Sinal "0"	I 1.1 -	I 1.1	AN I 1.1
Assign Output (saída)	Q 8.1 - ( )	Q 8.0 =	= Q 8.0
Seta Saída	Q 8.0 - (S)	Q 8.0 S	S Q 8.0
Reseta Saída	Q 8.0 - (R)	Q 8.0 R	R Q 8.0
Seta/Reseta Flip Flop	M 10.0 10.1   SR_FF   Q   S   10.2     R	M 10.0 10.1   SR_FF   Q   S   10.2     R	A I 0.1 S M 10.0 A I 0.2 R M 10.0

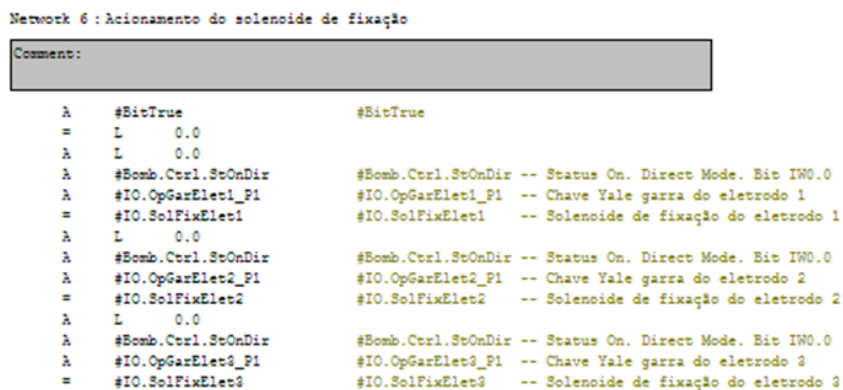
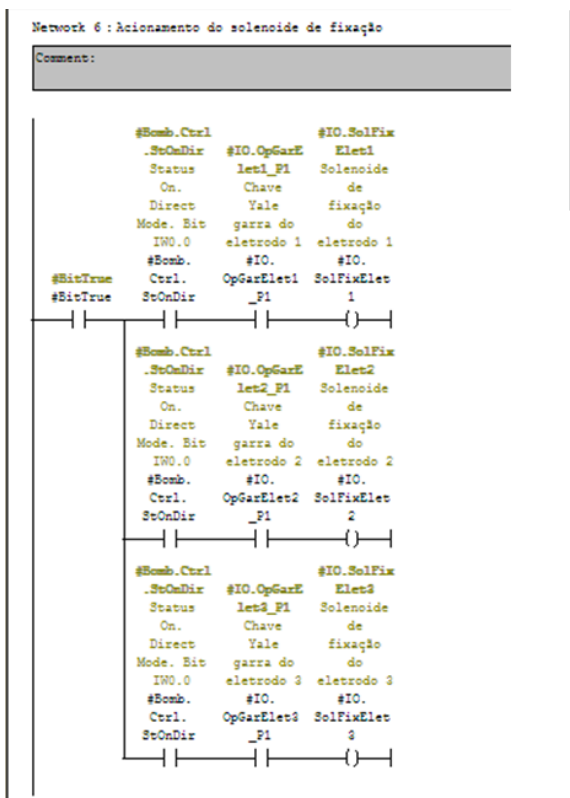


Figura 28: Quadro comparativo de Linguagens de programação e conversão Ladder x STL[Autor]

## 3 LAMINADOR A FRIO – ESTUDO DE CASO OEE

### 3.1 Considerações Gerais

A pesquisa utilizará como estudo de caso um problema industrial em uma siderurgia, na qual viu-se a instabilidade de produção nos processos do setor de acabamento, de uma unidade da Votorantim Siderurgia, onde fez-se necessário o entendimento dos indicadores que eram mais impactantes no OEE da planta, constatando-se baixos e instáveis resultados no indicador de eficiência. Inicialmente, foram capturados dados amostrais através do software de carta de controle IBA PDA para medir o desempenho de produtividade, analisando a velocidade em vários momentos da produção. Os dados foram analisados dentro da metodologia DMAIC, realizando análises de histograma, *boxplot*, capacidade, pareto, entre outros, possibilitando observar a existência de oscilações de desempenho por horário de produção, experiência do colaborador no momento de troca de bobina, passagem de solda, suaves rampas de aceleração e desaceleração, etc. Para tal solução foi criada uma lógica de automação através da modelagem de Rede de Petri Colorida desenvolvida no software CPN Tools, possibilitando logo após a programação no CLP S7 300 e IHM's OP17 na plataforma Protool, a partir de uma receita operacional que detecta cada um dos momentos de gap e automatiza o sistema, estreitando-o e estabilizando-o, além disso, os inversores de frequência Masterdrive foram reparametrizados. A interação com o homem foi feita através de mensagens na IHM, sinalizadores visuais e sonoros temporizados.

O presente estudo vem a concluir que um sistema de aumento de produtividade autônomo modelado com Rede de Petri e implementado nos equipamentos através da automatização e otimização dos sistemas de velocidade otimiza “gaps”, facilita a gestão operacional e consegue através da tecnologia embarcada em CLPS e interface homem máquina, trazer resultados de produtividade muito significativos em sistemas industriais com baixo custo de investimento. O resultado encontrado é um aumento de OEE e será mostrado os resultados obtidos através de novas amostras em carta de controle.



### 3.2 Análise prévia do processo na metodologia DMAIC (IBA)

No setor de laminação a frio foram realizadas medições através da carta de controle Iba Pda e feito análise estatística com o software Minitab de cada etapa do processo a fim de calcular o número meta do processo de laminação como um todo. As análises serão apresentadas a seguir o que possibilita o baseamento para o cálculo da meta a ser alcançada com o sistema.

O processo de laminação a frio, Figura 29, é composto basicamente pelo setor de Abastecimento, usualmente chamados de “pay offs”, onde são inseridas 2 bobinas de aço CA50 sendo soldadas a ponta do fim de uma bobina no início da outra. O fio máquina de CA50 é puxado pelos motores dos blocos de tração 1, 2 e 3, passando pela torre do *pay-off*, *feeder* e decapador (locais estes responsáveis pela limpeza do fio máquina). Ao passar pelo decapador, o fio máquina passa pelo aplicador mecânico de sabão e posteriormente inicia-se o processo de laminação a frio no bloco de tração 1 e sucessivamente aumenta-se a redução nos cassetes dos blocos 2 e 3. Após a passagem nos blocos existe o aliviador de tensão que faz o controle de tração do fio máquina nos blocos, para que o mesmo não arrebente ou embole. Ao passar por esse processo o fio máquina é aferido pelo *encoder* que envia o sinal para o PLC, informando quantos metros de produto CA60 foi produzido. Posteriormente a medição, o produto CA60 é enrolado no carretel acoplado ao bobinador estático, até que o comprimento atual produzido atinja o “*set point*”. Atingindo-se o “*set point*” de comprimento, a velocidade é reduzida a zero e a bobina pronta é expedida.

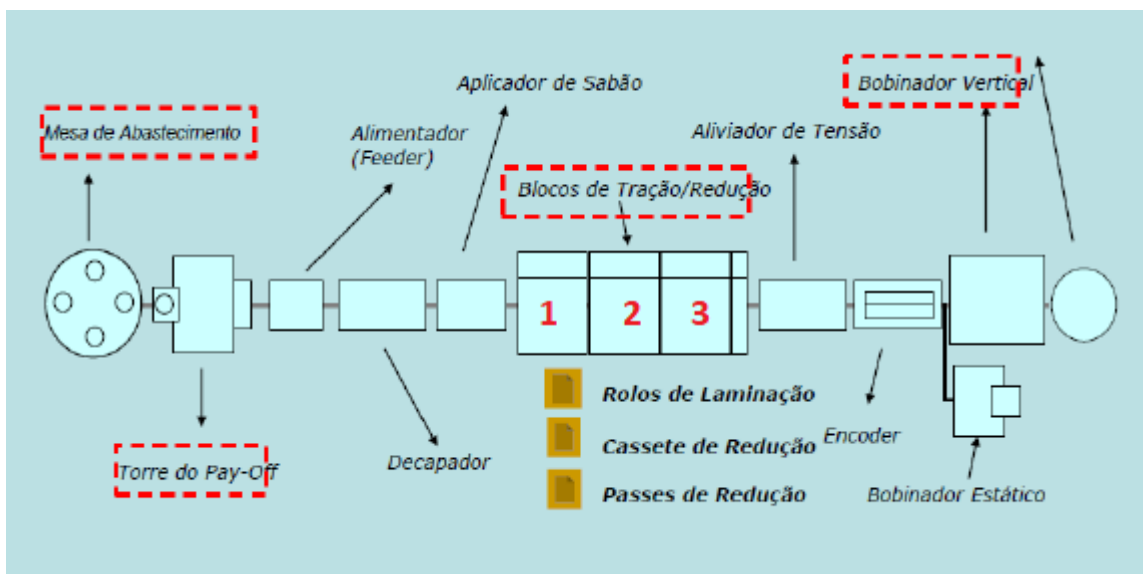


Figura 29: Laminação a Frio de Fio Máquina[Autor]

Para ter informações confiáveis do OEE atual e principalmente do índice de eficiência operacional, foi utilizado o software de carta de controle IBA PDA, este software é de aquisição de dados para manutenção e produção com ciclo de *scan* de até 1ms. Com esta ferramenta, é possível monitorar online e com gravação ode dados, as variáveis diretamente do CLP, contínua ou discreta.

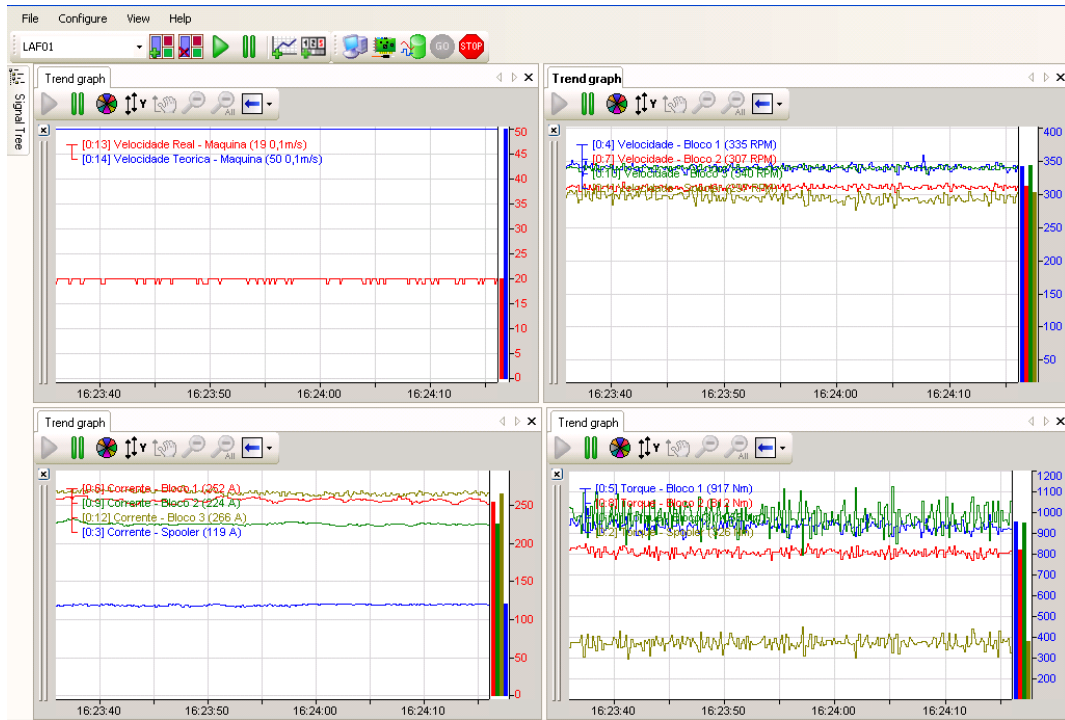


Figura 30: Análise online carta de controle do laminador IBA PDA[Autor]

Através do software Minitab, foi diagnosticado o desenho de desempenho de produção de uma bobina, com tempo médio de produção 1234 segundos (20,5 minutos). O índice de eficiência da máquina encontra-se em um valor de 69,3%, tendo um potencial de atingimento 83,43% como mostra no pareto na Figura 34.

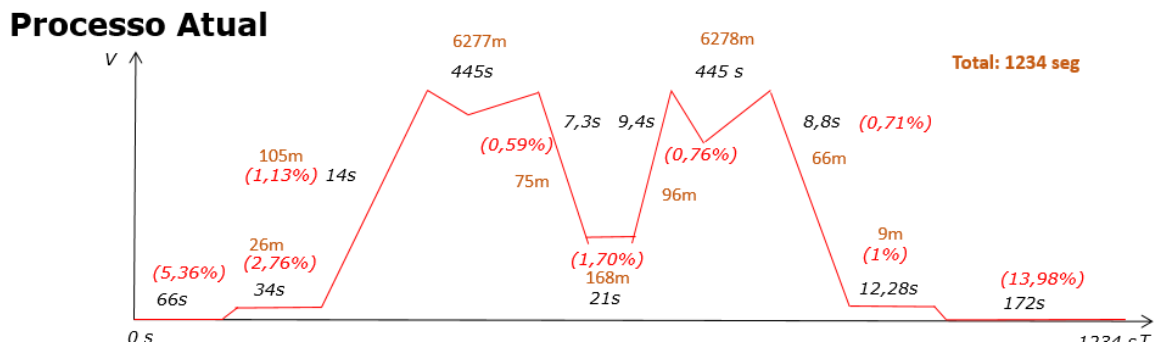


Figura 31: Análise % Eficiência Operacional do Laminadores e Meta[Autor]

A média de tempo para a fabricação de um spooler na análise é de 1234 segundos, para uma quantidade amostral de 216 bobinas, porém, pode se observar no Histograma e carta de controle (Figuras 32 e 33), que existem bobinas que são fabricadas acima de 1800 segundos, como existem bobinas, que são fabricadas abaixo de 1000 segundos. O desvio padrão (StDev) de 531 segundos, demonstra que o processo é muito instável.

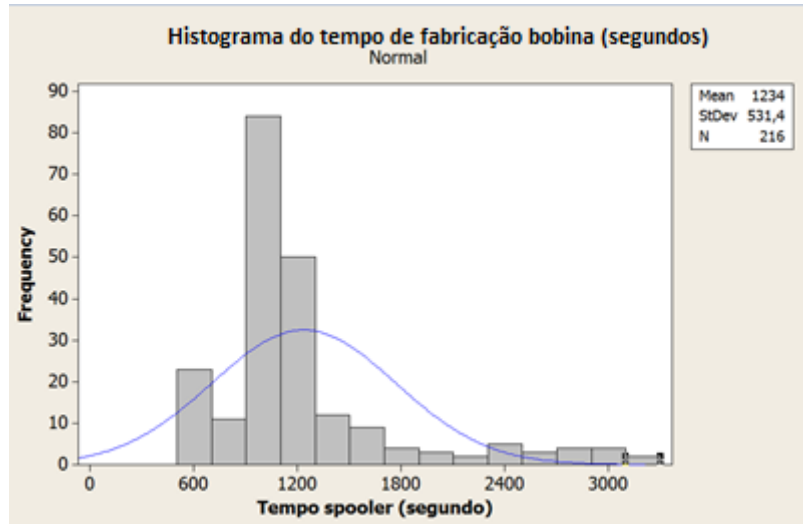


Figura 32: Histograma – Minitab[Autor]

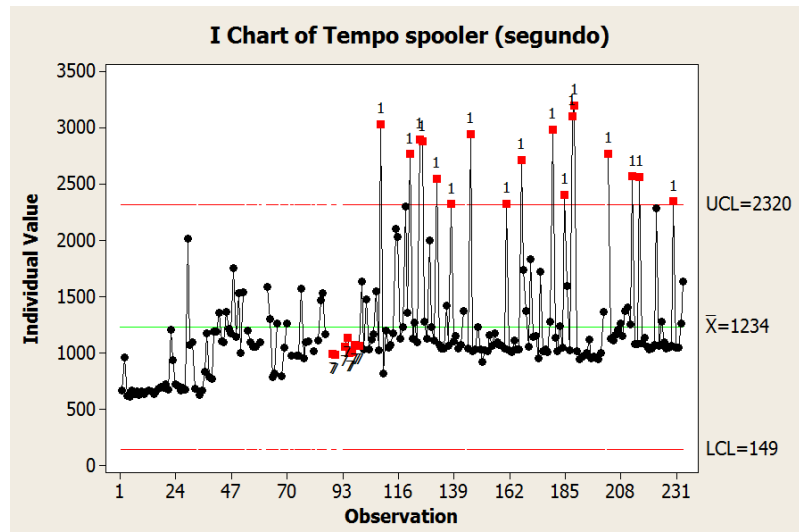


Figura33:Chart of Tempo – Minitab[Autor]

Estratificando as causas principais das perdas operacionais, o gráfico de pareto abaixo (Figura 34), demonstra os pontos que precisam ser solucionados para melhorar o desempenho do OEE.

Entre as principais perdas, foi identificado que a velocidade é reduzida manualmente pelo operador, ficando reduzida por um longo período, tanto durante o processo, como na troca de turno, finais de semana e na passagem de solda. Além disso, foi identificado que a velocidade de set point da bobina CA60 produzida, é inserida pela operação diferente do padrão afetando o OEE.

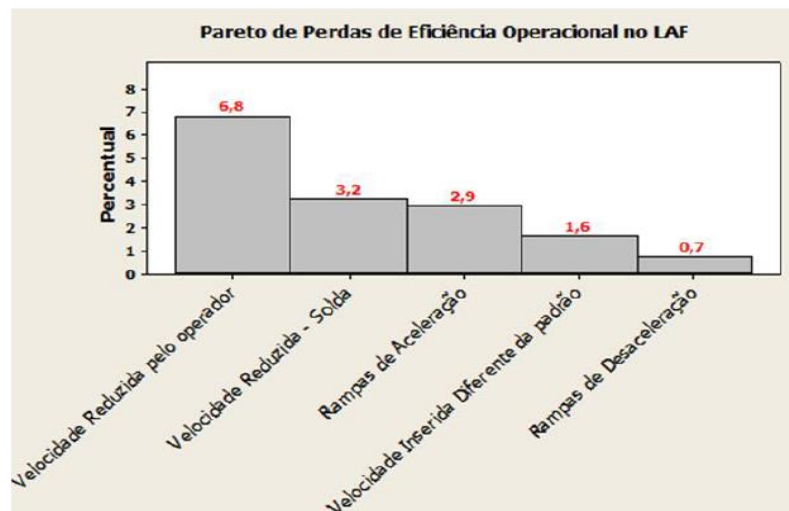
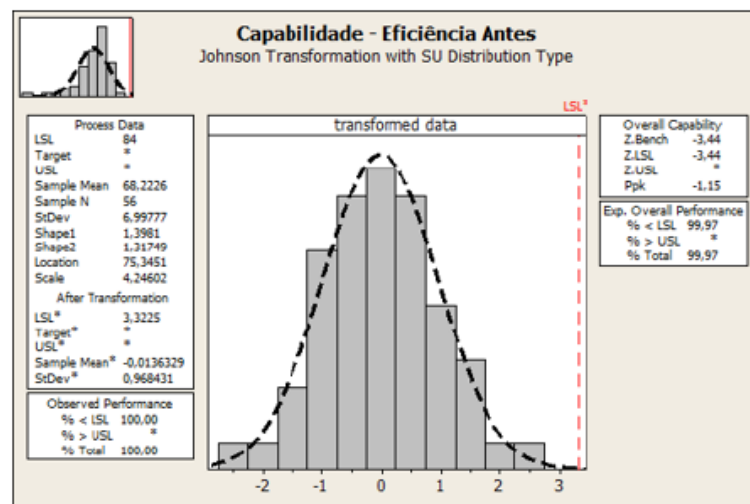


Figura 34: Pareto – Minitab[Autor]

O estudo de capacidade demonstra que o equipamento para o limite inferior de 84% de índice de eficiência possui um P-value não normal e o Ppk -1,15



**P-value < 0,005 – Não normal**

Figura 35: Capabilidade – Minitab[Autor]

O principal gap encontrado foi a velocidade reduzida (Figura 37), pelo operador por tempo longo principalmente em horário de troca de turno, no turno de madrugada e durante finais de semana, onde gastou-se todas as alternativas tradicionais para tentativa de solução do problema. Observou-se após tratativas momentâneas, melhoras de desempenho, mas ao longo do tempo perdia-se esse desempenho. O outro diagnóstico, foi perda de produtividade durante a passagem de solda (Figura 36), devido ao tempo excessivo na velocidade reduzida. O tempo correto deve ser aquele que é o suficiente para percorrer 30 metros (distância até o último bloco), O terceiro ponto diagnosticado foram rampas de aceleração e desaceleração (Figura 38) suave no inversor de frequência, demorando na retomada do equipamento e por último a velocidade de set point do equipamento, incompatível com a velocidade desejada para a bobina que estava sendo produzida.

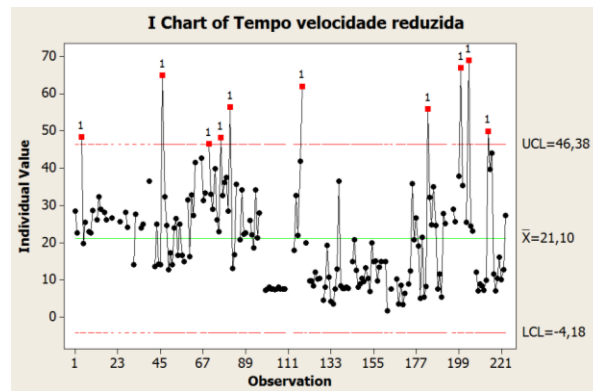


Figura 36: Tempo para passagem de solda– Minitab[Autor]

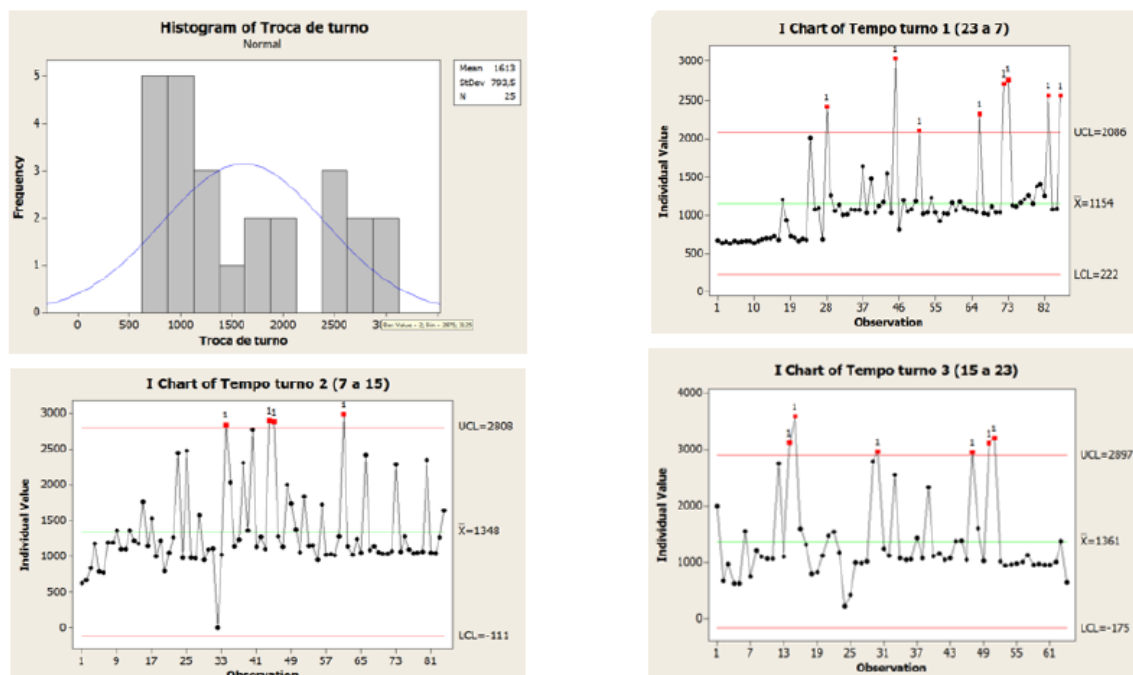
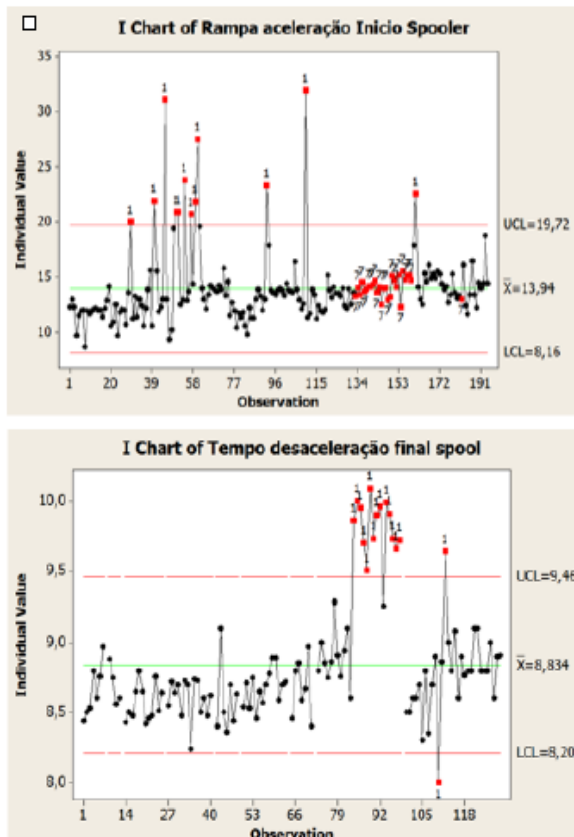


Figura 37: Tempo de desempenho por turno[Autor]

Com menor impacto, identificou-se, que as rampas de aceleração e desaceleração dos motores dos blocos, estavam com os valores suaves de parâmetros nos inversores de frequência, podendo ser otimizado frente os “datasheets” dos equipamentos.



