

**Gilberto Wildson Ribeiro**

**OTIMIZAÇÃO DA VELOCIDADE DE ACIONAMENTO DE  
UMA MÁQUINA DE FABRICAÇÃO DE PAPEL**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Pós-Graduação *Stricto-Sensu* em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté,

Área de Concentração: Automação e Controle Industrial

Orientador: Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino

**Taubaté - SP**

**2004**

Ribeiro, Gilberto Wildson

Otimização da velocidade de acionamento de uma máquina de fabricação de papel / Gilberto Wildson Ribeiro. - - Taubaté : UNITAU, 2004.

108f. : il.

Orientador: Márcio Abud Marcelino

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

1. Otimização da velocidade. 2. Acionamento de uma Máquina de fabricação de Papel. 3. Automação e Controle Industrial – Dissertação. I. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. II. Título.

GILBERTO WILDSON RIBEIRO

OTIMIZAÇÃO DA VELOCIDADE DE ACIONAMENTO DE UMA  
MÁQUINA DE FABRICAÇÃO DE PAPEL  
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ, TAUBATÉ, SP

Data: \_\_\_\_\_

Resultado: \_\_\_\_\_

**COMISSÃO JULGADORA**

Prof. Dr.Márcio Abud Marcelino (UNITAU/Taubaté)

Assinatura : \_\_\_\_\_

Prof. Dr.Francisco José Grandinetti (UNITAU/Taubaté)

Assinatura : \_\_\_\_\_

Prof. Dr.Samuel E. de Lucena (UNESP/Guaratinguetá)

Assinatura : \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho aos Meus Queridos Pais, Gilberto e Helena,  
que tanto incentivaram a sua execução.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino, por orientar o estudo deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia, Coordenador Geral do Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, pela oportunidade de estar participando deste programa de Pós-Graduação.

Ao corpo docente da Universidade de Taubaté, na presença de Prof. Dr. Álvaro Manuel de Souza Soares, Prof. Dr. Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia, Prof. Dr. Francisco José Grandinetti, Prof. Dr. Wilton Ney do Amaral Pereira, Prof. Dr. Edilson Hiroshi Tamai e Prof. Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria, por compartilharem seus conhecimentos e suas experiências pessoais.

À secretaria da Unitau, por seus esforços em nos auxiliar na administração de nossa vida acadêmica.

À Universidade de Taubaté, que cedeu os laboratórios e acesso à informação.

À Schweitzer-Mauduit do Brasil, na presença do Eng.<sup>o</sup> Edson Flávio Lima Ferreira, Gerente do Departamento de Manutenção Industrial, que viabilizou este estudo através do incentivo à execução e pleno acesso à informação.

## RESUMO

RIBEIRO, G. W. *Otimização da Velocidade de Acionamento de uma Máquina de Fabricação de Papel*. 2004. 108p. Dissertação (Mestrado, Engenharia Mecânica, área de Concentração: Automação e Controle Industrial) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté.

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de cálculos para a concepção do incremento de velocidade e a elaboração do projeto de uma central de comando totalmente automatizada para os motores do acionamento de uma máquina de fabricação de papéis. Tem por base o acionamento eletromecânico utilizado na fábrica de papéis Schweitzer-Mauduit localizada na Cidade de Piraí – Rio de Janeiro. Aplicaram-se os conceitos de cinemática, automação industrial e básico de modelagem de sistemas eletromecânicos e controle de processos. O acionamento é composto por um sistema de formação tipo mesa plana, setor de prensagem com três prensas, setor de secagem, sendo este dividido em dois grupos, onde o primeiro possui quatorze cilindros secadores e o segundo possui sete cilindros secadores, uma calandra e uma bobinadeira, além dos cilindros guia para direcionamento do papel durante o processo produtivo. O sistema de transmissão mecânica era acionado por um motor C.C., que mantinha o sincronismo apropriado ao processo entre os vários setores existentes na máquina. O escopo do estudo foi definido a partir de um exemplo prático, tendo estabelecido as características técnicas dos componentes do sistema, associando-o a outras metodologias de concepção disponíveis no mercado, que pudessem viabilizar o desenvolvimento do projeto. A proposta ainda inclui a modelagem parcial do sistema em questão. Para obter os resultados teóricos, foram utilizados conceitos de cinemática e controle de processos, utilizando-se na base de cálculos as condições de carga mais críticas identificadas no processo produtivo. O resultado da concepção foi obtido a partir de dados reais da central de comando atualmente instalada, que serviram de base para atestar a eficácia do projeto.

Palavras-Chave: Desenvolvimento, projeto, central de comando, sistema, acionamento, velocidade, controle, digital, motor, C.C..

## **ABSTRACT**

RIBEIRO, G. W. Optimization of the Speed of the Activation of a Machine of Papermaking. 2004. 108p. Dissertation (Master's degree in Mechanical Engineering, area of Concentration: Automation and Industrial Control) - Department of Mechanical Engineering, University of Taubaté, Taubaté.

This work has for objective the development of the calculations for the conception of the increment of speed and the elaboration of the project of a command central totally automated for the motors of the main activation of a machine of papers. Has for base the electromechanical activation used in the factory of papers located Schweitzer-Mauduit in the City of Pirai - Rio de Janeiro. The kinematics concepts, automation industrial and basic of modeling of systems electromechanical and control of processes were applied. The activation is composed by a system of formation type table glides, press section with three presses, drying section, being this divided in two groups, where the first possesses fourteen drying cylinders and the second possesses seven drying cylinders, a skylark and a bobinadeira, besides the cylinders guide for to drive of the paper during the productive process. The system of mechanical transmission was worked by a motor CC, that blanket the appropriate synchronize to the process among the several existent sections in the machine. The mark of the study was defined starting from a practical example, having established the technical characteristics of the components of the system, associating it with other available conception methodologies in the market, that could make possible the development of the project. The proposal still included the partial modeling of the system in subject. To obtain the theoretical results, kinematics concepts and control of processes was used, being used in the base of calculations the identified more critical load conditions in the productive process. The result of the conception was obtained starting from real data of the last command central installed, that served as base to attest the effectiveness of the project.

Word-key: Development, project, central of command, system, main activation, speed, control, digital, motor, DC.

## SUMÁRIO

	<i>Página</i>
<i>Resumo</i> .....	5
.	
<i>Abstract</i> .....	6
..	
<i>Lista de Figuras</i> .....	12
<i>Lista de Tabelas</i> .....	14
.....	
<i>Simbologia, Acrônimos e Abreviaturas</i> .....	15
1. <i>Introdução</i> .....	18
.....	
2. <i>Revisão da Literatura</i> .....	19
2.1 <i>Método Voith</i> .....	19
2.2 <i>Configuração original da máquina de fabricação de papel</i> .....	22
2.2.1 <i>Configuração construtiva da máquina de fabricação de papel</i> .....	22
2.2.2 <i>Descrição técnica do acionamento elétrico original</i> .....	24
3. <i>Material e Métodos</i> .....	27



<b>3.1</b>	27
<b>Proposição.....</b>	
<b>3.2 Determinação do máximo incremento de velocidade do conjunto original.....</b>	27
<b>3.2.1 Dados coletados do retificador trifásico, nas condições mais críticas, durante o processo produtivo.....</b>	27
<b>3.2.2 Estimativa de perdas elétricas no motor C.C. da transmissão principal.....</b>	27
<b>3.3 Determinação da potência dos motores para os acionamentos eletromecânicos.....</b>	31
..	
<b>3.3.1 Determinação da potência do sistema eletromecânico do setor de sucção (rolo de sucção).....</b>	31
<b>3.3.1.1 A velocidade da carga com a redução original para uma velocidade máxima de trabalho de 300m/min.....</b>	32
<b>3.3.1.2 A velocidade da carga e determinação da redução para uma velocidade de trabalho de 600m/min.....</b>	32
<b>3.3.2 Determinação da potência do sistema eletromecânico do setor de colagem (prensa de cola).....</b>	34
<b>3.3.2.1 Acionamento eletromecânico do rolo fixo da prensa de colagem.....</b>	34
<b>3.3.2.1.1 Cálculo da inércia total do rolo fixo (<math>wk^2</math>).....</b>	35
<b>3.3.2.1.2 Cálculo da velocidade (<math>\Delta n</math>) em RPM para 600m/min na</b>	35

<b>carga.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.2.1.3 Cálculo do torque na carga</b>	<b>36</b>
<b>(T).....</b>	
<b>3.3.2.1.4 Cálculo da potência do motor</b>	<b>36</b>
<b>(P(HP)).....</b>	
<b>3.3.2.1.5 Cálculo do torque refletido no</b>	<b>37</b>
<b>motor.....</b>	
	<i>Página</i>
<b>3.3.2.2 Acionamento eletromecânico do rolo móvel da prensa de</b>	<b>38</b>
<b>colagem.....</b>	
<b>3.3.2.2.1 Cálculo da inércia total do rolo móvel</b>	<b>38</b>
<b>(<math>wk^2</math>).....</b>	
<b>3.3.2.2.2 Cálculo da velocidade (<math>\Delta n</math>) em RPM para 600m/min na</b>	<b>39</b>
<b>carga.....</b>	
<b>3.3.2.2.3 Cálculo do torque na carga</b>	<b>39</b>
<b>(T).....</b>	
<b>3.3.2.2.4 Cálculo da potência do motor</b>	<b>40</b>
<b>(P(HP)).....</b>	
<b>3.3.2.2.5 Cálculo do torque refletido no</b>	<b>40</b>
<b>motor.....</b>	
<b>3.3.3 Determinação da potência do sistema eletromecânico do setor da</b>	<b>42</b>
<b>calandra</b>	
<b>(acetinadeira).....</b>	
<b>3.3.3.1 Acionamento eletromecânico do rolo superior</b>	<b>42</b>
<b>calandra.....</b>	
<b>3.3.3.1.1 Cálculo da inércia total do rolo superior</b>	<b>42</b>
<b>(<math>wk^2</math>).....</b>	

3.3.3.1.2 Cálculo da velocidade ( $\Delta n$ ) em RPM para 600m/min na carga.....	43
3.3.3.1.3 Cálculo do torque na carga (T).....	43
3.3.3.1.4 Cálculo da potência do motor (P(HP)).....	44
3.3.3.1.5 Cálculo do torque refletido no motor.....	44
3.3.3.2 Acionamento eletromecânico do rolo inferior da calandra.....	45
3.3.3.2.1 Cálculo da inércia total do rolo inferior ( $wk^2$ ).....	46
3.3.3.2.2 Cálculo da velocidade ( $\Delta n$ ) em RPM para 600m/min na carga.....	46
3.3.3.2.3 Cálculo do torque na carga (T).....	47
3.3.3.2.4 Cálculo da potência do motor (P(HP)).....	47
3.3.3.2.5 Cálculo do torque refletido no motor.....	48
3.4 Descrição técnica do acionamento elétrico otimizado para o incremento de velocidade de 300m/min para 600m/min.....	49
3.5 Estrutura da rede de comunicação e controle de sincronismo do acionamento da máquina de fabricação de papel.....	51
3.6 Modelagem do sistema em estudo.....	52

<b>3.6.1 Características de desempenho do motor C.C. controlado por armadura....</b>	53
<b>3.6.2 Características de desempenho do tacogerador.....</b>	55
<b>3.6.3 Características de desempenho do retificador trifásico.....</b>	56
<b>3.6.3.1 Controlador de velocidade PI microprocessado.....</b>	57
<b>3.6.3.1.1 Controlador PI.....</b>	57
<b>3.6.3.2 Circuito de disparo.....</b>	58
<b>3.6.3.2.1 Circuito do gerador de ângulo de controle <math>\alpha</math>.....</b>	59
<b>3.6.3.2.2 Funcionamento do circuito de sincronização do gerador de rampa ...</b>	60
	<i>Página</i>
<b>3.6.3.3 Circuito de potência.....</b>	61
<b>3.6.3.3.1 Características de desempenho do circuito de potência do retificador trifásico.....</b>	62
<b>3.6.4 Características de desempenho do redutor de engrenagens.....</b>	64
<b>3.6.5 Análise do Controlador de velocidade de cada um dos retificadores trifásicos.....</b>	65
<b>..</b>	

<b>3.6.6 Diagrama de blocos do novo sistema de controle de velocidade para 600m/min.....</b>	66
.	
<b>3.6.7 Simulação matemática a partir da obtenção do diagrama de blocos e funções de transferência do novo sistema de controle de velocidade.....</b>	68
.	
<b>3.6.7.1 Simulação matemática do acionamento do rolo de sucção.....</b>	68
<b>3.6.7.1.1 Função de transferência do acionamento do rolo de sucção.....</b>	69
<b>3.6.7.1.2 Análise gráfica da função de transferência do acionamento do rolo de sucção.....</b>	69
<b>3.6.7.2 Simulação matemática do acionamento dos rolos fixo e móvel da prensa de colagem.....</b>	70
<b>3.6.7.2.1 Função de transferência do acionamento dos rolos fixo e móvel da prensa de colagem.....</b>	72
<b>3.6.7.2.2 Análise gráfica da função de transferência do acionamento dos rolos fixo e móvel da prensa de colagem.....</b>	72
<b>3.6.7.3 Simulação matemática do acionamento dos rolos superior e inferior da calandra.....</b>	73
.	
<b>3.6.7.3.1 Função de transferência do acionamento do rolo superior da calandra.....</b>	74
.	

<b>3.6.7.3.2 Análise gráfica da função de transferência do acionamento do rolo superior da calandra.....</b>	<b>74</b>
<b>3.6.7.3.3 Simulação matemática do acionamento do rolo inferior da calandra..</b>	<b>75</b>
<b>3.6.7.3.4 Função de transferência do acionamento do rolo inferior da calandra.....</b>	<b>77</b>
<b>3.6.7.3.5 Análise gráfica da função de transferência do acionamento do rolo inferior da calandra.....</b>	<b>77</b>
<b>3.6.7.4 Simulação matemática do acionamento do line shaft.....</b>	<b>78</b>

	<i>Página</i>
<b>4. Resultados.....</b>	<b>80</b>

<b>4.1 Avaliação do ponto de vista financeiro.....</b>	80
<b>4.2 Avaliação do ponto de vista técnico.....</b>	81
<b>4.2.1 Análise gráfica dos novos acionamentos da máquina de fabricação de papéis.....</b>	84
<b>4.2.1.1 Gráfico de velocidade do novo acionamento do rolo de sucção.....</b>	84
<b>4.2.1.2 Gráfico de velocidade do novo acionamento da prensa de colagem rolo fixo.....</b>	85
<b>4.2.1.3 Gráfico de velocidade do novo acionamento da prensa de colagem rolo móvel.....</b>	86
<b>4.2.1.4 Gráfico de sincronismo de velocidade entre os acionamentos do rolo fixo e móvel da prensa de colagem.....</b>	86
<b>4.2.1.5 Gráfico de velocidade do novo acionamento do rolo superior da calandra.....</b>	87
<b>4.2.1.6 Gráfico de velocidade do novo acionamento do rolo inferior da calandra.....</b>	88
<b>4.2.1.7 Gráfico de sincronismo de velocidade entre os acionamentos do rolo superior e inferior da calandra.....</b>	89
<b>5. Conclusão.....</b>	90
<b>6. Referências Bibliográficas.....</b>	92

<b>7.</b>	94
<b>Apêndice.....</b>	
<b>7.1 Detalhamento técnico de uma máquina para fabricação de papéis.....</b>	94
<b>7.1.1 Caixa de entrada.....</b>	94
<b>7.1.2 Mesa plana.....</b>	95
<b>7.1.3 Parte úmida (prensagem).....</b>	96
<b>7.1.4 Seção de secagem.....</b>	96
<b>7.1.5 Prensa de cola.....</b>	97
<b>7.1.6 Calandra.....</b>	97
<b>7.1.7 Enroladeira.....</b>	97
<b>7.1.8 Central de comando de motores.....</b>	97
<b>7.2 Perfil Técnico Voith.....</b>	98
<b>7.3 Perfil Técnico Beloit.....</b>	101



	<i>Página</i>
<b>7.4 Detalhamento técnico da rede de comunicação Ethernet.....</b>	102
<b>7.4.1 Funcionamento das redes Ethernet.....</b>	102
<b>7.5 Detalhamento técnico da rede de comunicação Controlnet.....</b>	104
<b>7.5.1 Principais vantagens.....</b>	104
<b>8. Anexos.....</b>	105
<b>8.1 Anexo A – Estudo Voith (lista de potência requerida para acionamentos).....</b>	105
<b>8.2 Anexo B – Estudo Voith (lista de potência requerida para acionamentos).....</b>	108

## LISTA DE FIGURAS

	<i>Página</i>
<i>Figura 1 - Máquina de fabricação de papel com mesa plana Tipo Fourdrinier.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2 - Transmissão mecânica tipo Line Shaft.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3 - Esquemático da disposição do acionamento antigo da máquina de fabricação de papel.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4 - Elementos da central de comando.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 5 - Diagrama de blocos do retificador trifásico.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6 - Rolo fixo da prensa de colagem.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 7 - Rolo móvel da prensa de colagem.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 8 - Rolo superior da calandra.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 9 - Rolo inferior da calandra.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura - Esquemático da disposição do novo acionamento da máquina de fabricação de papel.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura - Plataforma da rede de comunicação.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura - Diagrama esquemático do motor C.C. controlado por</i>	<i>53</i>

*armadura.....*

<i>Figura</i>	<i>- Diagrama de blocos do motor C.C. controlado por armadura.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura</i>	<i>- Tacogerador.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura</i>	<i>- Diagrama de blocos do retificador trifásico.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura</i>	<i>- Formas de onda do circuito de disparo e da ponte tiristorizada.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura</i>	<i>- Circuito de disparo da ponte de tiristores.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura</i>	<i>- Esquema da ponte tiristorizada do retificador trifásico C.A. / C.C.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura</i>	<i>- Redutor de engrenagens.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura</i>	<i>- Diagrama de blocos do sistema em malha fechada de controle de velocidade de um motor C.C.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura</i>	<i>- Diagrama de blocos do sistema em malha fechada de controle de velocidade de um retificador trifásico com as funções de transferência de cada bloco.....</i>	<i>65</i>

<b>Figura</b>	<b>- Diagrama de blocos da central de comando de motores otimizada para 600 m/min.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura</b>	<b>- Simulação do controle de velocidade do acionamento individualizado do rolo de sucção.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura</b>	<b>- Simulação do controle de velocidade do acionamento individualizado dos rolos da prensa de colagem.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura</b>	<b>- Simulação do controle de velocidade do acionamento individualizado do rolo superior da calandra.....</b>	<b>75</b>
		<i>Página</i>
<b>Figura</b>	<b>- Simulação do controle de velocidade do acionamento individualizado do rolo inferior da calandra.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura</b>	<b>- Desempenho do sistema de acionamento original do Line Shaft.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura</b>	<b>- Desempenho do novo sistema de acionamento do Line Shaft.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura</b>	<b>- Controle de velocidade do acionamento do rolo de sucção.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura</b>	<b>- Controle de velocidade do acionamento do rolo fixo da prensa de colagem.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura</b>	<b>- Controle de velocidade do acionamento do rolo móvel da prensa</b>	