**Características dos motores:**

Motores dos blocos 1,2,3 e bobinador vertical:

Potência: 160kw

Corrente Nominal: 280 A

Corrente de pico programada: 400A

Status atual nominal:

Bloco 1: 163A

Bloco 2: 110A

Bloco 3: 103A

Vertical: 108A

Status atual em rampa:

Bloco 1: 197A

Bloco 2: 206A

Bloco 3: 202A

Vertical: 195A



Figura 38: Rampas do inversor de frequência[Autor]

## 4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO REDES DE PETRI COLORIDA

### 4.1 Aplicando técnica de Redes de Petri Colorida (RdP)

Para solucionar os problemas detectados no gráfico de pareto (Figura 34) na metodologia DMAIC, propõe-se alterações nos processos, que antes de ser implementada será simulada em Redes de petri no CPN tools, na etapa de análise do DMAIC. Para o primeiro e quarto lugar no pareto (Velocidade Reduzida Manualmente) pelo operador por tempo indeterminado (6,8%) e Velocidade nominal inserida na IHM diferente do padrão operacional (1,6%). As ações propostas estão a seguir:

- Desenvolvimento de Lógica em CLP previamente simulada e testada em técnicas de redes de Petri, a fim de identificar o material que está sendo produzido;
- Detecção do momento instantâneo da máquina, um algoritmo que toma a decisão: Acelera, freia, estabiliza ou para o equipamento;
- Alarmes visuais e sonoros sempre que necessário para garantir a segurança das pessoas envolvidas;

Para o segundo lugar do pareto (Instabilidade no tempo e velocidade reduzida muito baixa no momento da solda – 3,2%), a ação proposta é um sistema de automação que identifica através de sensores, se a solda está passando no equipamento. Para tal será inserido esse sinal no CPN tools.

Para o terceiro e quinto lugar do pareto (rampas de aceleração e desaceleração suaves - 3,6%). A ação proposta, é o estudo de reavaliação da parametrização dos inversores de frequência, frente a exigência atual dos motores em relação aos dados de placa.

## 4.2 Etapas da modelagem no CPN Tool

Iniciando a modelagem no software CPNtools, o sistema desejado foi dividido em etapas na hierarquia do software. A abordagem utilizada para obter o modelo é do tipo “*top-down*”, ou seja, foram definidas transições de alto nível, chamadas de transição de substituição no CPN Tools, e em seguida as mesmas foram detalhadas em sub-páginas (recurso do CPN Tools que permite criar sub-modelos de Rdp). As sub-páginas são:

- 1º Abastecimento de insumo do processo para produção;
- 2º Ligar ou desligar o sistema;
- 3º Receita operacional (Escolha de bitola a ser produzida);
- 4º Carregamento dos dados da receita a partir da escolha da bitola (Velocidade nominal teórica, velocidade reduzida teórica, comprimento teórico por bitola);
- 5º Detecção e passagem de solda;
- 6º Detecção de redução de velocidade manual – Aceleração automática temporizada;
- 7º Bobina CA60 pronta;
- 8º Subtração de saldo de insumo no abastecimento após bobina pronta;



Para desenvolver as sub-páginas mencionadas é preciso criar as Variáveis e declarações a serem utilizadas:

```

CPN Tools (Version 4.0.1, February 2015)
└─ Options
  └─ OEE LAF - FINAL - 05-01-2018.cpn
    Step: 974
    Time: 0
    └─ Options
      └─ History
        └─ Declarations
          └─ Laminador
            └─ Standard priorities
              └─ Standard declarations
                └─ colset BOOL = bool;
                  └─ colset bitola = with b34 | b38 | b42 | b45 | b50 | b56 |
                    b60 | b70 | b71 | b80 | b90 | b100;
                  └─ colset UNIT = unit;
                  └─ colset Bobina = int;
                  └─ colset OK = bool;
                  └─ colset INT = int;
                  └─ colset INTINF
                  └─ colset TIME
                  └─ colset REAL
                  └─ colset STRING = string;
                  └─ colset Vel_Nom_SP = REAL;
                  └─ colset Comp_Nom_SP = int;
                  └─ colset Vel_solda = REAL;
                  └─ var Vel_SP: REAL;
                  └─ var Comp_SP: INT;
                  └─ var Vel_SP_Solda: REAL;
                  └─ var u : UNIT;
                  └─ var b : BOOL;
                  └─ var i : INT;
                  └─ var i2:INT;
                  └─ var i3:INT;
                  └─ var i4: INT;
                  └─ var bit: bitola;
                  └─ var b34v, b38v, b42v, b45v, b50v, b56v,
                    b60v, b70v, b71v, b80v, b100v: STRING;
                  └─ colset prod = product Bobina*bitola;
                  └─ colset vel = product Bobina*bitola*Vel_Nom_SP;
                  └─ colset comp = product Bobina*bitola*Comp_Nom_SP;
                  └─ colset velcomp = product Bobina*bitola*Vel_Nom_SP*Comp_Nom_SP;
                  └─ colset solda = product Bobina*bitola*Vel_solda;
                  └─ colset bob_prod = product Bobina*bitola*Vel_Nom_SP*
                    Comp_Nom_SP*Vel_solda;
                └─ Monitors
                  └─ Laminadores
                    ON/OFF
                    RECEITA -SETPOINT
                    SUBTRACAO INSUMO
                    SELECAO BITOLA
                    OPERACAO MANUAL
                    SOLDA
                    BOBINA PRODUZIDA
                    ABASTECER INSUMO

```

**Figura 39: Declarações e variáveis do programa[Autor]**

Conforme mencionado na Figura 39, como exemplo foi criado um tipo de variável real chamada “Vel\_Nom\_SP”.

Utilizando o conceito de hierarquia, a Figura 40 mostra o processo de forma macro, onde observa-se as transições de substituição desenhadas com linhas duplas. Foram definidas sub-páginas para essas transições. Como exemplo a transição “Selecionar bitola” possui uma sub-página associada chamada “Seleção Bitola”. É possível observar a quantidade de insumos CA50 que se encontra no processo no lugar “Abastecimento bobina CA50”. A bitola que foi escolhida pelo operador é demonstrada no lugar “Bitola escolhida”, neste caso b36. Também podem ser vistas na figura 40 outras condições booleanas que são necessárias para o funcionamento do modelo.

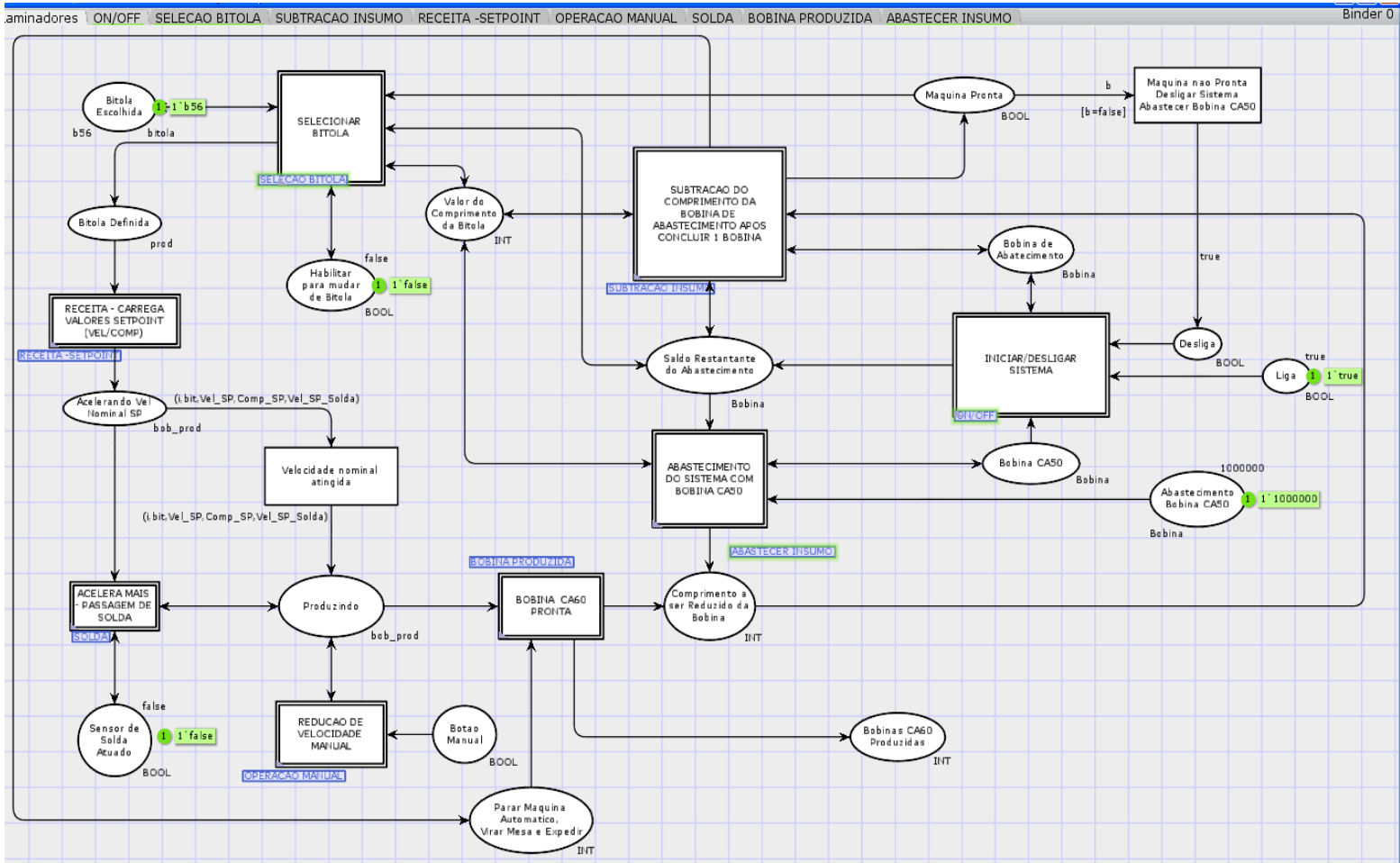
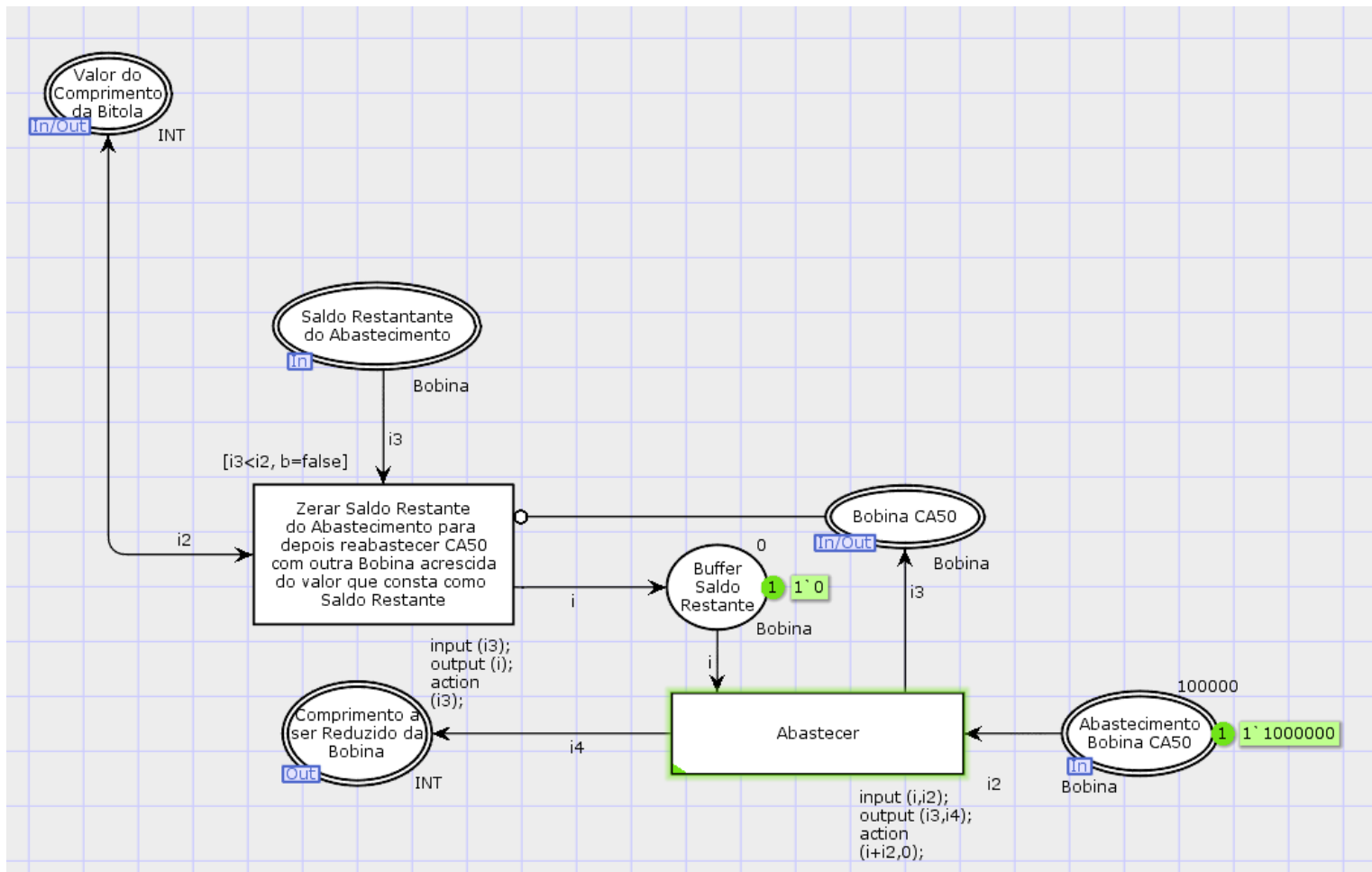


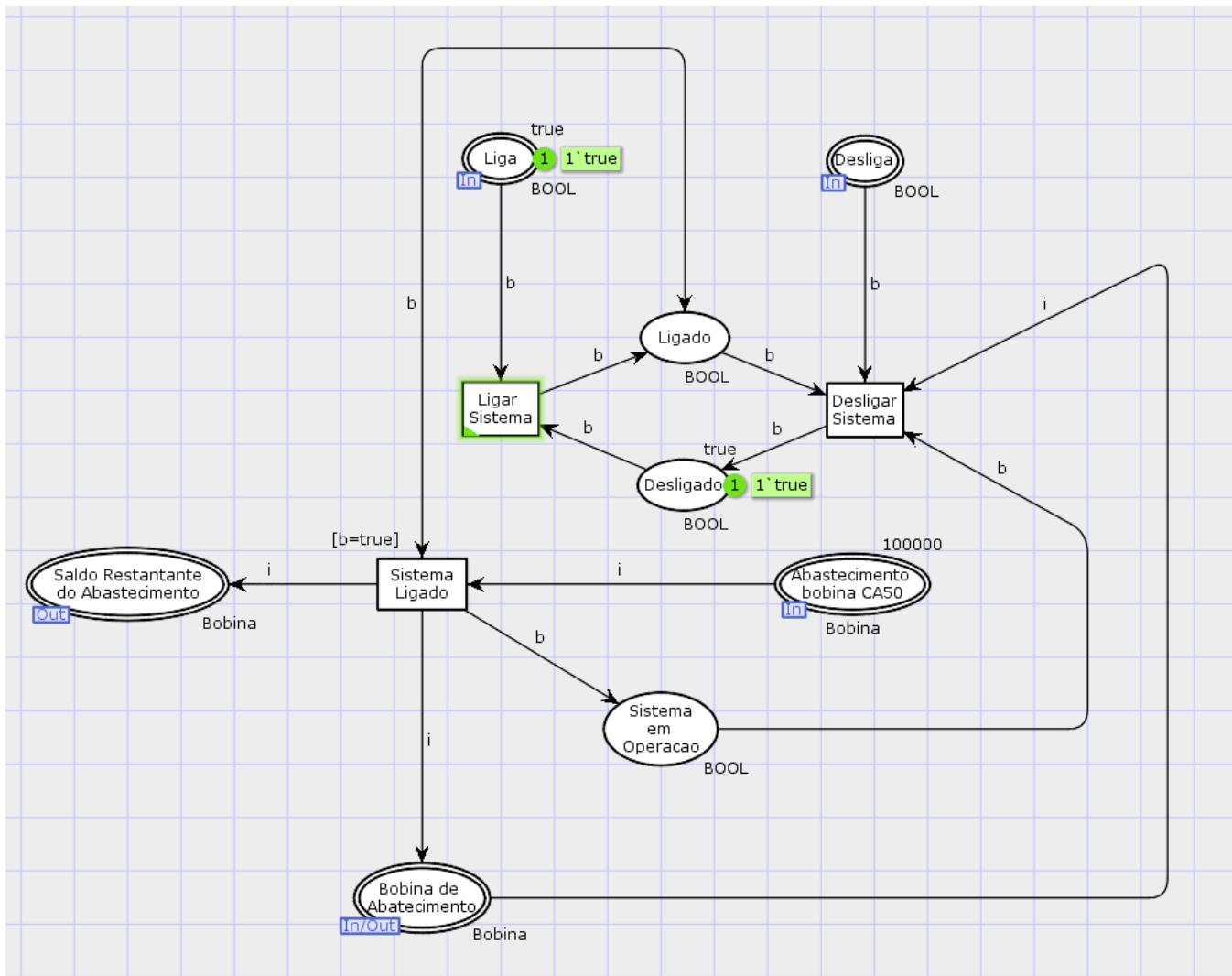
Figura 40: Tela Principal do Algoritmo[Autor]

Após a apresentação macro, será detalhada cada subpágina do processo. Na sub-página 1 (Figura 41), foram inseridas todos os lugares e transições para que seja possível realizar o abastecimento de insumo CA50. O operador abastece com o material CA50 na entrada do laminador a frio no lugar “Abastecimento bobina CA50”, abastecido com 1.000.000 metros de fio máquina “fichas”. A variável do valor do abastecimento é a “i2”. O valor abastecido é somado ao valor que já consta no equipamento, pois é o que sobrou da fabricação da última bobina. A variável do local “Saldo restante” é a “i3”. Após todos os dados carregados no sistema, é feita a comparação, verificando se o saldo do abastecimento é maior ao comprimento da bitola selecionada, para saber se possui insumo para produzir a bitola desejada. Caso tenha saldo, pode-se iniciar a produção. A subpágina foi nomeada como “ABASTECER INSUMO” e leva o valor da variável “i” até a sub-página 2 (Ligar/desligar a máquina).



**Figura 41: Sub-página 1 (Abastecimento de insumo CA50) [Autor]**

Na sub-página 2 (Figura 42) foram inseridas todas transições para que seja possível ligar ou desligar o sistema. A opção será acionada manualmente pelo operador, inserindo o valor 1 na ficha do local “Liga”, variável “b”. Estando esta variável com o valor em 1, a transição “Sistema ligado” será habilitada, colocando o sistema em operação através do lugar “Sistema em operação”. A subpágina no programa foi nomeada como “ON/OFF”.



**Figura 42: Sub-página 2 (Ligar/Desligar a Máquina) [Autor]**

Na sub-página 3 (Figura 43), é o momento de escolher a bitola que se deseja produzir. Esse sistema de escolha de bitola, não existe no equipamento original e é o processo que precisa ser implementado para iniciar a criação de uma receita operacional. Foram criadas 12 bitolas possíveis (b34, b38, b42, b45, b50, b56, b60, b70, b71, b80, b90, b100), os números no nome da variável representam a espessura do aço 34 = 3,4 mm, b100 = 10,0 mm). A escolha da bitola a ser produzida no lugar “Bitolas” é armazenada na variável “*bit*” e após a confirmação, a transição “Carregar bitola selecionada” é habilitada e carrega o valor para o lugar “Bitola definida”. Nesse caso foi selecionado a B56. Após a seleção da bitola, habilita-se a condição para o sistema definir qual o comprimento de fio máquina a ser produzido para esta bitola, utilizando a transição “Habilita comprimento bitola”. É feito uma comparação na transição “Comprimento da bitola” através de comando “*IF*”, carregando o valor do comprimento que foi armazenado na variável “*i*”, para o lugar “Valor do comprimento da bitola”. A sub página no programa foi nomeada como “SELEÇÃO BITOLA”.

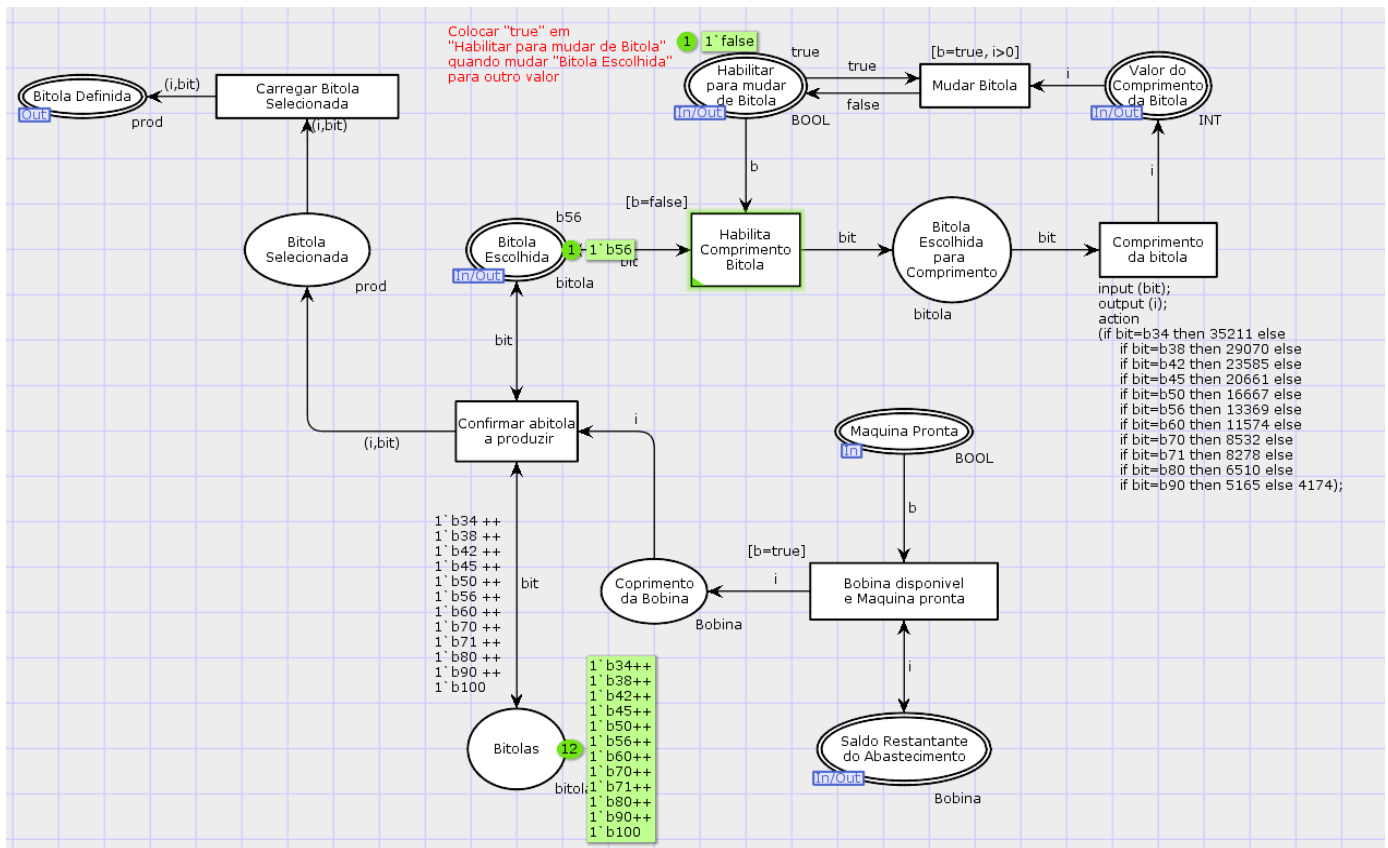


Figura 43: Sub-página 3 (Escolha do produto final a ser produzido) [Autor]

Na sub-página 4 (Figura 44), ao ter-se através da variável “bit” a seleção da bitola, ocorre o carregamento dos valores da receita de velocidade de produção. Nessa sub-página, a transição “Carregar velocidade nominal” é habilitada e carrega-se na variável “Vel\_SP” o valor da velocidade nominal teórica. O algoritmo foi desenvolvido utilizando a função “IF”, comparando e carregando sempre a velocidade da bitola escolhida. Após carregar o valor da velocidade teórica e comprimento, é necessário carregar o valor da velocidade reduzida usada para passagem de solda no equipamento. Para tal, após habilitada a transição “Carregar velocidade de solda nominal”, utilizou-se a função IF e é armazenado o valor desta velocidade na variável “Vel\_SP\_Solda”. Com os valores de *set point* carregados a transição “Iniciar produção” é habilitada e o equipamento começa a acelerar utilizando o lugar “Acelerando vel nominal SP”. A subpágina no programa foi nomeada como “RECEITA-SETPOINT”.

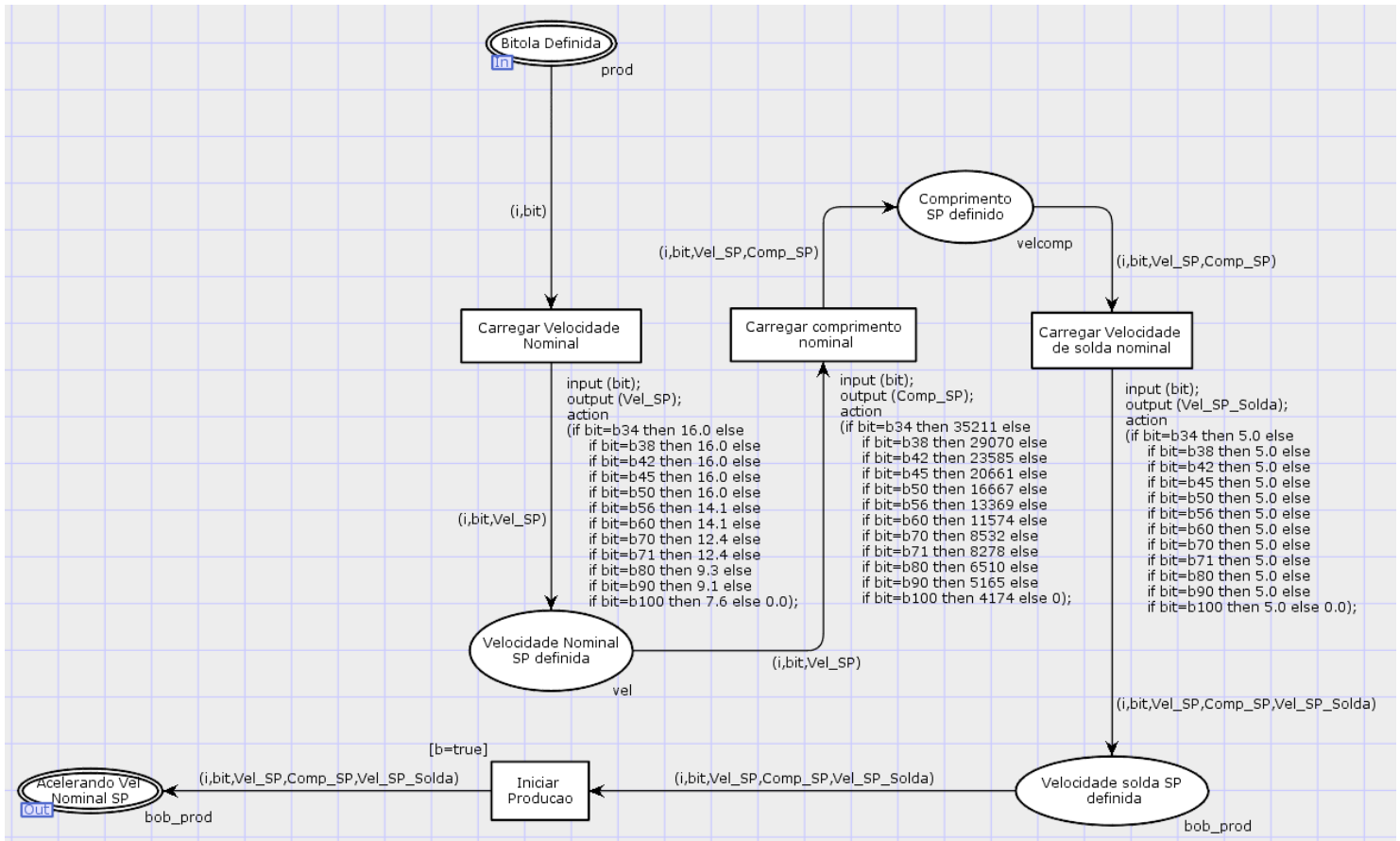


Figura 44: Sub-página 4 (Carregamento dos Set Points) [Autor]

Na Sub-página 5 (Figura 45), pode ser necessário passar a junção de duas pontas de bobinas soldadas nos blocos de tração 1,2 e 3. Para este caso, quando se tem habilitada a transição “Sensor solda atuado” pela variável “b”, a velocidade reduzirá através do lugar “Desacelerando”. O equipamento irá desacelerar para a velocidade definida na variável “Vel\_SP\_Solda” e ficará produzindo em velocidade lenta até que seja habilitada a transição “Sensor de solda não atuado” também pela variável “b”. Esse procedimento garante que a máquina só opere em velocidade lenta no momento necessário. A subpágina no programa foi nomeada como “SOLDA”.

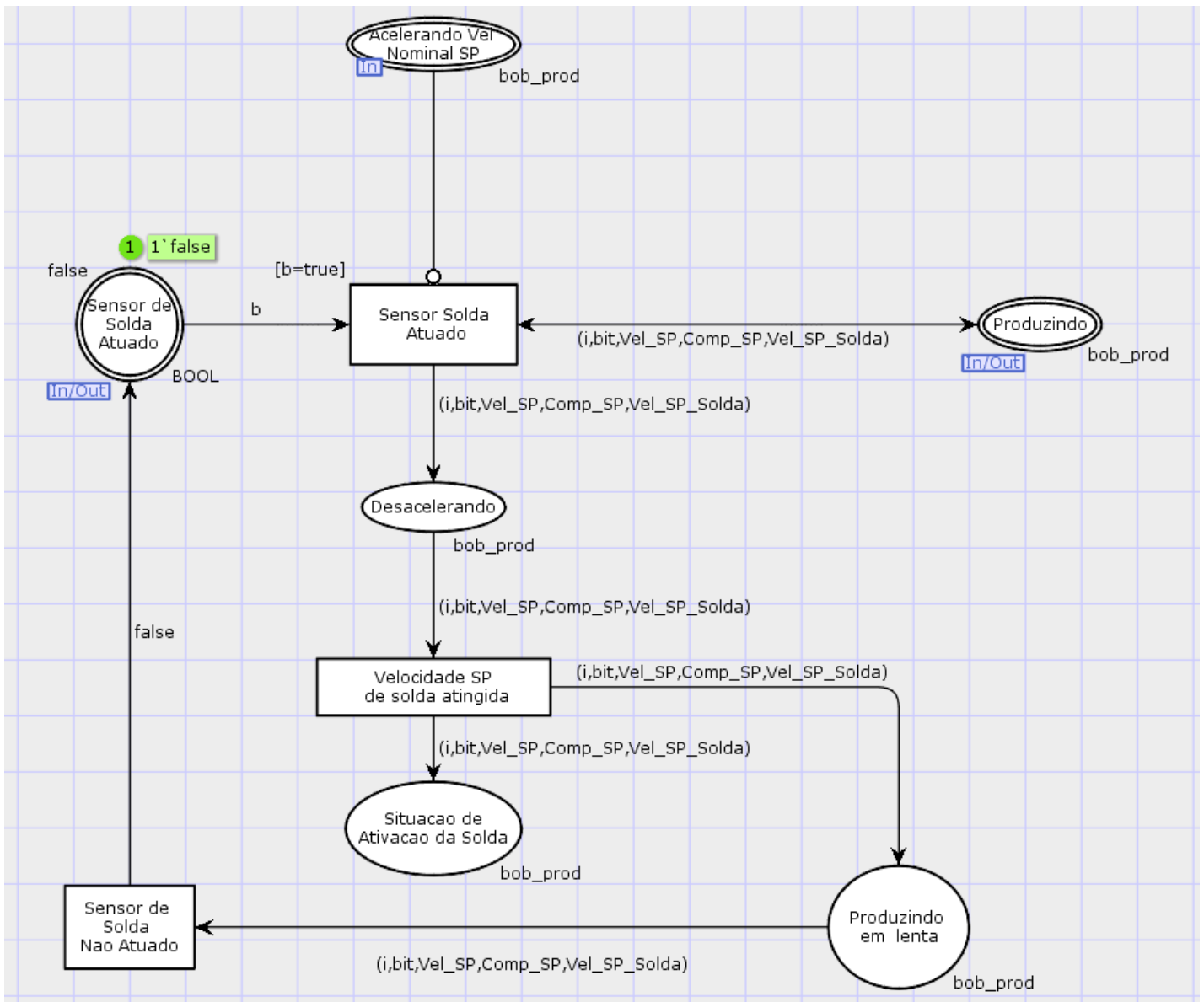
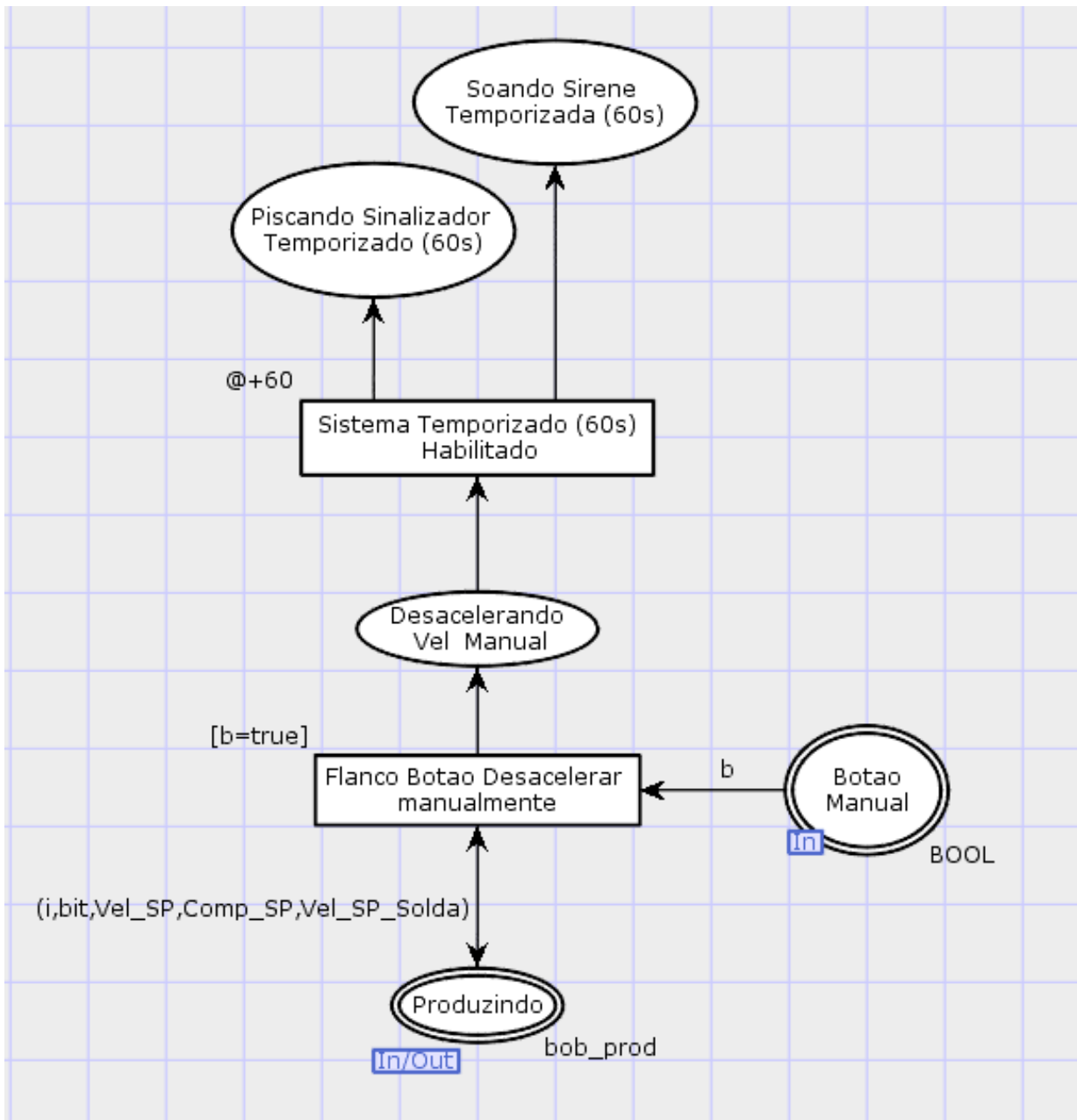


Figura 45: Sub-página 5 (Detecção e redução de velocidade para passagem de solda) [Autor]

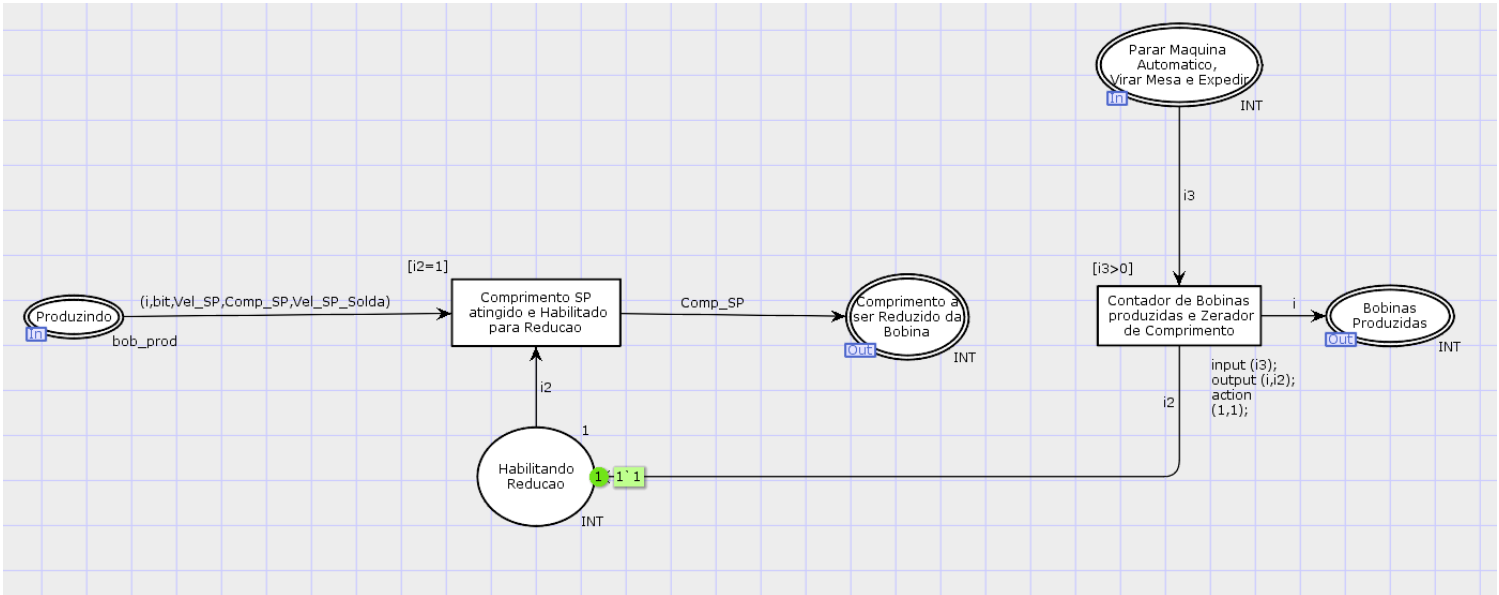
Durante a produção, o operador poderá apertar o botão de redução de velocidade, caso queira observar o equipamento tecnicamente por algum motivo. Na sub-página 6 (Figura 46), é realizada a redução de velocidade utilizando a variável “b” através da transição “Flanco botão desacelerar manualmente”, caso exista acionamento do botão de redução de velocidade. Ao pressionar o botão, o equipamento irá desacelerar e será habilitada a transição de temporização “Sistema temporizado (60s) habilitado” e ativará o lugar “Soando a sirene temporizada (60s)” e “Piscando sinalizador temporizado 60s” simultaneamente. A máquina irá acelerar automaticamente, ao final deste tempo, carregando a variável “Vel\_SP”. A subpágina no programa foi nomeada como “OPERAÇÃO MANUAL”.



**Figura 46: Sub-página 6 (Redução de velocidade pelo operador via botão manual) [Autor]**

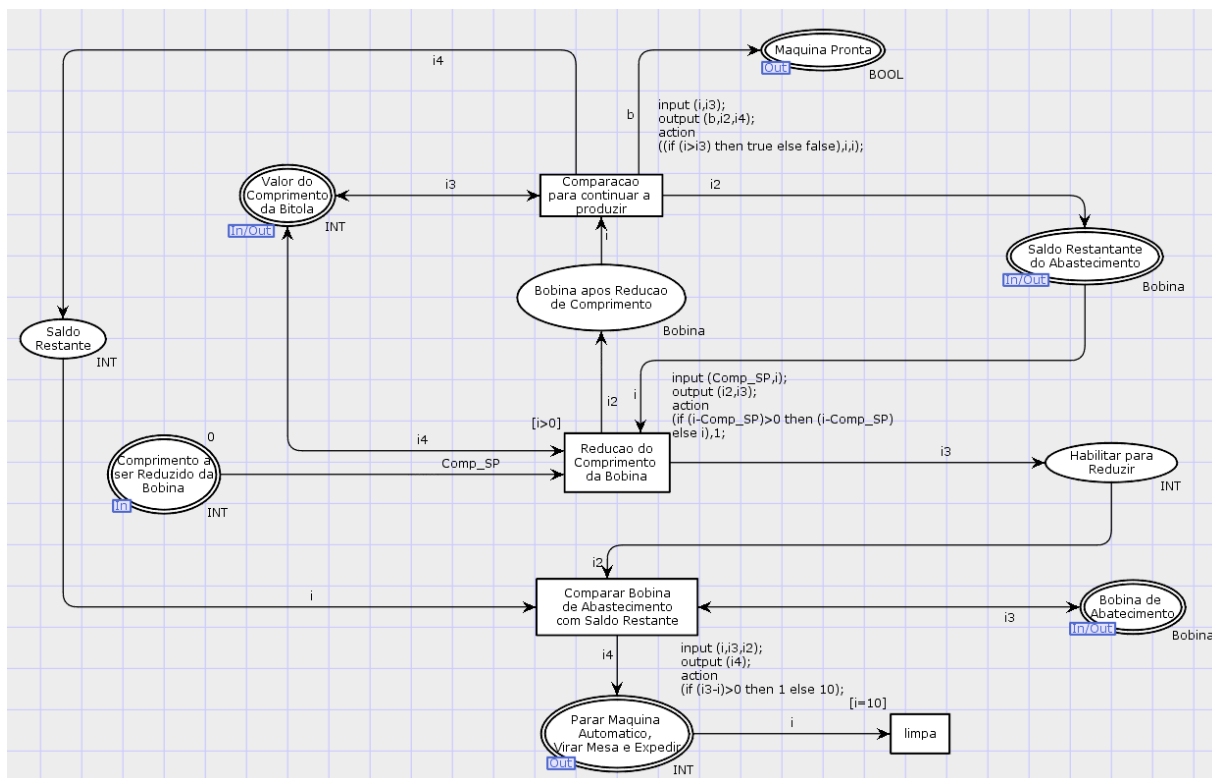
Na sub-página 7 (Figura 47), assim que o valor de *set point* do comprimento da bobina é atingido é habilitada a transição “Comprimento SP e habilitado para redução” e o valor da variável “Comp\_SP” é carregado para o lugar “Comprimento a ser reduzido da bobina”. A transição “Contador de bobinas produzidas e zerador de comprimento” é habilitada, carregando o valor 1 da variável “i” para o lugar “Bobinas produzidas”, este sendo o contador geral de bobinas produzidas do algoritmo. A sub página no programa foi nomeada como “BOBINA PRODUZIDA”





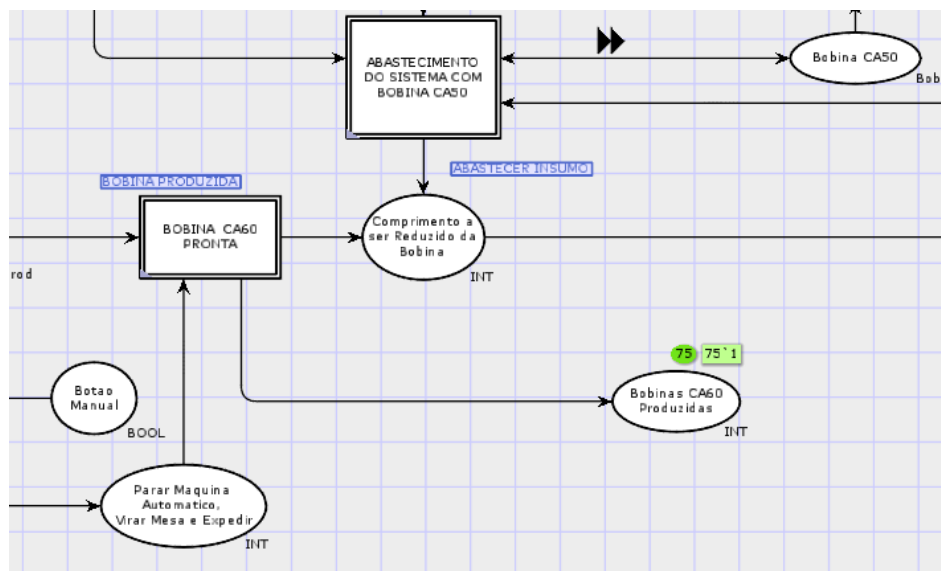
**Figura 47: Sub-página 7 (Comprimento de Set point atingido – Bobina CA60 pronta) [Autor]**

Na sub-página 8 (Figura 48), a partir da conclusão da produção da bobina, a transição “Redução do comprimento da bobina” é habilitada e realiza a redução do valor contido no abastecimento (variável “i”), subtraindo desta, o valor da variável “Comp\_SP”. Após a subtração, a resultante é armazenada na variável “i2” no lugar “Bobina após redução de comprimento” e reescreve-se este na variável “i”. Com o valor atual revisado no abastecimento, tem-se através da variável “i3”, o valor de set point de comprimento da próxima bobina a ser produzida. Na transição “Comparação para continuar a produzir” efetua-se comparação afim de descobrir se o valor do abastecimento é maior do que o valor de comprimento necessário para produzir a próxima bobina. Caso seja satisfatória a comparação, o lugar “Máquina pronta” receberá o valor verdadeiro na variável booleana “b”, permitindo nova produção. A subpágina no programa foi nomeada como “SUBTRAÇÃO INSUMO”



**Figura 48: Sub-página 8 (Subtração de insumo CA50 no abastecimento após produção da bobina CA60) [Autor]**

Na figura 49, foi desenvolvido um totalizador de bobinas produzidas no lugar “Bobinas CA60 produzidas”. Para o abastecimento de 1.000.000 de metros de CA50, houve uma resultante de 75 bobinas CA60, produzida da bitola B56.