	<i>de</i>	
	<i>colagem.....</i>	<b>86</b>
<b>Figura</b>	<b>- Sincronismo de velocidade entre os acionamentos dos rolos móvel e fixo da prensa de colagem.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura</b>	<b>- Controle de velocidade do acionamento do rolo superior da calandra.</b>	<b>88</b>
<b>Figura</b>	<b>- Controle de velocidade do acionamento do rolo inferior da calandra...</b>	<b>88</b>
<b>Figura</b>	<b>- Sincronismo de velocidade entre os acionamentos dos rolos superior e inferior da calandra.....</b>	<b>89</b>

## LISTA DE TABELAS

	<i>Página</i>
<i>Tabela 1 - Dados técnicos dos redutores instalados na configuração original.....</i>	<b>23</b>
<i>Tabela 2 - Características do motor do acionamento principal (Line Shaft).....</i>	<b>25</b>
<i>Tabela 3 - Características do retificador trifásico.....</i>	<b>25</b>
<i>Tabela 4 - Características do tacogerador.....</i>	<b>26</b>
<i>Tabela 5 - Dados coletados do retificador trifásico.....</i>	<b>27</b>
<i>Tabela 6 - Setores com maior consumo de potência.....</i>	<b>30</b>
<i>Tabela 7 - Especificação técnica do motor do rolo de sucção.....</i>	<b>34</b>
<i>Tabela 8 - Especificação técnica do motor do rolo fixo da colagem.....</i>	<b>38</b>
<i>Tabela 9 - Especificação técnica do motor do rolo móvel da colagem.....</i>	<b>41</b>
<i>Tabela - Especificação técnica do motor do rolo superior da calandra.....</i>	<b>45</b>
<i>Tabela - Especificação técnica do motor do rolo inferior da calandra.....</i>	<b>49</b>
<i>Tabela - Itenização financeira do projeto com base no estudo apresentado pelo</i>	<b>80</b>

*fabricante.....*

<i>Tabela</i>	<i>- Itenização financeira do projeto com base na metodologia de cálculos apresentados neste desenvolvimento.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela</i>	<i>- Consumo de corrente pelo acionamento do Line Shaft x tipo de papéis produzidos em 2002.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabela</i>	<i>- Consumo de corrente pelo acionamento do Line Shaft x tipo de papéis produzidos em 2003.....</i>	<i>83</i>

## **SIMBOLOGIA, ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS**

$I_{DC}$	- Corrente em corrente contínua
$I_{AC}$	- Corrente em corrente alternada
$R_a$	- Resistência do enrolamento da armadura, ohms;
$L_a$	- Indutância do enrolamento da armadura, henrys;
$i_a$	- Corrente do enrolamento da armadura, ampères;
$i_f$	- Corrente de campo, ampères;
$e_a$	- Tensão aplicada na armadura, volts;
$e_b$	- Força contra-eletromotriz, volts;
$\Theta$	- Deslocamento angular do eixo do motor, radianos;
$T$	- Torque fornecido pelo motor, N.m;
$J$	- Momento de inércia equivalente do motor e da carga referida ao eixo do motor, kgf.m;
$f$	- Coeficiente de fricção-viscosa equivalente do motor e da carga referida ao eixo do motor, kg-m/rad/s;
$\psi$	- Fluxo de entreferro
$\tau$	- Tempo médio de disparo
$V_{vt}$	- Tensão nominal da rede de alimentação
$V_c$	- Tensão C.C. controlada



$V_{ut}$	- Tensão de alimentação da rede
$V_{ac/3\sim}$	- Tensão alternada trifásica
$\alpha$	- Ângulo de disparo
$V_{DC}$	- Tensão em corrente contínua
$V_{m\acute{a}x}$	- Tensão máxima
$V_{m\acute{e}d}$	- Tensão média na carga
$V_a$	- Tensão fase A
$V_b$	- Tensão fase B
$V_c$	- Tensão fase C
$V_{ab}$	- Diferença de potencial entre as fases A e B
$K$	- Constante de torque do motor, kgf.m/amp;
$K_b$	- Constante de força contra-eletromotriz, volts-s/rad;
$K_m$	- Constante de ganho do motor
$T_m$	- Constante de tempo do motor
$P_u$	- Por unidade
$max$	- Valor máximo da grandeza
$m\acute{e}d$	- Valor médio da grandeza
$min$	- Valor mínimo da grandeza
$pespec$	- Valor de potência em kW para cada 1 metro de largura de tela,

*com 10 m/min de velocidade de papel*

*Potência NRL - (carga operacional normal), corresponde aos valores médios que, conforme experiência, ocorrem no eixo de acionamento (motor / redutor) do grupo com cuidadosa manutenção da máquina, sob condições normais de funcionamento.*

*Potência RDC - (capacidade recomendada de acionamento), deve ser fornecida em condições adversas de operação do motor ou redutor.*

*$P_{\text{aceleração}}$  - Potência de aceleração*

*N.m - Newton.metro*

*RPM - Rotações por minuto*

*m/min - Metro por minuto*

*kgf.m - Kilograma força.metro*

*A - Ampére*

*kg - Kilograma*

*kW - Kilowatt*

*mm - Milímetro*

*in - Polegada*

*T - Torque*

*$\Delta n$  - Velocidade em RPM*

$\omega$	- <b>Velocidade em m/min</b>
C.C.	- <b>Corrente Contínua</b>
C.A.	- <b>Corrente Alternada</b>
C.I.	- <b>Circuito Integrado</b>
lb.ft	- <b>Libra pé</b>
lb.ft <sup>2</sup>	- <b>Libra pé quadrado</b>
$wk^2$ ou J	- <b>Momento de inércia</b>
PWM	- <b>Pulse Width Modulation – Modulação por Largura de Pulso</b>
Hz	- <b>Hertz</b>
IEEE	- <b>Institute of Electrical and Electronic Engineers</b>
$\omega_{ld}$	- <b>Lead break frequency</b>
$K_p$	- <b>Ganho proporcional</b>
$T_i$	- <b>Tempo integral</b>

## **1. Introdução**

As máquinas para produção de papel estão se tornando cada vez mais eficientes, seja no aspecto elétrico, mecânico, de automação ou energético. São construídas para as mais altas possibilidades de produção e eficiência. Com o aumento da concorrência os investimentos que visam o aumento de produtividade se tornaram extremamente elevados, visando incremento de velocidade.

Estimulado por este cenário o presente trabalho trata de um conjunto de cálculos, conceitos técnicos e dispositivos, que, numa máquina de fabricação de papéis especiais, permitem aumentar a velocidade de trabalho, atualmente cerca de 300m/min, para 600m/min, além do desenvolvimento de uma central de comando para os motores do acionamento totalmente automatizada, que proporciona maior confiabilidade, através da redução das intervenções corretivas e preventivas.

O sistema de acionamento de uma máquina para produção de papéis constitui um item de grande peso no custo operacional, pois, se este for concebido sem critério adequado, poderá provocar efeitos indesejáveis, tais como consumo excessivo de energia elétrica, variações de velocidade que acarretará na redução da qualidade do papel produzido, ocasionando perda de matéria prima e retrabalhos.

No apêndice, são apresentados os detalhamentos técnicos dos setores que compõem uma máquina para fabricação de papéis.

## 2. Revisão da Literatura

As técnicas que visam o desenvolvimento de projetos de acionamentos para máquinas de fabricação de papel foram desenvolvidas a partir de experimentos práticos.

Os métodos mais utilizados para realizar o dimensionamento da potência dos motores para máquinas de fabricação de papel e especificação da relação de transmissão dos redutores são os utilizados pela Voith e Beloit, cujos respectivos perfis técnicos são detalhados no apêndice. Como os métodos são bem semelhantes, será apresentado neste trabalho a metodologia Voith.

### 2.1 Método Voith

A metodologia de cálculo Voith foi concebida a partir da construção de um protótipo de máquina de fabricação de papel com uma mesa plana de 1 metro de largura, onde foi aplicada uma velocidade estável de 10m/min. Durante o funcionamento desta máquina, foram medidas as potências dos motores em regime de trabalho em vazio. A partir daí foram elaboradas tabelas de potência específica para os vários setores que compõem uma máquina de fabricação de papel e uma fórmula (equação 1) para cálculos de NRL, a partir da potência específica em kilowatts, da largura da tela em metros e da velocidade de trabalho em m/min. É fornecido o valor da potência NRL dos motores em kilowatts. Conforme a fórmula a seguir [15].

$$P_{NRL} = \frac{(NS).(L_{Tela}).(\omega_{Trabalho})}{(10)} \quad (1)$$

onde

$P_{NRL}$  = Potência operacional normal, kW;

NS = Potência específica (pespec) a vazio, kW;

$L_{Tela}$  = Largura da tela, m;

$\omega_{\text{Trabalho}}$  = Velocidade de trabalho, m/min.

Após o cálculo da potência NRL, é necessário efetuar o cálculo da potência de aceleração do motor. Foi definido pela Voith que um motor levará 25 segundos para atingir a velocidade de 100m/min. A equação 2 fornece a fórmula para obtenção da potência de aceleração. Conforme a fórmula a seguir [15].

$$P_{\text{Aceleração}} = \frac{T \cdot \Delta n_{\text{Motor}}}{(5252)} \quad (2)$$

onde

$P_{\text{Aceleração}}$  = Potência de aceleração, kW;

T = Torque, lb.ft;

$\Delta n_{\text{Motor}}$  = Velocidade do motor, RPM.

Pode-se obter agora a potência necessária para os motores, denominada RDC, que além de utilizar os valores do produto das equações 1 e 2, são incluídos nos cálculos fatores de segurança. Utiliza-se a fórmula da equação 3 e algumas considerações [15].

$$P = P_{\text{Aceleração}} + P_{\text{NRL}} \quad (3)$$

onde

P = Potência necessária, kW;

$P_{\text{Aceleração}}$  = Potência de aceleração, kW;

$P_{\text{NRL}}$  = Potência operacional normal, kW.

Para obter-se a potência RDC dos motores, é necessário multiplicar o valor da potência necessária para os motores, conforme a equação 3, por um fator de segurança definido para cada um dos setores que compõem uma máquina de fabricação de papel, que foi definido pelo fabricante, após longos anos de experiência

neste seguimento. Estes valores serão demonstrados em uma tabela e agregam um valor de aproximadamente 40% do valor da potência calculada na equação 3. Conforme a fórmula a seguir [15].

$$P_{RDC} = P \cdot \eta \quad (4)$$

onde

$P_{RDC}$  = Potência recomendada de acionamento, kW;

$P$  = Potência necessária, kW;

$\eta$  = Fator de segurança, %.

Considerações:

- a. Se  $P_{RDC} \geq \sum(P_{Aceleração} + P_{NRL})$ , então o motor calculado atende.
- b. Se  $P_{RDC} \leq \sum(P_{Aceleração} + P_{NRL})$ , então o motor calculado não atende.

Portanto, o valor da potência RDC sempre deverá ser igual ou superior à somatória da potência de aceleração e a potência NRL. Pois, o motor calculado deverá suportar condições adversas de operação durante o processo produtivo. Tais como, falhas de lubrificação, leves desalinhamentos e cilindros secadores alagados com água [15].

Esta metodologia de cálculos é muito confiável. Porém, agrega um custo final de projeto muito maior, devido à grande margem de segurança utilizada. A base de cálculos utilizada neste trabalho visa garantir a mesma confiabilidade e estabilidade do acionamento, levando-se em consideração os conhecimentos práticos adquiridos junto aos produtos produzidos na máquina em questão, viabilizando assim a elaboração de uma nova metodologia de cálculos para este tipo de equipamento.

Este trabalho não visa realizar projetos para concepção de máquinas de fabricação de papel e, sim, fornecer subsídios para que o profissional envolvido possa

realizar otimizações em máquinas que tenham a mesma configuração física e que já estejam em funcionamento em um determinado complexo fabril.

## 2.2 Configuração original da máquina de fabricação de papel

A máquina em questão foi projetada para atingir uma velocidade máxima de trabalho de 250m/min. Porém, os altos fatores de segurança utilizados pelo fabricante durante a concepção da máquina permitiram que este equipamento sofresse pequenas alterações que viabilizaram um incremento de 50m/min na velocidade de trabalho.

### 2.2.1 Configuração construtiva da máquina de fabricação de papel

O equipamento possui uma configuração com mesa plana *tipo fourdrinier*, conforme mostrado na figura 1.

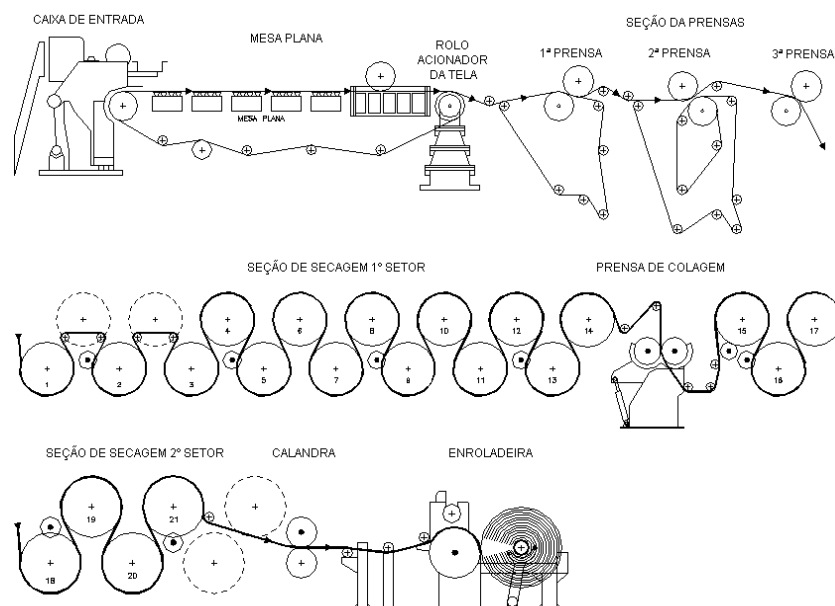
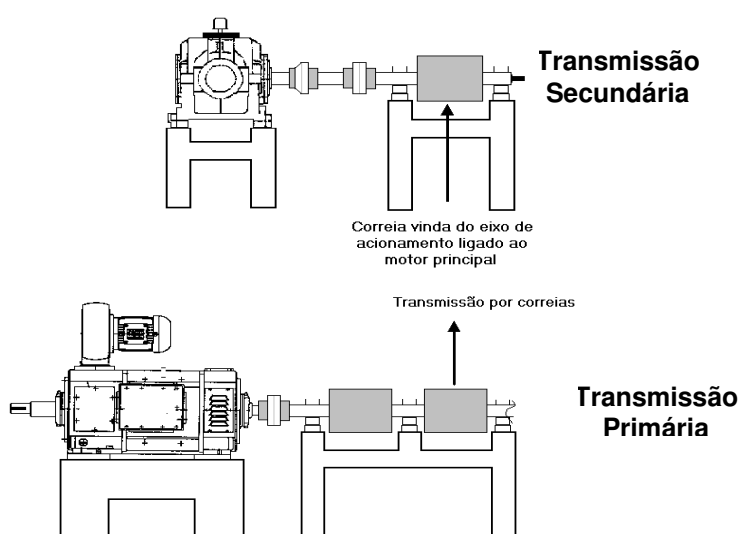


Figura 1 – Máquina de fabricação de papel com mesa plana *tipo*



O acionamento anteriormente instalado era do tipo *line shaft* com apenas um motor C.C. acionando todos os setores da máquina. O sistema mecânico era dividido em transmissão primária e transmissão secundária, onde o controle de passe (tensionamento do papel ao longo dos setores da máquina) era realizado por meio de mudança de diâmetro em polias cônicas instaladas em cada um dos setores da máquina, conforme mostrado na figura 2.



**Figura 2 – Transmissão mecânica tipo *line shaft***

Na tabela 1, são apresentados os dados técnicos dos redutores instalados na máquina na configuração original.

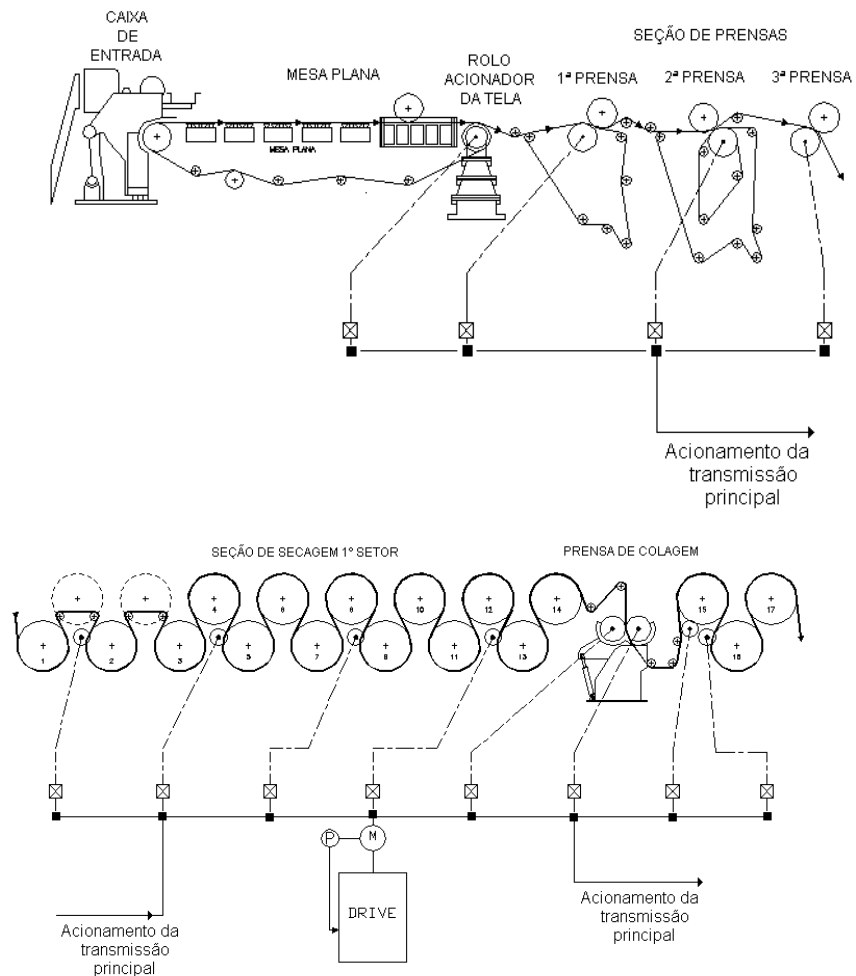
**Tabela 1 – Dados técnicos dos redutores instalados na configuração original**

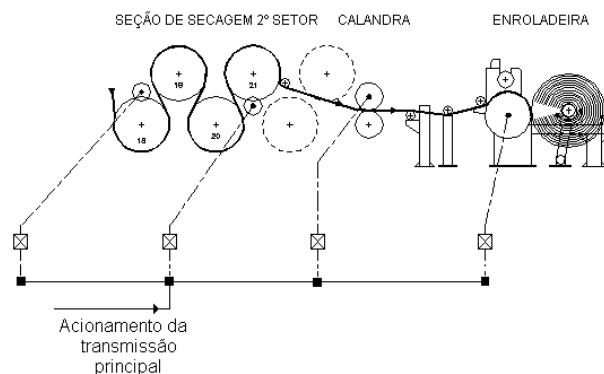
SETOR	TIPO	REDUÇÃO	RPM (ENTRADA)	RPM (SAÍDA)	POT. NRL (HP)
Rolo Sucção	D63HX	11,025	810,33	73,5	164,5
1ª Prensa	D40HX	9,647	795,88	82,5	41,10
2ª Prensa	D46HX	8,333	797,71	95,75	52,9
3ª Prensa	D31HX	8,055	799,51	99,25	17,6
1º Grupo	26X	6,375	792,09	124,25	6,8
2º Grupo	26X	6,375	792,09	124,25	6,8
3º Grupo	D35HX	6,4	795,2	124,25	23,5
4º Grup	D35HX	6,4	800	125	23,5
5º Grupo	D35HX	6,4	806,4	126	23,5
Colagem Móvel	D35HX	8	796	99,5	12,9
Colagem Fixa	180KDH	7,833	799	102	14,57
6º Grupo	26X	6,375	808,03	126,75	5,9
7º Grupo	26X	6,375	808,03	126,75	7

8º Grupo	D35HX	6,4	814,4	127,25	23,5
9º Grupo	D35HX	6,4	814,4	127,25	11,8
Calandra	D46HX	8,1238	800,19	98,5	58,8
Enroladeira	D31HX	8,75	791,87	90,5	20

## 2.2.2 Descrição técnica do acionamento elétrico original

Na configuração original, a central de comando do motor do acionamento principal, possuía apenas um retificador trifásico, para acionar todos os setores da máquina, conforme ilustrado na figura 3.





O motor C.C. do acionamento principal, seu respectivo alimentador/controlador (retificador trifásico) e o sensor (tacogerador) que garante a retroação do sistema em malha fechada, possuem as seguintes características técnicas, mostradas nas tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 – Características do motor do acionamento principal (*line shaft*)

DESCRIÇÃO	DADOS
Modelo	G400h500
Fabricante	ABB
Potência	420KW
Tensão de Armadura (V)	510
Tensão de Campo (V)	165,7
Corrente de Armadura (A)	875,0
Corrente de Campo (A)	19,5
Velocidade (RPM)	800
Rede de Alimentação	440Vac
Freqüência	60Hz
Classe de Isolação	F
Grau de Proteção	IP23S
Forma Construtiva	B3D
Cos $\varphi$	0,92
Conjugado Máximo	5013,70N.m
Conjugado Máximo de Partida	10027,40N.m
Momento de Inércia	13.000kgm <sup>2</sup>
Peso (Motor + Conj. Vent.)	3.495kg
Rendimento Nominal	94,1%
Resistência da armadura	0,502 $\Omega$
Indutância do enr. Da armadura	0,5H

ABB, 1998

Tabela 3 – Características do retificador trifásico

DESCRIÇÃO	DADOS
Modelo	DCS50xB1200-Y5

Fabricante	ABB
Entrada	440Vac – 3~
Saída	500V <sub>DC</sub>
I <sub>DC</sub>	1200A
I <sub>AC</sub>	979A
P	696kW
Peso	150kg
Dimensões	1493x548x447mm
Semicondutor	Interno

ABB, 2001

Tabela 4 – Características do tacogerador

DESCRIÇÃO	DADOS
Modelo	R/100
Fabricante	WEG
Tensão a 1000 RPM	100V
Velocidade Máxima	6000RPM
Sentido de rotação	Reversível
Erro Máximo	0,5%

WEG, 2001

A figura 4 apresenta os elementos que integravam a central de comando do acionamento principal da máquina de fabricação de papel.

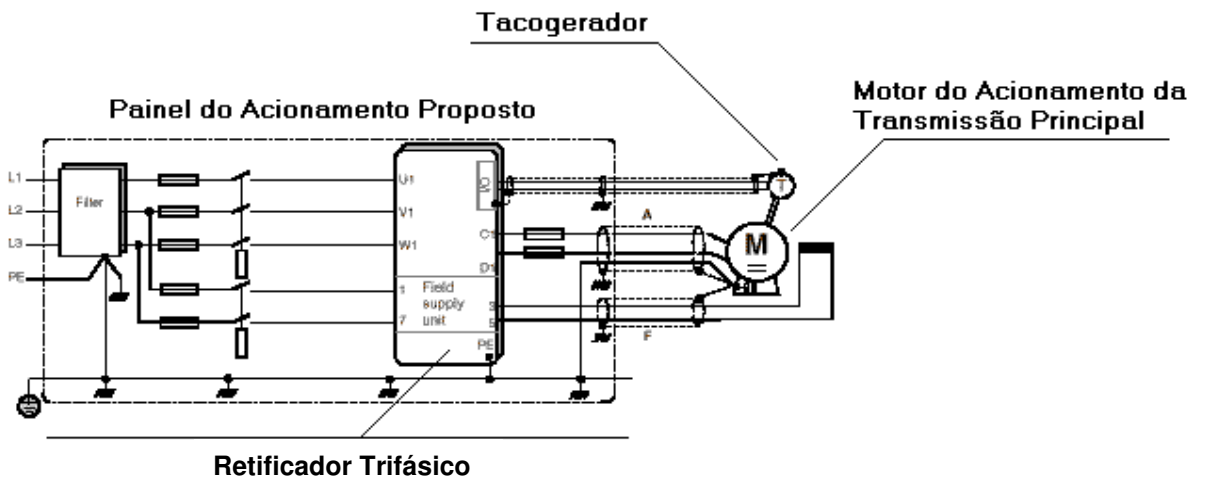


Figura 4 – Elementos da central de comando

Na figura 5 é apresentado o diagrama de blocos do retificador trifásico.

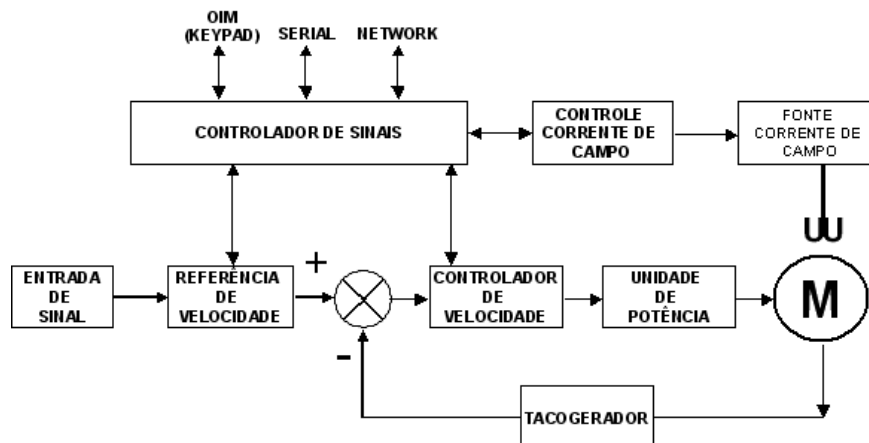


Figura 5 – Diagrama de blocos do retificador trifásico

(AUTOMATION, ROCKWELL. Instruction Manual, Setembro 1998)

### 3. Material e Métodos

#### 3.1 Proposição

Durante o desenvolvimento foram estabelecidas em primeira instância as especificações técnicas das partes que compunham o sistema, para a realização dos cálculos necessários para a viabilização do incremento de velocidade.

Como a seção de acionamento foi projetada originalmente para atingir uma velocidade máxima de trabalho de 250m/min, tornou-se necessária a realização dos cálculos que determinariam o limites reais de velocidade para o conjunto original, como segue, de maneira a viabilizar a metodologia proposta.

#### 3.2 Determinação do máximo incremento de velocidade do conjunto original

##### 3.2.1 Dados coletados do retificador trifásico, nas condições mais críticas, durante o processo produtivo

Tabela 5 – Dados coletados do retificador trifásico

DESCRIÇÃO	DADOS
Corrente de armadura (A)	650
Tensão de armadura (V)	500
Rotação do motor (RPM)	953,5
Velocidade enroladeira (m/min)	296

### 3.2.2 Estimativa de perdas elétricas no motor C.C. da transmissão principal

A equação 5 apresenta a potência elétrica no motor C.C. da transmissão principal em kilowatts, para obtenção do fator de redução dos redutores do acionamento eletromecânico da respectiva máquina.

$$P_{\text{Motor C.C.}} = V_{(\text{nominal})} \cdot I_{(\text{nominal})} \quad (5)$$

onde

$$V_{(\text{nominal})} = 510 = \text{Tensão nominal do motor da transmissão principal, V;}$$

$$I_{(\text{nominal})} = 875 = \text{Corrente nominal do motor da transmissão principal, A;}$$

$$P_{\text{Elétrica}} = 446,250 = \text{Potência elétrica do motor da transmissão principal, kW.}$$

Encontrando-se o valor da potência elétrica do motor C.C. da transmissão principal, a equação 6 apresenta as perdas elétricas.

$$\text{Perdas} = \frac{P_{\text{Elétrica}} - P_{\text{Mecânica}}}{P_{\text{Elétrica}}} \times (100) \quad (6)$$

onde

$$P_{\text{Elétrica}} = 446,250 = \text{Potência elétrica do motor da transmissão principal, kW;}$$

$$P_{\text{Mecânica}} = 420 = \text{Potência mecânica na ponta do eixo do motor da transmissão principal, kW;}$$

$$\text{Perdas} = 5,882 = \text{Perdas elétricas, \%}.$$

Para efeito de cálculo, foram consideradas as perdas elétricas no motor constante e percentualmente igual a 5,882%.

Levando-se em consideração a carga mais crítica durante o processo produtivo. A equação 7 apresenta a potência solicitada pelo sistema com suas respectivas perdas. Conforme a fórmula a seguir.

$$P_{\text{Motor C.C.}} = V_{(\text{máxima})} \cdot I_{(\text{crítica})} - \text{Perdas} \quad (7)$$

onde

$V_{(máxima)}$  = 500 = Tensão de armadura máxima em condições críticas, kW;

$I_{(crítica)}$  = 650 = Corrente de armadura em condições críticas, A;

Perdas = 5,882 = Perdas elétricas, %;

$P_{Motor\ C.C.}$  = 305,883 = Potência solicitada pelo sistema, kW.

A equação 8 apresenta o fator de redução para habilitar os redutores para 600m/min.

$$F_r = \frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} \quad (8)$$

onde

$\omega_{out}$  = 600 = Velocidade final desejada, m/min;

$\omega_{in}$  = 250 = Velocidade atual, m/min;

$F_r$  = 2,4 = Fator de redução.

A equação 9 apresenta o torque total da carga.

$$T_c = \frac{P_{Motor\ C.C.} \cdot 9550}{\Delta n} \quad (9)$$

onde

$P_{Motor\ C.C.}$  = 305,883 = Potência solicitada pelo sistema, kW.

$\Delta n$  = 953,5 = Velocidade de produção, RPM;

$$T_c = 3063,642 = \text{Torque total da carga, N.m.}$$

A equação 10 apresenta o torque refletido no motor.

$$T_{rm} = T_c \cdot F_r \quad (10)$$

onde

$$T_c = 3063,642 = \text{Torque total da carga, N.m;}$$

$$F_r = 2,4 = \text{Fator de redução;}$$

$$T_{rm} = 7352,740 = \text{Torque refletido no motor, N.m.}$$

O torque refletido no motor, mantendo-se o sistema na configuração original, seria de 7352,740N.m, que é superior ao valor máximo disponibilizado pelo fabricante, conforme demonstrado na tabela 2, que seria de 5013,70N.m, proporcionando-se uma velocidade de trabalho máxima de aproximadamente 410m/min.

Assim como o incremento de velocidade, a melhoria da qualidade do produto também foi um fator determinante para a concepção do desenvolvimento. Portanto, a melhoria do controle da velocidade durante o processo produtivo foi muito importante para determinar qual seria a melhor solução para a viabilização do incremento de velocidade proposto para o trabalho em questão.

Associando-se os embasamentos adquiridos a partir dos cálculos teóricos e o custo/benefício para o desenvolvimento, tomou-se como solução a retirada de carga do sistema, a partir da individualização do acionamento eletromecânico de alguns setores da máquina em questão, através da análise dos valores de potência, NRL (HP), disponibilizados na tabela 1.



A tabela 6 apresenta os setores que deveriam ser individualizados por exigirem uma maior quantidade de energia durante a execução do trabalho.

Tabela 6 – Setores com maior consumo de potência

SETOR	POT. NRL (HP)	POT. NRL (KW)
Rolo Sucção	164,5	122,667
Colagem Móvel	12,9	9,619
Colagem Fixa	14,57	10,864
Calandra	58,8	43,847

A individualização do acionamento eletromecânico destes setores proporcionou uma redução no torque refletido no motor C.C. de 61,13%, utilizando-se as equações 9 e 10, pois, a potência requerida pelo sistema sofreu uma redução de 305,883kW para 118,886kW.

### **3.3 Determinação da potência dos motores para os acionamentos eletromecânicos**

Foram aplicados os embasamentos teóricos, para a determinação e seleção da potência dos motores.

#### **3.3.1 Determinação da potência do sistema eletromecânico do setor de sucção (rolo de sucção)**

Levando-se em consideração que o setor de sucção representa um torque de 1228,599N.m, através da equação 9 e da tabela 6, pôde-se obter o torque real refletido no acionamento, através da equação 10:

$$T_{rm} = T_c \cdot F_r$$

onde

$$\begin{aligned}
T_c &= 1228,599 &= \text{Torque total do rolo de sucção, N.m;} \\
F_r &= 11,025 &= \text{Fator de redução atual;} \\
T_{m(r.sucção)} &= 13544,862 &= \text{Torque refletido no motor do rolo de sucção, N.m.}
\end{aligned}$$

Para o torque refletido no motor do rolo de sucção encontrado no cálculo anterior, será necessário encontrar um novo fator de redução para este acionamento, pois, com o valor atual de 13.544,862N.m seria necessário optar por um motor de construção especial, cujo custo seria muito elevado.

### 3.3.1.1 A velocidade da carga com a redução original para uma velocidade máxima de trabalho de 300m/min

A equação 11 apresenta a velocidade do rolo de sucção em RPM para a velocidade de 300m/min.

$$\Delta n_{(r.sucção)} = \frac{\omega_{(r.sucção)}}{\pi.D} \tag{11}$$

onde

$$\begin{aligned}
\omega_{(r.sucção)} &= 300 &= \text{Velocidade do rolo de sucção, m/min;} \\
D &= 1,0 &= \text{Diâmetro do rolo de sucção, m;} \\
\Delta n_{(r.sucção)} &= 95,492 &= \text{Velocidade do rolo de sucção, RPM.}
\end{aligned}$$

### 3.3.1.2 A velocidade da carga e determinação da redução para uma velocidade de trabalho de 600m/min

Levando-se em consideração que a velocidade de trabalho desejada é de 600m/min, pode-se obter a velocidade do rolo de sucção em RPM para esta nova condição, através da equação 11.

$$\Delta n_{(r.sucção)} = \frac{\omega_{(r.sucção)}}{\pi.D}$$

onde

$\omega_{(r.sucção)}$  = 600 = Velocidade do rolo de sucção, m/min;

D = 1,0 = Diâmetro do rolo de sucção, m;

$\Delta n_{(r.sucção)}$  = 190,985 = Velocidade do rolo de sucção, RPM.

A equação 12 apresenta o novo fator de redução para o redutor do rolo de sucção.

Observação: O motor a ser utilizado será de 1780 RPM.

$$F_{r(600)} = \frac{\Delta n_{(motor)}}{\Delta n_{(r.sucção)}} \quad (12)$$

onde

$\Delta n_{(motor)}$  = 1780 = Velocidade do motor, RPM;

$\Delta n_{(r.sucção)}$  = 190,985 = Velocidade do rolo de sucção, RPM;

$F_{r(600)}$  = 9,3201 = Fator de redução para 600m/min.

De posse do valor do fator de redução para 600m/min, pode-se obter o torque refletido no motor individualizado para o setor de sucção, utilizando-se a equação 13.

$$T_{rm(NR)} = \frac{T_{rm(r.sucção)}}{F_r(600)} \quad (13)$$

onde

$T_{rm(r.sucção)}$  = 13544,862 = Torque refletido no motor do rolo de sucção, N.m;

$F_r(600)$  = 9,320 = Fator de redução para 600m/min;

$T_{rm(NR)}$  = 1453,295 = Torque refletido no motor do rolo de sucção para o novo fator de redução, N.m;

$T_{rm(NR)}$  = 148,090 = Torque refletido no motor do rolo de sucção para o novo fator de redução, kgf.m;

É necessário demonstrar o torque refletido em kgf.m, pois os catálogos técnicos do fabricante só utilizam esta unidade para especificação técnica do motor e o valor em N.m é utilizado somente na base de cálculos. Além, de utilizar essa unidade nos cálculos da constante de tempo do motor ( $T_m$ ).

De posse do valor do torque refletido no motor individualizado para o setor de sucção, pôde-se definir a potência e o modelo do motor a ser utilizado. A especificação do motor está apresentada na tabela 7 [8].

Tabela 7 – Especificação Técnica do Motor do Rolo de Sucção

DESCRIÇÃO	DADOS
Potência (kW)	300
Tensão de Armadura (V)	510
Tensão de Campo (V)	165
Corrente de Armadura (A)	588,23
Corrente de Campo (A)	19
Peso (kg)	400

### 3.3.2 Determinação da potência do sistema eletromecânico do setor de colagem (prensa de colagem)

A seguir são apresentados os cálculos para definição do motor rolo fixo da prensa de colagem e, na seqüência, os cálculos referentes ao rolo móvel.

### 3.3.2.1 Acionamento eletromecânico do rolo fixo da prensa de colagem

A figura 6 apresenta uma vista frontal do rolo fixo da prensa de colagem.

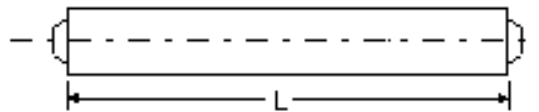


Figura 6 – Rolo fixo da prensa de colagem

Dados:

Pe	= 10,7	= Peso do rolo, t.	= 23593,500	= Peso do rolo, lbs;
L	= 4600	= Comprimento do rolo inferior, mm;		
D	= 780	= Comprimento, mm.	= 30,70	= Comprimento, in;
r	= 390	= Raio, mm.	= 15,350	= Raio, in;
T <sub>acel</sub>	= 25	= Tempo de aceleração, s.		

#### 3.3.2.1.1 Cálculo da inércia total do rolo fixo (wk<sup>2</sup>)

A equação 14 apresenta a inércia total do rolo fixo da prensa de colagem que o motor precisa acelerar [6].

$$wk^2 = \frac{Pe}{386,4} \times \left( \frac{r}{\sqrt{2}} \right)^2 \quad (14)$$

onde

Pe	= 23593,500	= Peso, lbs;
r	= 15,350	= Raio, in;
wk <sup>2</sup>	= 7193,529	= Momento de inércia, in.lb.sec <sup>2</sup> .