**Figura 49: Totalizador de Produção de Bobina CA60[Autor]**

### 4.3 Resultados alcançados do modelo

Para o processamento do modelo e a análise de suas propriedades, foi feita a simulação de análise do espaço de estados com 1.000.000 metros no abastecimento do algoritmo e alcançado o número de 974 Steps. Foram produzidas 75 bobinas, restando no abastecimento 10694 metros, inferior aos 13.369 metros, necessários para produzir a próxima.

O modelo mostrou-se **alcançável** na árvore de alcançabilidade obtendo-se 87.726 nós, 221.234 arcos fortemente conectados e um tempo de processamento de 55 segundos. Quanto a análise de vivacidade e bloqueio, a rede é dita **viva e sem bloqueio “dead lock”**, pois a partir de qualquer estado alcançado existe uma trajetória na qual uma transição qualquer possa disparar. O sistema é L2-viva, pois dado um inteiro positivo  $K$ , pode ser disparado pelo menos  $K$  vezes em alguma sequência de disparo. Na simulação tivemos o apontamento de 5 variáveis como “morta”, porém devem ser desconsideradas pois estão relacionadas ao botão de redução de velocidade e o sinal de passagem de solda, ambos são sinais externos que não poderiam ser disparados na opção automática do simulador. O modelo é considerado **Terminado** pois tem sequências de ocorrência finita e nenhuma delas é infinita “*Fairness Properties*”, isto porque em algum momento no modelo, uma transição de “baixo saldo de abastecimento” é ativada de forma que impeça um novo disparo. O modelo é considerado **limitado “boundedness” e seguro** pois o número de marcas ou fichas em cada lugar não excede o número do valor  $K$  inicial, tendo seu valor de “upper” do relatório menor ou igual a  $K$ . O modelo é **reversível** pois é capaz de retornar ao estado de origem ou inicial. Com esses resultados demonstra que o modelo satisfaz as propriedades desejadas para o sistema. O relatório completo da simulação encontra-se no **ANEXO A**.

## 5 ALTERAÇÃO NA LÓGICA DO CONTROLADOR DA MÁQUINA

### 5.1 Conversão do modelo de Redes de Petri e programação para controlador S7 300 existente

A partir do modelo testado em Redes de Petri no CPN tools, foi implementado o sistema desenvolvido no controlador S7 300 da Siemens, em uma das máquinas de laminação a frio de uma siderúrgica e após os resultados alcançados, replicado para as demais máquinas. Não existe disponível no mercado uma ferramenta que converta automaticamente um programa do Cpn Tools em Redes de Petri para linguagem convencional de controlador. Para efetuar tal, é necessário conhecimento teórico de conversão. Na Figura 50 é apresentado um modelo teórico de conversão:

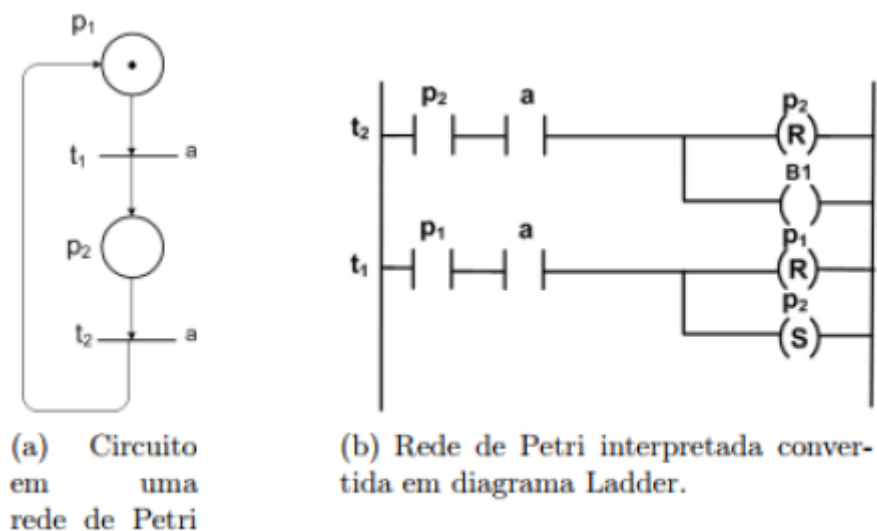


Figura 50: Conversão teórica Rede de Petri x Ladder[8]

Como exemplo de conversão prático do modelo desenvolvido, a Figura 51 mostra a conversão da sub-página 2(Ligar e Desligar o Sistema) mostrado em Redes de Petri na Figura 42 do capítulo 4. Para realizar a conversão para *Ladder* é necessário utilizar funções de operações aritméticas, selo e comparadores.

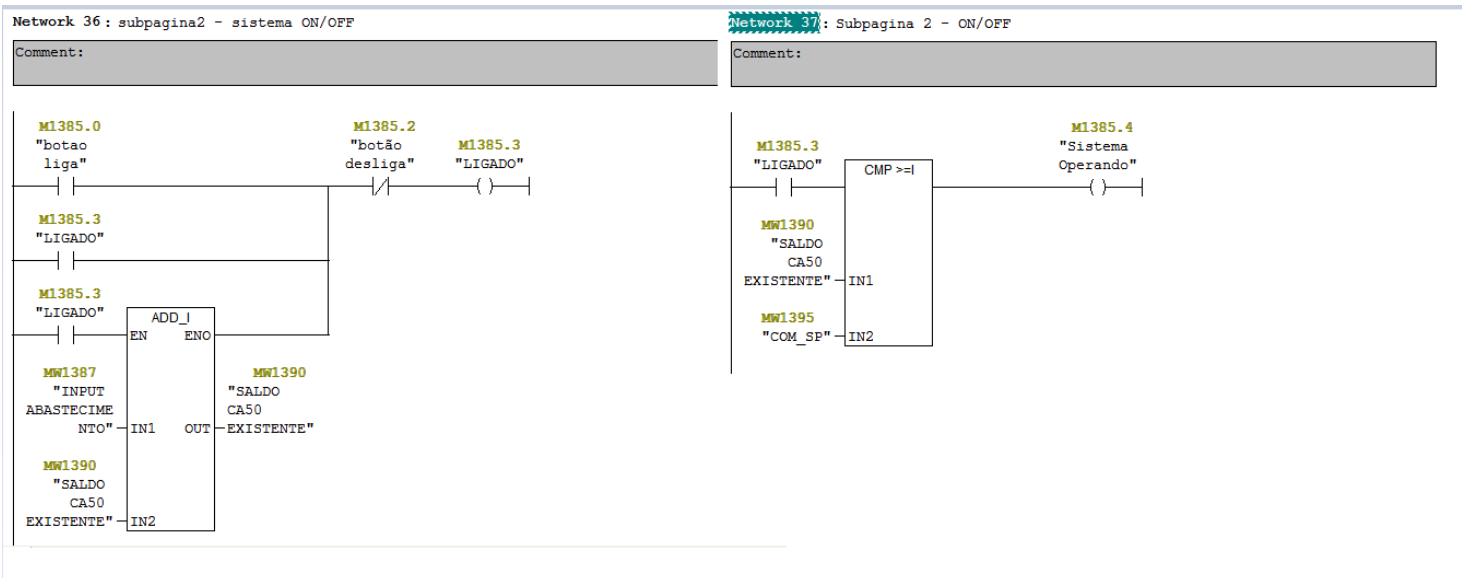


Figura 51: Conversão da sub-página 2 (RdP) para Ladder no controlador[Autor]

Para realizar o controle do sistema de velocidade e comprimento, foi criado a FC1000 e suas variáveis criadas na DB1000. A FC1000 será chamada no bloco principal OB1 Network 7:

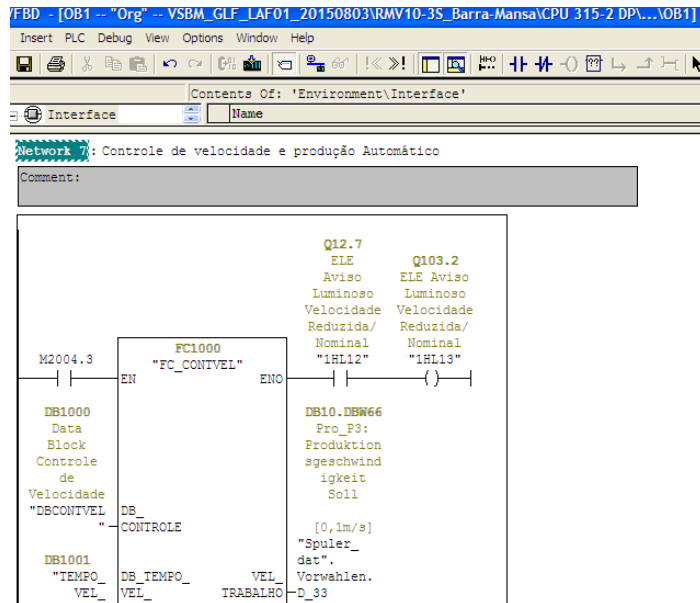


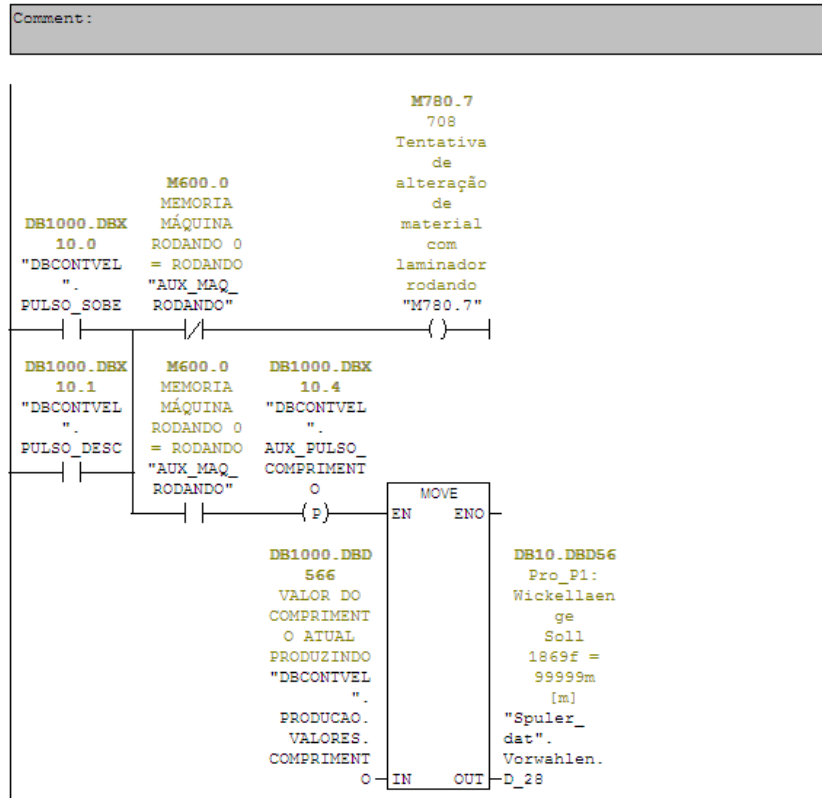
Figura 52: Bloco FC1000 sendo chamado na OB1[Autor]

A Programação da FC1000 foi realizada na linguagem STL, utilizando comandos próprios da linguagem. A programação completa encontra-se no ANEXO B.

Para ser feita a programação na FC1000, utilizou-se variáveis na DB1000, e os temporizadores utilizando a DB1001, DB1002, através da UDT1000. A programação completa encontra-se no ANEXO C.

Algumas proteções foram desenvolvidas em *Ladder* na FC1001, a fim de deixar o sistema com boa confiabilidade, além de contador de produção por turno:

Network 7 : 708 Tentativa de alteração de material com laminador rodando



Network 4 : AUXILIAR ZERAR CALCULADOR CONTROLE DE PRODUÇÃO

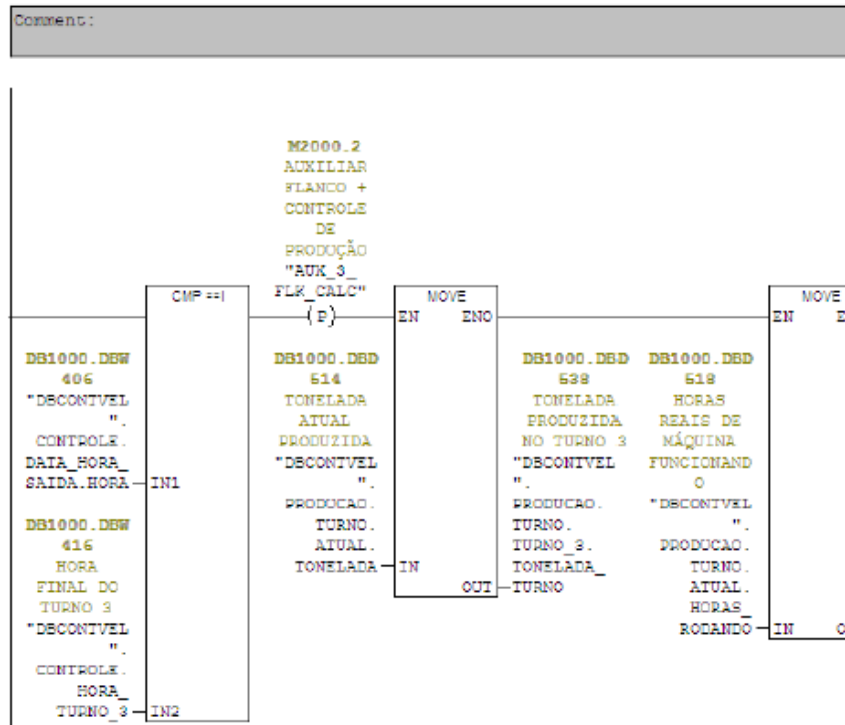


Figura 53: Proteção para que o operador não altere a bitola com máquina operando e contador[Autor]

## 5.2 Alterações de campo necessárias.

Para que fosse possível concluir as atividades do pareto, apresentado na metodologia DMAIC capítulo 3 e implementar a lógica no S7 300, alguns itens tiveram que ser alterados no campo, instalando novos cartões de entrada e saída digital.

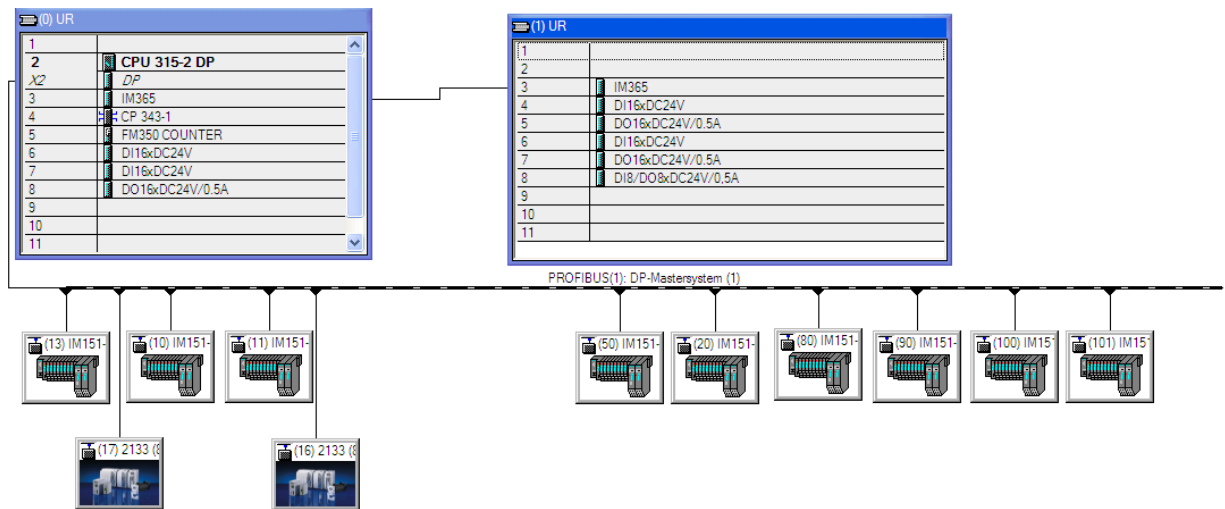


Figura 54: Arquitetura de Hardware de Automação[Autor]

Um outro ponto que foi analisado e alterado, foram os parâmetros dos inversores de frequência dos blocos, onde identificou-se que os mesmos estavam com 73% da capacidade nominal, podendo assim ter o seu parâmetro de desaceleração e aceleração ajustado.

A partir do que foi desenvolvido em lógica de automação do CLP S7 300 Siemens com receita, colocou-se as variáveis em interface com a IHM OP17, através de software Protool, afim de identificar o material que está sendo produzido. A partir da detecção do momento instantâneo da máquina, como já mencionado anteriormente, o sistema toma a decisão: acelera, freia, estabiliza ou para o equipamento, gerando alarmes visuais e sonoros, sempre que necessário para garantir a segurança das pessoas envolvidas. Para tal, foi configurado a IHM e instalado alarmes sonoros e visuais:

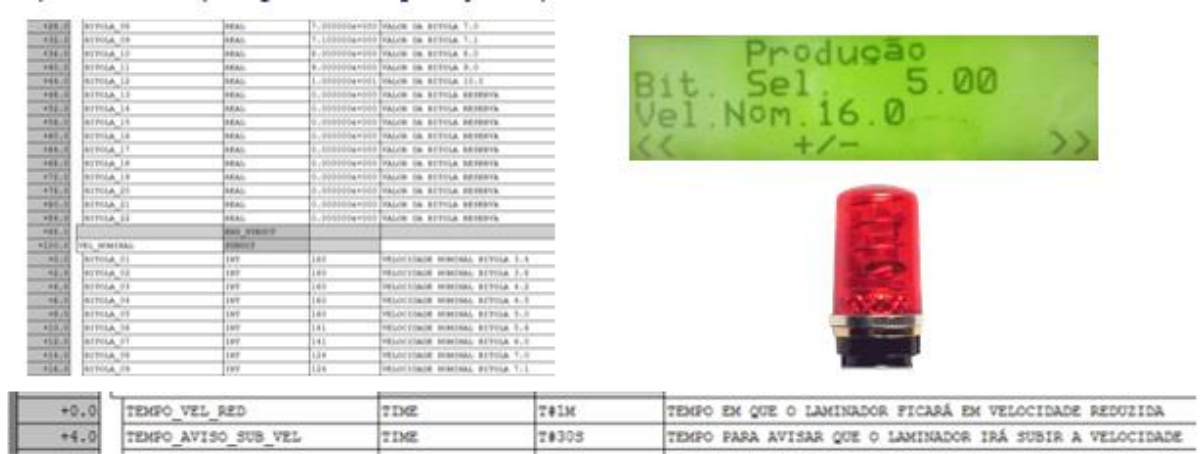


Figura 55: Variáveis inseridas na IHM e alarmes sonoro e visual instalado [Autor]

Para solucionar o problema de tempo curto ou longo para a passagem de solda e também automatizar esse momento, para que não fique somente na percepção do humano o processo da passagem de solda, foi desenvolvido em lógica de automação do CLP S7 300 Siemens, um novo sistema que identifica através de sensores, se a solda está passando no equipamento. Quando detectado que existe a passagem de solda, o equipamento reduz a velocidade para 5m/s e acelera novamente, após a saída da solda do último bloco de laminação do processo.



Figura 56: Instrumentação para automatizar passagem de solda [Autor]



## 6 RESULTADOS DMAIC

Após implementada a lógica de automação no controlador e realizadas modificações em campo, obteve-se um avanço de aproximadamente 20% de eficiência operacional no laminador a frio.

O processo consumiu em média 1039 segundos para produzir uma bobina, sendo que anteriormente esse valor era de 1234 segundos, como mostra a Figura 57:

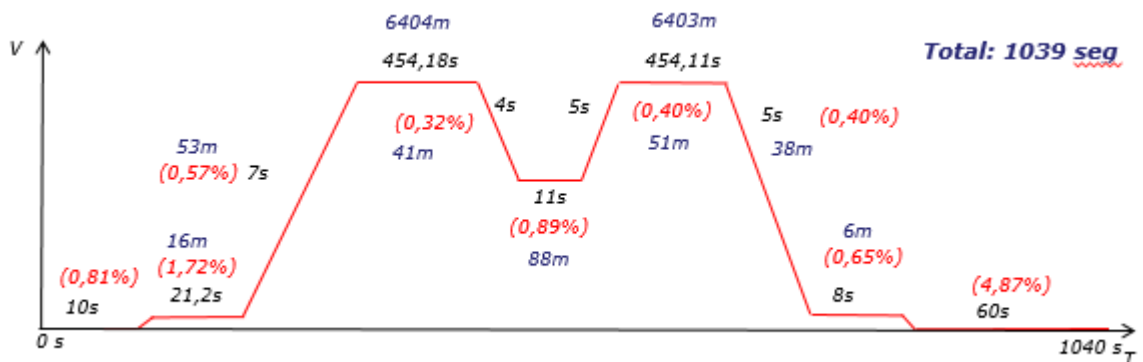


Figura 57: Curva do Processo depois das implementações (IBA) [Autor]

É possível observar na Figura 58, que durante as implementações das ações, houve um avanço parcial de 7%, saltando de uma média de 69,26% para 76,34% e após a conclusão das implementações, foi atingido o valor de 89,31% de índice de eficiência.

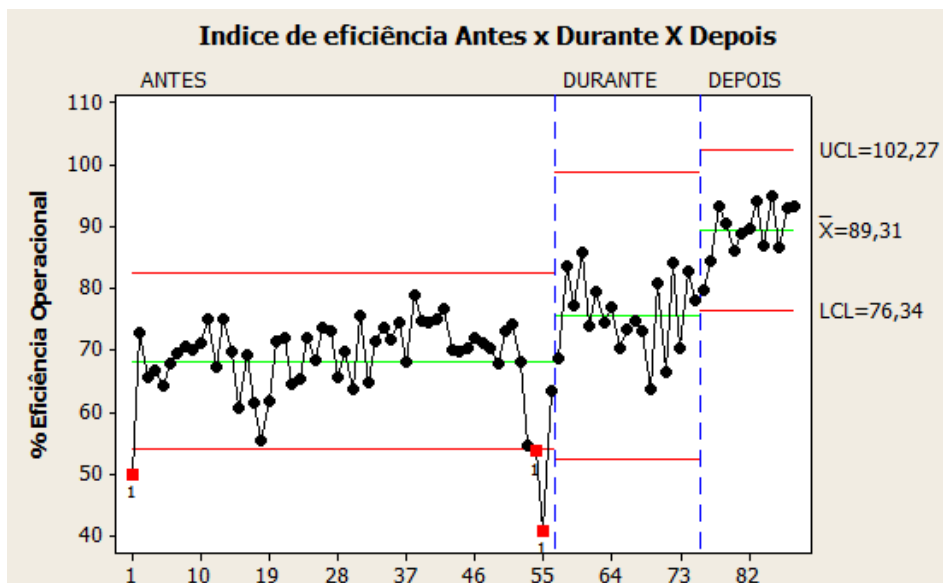


Figura 58: Gráfico de % de Eficiência depois das implementações[Autor]

No gráfico de boxplot (Figura 59), a variabilidade após as implementações oscilou entre 86% e 93%.