### 3.3.2.1.2 Cálculo da velocidade ( $\Delta n$ ) em RPM para 600m/min na carga

Levando-se em consideração que a velocidade de trabalho desejada é de 600m/min, pode-se obter a velocidade do rolo fixo em RPM para esta nova condição, através da equação 11.

$$\Delta n_{(r.\text{fixo})} = \frac{\omega_{(r.\text{fixo})}}{\pi.D}$$

onde

$$\omega_{(r.\text{fixo})} = 600 = \text{Velocidade do rolo fixo, m/min;}$$

$$D = 0,780 = \text{Diâmetro do rolo fixo, m;}$$

$$\Delta n_{(r.\text{fixo})} = 244,853 = \text{Velocidade do rolo fixo, RPM.}$$

### 3.3.2.1.3 Cálculo do torque na carga (T)

A equação 15 apresenta o torque na carga (rolo fixo da prensa de colagem) [6].

$$T_{(r.\text{fixo})} = \frac{wk^2 \cdot (\Delta n_{(r.\text{fixo})})}{308 \cdot (t_{\text{acel}})} \quad (15)$$

onde

$$wk^2 = 7193,529 = \text{Momento de inércia, in.lb.sec}^2, \quad = 19278,567 = \text{Momento de inércia, Lb.ft}^2;$$

$$\Delta n_{(r.\text{fixo})} = 244,853 = \text{Velocidade do rolo fixo, RPM;}$$

$t_{\text{acel}} = 25$  = Tempo de aceleração, s;

$T_{(r.\text{fixo})} = 613,041$  = Torque na carga (rolo fixo), lb.ft.

#### 3.3.2.1.4 Cálculo da potência do motor (P(HP))

A equação 16 apresenta a potência necessária para o motor do rolo fixo da prensa de colagem, em função do torque e da velocidade presentes na carga (rolo fixo da prensa de colagem), para uma velocidade de processo de 600m/min [6].

$$P_{(r.\text{fixo})} = \frac{T_{(r.\text{fixo})} \cdot (\Delta n_{(r.\text{fixo})})}{5252} \quad (16)$$

onde

$T_{(r.\text{fixo})} = 613,041$  = Torque na carga (rolo fixo), lb.ft;

$\Delta n_{(r.\text{fixo})} = 244,853$  = Velocidade do rolo fixo, RPM;

$P_{(r.\text{fixo})} = 28,580$  = Potência elétrica do motor do rolo fixo, HP.       $= 21,312$  = Potência elétrica do motor do rolo fixo, kW.

#### 3.3.2.1.5 Cálculo do torque refletido no motor

A equação 12 apresenta o fator de redução para o redutor do rolo fixo da prensa de colagem.

Observação: O motor a ser utilizado será de 1760 RPM.

$$F_{r(600)} = \frac{\Delta n_{(\text{motor})}}{\Delta n_{(r.\text{fixo})}}$$

onde

$\Delta n_{(\text{motor})} = 1760$  = Velocidade do motor do rolo fixo, RPM;

$\Delta n_{(r.\text{fixo})} = 244,853 =$  Velocidade do rolo fixo, RPM;

$F_{r(600)} = 7,1879 =$  Fator de redução para 600m/min.

De posse do valor do fator de redução para 600m/min, pode-se obter o torque refletido no motor individualizado para o setor de colagem (rolo fixo), utilizando-se a equação 17 [6].

$$T_{rm(r.\text{fixo})} = \frac{T_{(r.\text{fixo})}}{F_{r(600)} \cdot (0,85)} \quad (17)$$

onde

$T_{(r.\text{fixo})} = 613,041 =$  Torque na carga (rolo fixo), lb.ft;

$F_{r(600)} = 7,1879 =$  Fator de redução para 600m/min;

$T_{rm(r.\text{fixo})} = 100,338 =$  Torque na carga (rolo fixo), lb.ft;

$T_{rm(r.\text{fixo})} = 13,802 =$  Torque na carga (rolo fixo), kgf.m.

De posse do valor do torque refletido no motor individualizado para o setor de colagem (rolo fixo), pôde-se definir a potência e o modelo do motor a ser utilizado. A especificação do motor está apresentada na tabela 8 [8].

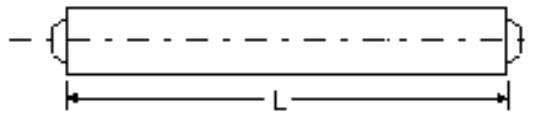
Tabela 8 – Especificação Técnica do Motor do Rolo Fixo da Colagem

DESCRIÇÃO	DADOS
Potência (kW)	30
Tensão de Armadura (V)	510
Tensão de Campo (V)	165
Corrente de Armadura (A)	58,82
Corrente de Campo (A)	19
Peso (kg)	100

### 3.3.2.2 Acionamento eletromecânico do rolo móvel da prensa de colagem

A figura 7 apresenta uma vista frontal do rolo móvel da prensa de colagem.





**Figura 7 – Rolo móvel da prensa de colagem**

Dados:

Pe	= 11,215	= Peso do rolo, t.	= 24729,075	= Peso do rolo, lbs;
L	= 4600	= Comprimento do rolo inferior, mm;		
D	= 800	= Comprimento, mm.	= 31,49	= Comprimento, in;
r	= 400	= Raio, mm.	= 15,740	= Raio, in;
T <sub>acel</sub>	= 25	= Tempo de aceleração, s.		

### 3.3.2.2.1 Cálculo da inércia total do rolo móvel ( $wk^2$ )

A equação 14 apresenta a inércia total do rolo móvel da prensa de colagem que o motor precisa acelerar [6].

$$wk^2 = \frac{Pe}{386,4} \times \left( \frac{r}{\sqrt{2}} \right)^2$$

onde

Pe	= 24729,075	= Peso, lbs;
r	= 15,740	= Raio, in;
$wk^2$	= 7927,754	= Momento de inércia, in.lb.sec <sup>2</sup> .

### 3.3.2.2.2 Cálculo da velocidade ( $\Delta n$ ) em RPM para 600m/min na carga

Levando-se em consideração que a velocidade de trabalho desejada é de 600m/min, pode-se obter a velocidade do rolo móvel em RPM para esta nova condição, através da equação 11.

$$\Delta n_{(r.móvel)} = \frac{\omega_{(r.móvel)}}{\pi.D}$$

onde

$$\begin{aligned} \omega_{(r.móvel)} &= 600 && = \text{Velocidade do rolo móvel, m/min;} \\ D &= 0,800 && = \text{Diâmetro do rolo móvel, m;} \\ \Delta n_{(r.móvel)} &= 238,732 && = \text{Velocidade do rolo móvel, RPM.} \end{aligned}$$

### 3.3.2.2.3 Cálculo do torque na carga (T)

A equação 15 apresenta o torque na carga (rolo móvel da prensa de colagem) [6].

$$T_{(r.móvel)} = \frac{wk^2 \cdot (\Delta n_{(r.móvel)})}{308 \cdot (t_{acel})}$$

onde

$$\begin{aligned} wk^2 &= 7927,754 && = \text{Momento de inércia,} && = 21246,380 && = \text{Momento de inércia,} \\ &&& \text{in.lb.sec}^2. && && \text{Lb.ft}^2; \\ \Delta n_{(r.móvel)} &= 238,732 && = \text{Velocidade do rolo móvel, RPM;} \\ t_{acel} &= 25 && = \text{Tempo de aceleração, s;} \\ T_{(r.móvel)} &= 658,726 && = \text{Torque na carga (rolo móvel), lb.ft.} \end{aligned}$$

### 3.3.2.2.4 Cálculo da potência do motor (P(HP))

A equação 16 apresenta a potência necessária para o motor do rolo móvel da prensa de colagem, em função do torque e da velocidade presentes na carga (rolo móvel da prensa de colagem), para uma velocidade de processo de 600m/min [6].

$$P_{(r.móvel)} = \frac{T_{(r.móvel)} \cdot (\Delta n_{(r.móvel)})}{5252}$$

onde

$T_{(r.móvel)}$  = 658,726 = Torque na carga (rolo móvel), lb.ft;

$\Delta n_{(r.móvel)}$  = 238,732 = Velocidade do rolo móvel, RPM;

$P_{(r.móvel)}$  = 29,942 = Potência elétrica do motor do rolo móvel, HP. = 22,327 = Potência elétrica do motor do rolo móvel, kW.

### 3.3.2.2.5 Cálculo do torque refletido no motor

A equação 12 apresenta o fator de redução para o redutor do rolo móvel da prensa de colagem.

Observação: O motor a ser utilizado será de 1760 RPM.

$$F_{r(600)} = \frac{\Delta n_{(motor)}}{\Delta n_{(r.móvel)}}$$

onde

$\Delta n_{(motor)}$  = 1760 = Velocidade do motor do rolo móvel, RPM;

$\Delta n_{(r.móvel)}$  = 238,732 = Velocidade do rolo móvel, RPM;

$F_{r(600)}$  = 7,3722 = Fator de redução para 600m/min.

De posse do valor do fator de redução para 600m/min, pode-se obter o torque refletido no motor individualizado para o setor de colagem (rolo móvel), utilizando-se a equação 17 [6].

$$T_{rm(r.móvel)} = \frac{T_{(r.móvel)}}{F_{r(600)} \cdot (0,85)}$$

onde

$T_{(r.móvel)}$  = 658,726 = Torque na carga (rolo móvel), lb.ft;

$F_{r(600)}$  = 7,3722 = Fator de redução para 600m/min;

$T_{rm(r.móvel)}$  = 105,120 = Torque na carga (rolo móvel), lb.ft;

$T_{rm(r.móvel)}$  = 14,460 = Torque na carga (rolo móvel), kgf.m.

De posse do valor do torque refletido no motor individualizado para o setor de colagem (rolo móvel), pôde-se definir a potência e o modelo do motor a ser utilizado. A especificação do motor está apresentada na tabela 9 [8].

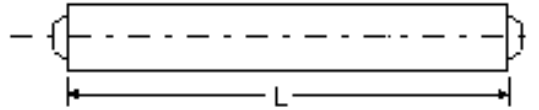
Tabela 9 – Especificação Técnica do Motor do Rolo Móvel da Colagem

DESCRIÇÃO	DADOS
Potência (kW)	30
Tensão de Armadura (V)	510
Tensão de Campo (V)	165
Corrente de Armadura (A)	58,82
Corrente de Campo (A)	19
Peso (kg)	100

### 3.3.3 Determinação da potência do sistema eletromecânico do setor da calandra (acetinadeira)

#### 3.3.3.1 Acionamento eletromecânico do rolo superior da calandra

A figura 8 apresenta uma vista frontal do rolo superior da calandra.



**Figura 8 – Rolo superior da calandra**

Dados:

Pe	= 21,0	= Peso do rolo, t.	= 46305	= Peso do rolo, lbs;
L	= 4600	= Comprimento do rolo inferior, mm;		
D	= 820	= Comprimento, mm.	= 32,28	= Comprimento, in;
r	= 410	= Raio, mm.	= 16,141	= Raio, in;
T <sub>acel</sub>	= 25	= Tempo de aceleração, s.		

### 3.3.3.1.1 Cálculo da inércia total do rolo superior ( $wk^2$ )

A equação 14 apresenta a inércia total do rolo superior da calandra que o motor precisa acelerar [6].

$$wk^2 = \frac{Pe}{386,4} \times \left( \frac{r}{\sqrt{2}} \right)^2$$

onde

Pe	= 46305	= Peso, lbs;
r	= 16,141	= Raio, in;
$wk^2$	= 15610,673	= Momento de inércia, in.lb.sec <sup>2</sup> .

### 3.3.3.1.2 Cálculo da velocidade ( $\Delta n$ ) em RPM para 600m/min na carga

Levando-se em consideração que a velocidade de trabalho desejada é de 600m/min, pode-se obter a velocidade do rolo superior em RPM para esta nova condição, através da equação 11.

$$\Delta n_{(r.superior)} = \frac{\omega_{(r.superior)}}{\pi.D}$$

onde,

$\omega_{(r.superior)} = 600$  = Velocidade do rolo superior, m/min;

$D = 0,820$  = Diâmetro do rolo superior, m;

$\Delta n_{(r.superior)} = 232,909$  = Velocidade do rolo superior, RPM.

### 3.3.3.1.3 Cálculo do torque na carga (T)

A equação 15 apresenta o torque na carga (rolo superior da calandra) [6].

$$T_{(r.superior)} = \frac{wk^2 . (\Delta n_{(r.superior)})}{308 . (t_{acel})}$$

onde

$wk^2 = 15610,673$  = Momento de inércia,  $in.lb.sec^2$ ,  $= 41836,603$  = Momento de inércia,  $Lb.ft^2$ ;

$\Delta n_{(r.superior)} = 232,909$  = Velocidade do rolo superior, RPM;

$t_{acel} = 25$  = Tempo de aceleração, s;

$T_{(r.superior)} = 1265,470$  = Torque na carga (rolo superior), lb.ft.

### 3.3.3.1.4 Cálculo da potência do motor (P(HP))

A equação 16 apresenta a potência necessária para o motor do rolo superior da calandra, em função do torque e da velocidade presentes na carga (rolo superior da calandra), para uma velocidade de processo de 600m/min [6].

$$P_{(r.superior)} = \frac{T_{(r.superior)} \cdot (\Delta n_{(r.superior)})}{5252}$$

onde

$T_{(r.superior)} = 1265,470$  = Torque na carga (rolo superior), lb.ft;

$\Delta n_{(r.superior)} = 232,909$  = Velocidade do rolo superior, RPM;

$P_{(r.superior)} = 56,119$  = Potência elétrica do motor do rolo superior, HP. =  $41,848$  = Potência elétrica do motor do rolo superior, kW.

### 3.3.3.1.5 Cálculo do torque refletido no motor

A equação 12 apresenta o fator de redução para o redutor do rolo superior da calandra.

Observação: O motor a ser utilizado será de 1760 RPM.

$$F_{r(600)} = \frac{\Delta n_{(motor)}}{\Delta n_{(r.superior)}}$$

onde

$\Delta n_{(motor)} = 1760$  = Velocidade do motor do rolo superior, RPM;

$\Delta n_{(r.superior)} = 232,909$  = Velocidade do rolo superior, RPM;

$F_{r(600)} = 7,5565$  = Fator de redução para 600m/min.

De posse do valor do fator de redução para 600m/min, pode-se obter o torque refletido no motor individualizado para o setor da calandra (rolo superior), utilizando-se a equação 17 [6].

$$T_{rm(r.superior)} = \frac{T_{(r.superior)}}{F_{r(600)} \cdot (0,85)}$$

onde

$$T_{(r.superior)} = 1265,470 = \text{Torque na carga (rolo superior), lb.ft;}$$

$$F_{r(600)} = 7,5565 = \text{Fator de redução para 600m/min;}$$

$$T_{rm(r.superior)} = 197,020 = \text{Torque na carga (rolo superior), lb.ft;}$$

$$T_{rm(r.superior)} = 27,103 = \text{Torque na carga (rolo superior), kgf.m.}$$

De posse do valor do torque refletido no motor individualizado para o setor da calandra (rolo superior), pôde-se definir a potência e o modelo do motor a ser utilizado. A especificação do motor está apresentada na tabela 10 [8].

Tabela 10 – Especificação Técnica do Motor do Rolo Superior da Calandra

DESCRIÇÃO	DADOS
Potência (kW)	45
Tensão de Armadura (V)	510
Tensão de Campo (V)	165
Corrente de Armadura (A)	88,23
Corrente de Campo (A)	19
Peso (kg)	125

### 3.3.3.2 Acionamento eletromecânico do rolo inferior da calandra

A figura 9 apresenta uma vista frontal do rolo inferior da calandra.

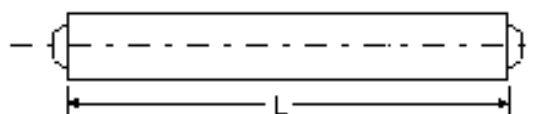


Figura 9 – Rolo inferior da calandra

Dados:

$$P_e = 10,1 = \text{Peso do rolo, t.} = 22270,5 = \text{Peso do rolo, lbs;}$$

$$L = 4600 = \text{Comprimento do rolo inferior, mm;}$$

$$D = 580 = \text{Comprimento, mm.} = 22,83 = \text{Comprimento, in;}$$

$$r = 290 = \text{Raio, mm.} = 11,417 = \text{Raio, in;}$$



$T_{\text{acel}} = 15 =$  Tempo de aceleração, s.

### 3.3.3.2.1 Cálculo da inércia total do rolo inferior ( $wk^2$ )

A equação 14 apresenta a inércia total do rolo inferior da calandra que o motor precisa acelerar [6].

$$wk^2 = \frac{Pe}{386,4} \times \left( \frac{r}{\sqrt{2}} \right)^2$$

onde

$Pe = 22270,5 =$  Peso, lbs;

$r = 11,417 =$  Raio, in;

$wk^2 = 3756,356 =$  Momento de inércia, in.lb.sec<sup>2</sup>.

### 3.3.3.2.2 Cálculo da velocidade ( $\Delta n$ ) em RPM para 600m/min na carga

Levando-se em consideração que a velocidade de trabalho desejada é de 600m/min, pode-se obter a velocidade do rolo inferior em RPM para esta nova condição, através da equação 11.

$$\Delta n_{(r.inferior)} = \frac{\omega_{(r.inferior)}}{\pi.D}$$

onde

$\omega_{(r.inferior)} = 600 =$  Velocidade do rolo inferior, m/min;

$D = 0,580 =$  Diâmetro do rolo inferior, m;

$\Delta n_{(r.inferior)} = 329,286 =$  Velocidade do rolo inferior, RPM.

### 3.3.3.2.3 Cálculo do torque na carga (T)

A equação 15 apresenta o torque na carga (rolo inferior da calandra) [6].

$$T_{(r.inferior)} = \frac{wk^2 \cdot (\Delta n_{(r.inferior)})}{308 \cdot (t_{acel})}$$

onde

$$wk^2 = 3756,356 = \text{Momento de inércia, in.lb.sec}^2, \quad 10067,034 = \text{Momento de inércia, Lb.ft}^2;$$

$$\Delta n_{(r.inferior)} = 329,286 = \text{Velocidade do rolo inferior, RPM};$$

$$t_{acel} = 15 = \text{Tempo de aceleração, s};$$

$$T_{(r.inferior)} = 717,518 = \text{Torque na carga (rolo inferior), lb.ft.}$$

### 3.3.3.2.4 Cálculo da potência do motor (P(HP))

A equação 16 apresenta a potência necessária para o motor do rolo inferior da calandra, em função do torque e da velocidade presentes na carga (rolo inferior da calandra), para uma velocidade de processo de 600m/min [6].

$$P_{(r.inferior)} = \frac{T_{(r.inferior)} \cdot (\Delta n_{(r.inferior)})}{5252}$$

onde

$$T_{(r.inferior)} = 717,518 = \text{Torque na carga (rolo inferior), lb.ft};$$

$$\Delta n_{(r.inferior)} = 329,286 = \text{Velocidade do rolo inferior, RPM};$$

$$P_{(r.inferior)} = 44,986 = \text{Potência elétrica do motor do rolo inferior, HP}, \quad 33,546 = \text{Potência elétrica do motor do rolo inferior, kW}.$$

### 3.3.3.2.5 Cálculo do torque refletido no motor

A equação 12 apresenta o fator de redução para o redutor do rolo inferior da calandra.

Observação: O motor a ser utilizado será de 1770 RPM.

$$F_{r(600)} = \frac{\Delta n_{(\text{motor})}}{\Delta n_{(\text{r.inferior})}}$$

onde

$$\Delta n_{(\text{motor})} = 1770 = \text{Velocidade do motor do rolo inferior, RPM};$$

$$\Delta n_{(\text{r.inferior})} = 329,286 = \text{Velocidade do rolo inferior, RPM};$$

$$F_{r(600)} = 5,3752 = \text{Fator de redução para 600m/min.}$$

De posse do valor do fator de redução para 600m/min, pode-se obter o torque refletido no motor individualizado para o setor da calandra (rolo inferior), utilizando-se a equação 17 [6].

$$T_{rm(\text{r.superior})} = \frac{T_{(\text{r.superior})}}{F_{r(600)} \cdot (0,85)}$$

onde

$$T_{(\text{r.inferior})} = 717,518 = \text{Torque na carga (rolo inferior), lb.ft};$$

$$F_{r(600)} = 5,3752 = \text{Fator de redução para 600m/min};$$

$$T_{rm(\text{r.inferior})} = 157,043 = \text{Torque na carga (rolo inferior), lb.ft};$$

$$T_{rm(\text{r.inferior})} = 21,6036 = \text{Torque na carga (rolo inferior), kgf.m.}$$

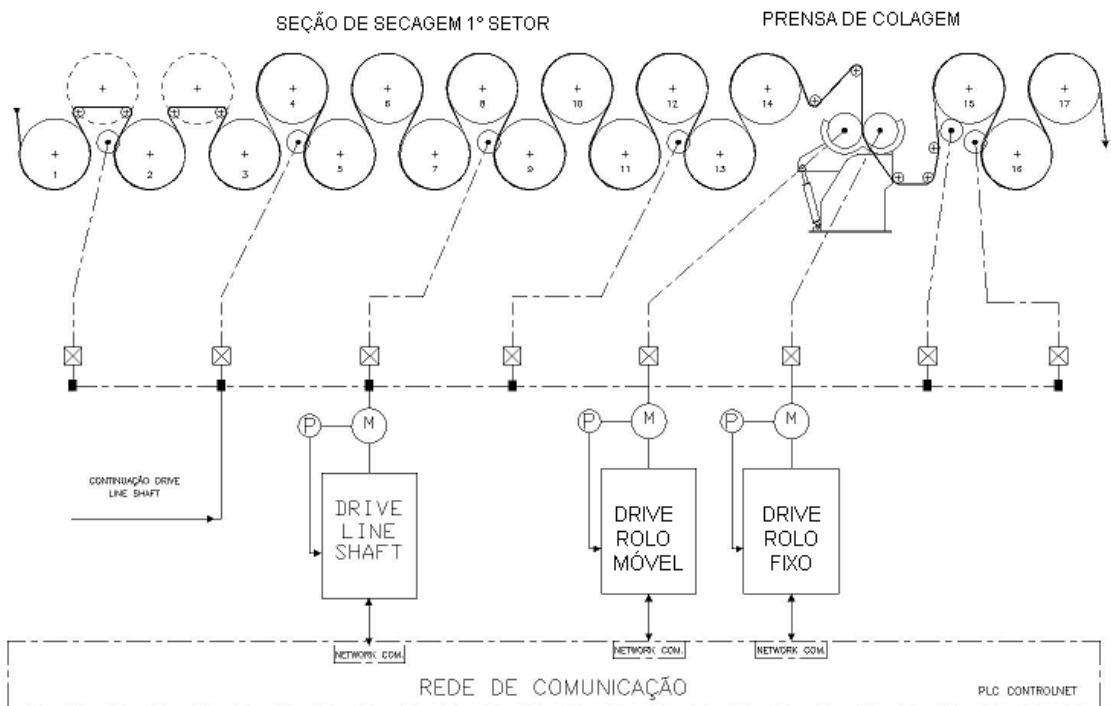
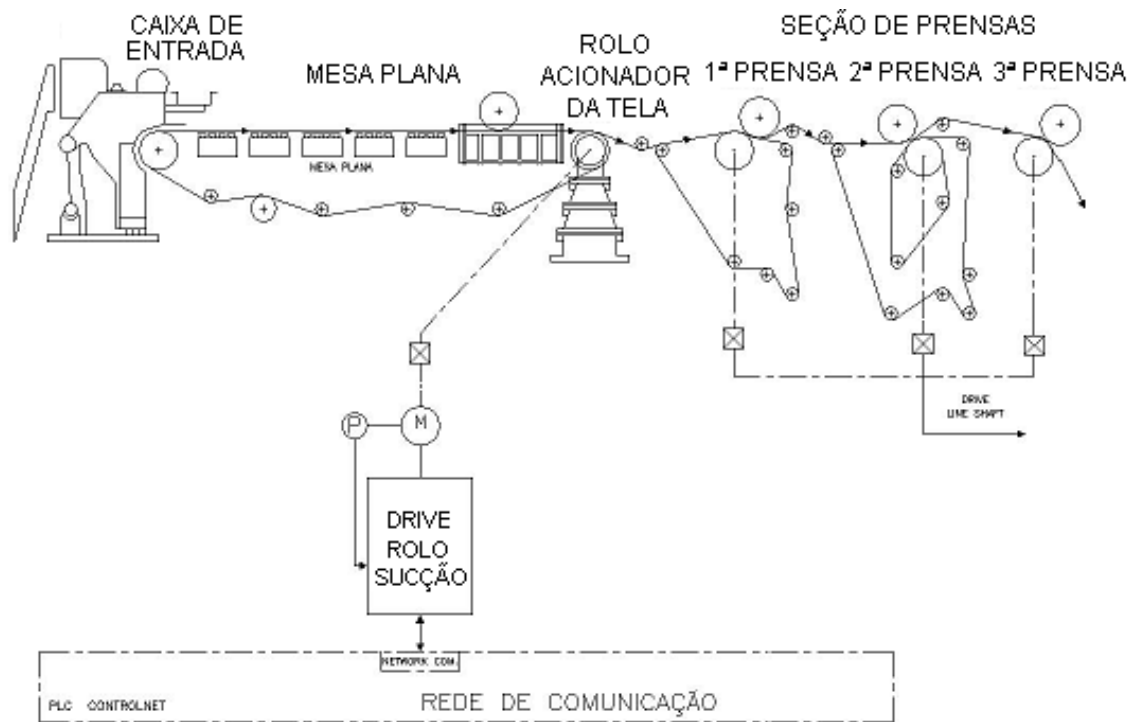
De posse do valor do torque refletido no motor individualizado para o setor da calandra (rolo inferior), pôde-se definir a potência e o modelo do motor a ser utilizado. A especificação do motor está apresentada na tabela 11 [8].

Tabela 11 – Especificação Técnica do Motor do Rolo Inferior da Calandra

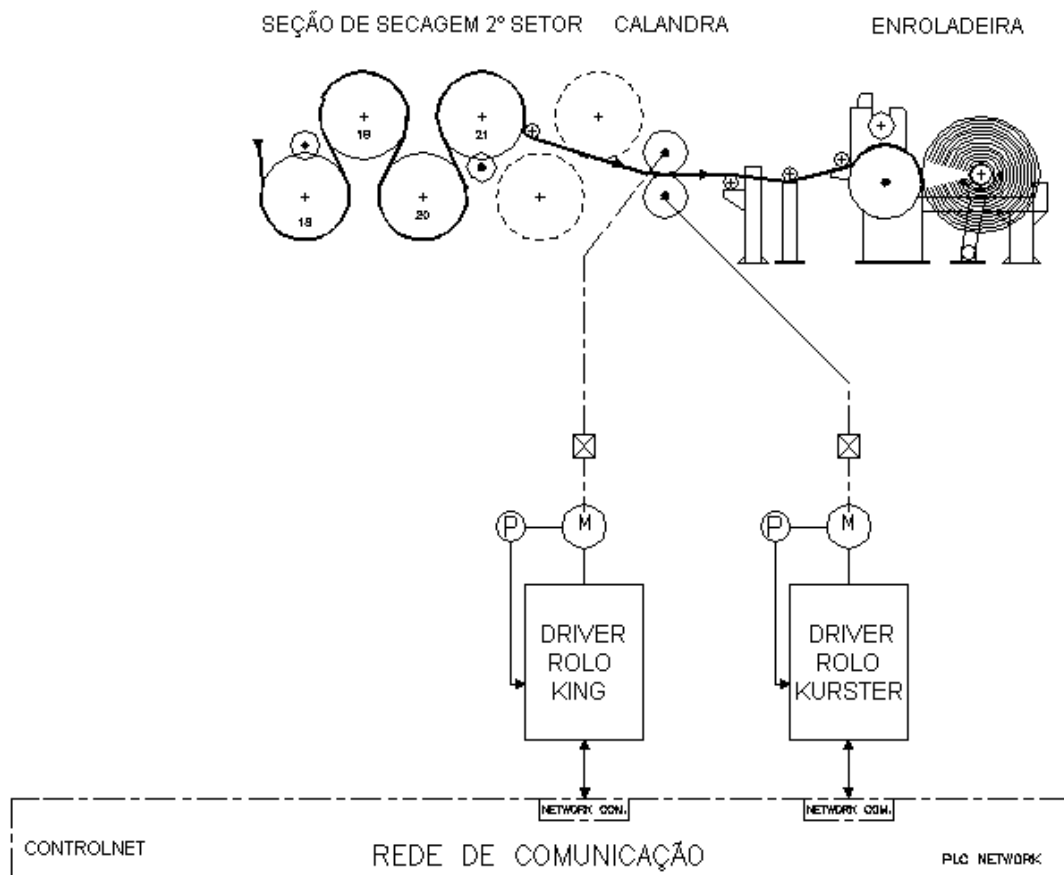
<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>DADOS</b>
Potência (kW)	38
Tensão de Armadura (V)	510
Tensão de Campo (V)	165
Corrente de Armadura (A)	74,5
Corrente de Campo (A)	19
Peso (kg)	110

### **3.4 Descrição técnica do acionamento elétrico otimizado para o incremento de velocidade de 300m/min para 600m/min**

Na nova configuração, foram integrados à central de comando da máquina de fabricação de papel mais 5 inversores de frequência, além do retificador trifásico que compunha o sistema original, para acionar todos os setores da máquina, conforme mostrado na figura 10.



CONTINUA



**Figura 10 – Esquemático da disposição do novo acionamento da máquina de fabricação de papel**

### **3.5 Estrutura da rede de comunicação e controle de sincronismo do acionamento da máquina de fabricação de papel**

Para a realização da comunicação entre os inversores de frequência e o retificador trifásico, foi elaborada uma rede de comunicação industrial, com sincronismo de velocidade entre os “drives”, conforme mostrado na figura 11.

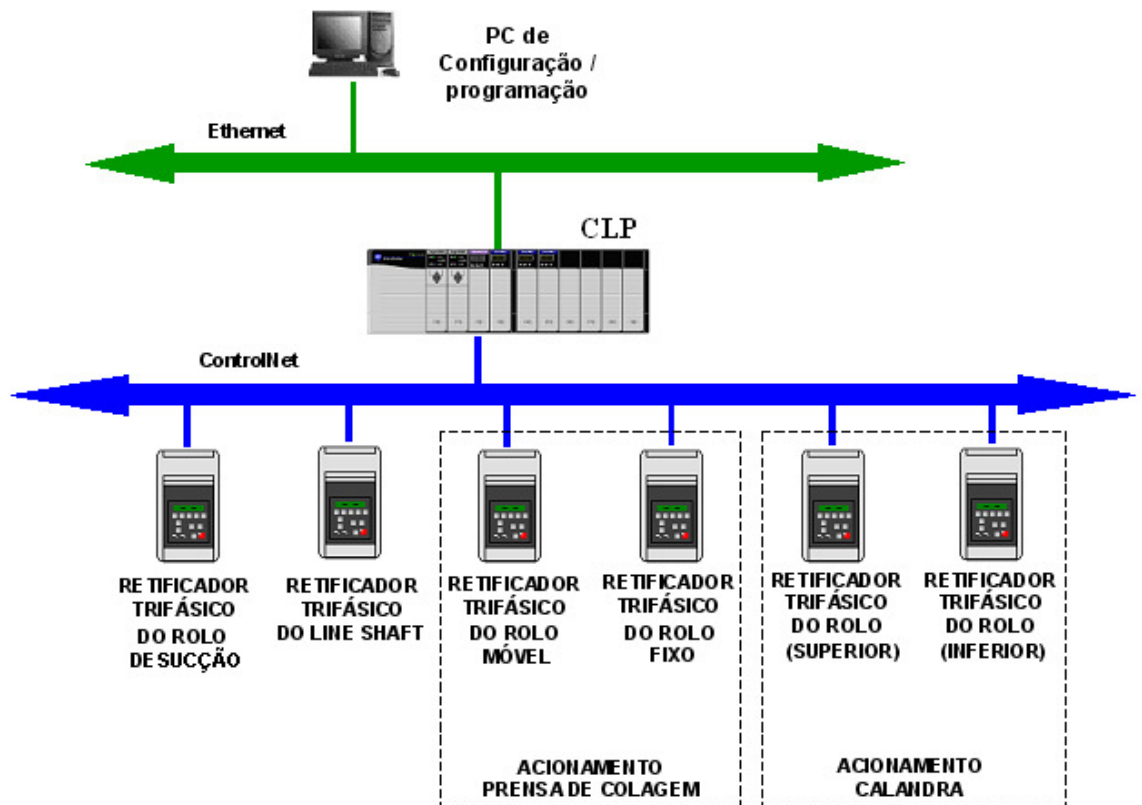


Figura 11 – Plataforma da rede de comunicação

Os perfis técnicos das redes Ethernet e Controlnet são detalhados no apêndice.

### 3.6 Modelagem do sistema em estudo

Neste tópico foram abordados os modelos matemáticos e as funções de transferência dos blocos que compõem a central de comando dos motores do acionamento da máquina de fabricação de papéis.

Com este modelamento, puderam-se realizar simulações em computador, para verificar o desempenho do sistema antes da implementação física.

### 3.6.1 Características de desempenho do motor C.C. controlado por armadura

O motor C.C. foi empregado, por ser um equipamento eletromecânico destinado ao acionamento de cargas que exigem uma quantidade apreciável de potência no eixo e elevado torque de aceleração. Os circuitos equivalentes do motor e da carga estão apresentados na figura 12 [3].

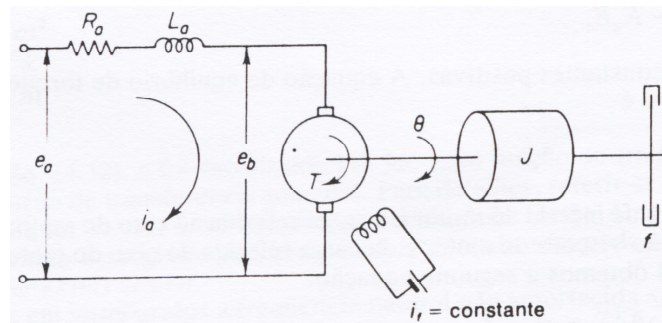


Figura 12 – Diagrama esquemático do motor C.C. controlado por armadura

([3] OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2000.)

onde

- $R_a$  = Resistência do enrolamento da armadura, ohms;
- $L_a$  = Indutância do enrolamento da armadura, henrys;
- $i_a$  = Corrente do enrolamento da armadura, ampères;
- $i_f$  = Corrente de campo, ampères;
- $e_a$  = Tensão aplicada na armadura, volts;
- $e_b$  = Força contra-eletromotriz, volts;
- $\theta$  = Deslocamento angular do eixo do motor, radianos;
- $T$  = Torque fornecido pelo motor, N.m;
- $J$  = Momento de inércia equivalente do motor e da carga referida ao eixo do motor, kgf.m;
- $F$  = Coeficiente de fricção-viscosa equivalente do motor e da carga referida ao eixo do motor, kg-m/rad/s;

Quando a armadura está girando, é induzida na armadura uma tensão proporcional ao produto do fluxo pela velocidade angular. Para um fluxo constante, a tensão induzida,  $e_b$ , é diretamente proporcional à velocidade angular  $d\theta/dt$ . Portanto,

$$e_b = K_b \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (18)$$

onde  $K_b$  é a constante da força-contra-eletromotriz.



A velocidade de um motor C.C. controlado por armadura é controlada pela tensão de armadura,  $e_a$ . A tensão de armadura,  $e_a$ , é suprida por um amplificador (ou por um gerador, que é suprido por um amplificador). A equação diferencial para o circuito de armadura é:

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b = e_a \quad (19)$$

A corrente de armadura produz o torque que é aplicado à inércia e à fricção; portanto,

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} = T = K i_a \quad (20)$$

Supondo que todas as condições iniciais são nulas e considerando as transformadas de Laplace das equações 18, 19 e 20, obtemos as seguintes equações:

$$K_b s \Theta(s) = E_b(s) \quad (21)$$

$$(L_a s + R_a) I_a(s) + E_b(s) = E_a(s) \quad (22)$$

$$(J s^2 + f s) \Theta(s) = T(s) = K I_a(s) \quad (23)$$

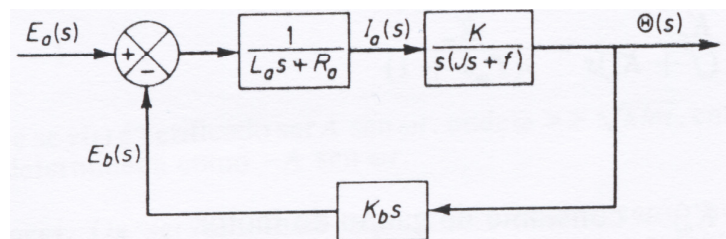


Figura 13 – Diagrama de blocos do motor C.C. controlado por armadura

([3] OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2000.)

Considerando  $E_a(s)$  como a entrada e  $\Theta(s)$  como a saída, podemos construir os diagramas de blocos das Eqs. 21, 22 e 23, como indicado na figura 13. O efeito da força-contra-eletromotriz é visto como sendo o sinal de realimentação proporcional à

velocidade do motor. Esta força-contra-eletromotriz aumenta o amortecimento efetivo do sistema. Portanto, a função de transferência deste sistema é dada por:

$$\frac{\Theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s[L_a J s^2 + (L_a f + R_a J)s + R_a f + K K_b]} \quad (24)$$

A indutância,  $L_a$ , no circuito de armadura normalmente é pequena e pode ser desprezada. Se  $L_a$  for desprezada, então a função de transferência dada pela equação 24 reduz-se a:

$$\frac{\Theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (25)$$

onde

$$K_m = K/(R_a f + K K_b) = \text{Constante de ganho do motor} \quad (26)$$

$$T_m = R_a J / (R_a f + K K_b) = \text{Constante de tempo do motor} \quad (27)$$

A partir das equações 24 e 25, pode ser visto que as funções de transferência envolvem o termo  $1/s$ . Portanto, este sistema possui uma propriedade de integração. Na equação 25, pode-se notar que a constante de tempo do motor é menor para um  $R_a$  menor e  $J$  menor. Com  $J$  pequeno, conforme a resistência  $R_a$  é reduzida, a constante de tempo do motor se aproxima de zero, e o motor atua como um integrador ideal [3].

### 3.6.2 Características de desempenho do tacogerador

O tacogerador é um dos transdutores de velocidade mais utilizados no meio industrial. Consiste num dínamo que gera um sinal de amplitude proporcional à velocidade de rotação do seu eixo, figura 14 [2].