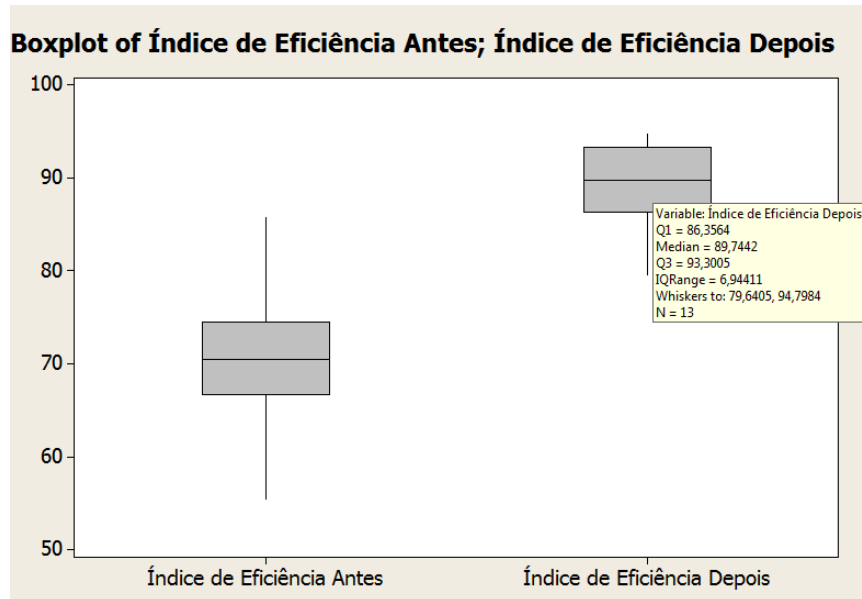
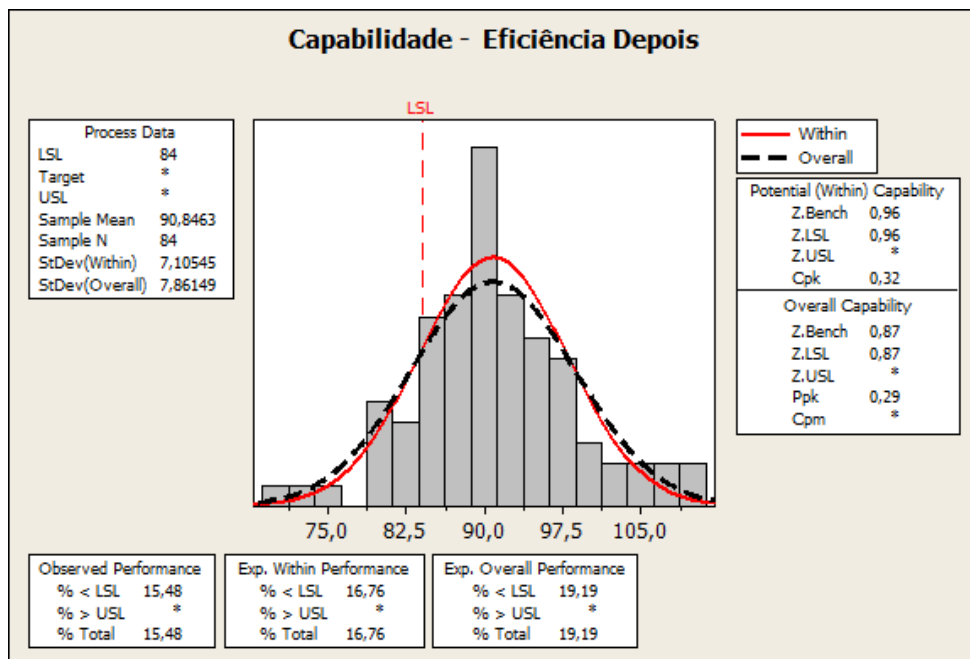


Figura 59: Gráfico Boxplot (Eficiência Antes x Depois) [Autor]

A Figura 60 (Capabilidade), mostra que o LSL de 84% anteriormente era pouco atingido. Após a implementação das ações, a média atingida foi de 90,8% e o PpK em 0,29. Antes das ações o mesmo era de -1,15 para o mesmo LSL. O PVALUE anteriormente menor que 0,005 agora está maior que 0,005, parâmetro este provando que o processo atingiu normalidade.



**P-value > 0,005 -**

Figura 60: Capabilidade do processo após implementações[Autor]

A Figura 61, mostra a evolução dos indicadores do OEE após as implementações. Apesar de o equipamento ainda não se encontrar em nível sigma, é possível observar que houve uma boa evolução. O OEE no início da pesquisa encontrava-se em 54,3%, valor este inferior à média dos equipamentos ao redor do mundo que giram em torno de 60%. Após a implementação do modelo, foi atingido o valor de OEE de 71%, valor este considerado muito bom para os patamares industriais. Plantas benchmarking no mundo resultam o valor de 85% [12]. A produtividade do laminador a frio aumentou em 38 toneladas por dia, 13.224 toneladas por ano.

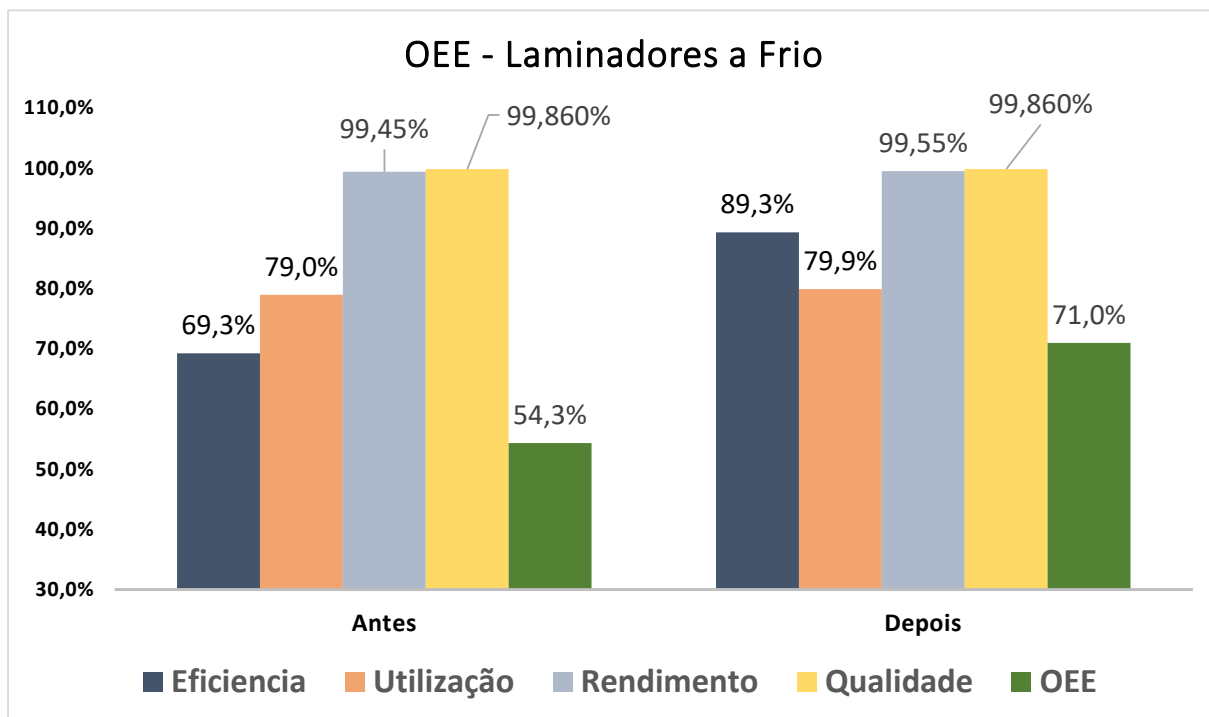


Figura 61: Resultados OEE[Autor]

## 7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A partir do objetivo desta dissertação, teve-se como principal meta o desenvolvimento de um método comum para tratativa de instabilidade de OEE no pilar de eficiência. Para tal concluímos que a metodologia DMAIC e Redes de Petri Colorida conseguem em conjunto direcionar de forma assertiva o desenvolvimento de um modelo lógico correto e otimizado a ser implementado no controlador lógico programável (CLP) do equipamento. Outro produto alcançado, foi encontrar através de modelagem de Redes de Petri, a melhor saúde e desempenho do controlador, com número de passos e ciclo de *scan* otimizados, sem *dead lock* e sem *loop*. Como objetivo secundário, esse tema mostrou o quanto é interessante metodologias de análise de engenharia de produção e automação estarem alinhadas para que seja possível encontrar resultados de campo positivo. Um ponto observado e conclusivo, é que o engenheiro de automação com atuação na área industrial, dificilmente possui o tempo necessário para realizar a modelagem antes de aplicar alterações no controlador, isso gera consequências negativas, pois dessa forma se realiza implementações no controlador e nem sempre é possível prever todas as variáveis e influências no sistema, tendo o mesmo que alterar sua modificação após acontecerem resultados não satisfatórios ou não completos. A modelagem possibilita mapear todas as alternativas possíveis do sistema e tratar um algoritmo para cada acontecimento.

Após as análises, ações e resultados apresentados e vivenciados, é possível concluir que um sistema de aumento de produtividade de OEE nos equipamentos através da automatização e otimização dos sistemas de velocidade otimiza “gaps”, facilita a gestão operacional e consegue através da tecnologia embarcada em CLPS e interface homem máquina, trazer resultados financeiros e operacionais muito significativos dentro da siderurgia, de forma que a máquina torne-se mais eficiente, com baixo custo de aquisição. A produtividade do laminador a frio aumentou em 38 toneladas por dia, 13.224 toneladas por ano.

A simulação do modelo em redes de Petri colorida, antes da implementação no controlador, prova que dessa forma é possível conhecer amplamente o processo e evita que se implemente lógica errada diretamente ao controlador. Além disso, para máquinas onde os profissionais não conhecem o sistema como um todo, o CPN TOOLS, ajuda a treinar esses profissionais, pois a linguagem do mesmo é mais amigável e didática do que o STL e SCL do controlador.

Como trabalhos futuros, sugere-se empregar esse sistema autônomo em outros maquinários que apresentem OEE baixo no pilar de índice de eficiência. Esse cenário pode

ocorrer em maquinários de outros setores como alimentício, automobilístico, petróleo, farmacêutico, etc.

Outra sugestão para trabalhos futuros seria o desenvolvimento de uma plataforma que pudesse permitir a conversão do modelo desenvolvido no CPN tools para a linguagem convencional de controlador automaticamente. Desta forma o engenheiro de automação poderia modelar o sistema e conseguiria implementar no controlador sem ter retrabalhos de conversão da lógica. Desta forma seria praticável modelar no dia a dia de um engenheiro de automação industrial.

## 8 REFERÊNCIAS

- [1]Busso, Christianne Matias and MIYAKE, Dario Ikuo. “**Análise da aplicação de indicadores alternativos ao Overall Equipment Effectiveness (OEE) na gestão do desempenho global de uma fábrica**”, Associação Brasileira de engenharia de Produção, Prod. [online]. 2013, vol.23, n.2, pp.205-225. Epub Oct 02, 2012. ISSN 01036513, em <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=396742052001>> Acesso em: 09/04/2018
- [2]J.Wang, Timed Petri Nets – “**Theory and Application**”, Kluwer Academic Publishers, 1998 (ISBN: 0792382706), em<<https://pdfs.semanticscholar.org/c7ea/9b8aae1d902f3d443f2e683705ae605b7124.pdf>> Acesso em: 09/04/2018
- [3]Jonsson, P. ; Lesshammar, M. , “**Evaluation and improvement of manufacturing performance measurement systems – the role of OEE**”. International Journal of Operations and Production Management, v.19, n.1, pp. 55-78, 1999.
- [4] Ljungberg, O. , “**Measurement of overall equipment effectiveness as a basis for TPM activities**”, International Journal of Operations & Production Management, v.18, n.5, pp. 495-507, 1998.
- [5]Muchiri, P.; Pintelon, L. “**Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion**”. International Journal of Production Research, v.46, n.13, pp. 3517-3535, 2008.
- [6] Amorim, G. , Balestrassi, P. P. , “**Six Sigma learning evaluation model using Bloom's**”, International Journal of Lean Six Sigma Quality & Reliability Management, 2017, Manuscript ID IJLSS-01-2017-0006.R1, Vol. 9 Issue: 1, pp.156-174
- [7] Linderman, K., Schroeder, R.G., Zaheer, S. and Choo, A.S. (2003), “**Six Sigma: a goal-theoretic perspective**”, Journal of Operations Management, Vol. 21, pp. 193–203.

[8] Francês, Carlos, **“Introdução às Redes de Petri”**, Universidade Federal do Pará – UFPA, Laboratório de Computação Aplicada, em <[http://www.dca.ufrn.br/~affonso/DCA0409/pdf/redes\\_de\\_petri.pdf](http://www.dca.ufrn.br/~affonso/DCA0409/pdf/redes_de_petri.pdf) > Acesso em: 09/04/2018

[9] Melo, Kelvin **“Vantagens e desvantagens do método seis sigma: uma abordagem teórica”**, Simpósio de Engenharia de Produção 2014, em <<http://docplayer.com.br/4818515-Vantagens-e-desvantagens-do-metodo-seis-sigma-uma-abordagem-teorica.html>> Acesso em: 09/04/2018

[10] Barroso, G. , Soares, J. **“Introdução às Redes Petri Coloridas Usando a Ferramenta CPN Tools”**, Departamento de Física – Universidade Federal do Ceará, 2016, em <[https://pt.slideshare.net/JarbasGuedes/redes-petri-tutorial-cpn-tools?from\\_action=save](https://pt.slideshare.net/JarbasGuedes/redes-petri-tutorial-cpn-tools?from_action=save)> Acesso em: 09/04/2018

[11] Filho, M. , Almeida, M. , **“Melhoria Contínua em um Processo de Manufatura: Utilização do Indicador de Eficácia Global de Equipamentos (OEE)”**, Congresso Virtual Brasileiro – Convibra 2014

[12] Silva, José Perdro. , **“OEE – A Forma de Medir a Eficácia dos Equipamentos”** , Website da Lean em Portugal, Setembro de 2009 , em <<http://leanemportugal.webs.com/artigoswhitepapers.htm> >, Acesso em 09/04/2018

[13] Salomão, Alexandre , **“OEE – Eficiência Global dos Equipamentos”** -, Revista Alimentare , 2016, em <<http://revistaalimentare.com.br/medir-a-eficiencia-dos-equipamentos> >., Acesso em 09/04/2018

[14] Pezeiro, Alberto, “**Conteúdo de certificação 6sigma Blackbelt**”, Seta desenvolvimento gerencial, 2014, São Paulo, Vol. 1 a 9.

[15] Rocha, Fábio, “**Desenvolvimento de um Sistema de Ventilação Forçada para secar o fio máquina na Laminação a Frio de Vergalhões**”, Dissertação de Mestrado, Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, 2012, em, <<http://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/3207>>, Acesso em 09/04/2018.

[16] Machado, Pedro, “**Metodologia de Modelagem CPN Aplicada a Análise de Desempenho de Sistemas de Comunicação baseados na Norma IEC 61850**”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 2015, 92 p, em <<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/267?locale-attribute=en>>, Acesso em 09/04/2018

[17] T.Murata, “**Petri nets: Properties, analysis and applications**” Proceedings of the IEEE, vol. 77, no. 4, pp. 541(580, 1989).

[18] NUNES, E. B. “**Propriedades Mecânicas e Caracterização Microestrutural na Soldagem do Aço Inoxidável Duplex UNS S31803 (SAF 2205).**”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2009, 203 p, em <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/15927>> , Acesso em 09/04/2018

[19] Siemens, “**SIMATIC S7 Programação Básica**”, Sitrain, São Paulo, 294 p., em <https://pt.slideshare.net/marcosromanholo7/s7-bsico/RK=1/RS=jnS7GRQIyOi6QRmNJcdKGuI3OSU->, Acesso em 09/04/2018

[20] Dieter, George E., “**Metalurgia Mecânica**” ; 2a Ed.; Guanabara Dois, 1981.part1, Rio de Janeiro, 653 p



[21] E. Bresciani Filho, “**Conformação plástica dos metais**”, Editora da Unicamp , 6ª edição, São Paulo, 2011, 258 p, em <  
<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf>>,  
Acesso em 09/04/2018

[22] Zurawski, R.; Zhou, MengChu: “**Petri nets and industrial applications**” - a **tutorial**. 1994.

[23] Jensen, Kurt; “**Coloured Petri Nets, Basic Concepts, Analyses Methods and Practical Use**” Volume 1 1997, Editora Springer

## 9 ANEXOS

### 9.1 ANEXO A - Simulação de análise de espaço de estados do modelo – CPN TOOLS

Observação 1: Foi feito a simulação no CPN TOOLS para 1.000.000,00 de metros, porém esta simulação alcançou 27 páginas.

Observação 2: Devido ao tamanho de páginas da simulação com 1.000.000,00 de metros de abastecimento, foi anexado a simulação com 50.000,00 metros.

CPN Tools state space report for:  
 /cygdrive/C/Documents and Settings/Windows/Desktop/OEE LAF - FINAL -  
 05-01-2018.cpn  
 Report generated: Mon Apr 9 08:25:27 2018

#### Statistics

---

##### State Space

Nodes: 467  
 Arcs: 1063  
 Secs: 0  
 Status: Full

##### Scc Graph

Nodes: 467  
 Arcs: 1063  
 Secs: 0

#### Boundedness Properties

---

##### Best Integer Bounds

	Upper	Lower
ABASTECER_INSUMO'Buffer_Saldo_Restante 1	1	0
BOBINA_PRODUZIDA'Habilitando_Reducao 1	2	0
Laminadores'Abastecimento_Bobina_CA50 1	1	0
Laminadores'Acelerando_Vel_Nominal_SP 1	1	0
Laminadores'Bitola_Definida 1	1	0
Laminadores'Bitola_Escolhida 1	1	1

Laminadores'	Bobina_CA50	1	0
		1	0
Laminadores'	Bobina_de_Abatecimento	1	0
		1	0
Laminadores'	Bobinas_CA60_Produzidas	1	0
		4	0
Laminadores'	Botao_Manual	1	0
		0	0
Laminadores'	Comprimento_a_ser_Reduzido_da_Bobina	1	0
		1	0
Laminadores'	Desliga	1	0
Laminadores'	Habilitar_para_mudar_de_Bitola	1	0
		1	0
Laminadores'	Liga	1	0
Laminadores'	Maquina_Pronta	1	0
		1	0
Laminadores'	Parar_Maquina_Automatico	1	0
		2	0
Laminadores'	Produzindo	1	0
		1	0
Laminadores'	Saldo_Restante_do_Abastecimento	1	0
		1	0
Laminadores'	Sensor_de_Solda_Atulado	1	1
		1	1
Laminadores'	Valor_do_Comprimento_da_Bitola	1	0
		1	0
ON'	Desligado	1	0
ON'	Ligado	1	0
ON'	Sistema_em_Operacao	1	0
		1	0
OPERACAO_MANUAL'	Desacelerando_Vel_Manual	1	0
		0	0
OPERACAO_MANUAL'	Piscando_Sinalizador_Temporizado	1	0
		0	0
OPERACAO_MANUAL'	Soando_Sirene_Temporizada	1	0
		0	0
RECEITA'	Comprimento_SP_definido	1	0
		1	0
RECEITA'	Velocidade_Nominal_SP_definida	1	0
		1	0
RECEITA'	Velocidade_solda_SP_definida	1	0
		1	0
SELECAO_BITOLA'	Bitola_Escolhida_para_Comprimento	1	0
		1	0
SELECAO_BITOLA'	Bitola_Selecionada	1	0
		1	0
SELECAO_BITOLA'	Bitolas	12	12
SELECAO_BITOLA'	Coprimento_da_Bobina	1	0
		1	0
SOLDA'	Desacelerando	1	0
SOLDA'	Produzindo_em_lenta	1	0
		0	0
SOLDA'	Situacao_de_Ativacao_da_Solda	1	0
		0	0
SUBTRACAO_INSUMO'	Bobina_apos_Reducao_de_Comprimento	1	0

```

                1          0
SUBTRACAO_INSUMO'Habilitar_para_Reduzir 1
                2          0
SUBTRACAO_INSUMO'Saldo_Restante 1
                2          0

Best Upper Multi-set Bounds
  ABASTECER_INSUMO'Buffer_Saldo_Restante 1
                1`0++
1`9893
  BOBINA_PRODUZIDA'Habilitando_Reducão 1
                2`1
  Laminadores'Abastecimento_Bobina_CA50 1
                1`50000
  Laminadores'Accelerando_Vel_Nominal_SP 1
                1`(23262,b56,14.1,13369,5.0)++
1`(36631,b56,14.1,13369,5.0)++
1`(50000,b56,14.1,13369,5.0)
  Laminadores'Bitola_Definida 1
                1`(23262,b56)++
1`(36631,b56)++
1`(50000,b56)
  Laminadores'Bitola_Escolhida 1
                1`b56
  Laminadores'Bobina_CA50 1
                1`50000
  Laminadores'Bobina_de_Abatecimento 1
                1`50000
  Laminadores'Bobinas_CA60_Produzidas 1
                4`1
  Laminadores'Botao_Manual 1
                empty
  Laminadores'Comprimento_a_ser_Reduzido_da_Bobina 1
                1`0++
1`13369
  Laminadores'Desliga 1
                1`true
  Laminadores'Habilitar_para_mudar_de_Bitola 1
                1`false
  Laminadores'Liga 1 1`true
  Laminadores'Maquina_Pronta 1
                1`false++
1`true
  Laminadores'Parar_Maquina_Automatico 1
                2`1++
1`10
  Laminadores'Produzindo 1
                1`(23262,b56,14.1,13369,5.0)++
1`(36631,b56,14.1,13369,5.0)++
1`(50000,b56,14.1,13369,5.0)
  Laminadores'Saldo_Restante_do_Abastecimento 1
                1`9893++
1`23262++
1`36631++
1`50000
  Laminadores'Sensor_de_Solda_Atulado 1

```

```

1`false
Laminadores'Valor_do_Comprimento_da_Bitola 1
1`13369
ON'Desligado 1 1`true
ON'Ligado 1 1`true
ON'Sistema_em_Operacao 1
1`true
OPERACAO_MANUAL'Desacelerando_Vel_Manual 1
empty
OPERACAO_MANUAL'Piscando_Sinalizador_Temporizado 1
empty
OPERACAO_MANUAL'Soando_Sirene_Temporizada 1
empty
RECEITA'Comprimento_SP_definido 1
1`(23262,b56,14.1,13369)++
1`(36631,b56,14.1,13369)++
1`(50000,b56,14.1,13369)
RECEITA'Velocidade_Nominal_SP_definida 1
1`(23262,b56,14.1)++
1`(36631,b56,14.1)++
1`(50000,b56,14.1)
RECEITA'Velocidade_solda_SP_definida 1
1`(23262,b56,14.1,13369,5.0)++
1`(36631,b56,14.1,13369,5.0)++
1`(50000,b56,14.1,13369,5.0)
SELECAO_BITOLA'Bitola_Escolhida_para_Comprimento 1
1`b56
SELECAO_BITOLA'Bitola_Selecionada 1
1`(23262,b56)++
1`(36631,b56)++
1`(50000,b56)
SELECAO_BITOLA'Bitolas 1
1`b34++
1`b38++
1`b42++
1`b45++
1`b50++
1`b56++
1`b60++
1`b70++
1`b71++
1`b80++
1`b90++
1`b100
SELECAO_BITOLA'Comprimento_da_Bobina 1
1`23262++
1`36631++
1`50000
SOLDA'Desacelerando 1
empty
SOLDA'Produzindo_em_lenta 1
empty
SOLDA'Situacao_de_Ativacao_da_Solda 1
empty
SUBTRACAO_INSUMO'Bobina_apos_Reducao_de_Comprimento 1
1`9893++

```

```

1`23262++
1`36631++
1`50000
    SUBTRACAO_INSUMO'Habilitar_para_Reduzir 1
        2`1
    SUBTRACAO_INSUMO'Saldo_Restante 1
        1`9893++

```

```

1`23262++
1`36631++
1`50000

```

Best Lower Multi-set Bounds

```

ABASTECER_INSUMO'Buffer_Saldo_Restante 1
    empty
BOBINA_PRODUZIDA'Habilitando_Reducão 1
    empty
Laminadores'Abastecimento_Bobina_CA50 1
    empty
Laminadores'Acelerando_Vel_Nominal_SP 1
    empty
Laminadores'Bitola_Definida 1
    empty
Laminadores'Bitola_Escolhida 1
    1`b56
Laminadores'Bobina_CA50 1
    empty
Laminadores'Bobina_de_Abatecimento 1
    empty
Laminadores'Bobinas_CA60_Produzidas 1
    empty
Laminadores'Botao_Manual 1
    empty
Laminadores'Comprimento_a_ser_Reduzido_da_Bobina 1
    empty
Laminadores'Desliga 1
    empty
Laminadores'Habilitar_para_mudar_de_Bitola 1
    empty
Laminadores'Liga 1
    empty
Laminadores'Maquina_Pronta 1
    empty
Laminadores'Parar_Maquina_Automatico 1
    empty
Laminadores'Produzindo 1
    empty
Laminadores'Saldo_Restante_do_Abastecimento 1
    empty
Laminadores'Sensor_de_Solda_Atulado 1
    1`false
Laminadores'Valor_do_Comprimento_da_Bitola 1
    empty
ON'Desligado 1
    empty
ON'Ligado 1
    empty
ON'Sistema_em_Operacao 1
    empty
OPERACAO_MANUAL'Desacelerando_Vel_Manual 1

```

```

empty
OPERACAO_MANUAL'Piscando_Sinalizador_Temporizado 1
empty
OPERACAO_MANUAL'Soando_Sirene_Temporizada 1
empty
RECEITA'Comprimento_SP_definido 1
empty
RECEITA'Velocidade_Nominal_SP_definida 1
empty
RECEITA'Velocidade_solda_SP_definida 1
empty
SELECAO_BITOLA'Bitola_Escolhida_para_Comprimento 1
empty
SELECAO_BITOLA'Bitola_Selecionada 1
empty
SELECAO_BITOLA'Bitolas 1
1`b34++
1`b38++
1`b42++
1`b45++
1`b50++
1`b56++
1`b60++
1`b70++
1`b71++
1`b80++
1`b90++
1`b100
SELECAO_BITOLA'Coprimento_da_Bobina 1
empty
SOLDA'Desacelerando 1
empty
SOLDA'Produzindo_em_lenta 1
empty
SOLDA'Situacao_de_Ativacao_da_Solda 1
empty
SUBTRACAO_INSUMO'Bobina_apos_Reducao_de_Comprimento 1
empty
SUBTRACAO_INSUMO'Habilitar_para_Reduzir 1
empty
SUBTRACAO_INSUMO'Saldo_Restante 1
empty

```

Home Properties

-----  
 ----

Home Markings  
 None

Liveness Properties

-----  
 ----

## Dead Markings

10 [467,466,458,457,453,...]

## Dead Transition Instances

OPERACAO\_MANUAL'Flanco\_Botao\_Desacelerar\_manualmente 1  
OPERACAO\_MANUAL'Sistema\_Temporizado 1  
SELECAO\_BITOLA'Mudar\_Bitola 1  
SOLDA'Sensor\_Solda\_Atulado 1  
SOLDA'Sensor\_de\_Solda\_Nao\_Atulado 1  
SOLDA'Velocidade\_SP\_de\_solda\_atingida 1

## Live Transition Instances

None

## Fairness Properties

-----  
-----

No infinite occurrence sequences.



## 9.2 ANEXO B - Programação da FC1000 no controlador (Controle de velocidade, comprimento, alarmes)

```

it Insert PLC Debug View Options Window Help
FUNCTION FC 1000 : VOID
TITLE =
//KNOW_HOW_PROTECT
AUTHOR : JOSE HUGO
FAMILY : CONTROLE
NAME : CONTVEL
VERSION : 0.1

VAR_INPUT
  DBCONTVEL: BLOCK_DB ; //DATA BLOCK DE CONTROLE DO SISTEMA DE VELOCIDADES
  DB_TEMPO_VEL_SUBIDA : BLOCK_DB ; //DATA BLOCK DOS TEMPORIZADORES PARA SUBIDA DE VELOCIDADE
  DB_TEMPO_AVISO_SUBIDA : BLOCK_DB ; //DATA BLOCK DOS TEMPORIZADORES PARA AVISO DE SUBIDA DE VELOCIDADE
  VEL_REAL : WORD ; //VELOCIDADE REAL DA MÁQUINA
  MAQ_RODANDO : BOOL ; //STATUS DE MÁQUINA RODANDO
END_VAR
VAR_OUTPUT
  VEL_TRABALHO : INT ; //VELOCIDADE DE TRABALHO
  VEL_REDUZIDA : INT ; //VELOCIDADE REDUZIDA
  MASSA_LINEAR : REAL ; //MASSA LINEAR DO MATERIAL PRODUZIDO (Kg/m)
  PROD_PADRAO : REAL ; //PRODUTIVIDADE PADRÃO DO MATERIAL PRODUZIDO (T/h)
  SINAL_LUMINOSO : BOOL ; //PULSO SINAL LUMINOSO
  SINAL_SONORO : BOOL ; //PULSO SINAL SONORO
  SELECAO_ROLINHO : BOOL ; //SINAL QUANDO SELECIONADO VALORES DE PRODUÇÃO DE ROLINHOS
  COMPRIMENTO : DINT ; //VALOR DE COMPRIMENTO PADRAO (mts)
END_VAR
VAR_IN_OUT
  HAB_VEL_RED : BOOL ;
  STS_VEL_RED : BOOL ;
END_VAR
VAR_TEMP
  TMP_TEMPO_VEL_RED : TIME ; //TEMPO DE VELOCIDADE REDUZIDA
  TMP_TEMPO_SUB_VEL : TIME ; //TEMPO AVISO SUBIDA DE VELOCIDADE
  TMP_STATUS_VEL_RED : BOOL ; //AUXILIAR STATUS VELOCIDADE REDUZIDA
  TMP_STATUS_SUB_VEL : BOOL ; //AUXILIAR STATUS SUBIDA DE VELOCIDADE
  TMP_STATUS_VEL_SEL : BOOL ; //AUXILIAR STATUS VELOCIDADE ATUAL <> NOMINAL
  TMP_VEL_NOMINAL : INT ; //VELOCIDADE NOMINAL x 100
END_VAR
BEGIN
NETWORK
TITLE =

  OPN #DB_TEMPO_VEL_SUBIDA;
  L DBLG;
  L W#16#16;
  <>I ;
  JC ERRO;

  OPN #DB_TEMPO_AVISO_SUBIDA;
  L DBLG;
  L W#16#16;
  <>I ;
  JC ERRO;

  OPN #DB_CONTROLE;
  L DBLG;
  L W#16#2E4;
  <>I ;
  JC ERRO;

```

```

A      DBX  10.0;
AN     DBX  10.2;
=      DBX  10.4;

A      DBX  10.0;
=      DBX  10.2;

A      DBX  10.1;
AN     DBX  10.3;
=      DBX  10.5;

A      DBX  10.1;
=      DBX  10.3;

AN     #MAQ_RODANDO;
A      DBX  10.4;
JCN    SOBE;
L      DBW  0;
L      2;
+I     ;
T      DBW  0;
SOBE:  NOP  0;

AN     #MAQ_RODANDO;
A      DBX  10.5;
JCN    DESC;
L      DBW  0;
L      2;
-I     ;
T      DBW  0;
DESC:  NOP  0;

L      DBW  0;
L      42;
>I     ;
JC     ZERA;
TAK    ;
L      0;
<I     ;
JC     ZERA;

L      DBW  0;
L      18;
>=I    ;
=      #SELECAO_ROLINHO;

L      DBW  0;
SLW    3;
LAR1   ;
L      DBW  0;
L      2;
*I     ;
SLW    3;
LAR2   ;

L      DBD  [AR2,P#12.0];
T      DBD  2;
L      DBW  [AR1,P#100.0];
T      DBW  6;
L      DBW  [AR1,P#144.0];
T      DBW  8;
L      DBD  [AR2,P#188.0];
T      #MASSA_LINEAR;

```

```

L   DBD [AR2,P#276.0];
T   #PROD_PADRAO;
L   DBD [AR2,P#652.0];
T   #COMPRIMENTO;

L   DBD 364;
T   #TMP_TEMPO_VEL_RED;

L   DBD 368;
T   #TMP_TEMPO_SUB_VEL;

L   DBW 6;
T   #VEL_TRABALHO;
L   100;
*I  ;
T   #TMP_VEL_NOMINAL;

L   DBW 8;
T   #VEL_REDUZIDA;

A   #MAQ_RODANDO;
A(  ;
O   #HAB_VEL_RED;
O   ;
A   #STS_VEL_RED;
A(  ;
L   #VEL_REAL;
L   #TMP_VEL_NOMINAL;
<I  ;
)   ;
)   ;
=   #TMP_STATUS_VEL_SEL;

CALL SFB 4 , #DB_TEMPO_VEL_SUBIDA (
      IN0          := #TMP_STATUS_VEL_SEL,
      IN1          := #TMP_TEMPO_VEL_RED,
      OUT2         := #TMP_STATUS_VEL_RED);

CALL SFB 4 , #DB_TEMPO_AVISO_SUBIDA (
      IN0          := #TMP_STATUS_VEL_SEL,
      IN1          := #TMP_TEMPO_SUB_VEL,
      OUT2         := #TMP_STATUS_SUB_VEL);

A   #TMP_STATUS_VEL_SEL;
A(  ;
A   #TMP_STATUS_SUB_VEL;
A   M 99.3;
O   ;
AN  #TMP_STATUS_SUB_VEL;
A   M 99.5;
)   ;
=   #SINAL_LUMINOSO;

A   #TMP_STATUS_SUB_VEL;
=   #SINAL_SONORO;

A   #TMP_STATUS_VEL_RED;
R   #HAB_VEL_RED;
R   #STS_VEL_RED;
SET ;
SAVE ;
BEU ;
ZERA: NOP 0;
L   0;
T   DBW 0;
CLR ;
SAVE ;
BEU ;

```

```
ERRO: NOP    0;
L    0.000000e+000;
T    DBD     2;
T    #MASSA_LINEAR;
T    #PROD_PADRAO;
L    W#16#0;
T    DBW     6;
T    DBW     8;
T    #VEL_TRABALHO;
T    #VEL_REDUZIDA;
CLR   ;
=    #SINAL_LUMINOSO;
=    #SINAL_SONORO;
=    #HAB_VEL_RED;
=    #STS_VEL_RED;
SAVE  ;
END_FUNCTION
```

### 9.3 ANEXO C - UDT1000 – variáveis declaradas no controlador FC1000

Address	Name	Type	Initial value	Comment
0.0		STRUCT		
+0.0	INDICE	INT	0	VALOR DO INDICE DE BITOLAS
+2.0	BITOLA	REAL	0.000000e+000	VALOR DA BITOLA SELECIONADA
+6.0	VELO_NOMIN	INT	0	VALOR DA VELOCIDADE NOMINAL REFERENCIADA A BITOLA SELECIONADA
+8.0	VELO_REDUZ	INT	0	VALOR DA VELOCIDADE REDUZIDA REFERENCIADA A BITOLA SELECIONADA
+10.0	PULSO_SOBE	BOOL	FALSE	
+10.1	PULSO_DESC	BOOL	FALSE	
+10.2	AUX_PULSO_SOBE	BOOL	FALSE	
+10.3	AUX_PULSO_DESC	BOOL	FALSE	
+10.4	AUX_PULSO_COMPRIMENTO	BOOL	FALSE	
+10.5	AUX_RESERVA_01	BOOL	FALSE	
+12.0	BITOLAS	STRUCT		
+0.0	BITOLA_01	REAL	3.400000e+000	VALOR DA BITOLA 3.4
+4.0	BITOLA_02	REAL	3.800000e+000	VALOR DA BITOLA 3.8
+8.0	BITOLA_03	REAL	4.200000e+000	VALOR DA BITOLA 4.2
+12.0	BITOLA_04	REAL	4.500000e+000	VALOR DA BITOLA 4.5
+16.0	BITOLA_05	REAL	5.000000e+000	VALOR DA BITOLA 5.0
+20.0	BITOLA_06	REAL	5.600000e+000	VALOR DA BITOLA 5.6
+24.0	BITOLA_07	REAL	6.000000e+000	VALOR DA BITOLA 6.0
+28.0	BITOLA_08	REAL	7.000000e+000	VALOR DA BITOLA 7.0
+32.0	BITOLA_09	REAL	7.100000e+000	VALOR DA BITOLA 7.1
+36.0	BITOLA_10	REAL	8.000000e+000	VALOR DA BITOLA 8.0
+40.0	BITOLA_11	REAL	9.000000e+000	VALOR DA BITOLA 9.0
+44.0	BITOLA_12	REAL	1.000000e+001	VALOR DA BITOLA 10.0
+48.0	BITOLA_13	REAL	1.100000e+001	VALOR DA BITOLA RESERVA
+52.0	BITOLA_14	REAL	1.200000e+001	VALOR DA BITOLA RESERVA
+56.0	BITOLA_15	REAL	1.300000e+001	VALOR DA BITOLA RESERVA
+60.0	BITOLA_16	REAL	1.400000e+001	VALOR DA BITOLA RESERVA
+64.0	BITOLA_17	REAL	1.500000e+001	VALOR DA BITOLA RESERVA
+68.0	BITOLA_18	REAL	4.200000e+000	VALOR DA BITOLA PARA ROLINHO
+72.0	BITOLA_19	REAL	5.000000e+000	VALOR DA BITOLA PARA ROLINHO
+76.0	BITOLA_20	REAL	6.000000e+000	VALOR DA BITOLA PARA ROLINHO
+80.0	BITOLA_21	REAL	7.000000e+000	VALOR DA BITOLA RESERVA PARA ROLINHO
+84.0	BITOLA_22	REAL	7.100000e+000	VALOR DA BITOLA RESERVA PARA ROLINHO
+88.0		END_STRUCT		
+100.0	VEL_NOMINAL	STRUCT		
+0.0	BITOLA_01	INT	160	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 3.4
+2.0	BITOLA_02	INT	160	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 3.8
+4.0	BITOLA_03	INT	160	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 4.2
+6.0	BITOLA_04	INT	160	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 4.5
+8.0	BITOLA_05	INT	160	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 5.0
+10.0	BITOLA_06	INT	141	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 5.6
+12.0	BITOLA_07	INT	141	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 6.0
+14.0	BITOLA_08	INT	124	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 7.0
+16.0	BITOLA_09	INT	124	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 7.1
+18.0	BITOLA_10	INT	93	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 8.0
+20.0	BITOLA_11	INT	91	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 9.0
+22.0	BITOLA_12	INT	76	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 10.0
+24.0	BITOLA_13	INT	0	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA RESERVA
+26.0	BITOLA_14	INT	0	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA RESERVA
+28.0	BITOLA_15	INT	0	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA RESERVA
+30.0	BITOLA_16	INT	0	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA RESERVA
+32.0	BITOLA_17	INT	0	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA RESERVA
+34.0	BITOLA_18	INT	150	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 4.2 ROLINHO
+36.0	BITOLA_19	INT	120	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 5.0 ROLINHO
+38.0	BITOLA_20	INT	65	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA 6.0 ROLINHO
+40.0	BITOLA_21	INT	0	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA RESERVA ROLINHO
+42.0	BITOLA_22	INT	0	VELOCIDADE NOMINAL BITOLA RESERVA ROLINHO
+44.0		END_STRUCT		

+144.0	VEL_REDUZIDA	STRUCT		
+0.0	BITOLA_01	INT	50	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 3.4
+2.0	BITOLA_02	INT	50	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 3.8
+4.0	BITOLA_03	INT	50	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 4.2
+6.0	BITOLA_04	INT	50	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 4.5
+8.0	BITOLA_05	INT	50	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 5.0
+10.0	BITOLA_06	INT	50	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 5.6
+12.0	BITOLA_07	INT	50	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 6.0
+14.0	BITOLA_08	INT	50	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 7.0
+16.0	BITOLA_09	INT	50	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 7.1
+18.0	BITOLA_10	INT	50	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 8.0
+20.0	BITOLA_11	INT	50	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 9.0
+22.0	BITOLA_12	INT	50	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 10.0
+24.0	BITOLA_13	INT	0	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA RESERVA
+26.0	BITOLA_14	INT	0	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA RESERVA
+28.0	BITOLA_15	INT	0	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA RESERVA
+30.0	BITOLA_16	INT	0	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA RESERVA
+32.0	BITOLA_17	INT	0	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA RESERVA
+34.0	BITOLA_18	INT	20	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 4.2 ROLINHO
+36.0	BITOLA_19	INT	20	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 5.0 ROLINHO
+38.0	BITOLA_20	INT	20	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA 6.0 ROLINHO
+40.0	BITOLA_21	INT	0	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA RESERVA ROLINHO
+42.0	BITOLA_22	INT	0	VELOCIDADE REDUZIDA BITOLA RESERVA ROLINHO
+44.0		END_STRUCT		
+364.0	CONTROLE	STRUCT		
+0.0	TEMPO_VEL_RED	TIME	T#1M	TEMPO EM QUE O LAMINADOR FICARÁ EM VELOCIDADE REDUZIDA
+4.0	TEMPO_AVISO_SUB_VEL	TIME	T#30S	TEMPO PARA AVISAR QUE O LAMINADOR IRÁ SUBIR A VELOCIDADE
+8.0	FUT_DATA_HORA_SYSTEMA	DATE_AND_TIME	DT#90-1-1-0:0:0.000	GRAVAR DATA E HORA DO SISTEMA
+16.0	DATA_HORA_ENTRADA	STRUCT		
+0.0	ANO	INT	0	
+2.0	MES	INT	0	
+4.0	DIA	INT	0	
+6.0	HORA	INT	0	
+8.0	MINUTO	INT	0	
+10.0	SEGUNDO	INT	0	
+12.0		END_STRUCT		
+28.0	GET_DATA_HORA_SYSTEMA	DATE_AND_TIME	DT#90-1-1-0:0:0.000	LER DATA E HORA DO SISTEMA
+148.0	VALORES	STRUCT		
+0.0	COMPRIMENTO	DINT	L#0	VALOR DO COMPRIMENTO ATUAL PRODUZINDO
+4.0	RESERVA_0	WORD	W#16#0	RESERVA DOUBLE WORD 0
+6.0	RESERVA_4	DWORD	DW#16#0	RESERVA DOUBLE WORD 4
+10.0	RESERVA_8	DWORD	DW#16#0	RESERVA DOUBLE WORD 8
+652.0	COMPRIMENTOS	STRUCT		
+0.0	BITOLA_01	DINT	L#35211	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 3.4
+4.0	BITOLA_02	DINT	L#29070	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 3.8
+8.0	BITOLA_03	DINT	L#23585	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 4.2
+12.0	BITOLA_04	DINT	L#20661	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 4.5
+16.0	BITOLA_05	DINT	L#16667	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 5.0
+20.0	BITOLA_06	DINT	L#13369	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 5.6
+24.0	BITOLA_07	DINT	L#11574	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 6.0
+28.0	BITOLA_08	DINT	L#8532	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 7.0
+32.0	BITOLA_09	DINT	L#8278	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 7.1
+36.0	BITOLA_10	DINT	L#6510	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 8.0
+40.0	BITOLA_11	DINT	L#5165	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 9.0
+44.0	BITOLA_12	DINT	L#4174	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 10.0
+48.0	BITOLA_13	DINT	L#0	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA RESERVA
+52.0	BITOLA_14	DINT	L#0	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA RESERVA
+56.0	BITOLA_15	DINT	L#0	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA RESERVA
+60.0	BITOLA_16	DINT	L#0	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA RESERVA
+64.0	BITOLA_17	DINT	L#0	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA RESERVA
+68.0	BITOLA_18	DINT	L#1700	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 4.2 ROLINHO
+72.0	BITOLA_19	DINT	L#1201	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 5.0 ROLINHO
+76.0	BITOLA_20	DINT	L#834	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA 6.0 ROLINHO
+80.0	BITOLA_21	DINT	L#0	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA RESERVA ROLINHO
+84.0	BITOLA_22	DINT	L#0	COMPRIMENTO MAXIMO BITOLA RESERVA ROLINHO
+88.0		END_STRUCT		
+740.0		END_STRUCT		

## 9.4 ANEXO D - ARTIGO PUBLICADO

### ARTIGO SUBMETIDO, PUBLICADO E APRESENTADO AO 6º CONGRESSO INTERNACIONAL DE METALURGIA, MINERAIS E MINERAÇÃO – CLASSIFICADO EM PRODUTIVIDADE EM TREFILAÇÃO – RIO DE JANEIRO – RIOCENTRO – TRABALHO 26688 – RESULTADOS PARCIAIS.



Prezado(a) José Hugo de Carvalho Souza.

O trabalho **26688 - AUMENTO DE PRODUTIVIDADE NOS PRODUTOS ACABADOS EM VERGALHÕES CA60 PELA AUTOMAÇÃO DOS SISTEMAS DE VELOCIDADE** Com **2,86 Mb**, destinado ao **6º Trefilação**, classificado no **Produtividade em trefilação**, foi recebido pela Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração.

Uma mensagem de confirmação foi encaminhada ao e-mail indicado (jose.carvalho.jc1@vsiderurgia.com.br).

**Caso queira mudar a sua opção com relação a AUTORIZAÇÃO DE PUBLICAÇÃO DE TRABALHOS E PALESTRAS, clique aqui.**

Obrigado por utilizar nossos serviços internet.

# ARTIGO SUBMETIDO AO XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA – JOÃO PESSOA-PB - TRABALHO CBA2018-0047 – RESULTADO TOTAL.



Prezado Usuário José Hugo de Carvalho Souza,

O trabalho **CBA2018-0047 - AUMENTO DE PRODUTIVIDADE INDUSTRIAL (OEE) ATRAVÉS DA OTIMIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE VELOCIDADE POR TÉCNICAS DE MODELAGEM DE REDE DE PETRI COLORIDA (RDP)** foi recebido no SWGE.

A Comissão Editorial irá iniciar a avaliação do mesmo, conforme o cronograma do evento. Até que o trabalho entre em processo de avaliação, ele pode ser alterado através de sua conta SWGE, no item MEUS TRABALHOS.

Toda alteração de status do trabalho será notificada por e-mail, mas alertamos a importância de visitar o website do evento e sua conta SWGE periodicamente, para ficar a par de todas as novidades.

Agradecemos sua participação no CBA2018.

Atenciosamente,

Equipe de Suporte SWGE.



# Aumento de Produtividade Industrial (OEE) através da otimização dos sistemas de velocidade por técnicas de Modelagem de Rede de Petri Colorida (RdP)

José Hugo de Carvalho Souza (Mestrando)

Prof. Dr. Luíz Edival de Souza

Universidade Federal de Itajubá, Caixa Postal: 50 - CEP: 37500 903 - Itajubá – MG

**Abstract** — This work presents a new approach for dealing with industrial operational inefficiency that contains automatic systems. The purpose of this dissertation is to perform studies for the purpose of optimizing a discrete distributed system from data sampled in the industrial sector that contains problems in the speed efficiency system that makes up one of the pillars of OEE (Overall equipment effectiveness). In order to propose solutions of these problems, we perform the modeling of the distributed system and the analysis of its properties through computer simulations. The tools that were used for discrete system, is the Colored Petri Net in CPN TOOLS. From the RDP model an autonomous decision-making system is presented to accelerate or decelerate the equipment automatically up to the specified set point speed established by the work, eliminating the instability of the industrial process by the speed rule. From the development and implementation of the new logic model of speed automation system, it was possible to achieve a 6.62% increase in OEE (total productivity) in the chosen industrial process (Cold Rolling). The

system also enabled a better structured understanding of automation logic and assertiveness in the implementation in the industrial controller, not generating interferences in the process and reworking.

**Keywords:** Discrete systems, CPN tools, Petri Nets (RdP), Cold Rolling , Steel

**Resumo** – Este trabalho apresenta uma nova abordagem para tratativa de ineficiência operacional industrial que contenha sistemas automático. A proposta deste artigo é realizar estudos para fins de otimização de um sistema distribuído discreto a partir de dados amostrados no setor industrial que contenha problemas no sistema de eficiência de velocidade que compõe um dos pilares do OEE(Overall equipment effectiveness). Para propor soluções destes problemas, foi realizada a modelagem do sistema distribuído e a análise das propriedades do mesmo através de simulações em computador. A ferramentas que foi utilizada para sistema discreto, é a Rede de Petri Colorida no CPN TOOLS. A partir do modelo RDP

é apresentado um sistema de tomada de decisão autônomo para acelerar ou desacelerar o equipamento automaticamente até a velocidade especificada de “set point” estabelecida pelo trabalho, eliminando a instabilidade do processo industrial pelos critérios de velocidade. A partir do desenvolvimento e implementação do novo modelo lógico de sistema de automação de velocidade, foi possível alcançar 16,62% de aumento de OEE (produtividade total) no processo industrial escolhido (Laminação a Frio). O sistema também possibilitou um melhor entendimento estruturado de lógica de automação e assertividade na implementação no controlador industrial, não gerando interferências no processo e retrabalhos.

**Palavras-Chave:** Sistemas Discretos, CPN Tools, Redes de Petri (RdP), Laminação a Frio, Siderurgia;

## 1. INTRODUÇÃO

Em sistemas industriais o indicador de desempenho normalmente utilizado é o OEE (Overall equipment effectiveness). Um dos 4 pilares do OEE é o índice de eficiência de velocidade, onde em alguns equipamentos apresentam baixo desempenho deste ou grande variabilidade.