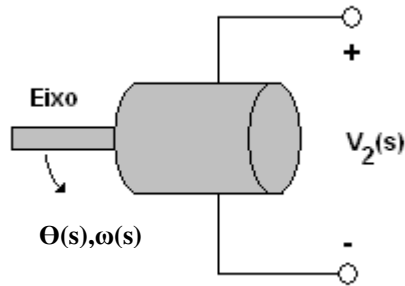


Figura 14 – Tacogerador

([2] Dorf, R.C. Bishop, R.H. Sistemas de Controle Modernos. 8ª Edição. Rio de Janeiro, 2001.)

A função de transferência do tacogerador é dada por:

$$\frac{\omega(s)}{V_2(s)} = \frac{1}{K_t} \quad (28)$$

onde

$K_t$  é uma constante [2].

### 3.6.3 Características de desempenho do retificador trifásico

Este retificador, cujo diagrama de blocos é apresentado na figura 15, permite um ajuste contínuo da velocidade e torque do motor, dentro de uma faixa de operação. O retificador trifásico é alimentado por uma tensão C.A. que é convertida para uma tensão C.C., através de uma ponte tiristorizada [6].

Nesta aplicação, o controle é realizado sobre a armadura, mantendo a excitação de campo fixa.

Este método de controle apresenta uma série de vantagens, tais como: resposta rápida e precisão de controle, baixas perdas, ausência das partes móveis sujeitas a desgastes, versatilidade, etc.

O retificador trifásico é dividido, como ilustra a figura 15, em:

- Controlador microprocessado PI (controle de velocidade);
- Circuito de disparo;

- Circuito de potência.

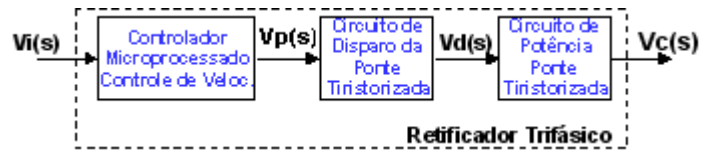


Figura 15 – Diagrama de blocos do retificador trifásico

### 3.6.3.1 Controlador de velocidade PI microprocessado

O bloco controlador é o responsável por comparar o nível de sinal desejado com o sinal do motor e minimizar o erro apresentado.

Nesta aplicação, o controlador utilizado foi o que associa características de dois tipos específicos, proporcional e integral.

#### 3.6.3.1.1 Controlador PI

O controlador PI é um compensador por atraso de fase. Ele possui um zero em  $s=-1/T_i$  e um pólo em  $s=0$ . Os valores de  $K_p$  e de  $T_i$  devem ser escolhidos cuidadosamente de modo a assegurar uma resposta transitória conveniente. Através do projeto adequado do controlador PI, é possível fazer com que a resposta transitória a uma excitação degrau apresente pequeno ou nenhum sobresinal. A velocidade de resposta, contudo, se torna mais lenta. Isto se deve ao fato de que o controlador PI atenua as componentes de altas frequências do sinal [2].

A equação 29 apresenta a função de transferência do controlador PI.

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (29)$$

onde

$K_p$  é o ganho proporcional;

$T_i$  é o tempo integral.

Para esta aplicação foi utilizada a função de transferência do controlador PI, apresentada pela equação 30, fornecida pelo fabricante do equipamento [9].

$$G_c(s) = K_p \cdot \left( \frac{s + \omega_{ld}}{s} \right) \quad (30)$$

onde

$K_p$  é o ganho proporcional;

$\omega_{ld}$  denominado *lead break frequency*, representa um filtro para as altas frequências, e apresenta grande influência na resposta do controle. Quanto menor este valor, menor será a influência do tempo integral no sistema. Este parâmetro pode variar de 0 a 282,74 rad/s, para controle pela armadura [9].

### 3.6.3.2 Circuito de disparo

O circuito de disparo, apresentado na figura 17, se incumbe de aplicar uma tensão nos terminais de controle dos tiristores, sendo que a este existe um transistor de potência conectado num circuito lógico do tipo CMOS ou TTL de coletor aberto. O circuito de geração de pulso também envolve um oscilador (CI-2) da figura 17, de frequência em aproximadamente 10kHz. O sinal de disparo atua nos terminais dos tiristores através dos transformadores de pulso, cuja finalidade é isolar o circuito de geração de pulsos de disparo do circuito de potência [6].

Na figura 16, tem-se as formas de onda do circuito de disparo e da ponte tiristorizada.

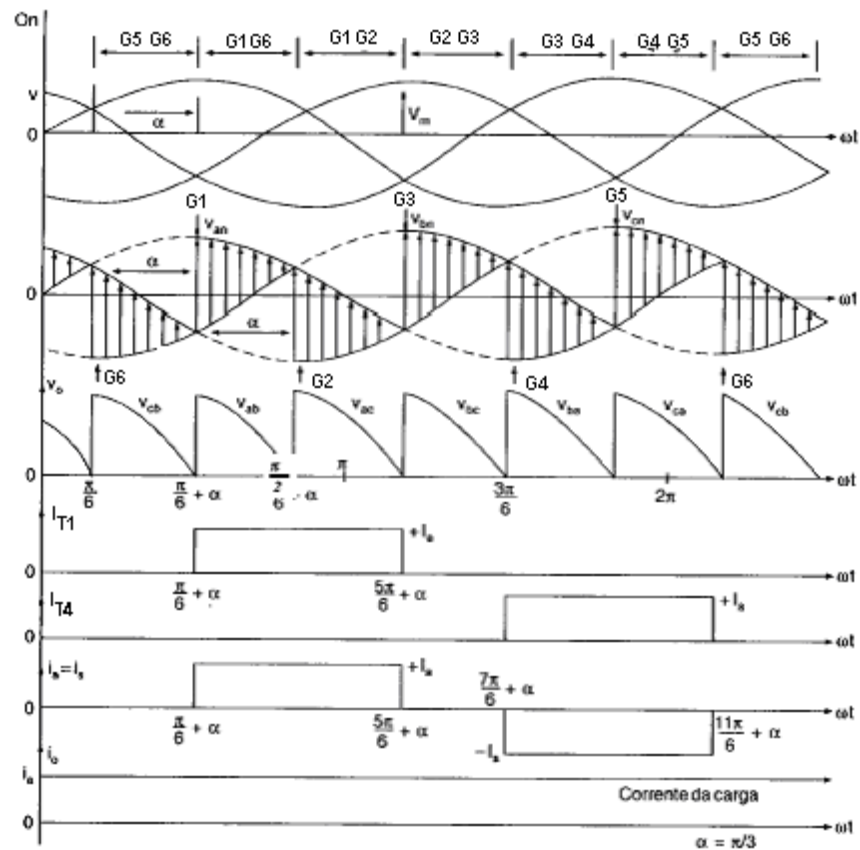


Figura 16 – Formas de onda do circuito de disparo e da ponte tiristorizada

([6] ALLEN BRADLEY Inc. Drives & Motion Controllers Catalog. Allen Bradley,1985.)

### 3.6.3.2.1 Circuito do gerador de ângulo de controle $\alpha$

O circuito de geração de ângulo de gatilhamento deve gerar um período de retardo de tempo em relação ao ponto em que a tensão da rede cruza o zero. Este valor de tempo corresponde ao ângulo de gatilhamento dos tiristores. O ângulo de disparo dos tiristores é dado pela equação 31 [6].

$$\alpha = \arccos\left(\frac{V_{vt} \cdot V_c}{V_{ut} \cdot 10}\right) \quad (31)$$

onde

$\alpha$  é o ângulo de disparo;

$V_{vt}$  é a tensão nominal da rede de alimentação;

$V_c$  tensão C.C. controlada;

$V_{ut}$  tensão de alimentação da rede;

10 volts é a tensão de pico ajustada.

A equação 32 apresenta a função de transferência do circuito de disparo, fornecida pelo fabricante.

$$F(s) = e^{-\tau s} \quad (32)$$

onde

$\tau$  é o tempo médio de disparo, variando entre 1,2 a 1,5 ms.

### **3.6.3.2.2 Funcionamento do circuito de sincronização do gerador de rampa**

O circuito de sincronização do gerador de rampa deve gerar pulsos estreitos de modo a provocar a saturação do transistor do gerador de rampa invertida e, conseqüentemente, a carga plena do capacitor no menor período de tempo possível [14].

Os pulsos devem estar sincronizados com o momento do tempo em que a tensão da rede passa pelo valor zero. Neste ponto o diodo do foto-acoplador que ficar diretamente polarizado deve conduzir e acionar a base do fototransistor associado. Isto leva o fototransistor para a saturação (um valor alto foi adotado para o resistor de coletor do transistor do foto-acoplador, para forçar a saturação nesta condição), fazendo com que a tensão do coletor caia a zero [6]. Esta variação da tensão de coletor deve acionar o multivibrador mono-estável associado ao fototransistor de modo

que o mesmo gere um pulso estreito, que é enviado à base do transistor para comparação com a rampa invertida [6].

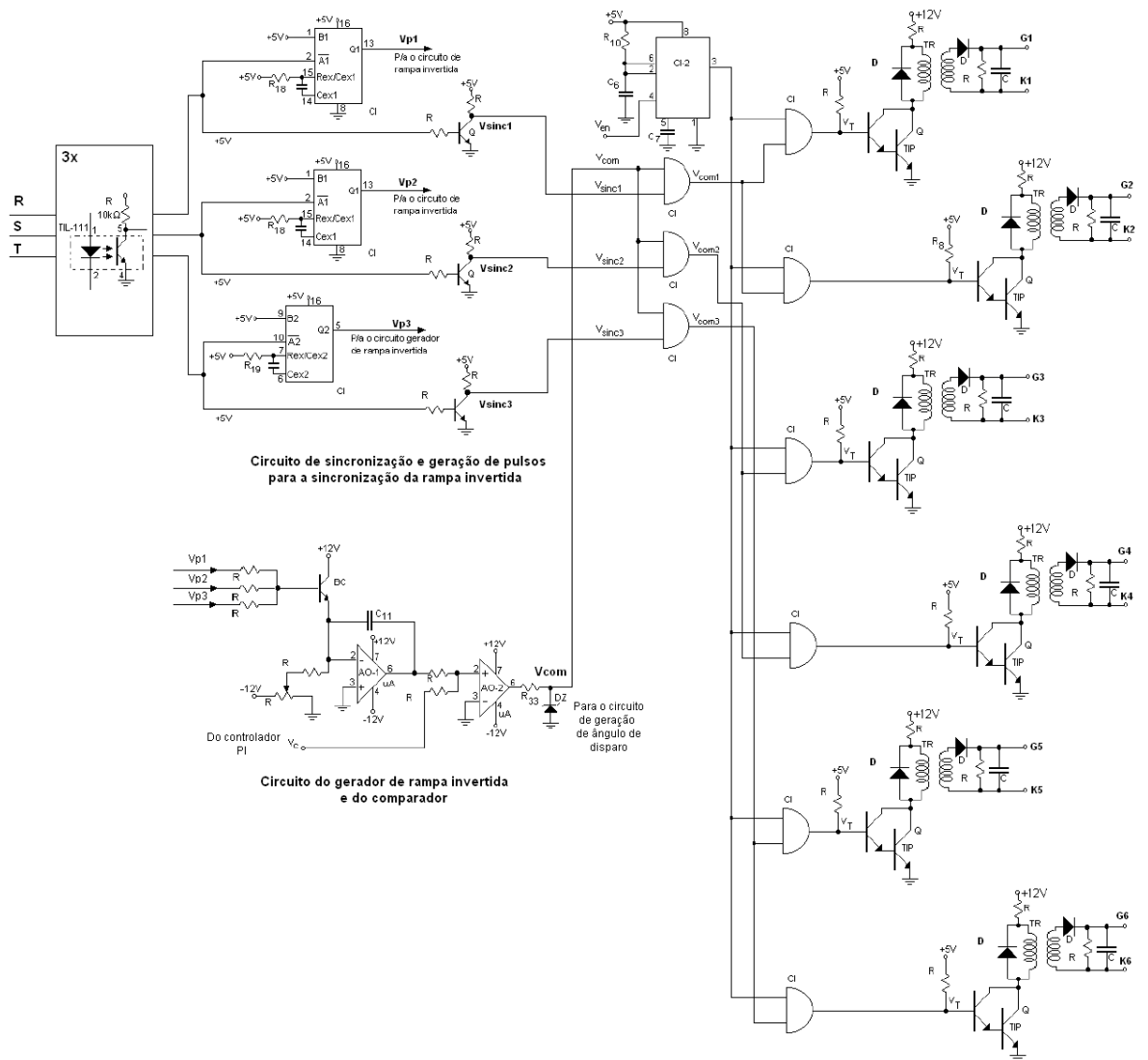


Figura 17 – Circuito de disparo da ponte de tiristores

([6] ALLEN BRADLEY Inc. Drives & Motion Controllers Catalog. Allen Bradley,1985.)

### 3.6.3.3 Circuito de potência

O circuito de potência, apresentado na figura 18, é constituído de tiristores conectados em configuração de ponte trifásica de onda completa. Os tiristores são



disparados pela seqüência de pulsos formada pelo circuito de disparo e podem ser atrasados ou adiantados conforme a necessidade [6].

Inicialmente, os tiristores 5 e 6 estão conduzindo, sendo que o próximo pulso dispara o tiristor 1. O disparo do tiristor 1 corta a corrente que circularia através do tiristor 5, pois seu potencial de catodo passa a ser maior que o potencial de catodo do tiristor 5. Este processo de transferência da corrente de um tiristor para outro (comutação) repete-se a cada  $60^\circ$ , e o ângulo de condução de cada tiristor é de  $120^\circ$  [10].

Todos os tiristores recebem outro pulso após  $60^\circ$  do pulso de disparo, para garantir a condução do tiristor quando a corrente na carga for descontínua [10].

O retificador trifásico estará com a tensão máxima de saída, quando o ponto de disparo coincidir com os pontos de interseção das fases da linha. Este é o ponto de referência de controle de fase e denomina-se ângulo mínimo ( $\alpha = 0^\circ$ ) [10].

O valor médio da tensão na carga varia de acordo com o ângulo de disparo,  $\alpha$ , dos tiristores. Portanto, aumentando-se o ângulo de disparo, varia-se a tensão C.C. de saída do retificador trifásico [10].

O ângulo mínimo de disparo,  $\alpha = 10^\circ$ , evita oscilações nos motores C.C., quando a corrente for descontínua.

Para uma alimentação de  $440\text{Vac}/3\sim$ , e ângulo de disparo  $\alpha = 10^\circ$ , tem-se os seguintes valores [6]:

- Tensão de saída em vazio = 585Vdc
- Tensão de saída com carga nominal = 560Vdc
- Tensão de saída com 10% de sobrecarga = 505Vdc

### 3.6.3.3.1 Características de desempenho do circuito de potência do retificador trifásico

Conforme as figuras 16 e 18, as equações das tensões de fase são [12],

$$v_a = V_{\max} \cdot \text{sen}\theta \quad (33)$$

$$v_b = V_{\max} \cdot \text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (34)$$

$$v_c = V_{\max} \cdot \text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (35)$$

como

$$v_{ab} = v_a - v_b \quad (36)$$

então

$$v_{ab} = V_{\max(\text{linha})} \cdot \text{sen}\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \quad (37)$$

a tensão média na carga é:

$$V_{\text{médio}} = \frac{3 \cdot V_{\max(\text{linha})}}{\pi} \cdot \cos\alpha \quad (38)$$

Ou seja, função apenas da variável  $\alpha$ .

No diagrama de blocos, os circuitos de disparo e potência podem ser representados por uma constante,  $K_1$ , pois nestes blocos ocorrem pulsos contínuos de disparo.

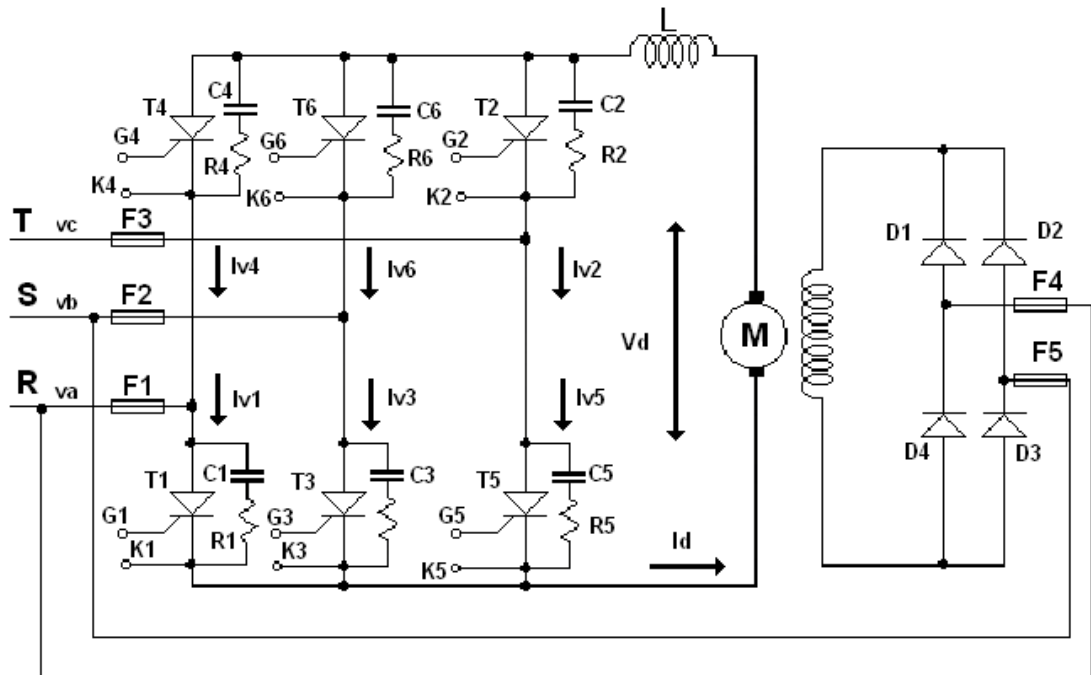


Figura 18 – Esquema da ponte tiristorizada do retificador trifásico CA / CC

([6] ALLEN BRADLEY Inc. Drives & Motion Controllers Catalog. Allen Bradley,1985.)

### 3.6.4 Características de desempenho do redutor de engrenagens

O redutor de engrenagem permite que o motor opere próximo a sua velocidade nominal quando a carga necessitar de uma velocidade de trabalho inferior. O redutor transmite potência através das diferentes formas de engrenagens. Isto permite mudanças de velocidade, direção e torque eficientes, pois, serve como um amplificador de torque, ou seja, quanto maior o fator de redução menor será o torque da carga refletido no motor [6]. A figura 19 apresenta a disposição externa e interna do redutor de engrenagens.

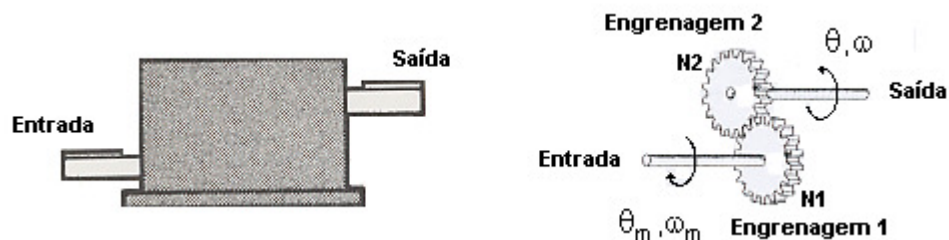


Figura 19 – Redutor de engrenagens

([6] ALLEN BRADLEY Inc. Drives & Motion Controllers Catalog. Allen Bradley,1985.)

A função de transferência do redutor de engrenagens é dada por [2]:

$$\frac{\omega_m(s)}{\omega(s)} = \frac{1}{K_R} \quad (39)$$

onde

$K_R$  é uma constante [2].

### 3.6.5 Análise do controlador de velocidade de cada um dos retificadores trifásicos

Após serem analisados os blocos que compõem o sistema em estudo, obtendo-se suas funções de transferência individuais, foi concebido o sistema global para o acionamento eletromecânico dos setores que compõem a máquina para fabricação de papéis, conforme apresentado nas figuras 20 e 21.

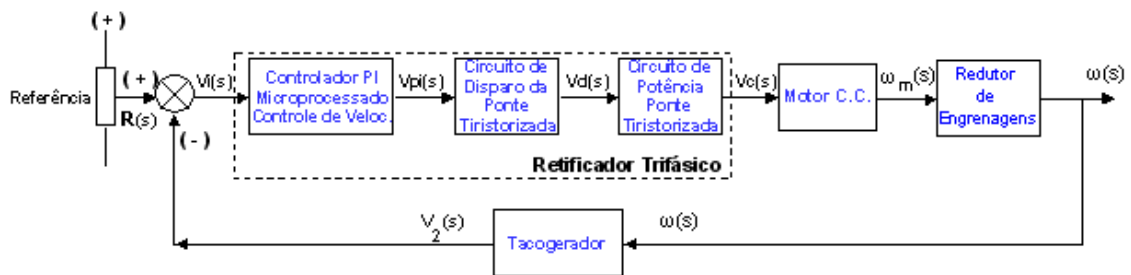


Figura 20 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada de controle de velocidade de um motor C.C.

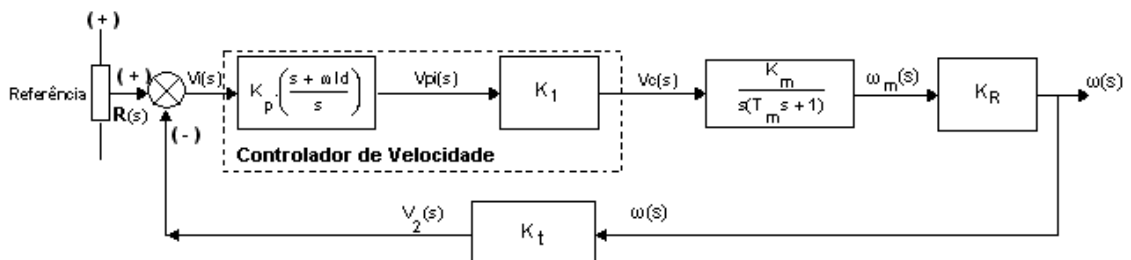


Figura 21 - Diagrama de blocos do sistema em malha fechada de controle de velocidade de um retificador trifásico com as funções de transferências de cada bloco

### **3.6.6 Diagrama de blocos do novo sistema de controle de velocidade para 600m/min**

Após o dimensionamento dos novos motores que integram o acionamento individualizado do sistema eletromecânico da máquina de fabricação de papéis e da definição do diagrama de blocos do sistema de controle de velocidade em malha fechada, foi realizado o desenvolvimento da nova central de comando de motores, habilitada a funcionar até 600m/min, conforme apresentado na figura 22.

Nesta configuração os ajustes de parâmetros de controle de velocidade de cada um dos setores cujos acionamentos foram individualizados são realizados através do terminal de engenharia, que, por sua vez, está interligado a uma rede de comunicação *ethernet*, que tem como principal função efetuar a comunicação do terminal de engenharia com o controlador lógico programável (CLP). No CLP os parâmetros serão direcionados aos seus respectivos retificadores trifásicos, conduzidos através da rede de comunicação *controlnet*, onde posteriormente os dados são adquiridos pelo controlador de sinais. A retroação do sistema é realizada pelo tacogerador instalado em cada um dos retificadores trifásicos, onde os dados são enviados via rede de comunicação para o CLP e posteriormente para o terminal de engenharia, viabilizando a visualização da velocidade real do sistema ao operador.

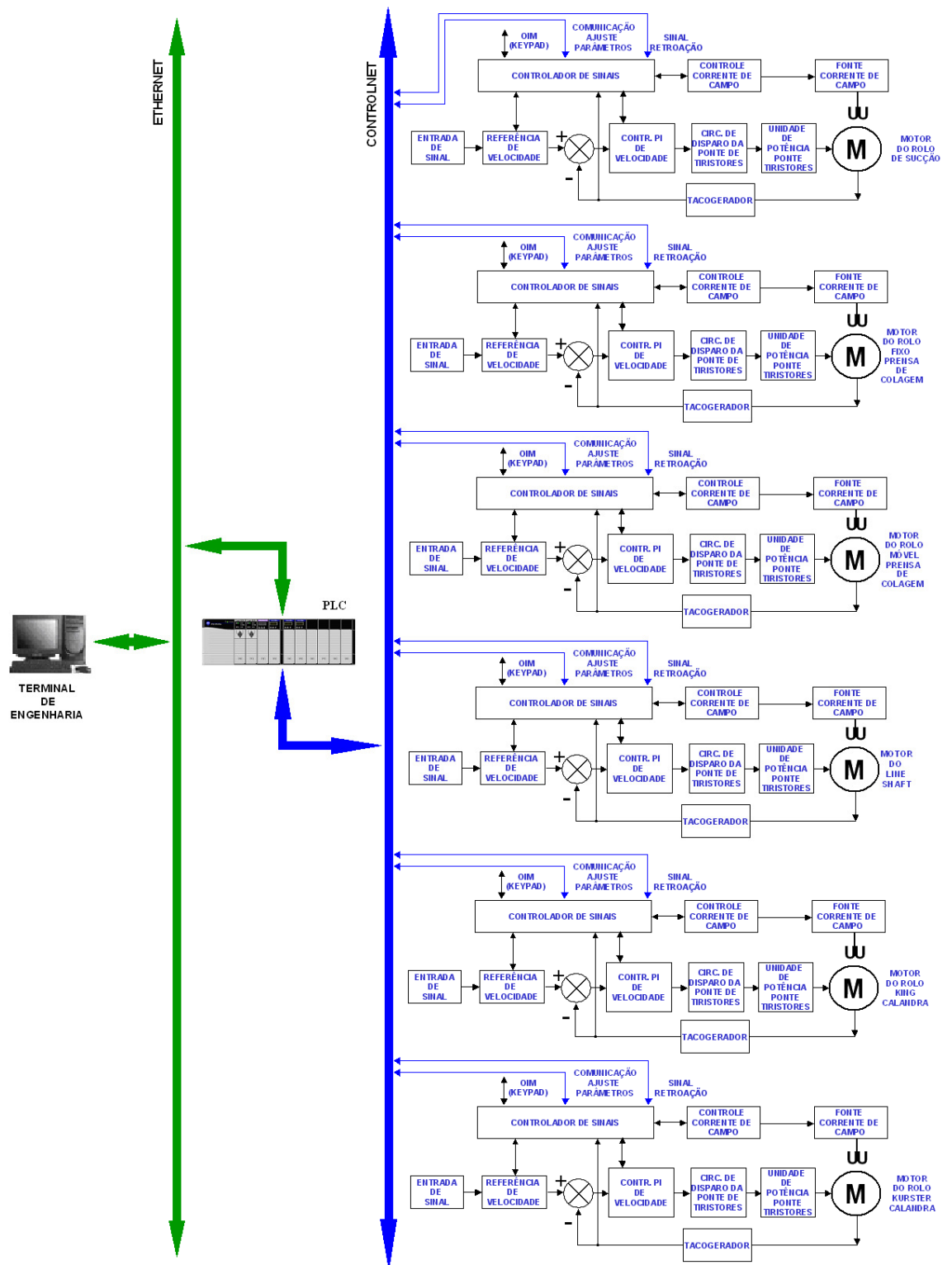


Figura 22 – Diagrama de blocos da central de comando de motores otimizada para 600m/min

### **3.6.7 Simulação matemática a partir da obtenção do diagrama de blocos e funções de transferência do novo sistema de controle de velocidade**

Neste item são apresentadas as simulações realizadas em computador, para verificar o desempenho individual de cada um dos diagramas de bloco em malha fechada, dos controladores de velocidade dos retificadores trifásicos dos acionamentos individualizados, antes da implementação física. Nesta simulação foram obtidos os gráficos teóricos, que foram comparados com os gráficos de velocidade coletados após a implementação dos novos acionamentos individualizados.

#### **3.6.7.1 Simulação matemática do acionamento do rolo de sucção**

Primeiramente são calculadas as constantes de ganho e de tempo do motor do rolo de sucção.

Dados:

$R_a$	= 2,48	= Resistência de enrolamento da armadura (ohms);
$K$	= $87,63 \times 10^{-1}$	= Constante de torque do motor (kgf.m/amp);
$f$	= 1,74	= Coeficiente de fricção-viscosa equivalente do motor e da carga ao eixo do motor (kg-m/rad/s);
$K_b$	= $17,97 \times 10^{-1}$	= Constante de força-contratromotriz (volts-s/rad);
$J$	= 134,35	= Momento de inércia equivalente do motor e da carga ao eixo do motor (kgf.m);
$K_p$	= 400	= Ganho proporcional;
$T_i$	= 25,0	= Tempo integral (segundos).

Os ganhos  $K_p$  e  $T_i$  foram ajustados para obter uma resposta de forma a proporcionar uma condição satisfatória ao sistema.

Utilizando-se a equação 26, a constante de ganho do motor é

$$K_m = \frac{K}{(R_a \cdot f + K \cdot K_b)} = \left( \frac{87,63 \times 10^1}{2,48 \cdot 1,74 + 87,63 \times 10^1 \cdot 17,97 \times 10^1} \right) = 0,4367$$

Utilizando-se a equação 27, a constante de tempo do motor é

$$T_m = \frac{R_a \cdot J}{(R_a \cdot f + K \cdot K_b)} = \left( \frac{2,48 \cdot 134,35}{2,48 \cdot 1,74 + 87,63 \times 10^1 \cdot 17,97 \times 10^1} \right) = 16,6076$$

Os valores utilizados na base de cálculo das constantes de ganho e de tempo do motor foram obtidos do fabricante e de cálculos realizados neste estudo [8].

#### **3.6.7.1.1 Função de transferência do acionamento do rolo de sucção**

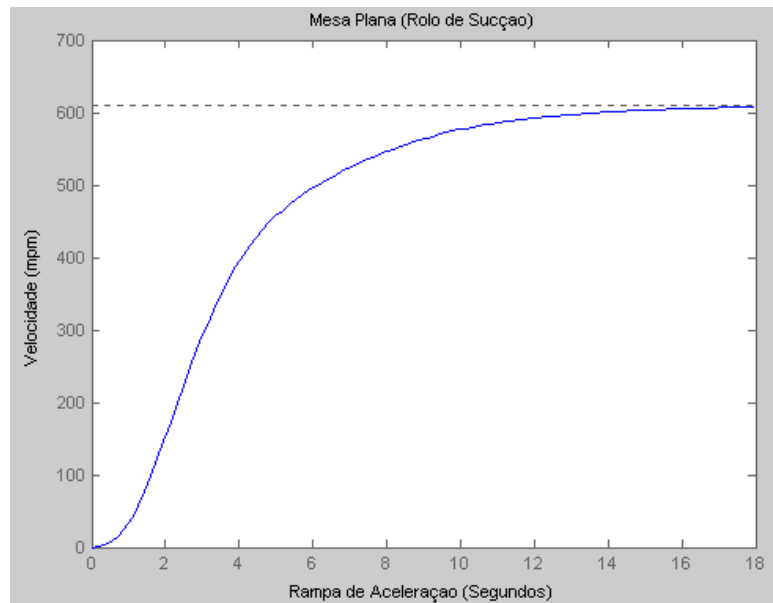
Usando-se as equações 25, 26, 27, 28, 30 e 39, pôde-se calcular a função de transferência do acionamento do rolo de sucção:

$$\left[ \frac{196,515s + 4912,87}{16,6076s^3 + 26,784s^2 + 32s + 7,84} \right]$$

#### **3.6.7.1.2 Análise gráfica da função de transferência do acionamento do rolo de sucção**

O gráfico da figura 23, apresenta o resultado da simulação em computador do tempo de resposta versus o erro em regime do controle de velocidade do acionamento individualizado do rolo de sucção.





**Figura 23 – Simulação do controle de velocidade do acionamento individualizado do rolo de sucção**

A resposta ao degrau obtida através da simulação mostrada na figura 23 apresentou melhor resultado utilizando-se  $K_p$  igual a 400 e  $T_i$  de 25,0 segundos, mantendo-se uma rampa de aceleração de 20 segundos, semelhante ao memorial de cálculos deste documento.

### **3.6.7.2 Simulação matemática do acionamento dos rolos fixo e móvel da prensa de colagem**

Para o acionamento dos rolos fixo e móvel da prensa de colagem, foi utilizada apenas uma simulação representando os dois motores individualizados, pois as duas posições utilizam motores com as mesmas características técnicas, cujos os comportamentos em regime de trabalho são semelhantes.

Primeiramente são calculadas as constantes de ganho e de tempo dos motores do rolo fixo e móvel da prensa de colagem.

Dados:

- Ra = 0,43 = Resistência de enrolamento da armadura (ohms);  
K = 8,93x10<sup>-2</sup> = Constante de torque do motor (kgf.m/amp);  
f = 0,9 = Coeficiente de fricção-viscosa equivalente do motor e da carga ao eixo do motor (kg-m/rad/s);  
K<sub>b</sub> = 5,38x10<sup>-1</sup> = Constante de força-contra-eletromotriz (volts-s/rad);  
J = 13,820 = Momento de inércia equivalente do motor e da carga ao eixo do motor (kgf.m);  
K<sub>p</sub> = 360 = Ganho proporcional;  
T<sub>i</sub> = 39,0 = Tempo integral (segundos).

Os ganhos K<sub>p</sub> e T<sub>i</sub> foram ajustados para obter uma resposta de forma a proporcionar uma condição satisfatória ao sistema.

Utilizando-se a equação 26, a constante de ganho do motor é

$$K_m = \frac{K}{(R_a \cdot f + K \cdot K_b)} = \left( \frac{8,93 \times 10^{-2}}{0,43 \cdot 0,9 + 8,93 \times 10^{-2} \cdot 5,38 \times 10^{-1}} \right) = 0,2052$$

Utilizando-se a equação 27, a constante de tempo do motor é

$$T_m = \frac{R_a \cdot J}{(R_a \cdot f + K \cdot K_b)} = \left( \frac{0,43 \cdot 13,820}{0,43 \cdot 0,9 + 8,93 \times 10^{-2} \cdot 5,38 \times 10^{-1}} \right) = 13,6597$$

Os valores utilizados na base de cálculo das constantes de ganho e de tempo do motor foram obtidos do fabricante e de cálculos realizados neste estudo [8].

### 3.6.7.2.1 Função de transferência do acionamento dos rolos fixo e móvel da prensa de colagem

Usando-se as equações 25, 26, 27, 28, 30 e 39, pôde-se calcular a função de transferência do acionamento dos rolos fixo e móvel da prensa de colagem:

$$\left[ \frac{102,60s + 4004,6011}{13,6597s^3 + 19,3223s^2 + 28s + 6,811} \right]$$

### 3.6.7.2.2 Análise gráfica da função de transferência do acionamento dos rolos fixo e móvel da prensa de colagem

O gráfico da figura 24, apresenta o resultado da simulação em computador do tempo de resposta versus o erro em regime do controle de velocidade do acionamento individualizado dos rolos fixo e móvel da prensa de colagem.

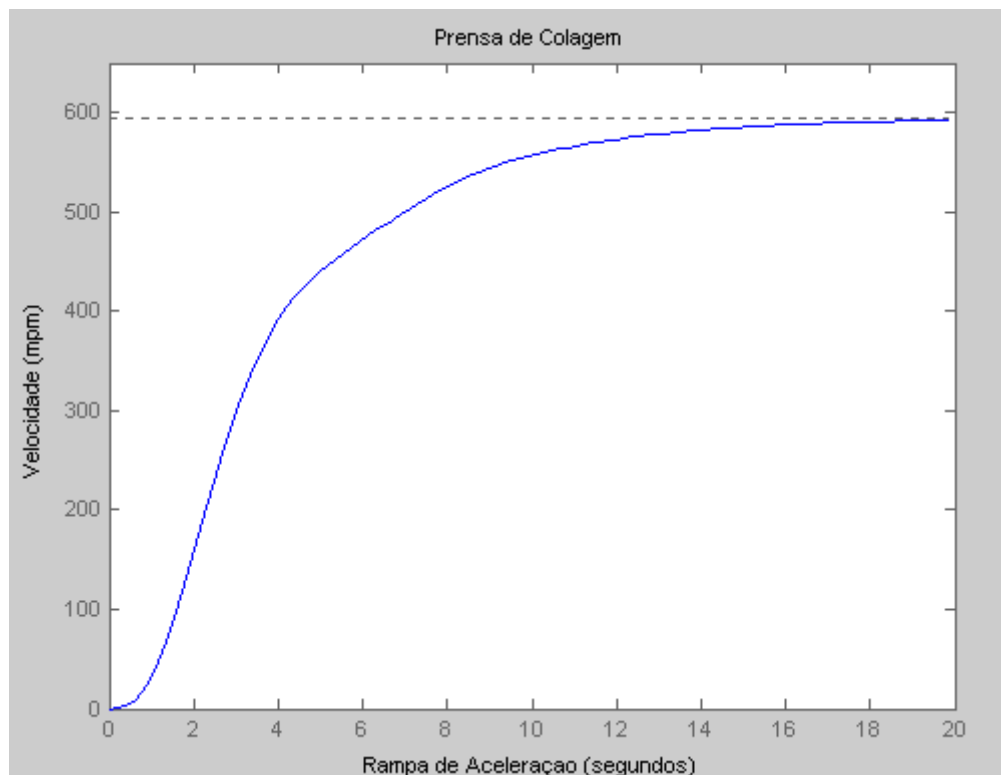


Figura 24 – Simulação do controle de velocidade do acionamento individualizado dos rolos da prensa de colagem

A resposta ao degrau obtida através da simulação mostrada na figura 24 apresentou melhor resultado utilizando-se Kp igual a 360 e Ti de 39,0 segundos, mantendo-se uma rampa de aceleração de 20 segundos, ao invés dos 25 segundos do memorial de cálculos.

### **3.6.7.3 Simulação matemática do acionamento dos rolos superior e inferior da calandra**

Para o acionamento dos rolos superior e inferior da calandra, foram realizadas simulações individuais, pois o rolo superior possui dimensões totalmente diferentes do rolo inferior, levando a especificação de motores com momento de inércia equivalente diferentes para estas posições.