Para solucionar tal problema é necessário aplicar melhorias de lógica de automação e na maioria dos casos o engenheiro de automação aplica melhorias diretamente no controlador sem antes mapear todo o sistema e realizar simulação de desempenho da lógica aplicada. O entendimento e revisão teórica da

lógica de automação é indispensável para atingir os objetivos de aumento de produtividade e para isso existem ferramentas e métodos que possibilitam atingir melhores resultados.

O problema de pesquisa utilizará como estudo de caso um problema industrial em uma siderurgia, na qual viu-se a instabilidade de produção nos processos do setor de acabamento de uma unidade da Votorantim Siderurgia, onde fez-se necessário o entendimento dos indicadores que eram mais impactantes no OEE da planta, constatando-se baixos e instáveis resultados no indicador de eficiência. O estudo consiste em otimização de produção através de aumento e estabilização de velocidade nos laminadores a frio.

## 2. OBJETIVOS

Em linhas gerais o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de sistemas dinâmicos discreto com foco em aumento de OEE ( pilar de eficiência de velocidade) e segurança operacional, preocupando-se também com o desempenho do controlador, otimização do número de passos e ciclo de scan do mesmo, sem dead lock, sem loop e que no final esteja também de forma documentada. Um outro objetivo importante do método é realizar implementações no controlador de forma assertiva de uma única vez, sem retrabalhos, potenciais de falha e interrupção de máquina não programada. O método busca um sistema de Aumento de produtividade Autônomo que otimiza os sistemas de velocidade, minimiza “gaps” e consegue através da

tecnologia embarcada em CLPS e interface homem máquina, trazer resultados de produtividade muito significativos em sistemas industriais com baixo custo de investimento.

Após este trabalho, comprovando-se os ganhos do sistema, é totalmente praticável a usabilidade e interação deste modelo em outros equipamentos industriais que apresentem este problema.

### 3. ANÁLISE DO PROCESSO METODOLOGIA DMAIC

No setor de laminação a frio foram realizadas medições através da carta de controle IBAPDA e analisado estatisticamente com o Minitab cada etapa do processo a fim de calcular o número meta do processo de laminação como um todo. As análises serão apresentadas a seguir o que possibilita o baseamento para o cálculo da meta a ser alcançada com o sistema autônomo.

O processo de laminação a frio é composto basicamente pelo setor de Abastecimento, usualmente chamados de “pay offs”, onde são inseridas 2 bobinas de aço CA50 sendo soldadas a ponta do fim de uma bobina no início da outra. O fio máquina de CA50 é puxado pelos motores dos blocos de tração 1, 2 e 3, passando pela torre do pay-off, feeder e decapador (locais estes responsáveis pela limpeza do fio máquina). Ao passar pelo decapador, o fio máquina passa pelo aplicador mecânico de sabão e posteriormente inicia-se o processo de laminação a frio no bloco 1 e sucessivamente aumenta-se a redução nos cassetes

dos blocos 2 e 3. Após a passagem nos blocos existe o aliviador de tensão que faz o controle de tração do fio máquina nos blocos para que o mesmo não arrebente ou embole. Ao passar por esse processo o fio máquina é aferido pelo encoder que envia o sinal para o PLC informando quantos metros de produto CA60 foi produzido. Posteriormente a medição o produto CA60 é enrolado no carretel acoplado ao bobinador estático até que o comprimento atual produzido atinja o SETPOINT. Atingindo-se o SETPOINT de comprimento a velocidade é reduzida a zero e a bobina pronta é expedida

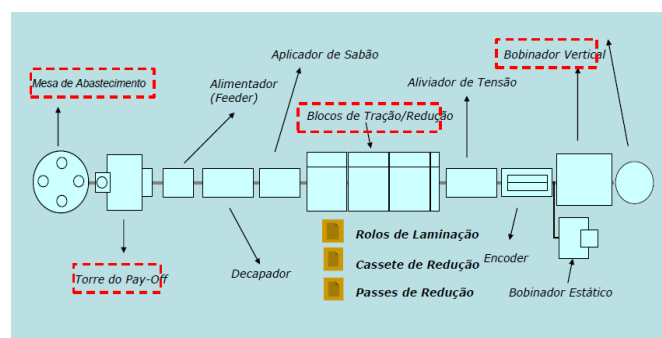


Figura 1: Laminação a Frio de Fio Máquina

Após levantamento de dados no software IBA PDA e análise chegou-se ao seguinte resultado de eficiência:

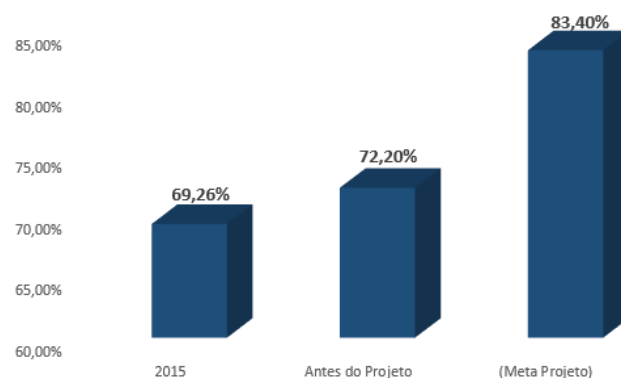


Figura 2: Análise % Eficiência do Laminadores e Meta

Através do software Minitab, foi diagnosticado o seguinte desenho de desempenho de produção de uma bobina

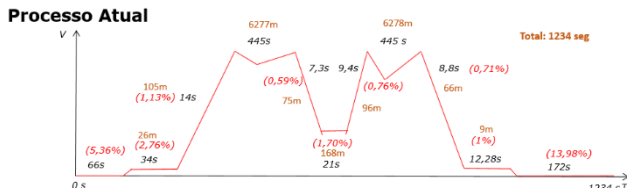


Figura 3: Produção de bobina CA60 – Velocidade x Tempo

A média de tempo para a fabricação de um spooler na análise era de 1234 segundos, para uma quantidade amostral de 216 bobinas, porém pode se observar no gráfico que existem bobinas que são fabricadas acima de 1800 segundos como existem bobinas que são fabricadas abaixo de 1000 segundos. O desvio padrão (StDev) de 531 segundos, demonstrando que o processo é muito instável

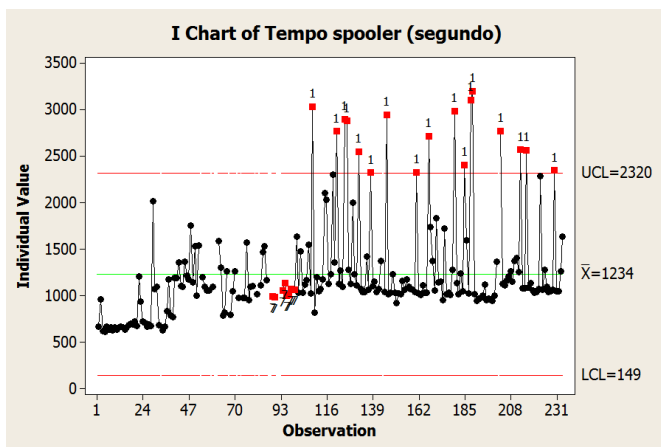


Figura 3: Chart of Tempo – Minitab

Estratificando as causas principais das perdas operacionais, momento de instabilidades do processo e ineficiência o gráfico de pareto abaixo demonstra os pontos que precisam ser solucionados para atingir a meta:

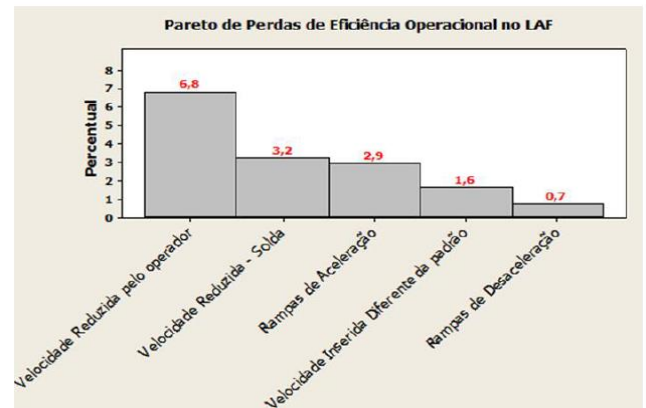
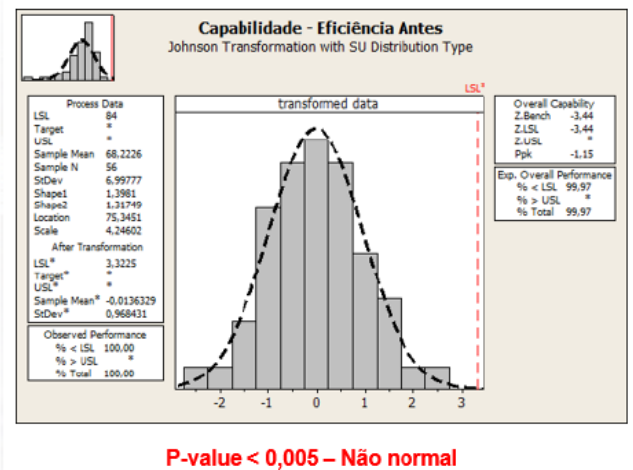


Figura 4: Pareto – Minitab

O estudo de capacidade demonstra que o equipamento para o limite inferior de 84% de índice de eficiência possui um P-value não normal e o Ppk -1,15



P-value < 0,005 – Não normal

Figura 5: Capabilidade – Minitab

O principal gap encontrado foi a velocidade reduzida pelo operador por tempo longo principalmente em horário de troca de turno, no turno de madrugada e durante finais de semana, onde gastou-se todas as alternativas tradicionais para tentativa de solução do problema, observando após tratativas momentâneas melhoras de desempenho mais ao longo do tempo perdia-se esse desempenho. O outro diagnóstico foi perda de produtividade durante a passagem de solda, devido ao tempo de velocidade reduzida, sendo que o tempo necessário é somente o suficiente para percorrer

30 metros (distancia para o último bloco), O terceiro ponto diagnosticado foram rampas de aceleração e desaceleração suave no inversor de frequência, demorando na retomada do equipamento e por último a velocidade de set point do equipamento incompatível com a velocidade desejada para a bobina que estava sendo produzida.

#### 4 - DESENVOLVIMENTO DO MODELO EM REDES DE PETRI COLORIDA

Para solucionar os problemas detectados no gráfico de pareto na metodologia DMAIC, é proposto alterações nos processos que antes de ser implementada será simulada no CPN tools. Para o primeiro e quarto lugar no pareto (Velocidade Reduzida Manualmente pelo operador por tempo indeterminado (6,8%) e Velocidade nominal inserida na IHM diferente do padrão operacional (1,6%) as ações propostas estão a seguir:

- Desenvolvimento de Lógica em CLP previamente simulada e testada em técnicas de redes de Petri, a fim de identificar o material que está sendo produzido.
- Detecção do momento instantâneo da máquina, um algoritmo que toma a decisão se acelera, freia, estabiliza ou para o equipamento;
- Alarmes visuais e sonoros sempre que necessário para garantir a segurança das pessoas envolvidas.

Para o segundo lugar do pareto (Instabilidade no tempo e velocidade reduzida muito baixa no momento da solda – 3,2%) a ação proposta é um sistema de automação que identifica através de sensores se a solda está passando no equipamento, para tal existirá esse sinal no

CPN tools. Para o terceiro e quinto lugar do pareto (Rampas de aceleração e desaceleração suaves - 3,6%). A ação proposta é o estudo de reavaliação da parametrização dos inversores de frequência Masterdrive frente a exigência atual dos motores em relação aos dados de placa.

Iniciando a programação no software CPNtools, o sistema desejado foi dividido em algumas etapas principais:

- 1º Abastecimento de insumo do processo para produção;
- 2º Ligar ou Desligar o sistema;
- 3º Receita operacional (Escolha de bitola a ser produzida);
- 4º Carregamento dos dados da receita a partir da escolha da bitola (Velocidade nominal teórica, velocidade reduzida teórica, comprimento teórico por bitola);
- 5º Detecção e Passagem de Solda;
- 6º Detecção de redução de velocidade manual – Aceleração automática temporizada;
- 7º Bobina CA60 pronta;
- 8º Subtração de Saldo de Insumo no Abastecimento após Bobina Pronta;
- 9º Totalizador de Produção;

De forma Hierárquica, na Figura 6 é mostrada todo o processo de forma macro, sendo possível observar a quantidade de insumos CA50 que encontra-se no processo, a bitola que foi escolhida pelo operador, os valores de SETPOINT da receita (comprimento e velocidade) que foram carregados no sistema após a seleção da bitola, o status atual que o sistema está

produzindo (acelerando, em solda ou em opção manual), quantas bobinas foram produzidas no total, se existe permissível para produzir a próxima bobina(buffer de insumo).

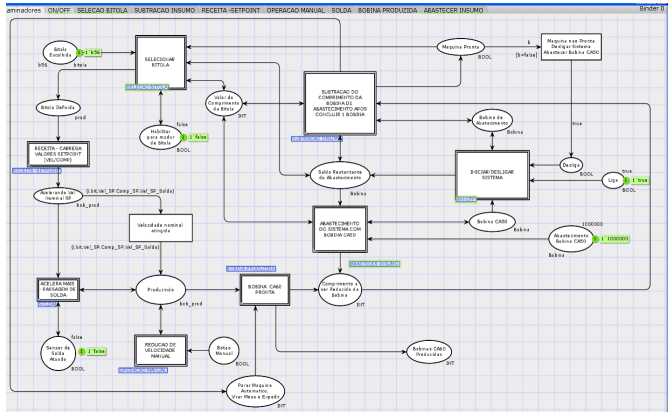


Figura 6: Tela principal do algoritmo

Após a apresentação macro, será detalhada cada sub página do processo. Na sub-página 1 (Figura 7) foram inseridas todas transições para que seja possível realizar o abastecimento de insumo CA50. O operador abastece com o material CA50 na entrada do laminador a frio (Abastecido com 1.000.000 metros de fio máquina). Após todos os dados carregados no sistema, é feita comparação se o saldo do abastecimento é maior ao comprimento da bitola selecionada para saber se possui Insumo para produzir a bitola desejada. Caso tenha saldo pode-se iniciar a produção A sub pagina foi nomeada como “ABASTECER INSUMO”.

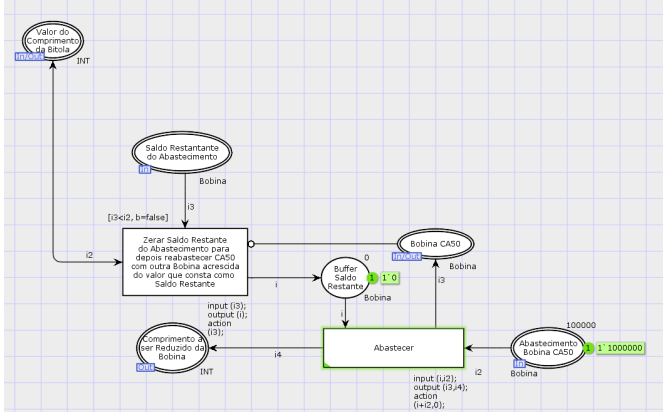


Figura 7: Sub-página 1 (Abastecimento de insumo CA50)

Na sub-página 2 (Figura 8) foram inseridas todas transições para que seja possível ligar ou desligar, opção esta acionada manualmente pelo operador. A sub pagina no programa foi nomeada como “ON/OFF”.

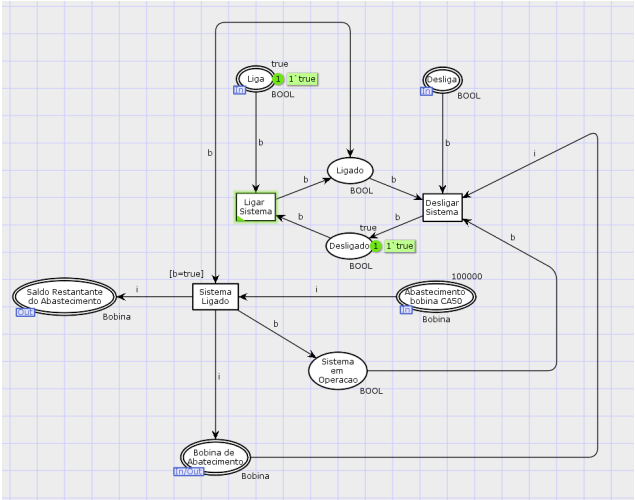


Figura 8: Sub-página 2 (Ligar/Desligar a Máquina)

Na sub-página 3 (Figura 9) é o momento de escolher a bitola que deseja-se produzir, esse sistema de escolha de bitola não existe no equipamento original e é o processo que precisa ser implementado para iniciar a criação de uma receita operacional. Foi criada 12 bitolas possíveis (b34, b38, b42, b45, b50, b56, b60, b70, b71, b80, b90, b100), o número no nome da variável representa a espessura do aço 34=3,4mm, b100= 10,0mm).

Nesse caso foi selecionado a B56. A sub pagina no programa foi nomeada como “SELEÇÃO BITOLA”.

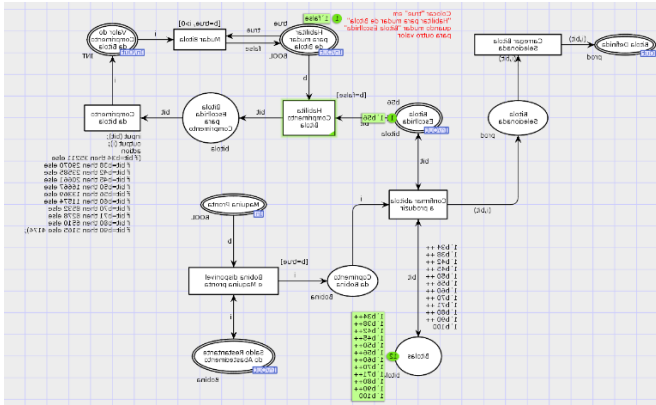


Figura 9: Sub-página 3 (Escolha do produto final a ser produzido)

Na sub-página 4 (Figura 10) Ao selecionar a bitola, ocorre o carregamento da receita com os setpoint definidos por bitola. Nessa etapa carrega-se a Velocidade nominal teórica, velocidade reduzida teórica, comprimento teórico por bitola). Para tal foi utilizada a função IF para carregar juntamente com o valor da bitola o comprimento do produto final na variável i, neste caso uma bobina B56 possuirá 13369 metros. Essa ação impedirá a parametrização indevida pelo operador. A sub pagina no programa foi nomeada como “RECEITA-SETPOINT”.

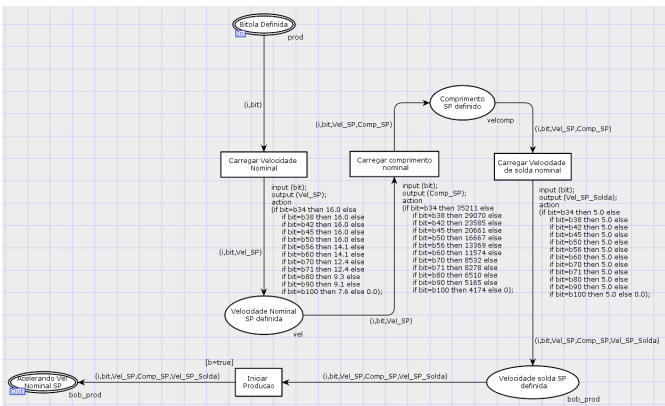


Figura 10: Sub-página 4 (Carregamento dos Set Points)

Na Sub-página 5 (Figura 11), durante a produção, pode ser necessário passar a junção de 2 bobinas no abastecimento (passagem de solda), para este caso é necessário reduzir a velocidade, sendo sinalizado neste momento para o controlador por um sensor. Para solucionar o problema de variação de tempo e velocidade na passagem de ponta soldada de CA50, foi inserido na receita o set point de velocidade reduzida a partir da atuação do sensor que detecta a ponta soldada. A sub pagina no programa foi nomeada como “SOLDA”.

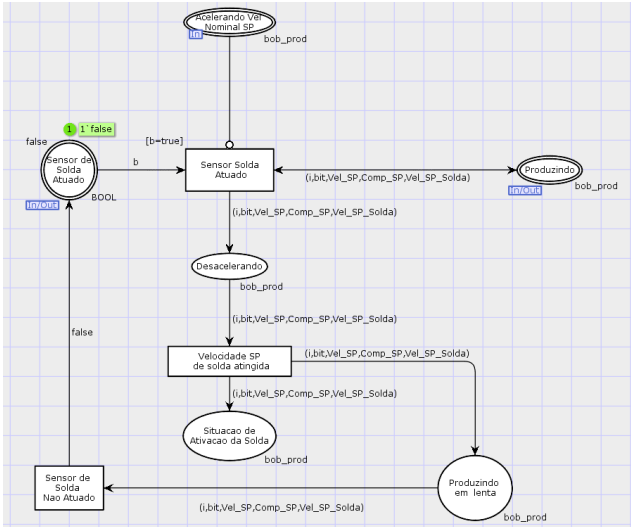


Figura 11: Sub-página 5 (Detecção e redução de velocidade para passagem de solda)

Na sub-página 6 (Figura 12) é feita a detecção caso exista de redução de velocidade pelo botão manual. Durante a produção, o operador poderá apertar o botão de redução de velocidade para caso queira observar o equipamento tecnicamente por algum motivo, porém a partir do momento que o mesmo efetua isto um temporizador de 60 segundos de 60 segundos será ativado, soando sirene e sinalizador informando que a máquina será acelerada automaticamente ao final deste tempo. A

sub pagina no programa foi nomeada como “OPERAÇÃO MANUAL”.

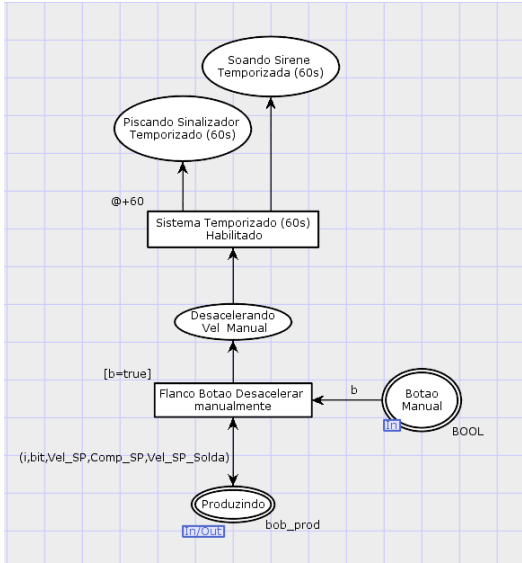


Figura 12: Sub-página 6 (Redução de velocidade pelo operador via botão manual)

Na sub-página 7 (Figura 13), assim que o valor de SETPOINT do comprimento da bobina é atingido, habilita-se a redução de velocidade até 0m/s, ocorrendo assim a expedição e finalização da bobina. A sub pagina no programa foi nomeada como “BOBINA PRODUZIDA”

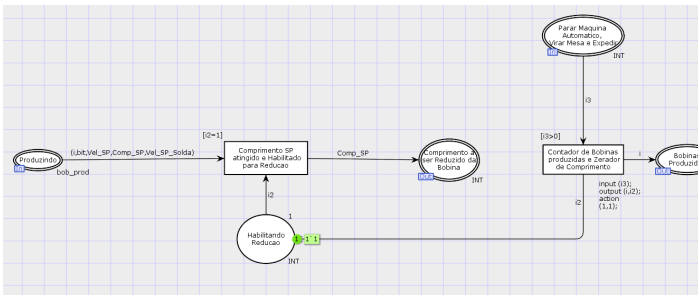


Figura 13: Sub-página 7 (Comprimento de Set point atingido – Bobina CA60 pronta)

Na sub-página 8 (Figura 14), a partir da conclusão da produção da bobina, o valor do insumo usado será debitado do valor que estava no Abastecimento. Esse sistema apenas permitirá que inicia-se a próxima bobina se houver saldo no abastecimento,

caso contrário é necessário que o operador abasteça a máquina. A sub pagina no programa foi nomeada como “SUBTRACAO INSUMO”

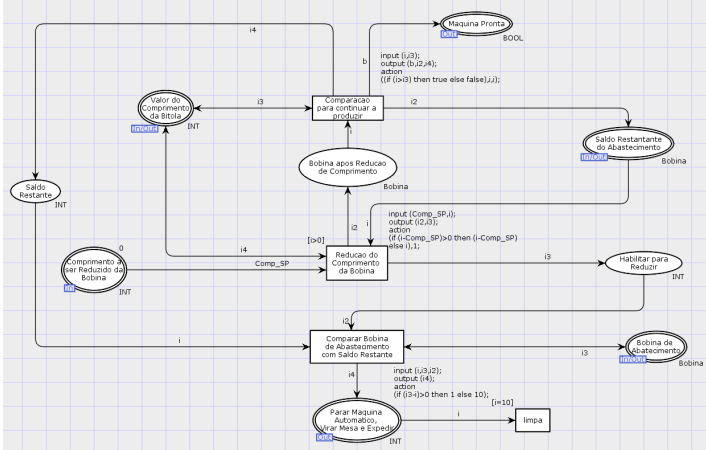


Figura 14: Sub-página 8 (Subtração de insumo CA50 no abastecimento após produção da bobina CA60)

Na Figura 15, foi desenvolvido um totalizador de bobinas produzidas. Para o abastecimento de 1.000.000 de metros de CA50, houve uma resultante de 75 bobinas CA60 produzida da bitola B56.

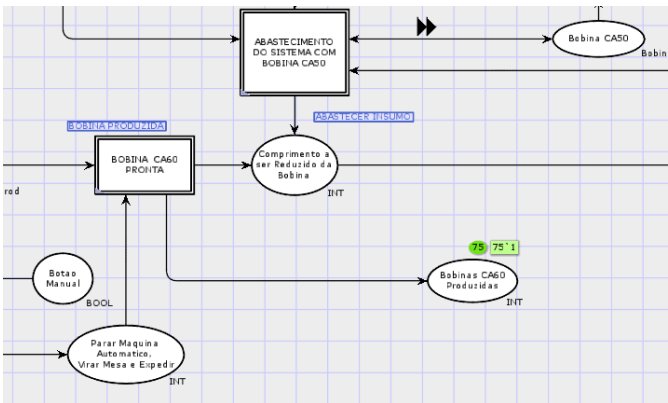


Figura 15: Totalizador de Produção de Bobina CA60

O processo mencionado no tópico anterior se repetirá, até que o saldo de abastecimento de fio máquina seja menor que o comprimento de set point da bobina selecionada. Abaixo a conclusão da produção para 1.000.000 metros inseridos inicialmente. Foram produzidas com CA60 1.000.000 metros 75 bobinas, restando no abastecimento



10694 metros, inferior aos 13.369 metros necessários para produzir a próxima.

Para o processamento do modelo, foi feita a simulação de análise de espaço de estados com 1.000.000 metros no abastecimento e alcançado o número de 974 Steps

### 5. APLICAÇÃO NO CONTROLADOR S7 300

A partir do modelo testado em Redes de Petri no CPN tools, foi implementado o sistema desenvolvido no controlador S7 300 da Siemens em uma das máquinas de laminação a frio de uma siderúrgica e após os resultados alcançados replicado para as demais máquinas.

Para realizar o controle do sistema de velocidade e comprimento, foi criado a FC1000 e suas variáveis criadas na DB1000. A FC1000 será chamada no bloco principal OB1 Network 7:

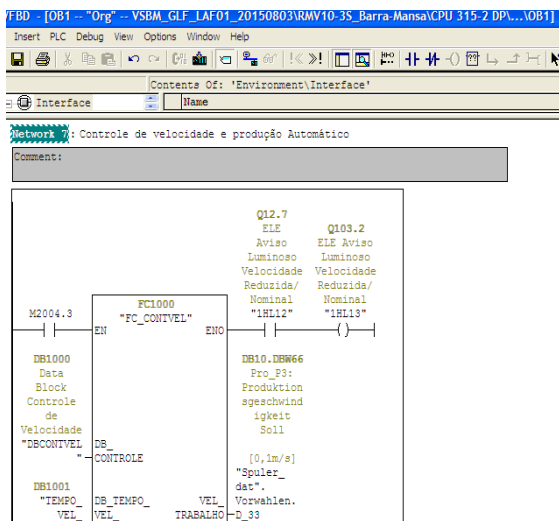


Figura 16: Bloco FC1000 sendo chamado na OB1

A Programação da FC1000 foi realizada na linguagem STL, utilizando comandos próprios da linguagem:

```

FUNCTION FC1000 : VOID
TITLE =
//FROM_HOM_PROTECT
AUTHOR : JOSE WAGO
FAMILY : CONTROLE
NAME : CONTVEL
VERSION : 0.1

VAR_INPUT
  DBCONTVEL: BLOCK_DB ; //DATA BLOCK DE CONTROLE DO SISTEMA DE VELOCIDADES
  DB_TEMPO_VEL_SUBIDA : BLOCK_DB ; //DATA BLOCK DOS TEMPORIZADORES PARA SUBIDA DE VELOCIDADE
  DB_TEMPO_AVISO_SUBIDA : BLOCK_DB ; //DATA BLOCK DOS TEMPORIZADORES PARA AVISO DE SUBIDA DE VELOCIDADE
  VEL_REAL : WORD ; //VELOCIDADE REAL DA MÁQUINA
  MAQ_RODANDO : BOOL ; //STATUS DE MÁQUINA RODANDO
END_VAR

VAR_OUTPUT
  VEL_TRABALHO : INT ; //VELOCIDADE DE TRABALHO
  VEL_REDUCIDA : INT ; //VELOCIDADE REDUZIDA
  MASSA_LINEAR : REAL ; //MASSA LINEAR DO MATERIAL PRODUZIDO (Kg/m)
  PROD_PADRAO : REAL ; //PRODUTIVIDADE PADRÃO DO MATERIAL PRODUZIDO (T/h)
  SIGNAL_LUMINOSO : BOOL ; //PULSO SINAL LUMINOSO
  SIGNAL_SONORO : BOOL ; //PULSO SINAL SONORO
  SELEÇÃO_ROLHINHO : BOOL ; //SINAL QUANDO SELECIONADO VALORES DE PRODUÇÃO DE ROLINHOS
  COMPRIMENTO : DINT ; //VALOR DE COMPRIMENTO PADRÃO (mts)
END_VAR

VAR_IN_OUT
  VAR_VEL_RED : BOOL ;
  STS_VEL_RED : BOOL ;
END_VAR
    
```

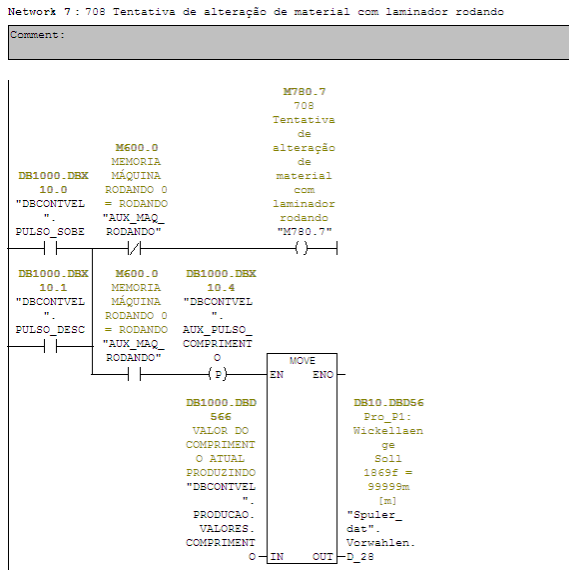
Figura 17: Programação da FC1000 (Controle de velocidade, comprimento, alarmes)

Para ser feita a programação na FC1000, utilizou-se as variáveis na DB1000, e os temporizadores utilizando a DB1001, DB1002.

Address	Name	Type	Initial value	Comment
0.0		STEPUNT		
+0.0	INDICE	INT	0	VALOR DO INDICE DE BITOLAS
+2.0	BITOLA	REAL	0.000000e+000	VALOR DA BITOLA SELECIONADA
+6.0	VEL_NOMIN	INT	0	VALOR DA VELOCIDADE NOMINAL REFERENCIADA A BITOLA SELECIONADA
+8.0	VEL_REDUC	INT	0	VALOR DA VELOCIDADE REDUZIDA REFERENCIADA A BITOLA SELECIONADA
+10.0	PULSO_SOBE	BOOL	FALSE	
+10.1	PULSO_DESC	BOOL	FALSE	
+10.2	AUX_PULSO_SOBE	BOOL	FALSE	
+10.3	AUX_PULSO_DESC	BOOL	FALSE	
+10.4	AUX_PULSO_COMPRIMENTO	BOOL	FALSE	
+10.5	AUX_RESERVA_01	BOOL	FALSE	

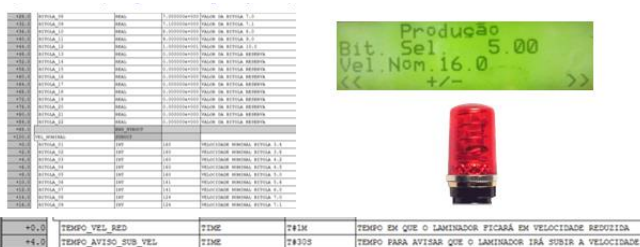
Figura 18: UDT1000 – variáveis declaradas no programa FC1000

Para efeito somente de gestão e controle, foi criada a FB1000 em linguagem SCL para calcular automaticamente e corretamente o desempenho da máquina quanto a tempo de utilização, produtividade por turno, etc. Algumas proteções foram desenvolvidas em Ladder na FC1001 a fim de deixar o sistema com boa confiabilidade:



**Figura 19: Proteção para que o operador não altere a bitola com máquina operando**

A partir do que foi desenvolvido em lógica de automação do CLP S7 300 Siemens com receita, foi inserida as variáveis em interface com a IHM OP17 em plataforma Protool, afim de identificar o material que está sendo produzido. A partir da detecção do momento instantâneo da máquina como já mencionado anteriormente o sistema toma a decisão se acelera, freia, estabiliza ou para o equipamento, gerando Alarmes visuais e sonoros sempre que necessário para garantir a segurança das pessoas envolvidas. Para tal, foi configurado a IHM e instalado alarmes sonoros e visuais:



**Figura 20: Variáveis inseridas na IHM e alarmes sonoro e visual instalado**

Para solucionar o problema de tempo curto ou longo para passagem de solda e também automatizar esse

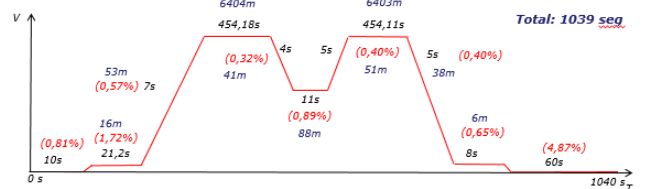
momento para que não fique na percepção do humano o início e o término da passagem da solda, foi desenvolvido em lógica de automação do CLP S7 300 Siemens, um sistema que identifica através de sensores se a solda está passando no equipamento. Quando detectado que existe a passagem de solda, o equipamento reduz a velocidade para 5m/s e acelera novamente após a saída da solda do último bloco de laminação do processo.



**Figura 21: Instrumentação automação passagem de solda**

## 6. RESULTADO DMAIC

Após implementado a lógica de automação no controlador e modificações de campo, alcançou-se um avanço de aproximadamente 19% de eficiência operacional no laminador a frio 1. O desempenho do processo ficou da seguinte forma em média na carta de controle IBA:



**Figura 22: Curva do Processo depois das implementações**

É possível observar que durante as implementações das ações, um avanço parcial de 7% já aconteceu.3

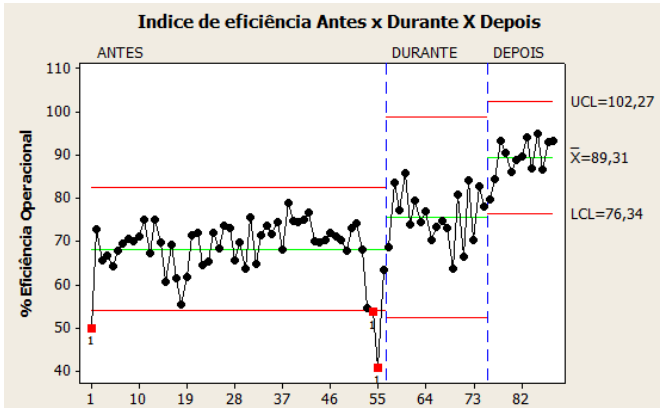


Figura 23: Gráfico de % de Eficiência depois das implementações

No gráfico de boxplot a variabilidade média oscilou entre 86% e 93% após todas as ações implementadas.

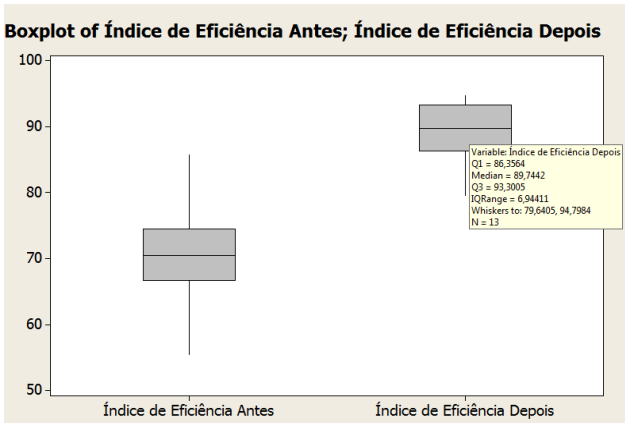


Figura 24: Gráfico Boxplot (Eficiência Antes x Depois)

O gráfico de capacidade, mostra que o LSL de 84% anteriormente era pouco atingido. Após a implementação das ações a média atingida foi de 90,8% e o PpK em 0,29, antes das ações o mesmo era de -1,15 para o mesmo LSL e o PVALUE anteriormente menor que 0,005 agora esta maior que 0,005 parametro este provando que o processo atingiu estabilidade.

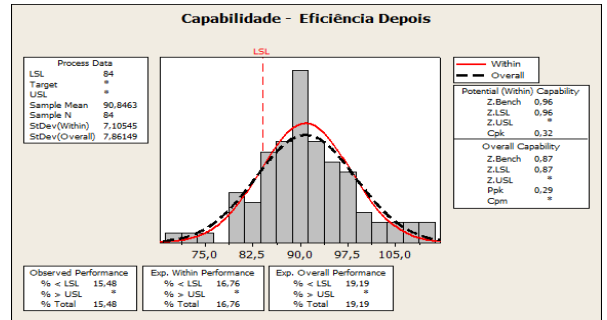


Figura 25: Capabilidade do processo após implementações

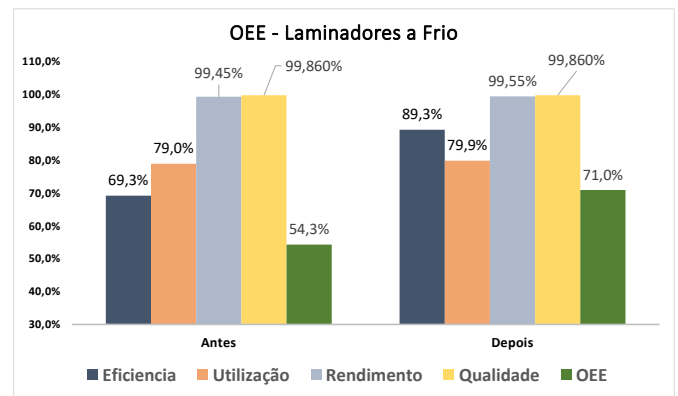


Figura 26: Resultados OEE

## 7. CONCLUSÃO

A partir do objetivo deste artigo, teve-se como principal meta o desenvolvimento de um método comum para tratativa de instabilidade de OEE no pilar de eficiência. Para tal concluímos que a metodologia DMAIC e Redes de Petri Colorida conseguem em conjunto direcionar de forma assertiva o desenvolvimento de um modelo lógico correto e otimizado a ser implementado no controlador lógico programável (CLP) do equipamento. Outro produto alcançado, foi encontrar através de modelagem de Redes de Petri, a melhor saúde e desempenho do controlador, com número de passos e ciclo de scan otimizados, sem dead lock e sem loop. Como objetivo secundário, esse tema mostrou o quanto é interessante

metodologias de análise de engenharia de produção e automação estejam alinhadas para que seja possível encontrar resultados de campo positivo. Um ponto observado e conclusivo, é que o engenheiro de automação com atuação na área industrial, dificilmente possui o tempo necessário para realizar a modelagem antes de aplicar alterações no controlador, isso gera consequências negativas, pois dessa forma se realiza implementações no controlador e nem sempre é possível prever todas as variáveis e influências no sistema, tendo o mesmo que alterar sua modificação após acontecerem resultados não satisfatórios ou não completos. A modelagem possibilita mapear todas as alternativas possíveis do sistema e tratar um algoritmo para cada acontecimento.

Após as análises, ações e resultados apresentados e vivenciados, é possível concluir que um sistema de aumento de produtividade de OEE nos equipamentos através da automatização e otimização dos sistemas de velocidade otimiza “gaps”, facilita a gestão operacional e consegue através da tecnologia embarcada em CLPS e interface homem máquina, trazer resultados financeiros e operacionais muito significativos dentro da siderurgia, de forma que a máquina torne-se mais eficiente, com custo de aquisição próximo a zero.

A simulação do modelo em redes de Petri colorida, antes da implementação no controlador, prova que dessa forma é possível conhecer amplamente o processo e evita que se implemente lógica errada diretamente ao controlador. Além disso, para máquinas onde os profissionais não conhecem o sistema como um todo, o CPN TOOLS, ajuda a treinar esses profissionais,

pois a linguagem do mesmo é mais amigável e didática do que o STL e SCL do controlador.

Como trabalhos futuros, sugere-se empregar esse sistema autônomo em outros maquinários que apresentem OEE baixo no pilar de índice de eficiência. Esse cenário pode ocorrer em maquinários de outros setores como alimentício, automobilístico, petróleo, farmacêutico, etc.

Outra sugestão para trabalhos futuros seria o desenvolvimento de uma plataforma que pudesse permitir a conversão do modelo desenvolvido no CPN tools para a linguagem convencional de controlador automaticamente. Desta forma o engenheiro de automação poderia modelar o sistema e conseguiria implementar no controlador sem ter retrabalhos de conversão da lógica. Desta forma seria praticável modelar no dia a dia de um engenheiro de automação industrial.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]Busso, Christianne Matias and MIYAKE, Dario Ikuo. “**Análise da aplicação de indicadores alternativos ao Overall Equipment Effectiveness (OEE) na gestão do desempenho global de uma fábrica**”, Associação Brasileira de engenharia de Produção, Prod. [online]. 2013, vol.23, n.2, pp.205-225. Epub Oct 02, 2012. ISSN 01036513, em <  
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=396742052001>> Acesso em: 09/04/2018
- [2]J.Wang, Timed Petri Nets – “**Theory and Application**”, Kluwer Academic Publishers,

1998 (ISBN: 0792382706),

em<<https://pdfs.semanticscholar.org/c7ea/9b8aae1d902f3d443f2e683705ae605b7124.pdf>> Acesso em: 09/04/2018

[3]Jonsson, P. ; Lesshammar, M. , **“Evaluation and improvement of manufacturing performance measurement systems – the role of OEE”**. International Journal of Operations and Production Management, v.19, n.1, pp. 55-78, 1999.

[4] Ljungberg, O. , **“Measurement of overall equipment effectiveness as a basis for TPM activities”**, International Journal of Operations & Production Management, v.18, n.5, pp. 495-507, 1998.

[5]Muchiri, P.; Pintelon, L. **“Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion”**. International Journal of Production Research, v.46, n.13, pp. 3517-3535, 2008.

[6] Amorim, G. , Balestrassi, P. P. , **“Six Sigma learning evaluation model using Bloom's”**, International Journal of Lean Six Sigma Quality & Reliability Management, 2017, Manuscript ID IJLSS-01-2017-0006.R1, Vol. 9 Issue: 1, pp.156-174

[7] Linderman, K., Schroeder, R.G., Zaheer, S. and Choo, A.S. (2003), **“Six Sigma: a goal-theoretic perspective”**, Journal of Operations Management, Vol. 21, pp. 193–203.

[8] Francês, Carlos, **“Introdução às Redes de Petri”**, Universidade Federal do Pará – UFPA, Laboratório de Computação Aplicada, em <[http://www.dca.ufrn.br/~affonso/DCA0409/pdf/redes\\_de\\_petri.pdf](http://www.dca.ufrn.br/~affonso/DCA0409/pdf/redes_de_petri.pdf) > Acesso em: 09/04/2018

[9] Melo, Kelvin **“Vantagens e desvantagens do método seis sigma: uma abordagem teórica”** , Simpósio de Engenharia de Produção 2014, em <<http://docplayer.com.br/4818515-Vantagens-e-desvantagens-do-metodo-seis-sigma-uma-abordagem-teorica.html>> Acesso em: 09/04/2018

[10] Barroso, G. , Soares, J. **“Introdução às Redes Petri Coloridas Usando a Ferramenta CPN Tools”**, Departamento de Física – Universidade Federal do Ceará, 2016, em <[https://pt.slideshare.net/JarbasGuedes/redes-petri-tutorial-cpn-tools?from\\_action=save](https://pt.slideshare.net/JarbasGuedes/redes-petri-tutorial-cpn-tools?from_action=save)> Acesso em: 09/04/2018

[11] Filho, M. , Almeida, M. , **“Melhoria Contínua em um Processo de Manufatura: Utilização do Indicador de Eficácia Global de Equipamentos (OEE)”**, Congresso Virtual Brasileiro – Convibra 2014, em <[http://www.convibra.com.br/upload/paper/2014/36/2014\\_36\\_9257.pdf](http://www.convibra.com.br/upload/paper/2014/36/2014_36_9257.pdf)> Acesso em 09/04/2018

- [12] Silva, José Perdro. , “ **OEE – A Forma de Medir a Eficácia dos Equipamentos**” , Website da Lean em Portugal, Setembro de 2009 , em <<http://leanemportugal.webs.com/artigoswhitepapers.htm> >, Acesso em 09/04/2018
- [13] Salomão, Alexandre , “**OEE – Eficiência Global dos Equipamentos**” -, Revista Alimentare , 2016, em <<http://revistaalimentare.com.br/medir-a-eficiencia-dos-equipamentos> >., Acesso em 09/04/2018
- [14] Pezeiro, Alberto, “**Conteúdo de certificação 6sigma Blackbelt**”, Seta desenvolvimento gerencial, 2014, São Paulo, Vol. 1 a 9.
- [15] Rocha, Fábio, “**Desenvolvimento de um Sistema de Ventilação Forçada para secar o fio máquina na Laminação a Frio de Vergalhões**”, Dissertação de Mestrado, Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, 2012, em, <<http://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/3207>>, Acesso em 09/04/2018.
- [16] Machado, Pedro, “**Metodologia de Modelagem CPN Aplicada a Análise de Desempenho de Sistemas de Comunicação baseados na Norma IEC 61850**”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 2015, 92 p, em <<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/267?locale-attribute=en>>, Acesso em 09/04/2018
- [17] T.Murata, “**Petri nets: Properties, analysis and applications**” Proceedings of the IEEE, vol. 77, no. 4, pp. 541(580, 1989).
- [18] NUNES, E. B. “**Propriedades Mecânicas e Caracterização Microestrutural na Soldagem do Aço Inoxidável Duplex UNS S31803 (SAF 2205).**”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2009, 203 p, em <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/15927> > , Acesso em 09/04/2018
- [19] Siemens, “**SIMATIC S7 Programação Básica**”, Sitrain, São Paulo, 294 p., em <https://pt.slideshare.net/marcosromanholo7/s7-basico/RK=1/RS=jnS7GRQIyOi6QRmNJcdKGuI3OSU->, Acesso em 09/04/2018
- [20] Dieter, George E., “**Metalurgia Mecânica**” ; 2a Ed.; Guanabara Dois, 1981.part1, Rio de Janeiro, 653 p
- [21] E. Bresciani Filho, “**Conformação plástica dos metais**”, Editora da Unicamp , 6ª edição, São Paulo, 2011, 258 p, em <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf>>, Acesso em 09/04/2018
- [22] Zurawski, R.; Zhou, MengChu: “**Petri nets and industrial applications**” - a tutorial. 1994.
- [23] Jensen, Kurt; “**Coloured Petri Nets, Basic Concepts, Analyses Methods and Practical Use**” Volume 1 1997, Editora Springer