Primeiramente são calculadas as constantes de ganho e de tempo do motor do rolo superior da calandra.

Dados:

Ra	= 0,67	= Resistência de enrolamento da armadura (ohms);
K	= $15,36 \times 10^{-2}$	= Constante de torque do motor (kgf.m/amp);
f	= 0,9	= Coeficiente de fricção-viscosa equivalente do motor e da carga ao eixo do motor (kg-m/rad/s);
K <sub>b</sub>	= $5,86 \times 10^{-1}$	= Constante de força-contra-eletromotriz (volts-s/rad);
J	= 26,87	= Momento de inércia equivalente do motor e da carga ao eixo do motor (kgf.m);
Kp	= 601	= Ganho proporcional;
Ti	= 42,0	= Tempo integral (segundos).

Os ganhos Kp e Ti foram ajustados para obter uma resposta de forma a proporcionar uma condição satisfatória ao sistema.

Utilizando-se a equação 26 a constante de ganho do motor do rolo superior é

$$K_m = \frac{K}{(R_a \cdot f + K \cdot K_b)} = \left( \frac{15,36 \times 10^{-2}}{0,67 \cdot 0,9 + 15,36 \times 10^{-2} \cdot 5,86 \times 10^{-1}} \right) = 0,1291$$

Utilizando-se a equação 27, a constante de tempo do motor do rolo superior é

$$T_m = \frac{R_a \cdot J}{(R_a \cdot f + K \cdot K_b)} = \left( \frac{0,67 \cdot 26,87}{0,67 \cdot 0,9 + 15,36 \times 10^{-2} \cdot 5,86 \times 10^{-1}} \right) = 25,9778$$

Os valores utilizados na base de cálculo das constantes de ganho e de tempo do motor foram obtidos do fabricante e de cálculos realizados neste estudo [8].

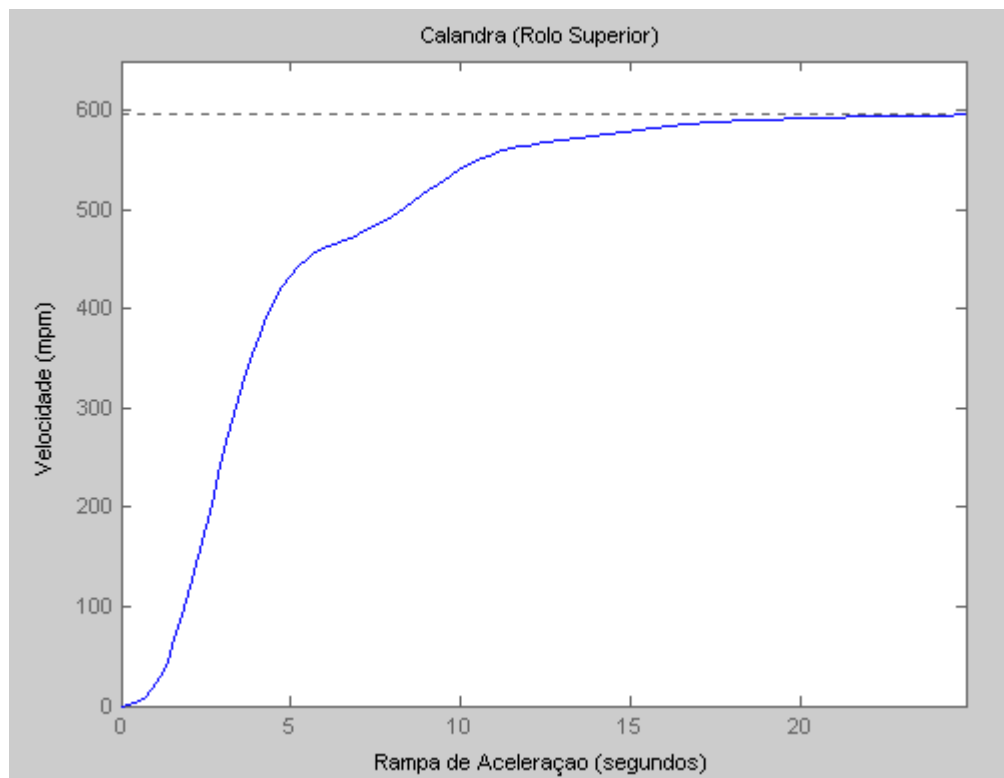
### 3.6.7.3.1 Função de transferência do acionamento do rolo superior da calandra

Usando-se as equações 25, 26, 27, 28, 30 e 39, pôde-se calcular a função de transferência do acionamento do rolo superior da calandra:

$$\left[ \frac{90,468s + 3799,693}{25,9778s^3 + 23,1157s^2 + 32s + 7,84} \right]$$

### 3.6.7.3.2 Análise gráfica da função de transferência do acionamento do rolo superior da calandra

O gráfico da figura 25, apresenta o resultado da simulação em computador do tempo de resposta versus o erro em regime do controle de velocidade do acionamento individualizado do rolo superior da calandra.



**Figura 25 – Simulação do controle de velocidade do acionamento individualizado do rolo superior da calandra**

A resposta ao degrau obtida através da simulação mostrada na figura 25 apresentou melhor resultado utilizando-se  $K_p$  igual a 601 e  $T_i$  de 42,0 segundos, mantendo-se uma rampa de aceleração de 25 segundos, semelhante ao memorial de cálculos deste documento.

### **3.6.7.3.3 Simulação matemática do acionamento do rolo inferior da calandra**

Neste momento são apresentados os resultados da simulação matemática do acionamento individualizado do rolo inferior da calandra.

Primeiramente são calculadas as constantes de ganho e de tempo do motor do rolo inferior da calandra.

Dados:

- Ra = 0,5 = Resistência de enrolamento da armadura (ohms);  
K = 9,31x10<sup>-2</sup> = Constante de torque do motor (kgf.m/amp);  
f = 0,9 = Coeficiente de fricção-viscosa equivalente do motor e da carga ao eixo do motor (kg-m/rad/s);  
K<sub>b</sub> = 5,50x10<sup>-1</sup> = Constante de força-contra-eletromotriz (volts-s/rad);  
J = 21,629 = Momento de inércia equivalente do motor e da carga ao eixo do motor (kgf.m);  
K<sub>p</sub> = 410 = Ganho proporcional;  
T<sub>i</sub> = 40,0 = Tempo integral (segundos).

Os ganhos K<sub>p</sub> e T<sub>i</sub> foram ajustados para obter uma resposta de forma a proporcionar uma condição satisfatória ao sistema.

Utilizando-se a equação 26, a constante de ganho do motor do rolo inferior é

$$K_m = \frac{K}{(R_a \cdot f + K \cdot K_b)} = \frac{9,31 \times 10^{-2}}{(0,5 \cdot 0,9 + 9,31 \times 10^{-2} \cdot 5,50 \times 10^{-1})} = 0,1815$$

Utilizando-se a equação 27, a constante de tempo do motor do rolo inferior é

$$T_m = \frac{R_a \cdot J}{(R_a \cdot f + K \cdot K_b)} = \frac{0,5 \cdot 21,629}{(0,5 \cdot 0,9 + 9,31 \times 10^{-2} \cdot 5,50 \times 10^{-1})} = 21,5769$$

Os valores utilizados na base de cálculo das constantes de ganho e de tempo do motor foram obtidos do fabricante e de cálculos realizados neste estudo [8].

### 3.6.7.3.4 Função de transferência do acionamento do rolo inferior da calandra

Usando-se as equações 25, 26, 27, 28, 30 e 39, pôde-se calcular a função de transferência do acionamento do rolo inferior da calandra:

$$\left[ \frac{104,181s + 4167,24}{21,5769s^3 + 23,1157s^2 + 32s + 7,84} \right]$$

### 3.6.7.3.5 Análise gráfica da função de transferência do acionamento do rolo inferior da calandra

O gráfico da figura 26, apresenta o resultado da simulação em computador do tempo de resposta versus o erro em regime do controle de velocidade do acionamento individualizado do rolo inferior da calandra.

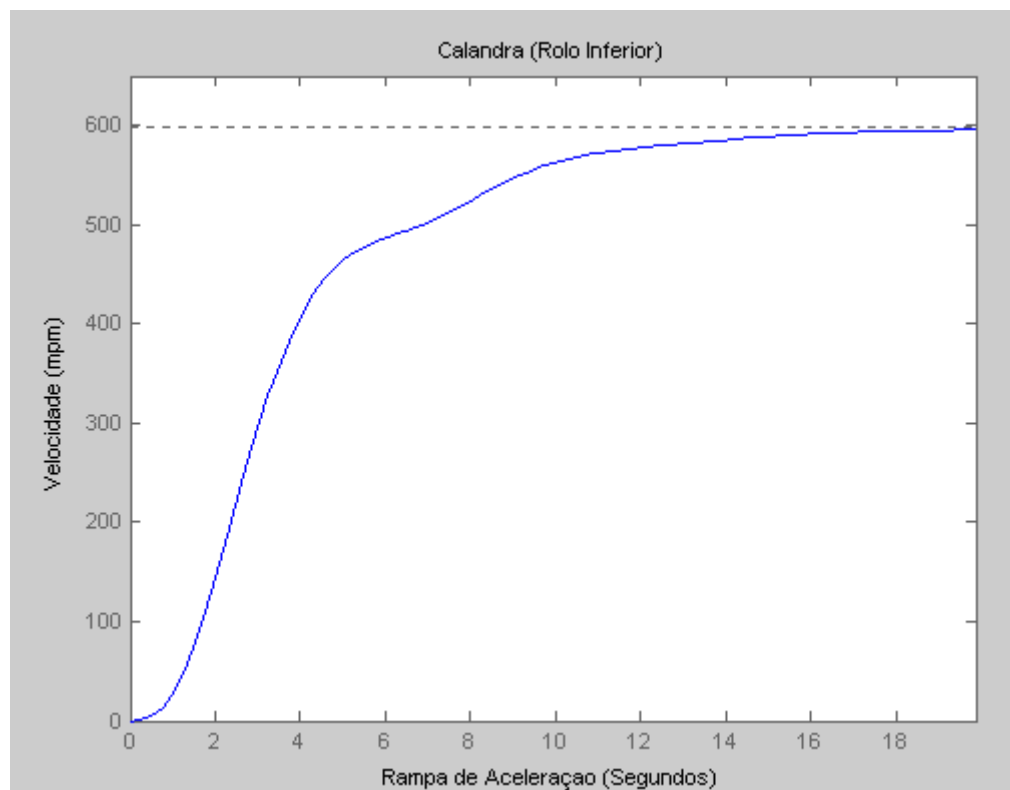


Figura 26 – Simulação do controle de velocidade do acionamento individualizado do rolo inferior da calandra



A resposta ao degrau obtida através da simulação mostrada na figura 26 apresentou melhor resultado utilizando-se  $K_p$  igual a 410 e  $T_i$  de 40,0 segundos, mantendo-se uma rampa de aceleração de 20 segundos, ao invés dos 15 segundos do memorial de cálculos.

### 3.6.7.4 Simulação matemática do acionamento do *line shaft*

Para o acionamento do *line shaft* não foram realizadas simulações prévias. Foi procedida apenas a substituição do retificador trifásico, que estava obsoleto, por um equipamento novo com as mesmas características técnicas, onde os parâmetros já eram conhecidos e os mesmos parâmetros foram reaproveitados durante a realização dos ajustes deste novo retificador trifásico.

Para análise da performance deste novo retificador trifásico, foi realizada uma análise comparativa entre os gráficos de estabilidade de velocidade antes da instalação do novo retificador e após a instalação do novo retificador, respectivamente apresentados nas figuras 27 e 28.

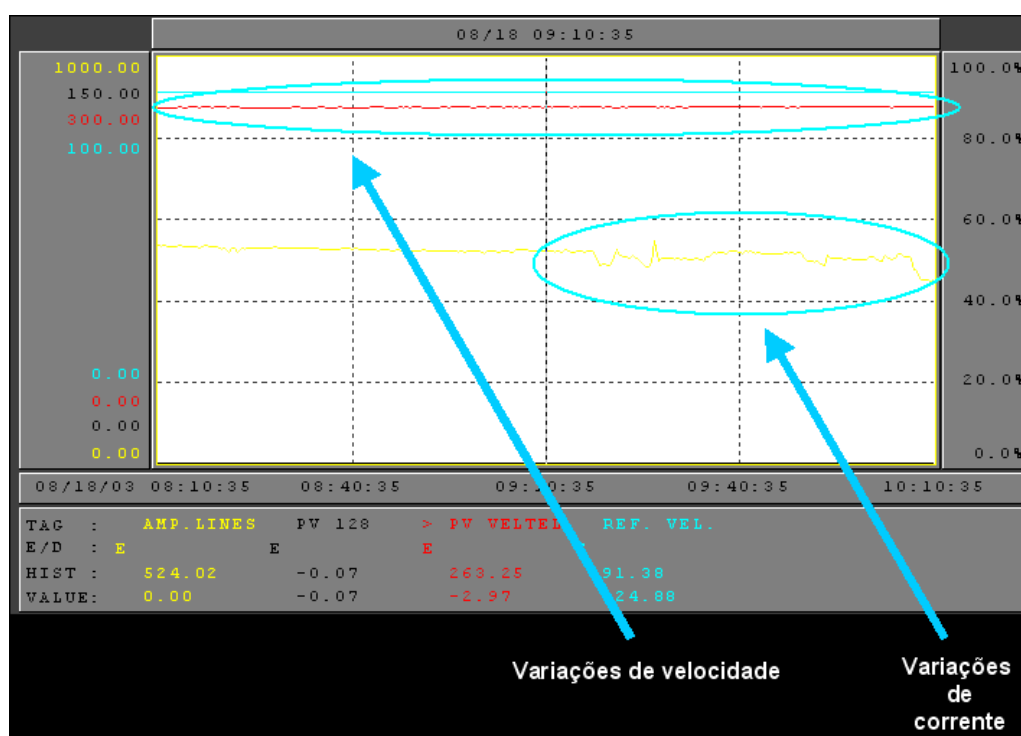
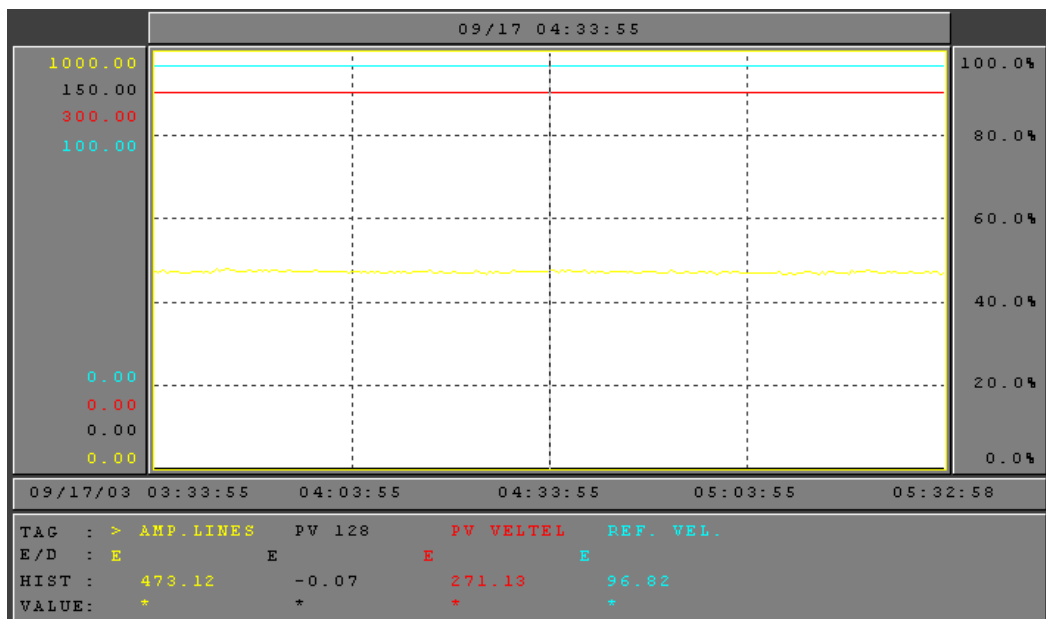


Figura 27 – Desempenho do sistema de acionamento original do *line shaft*



**Figura 28 – Desempenho do novo sistema de acionamento do *line shaft***

No gráfico da figura 27 são apresentadas a velocidade e corrente de armadura durante o processo produtivo do tipo E1302/65, utilizando-se o acionamento originalmente instalado no *line shaft* da máquina de fabricação de papéis. Através da figura 28, pôde-se constatar que o gráfico mostrado apresenta os mesmos valores de escala, porém as variações foram eliminadas, melhorando a estabilidade do processo produtivo.

## 4. Resultados

Para avaliação do projeto em questão, foram utilizadas duas linhas de análise, sendo uma do ponto de vista técnico e outra relacionada ao impacto financeiro proporcionado pela utilização do embasamento técnico apresentado neste documento.

Para atestar a eficiência da especificação técnica da modelagem desenvolvida e do diagrama de blocos em malha fechada, foram utilizadas análises gráficas do controle de velocidade dos equipamentos instalados (rolo de sucção, prensa de colagem rolos fixo e móvel e calandra rolos superior e inferior) em tempo real, durante o regime normal de produção, atendendo todos os itens propostos neste trabalho. Portanto, todos os resultados alcançados puderam servir de referência para a conclusão do projeto.

### 4.1 Avaliação do ponto de vista financeiro

Conforme apresentado no anexo A, foi contratada uma consultoria, junto ao fabricante da máquina, para avaliação dos custos envolvidos na implementação do incremento de velocidade de 300m/min para 600m/min. Na tabela 12, são apresentados os custos envolvidos nesta implementação em dólares.

Tabela 12 – Itenização financeira do projeto com base no estudo apresentado pelo fabricante

ÍTEM	DESCRIÇÃO	EQUIPAMENTO (COM ICMS)
01	Acionamento elétrico <i>line shaft</i>	US\$ 45.015,57
02	Acionamento elétrico rolo de sucção	US\$ 94.556,07
03	Acionamento elétrico rolos prensa de colagem	US\$ 44.998,26
04	Acionamento elétrico calandra	US\$ 58.667,01
05	Motores elétricos	US\$ 63.343,71
06	Modificações físicas	US\$ 46.728,97
07	Redutores	US\$ 173.070,26
TOTAL DO INVESTIMENTO		US\$ 526.379,85

Valor referência: R\$2,889/Dólares

Com a apresentação do trabalho em questão, foi solicitado ao setor de projetos do fabricante que fossem considerados os novos valores calculados na planilha apresentada no anexo A. As modificações foram aceitas pelo fabricante, porém os valores de potência ainda ficaram acima dos cálculos fornecidos neste trabalho, ocasionado pela necessidade de se manter os índices mínimos de fatores de segurança, gerando desta forma uma nova planilha que foi apresentada no anexo B deste documento.

Os resultados deste trabalho proporcionaram um novo impacto financeiro ao projeto, conforme mostrado na tabela 13.

Tabela 13 – Itenização financeira do projeto com base na metodologia de cálculos apresentado neste desenvolvimento.

ÍTEM	DESCRIÇÃO	EQUIPAMENTO (COM ICMS)
01	Acionamento elétrico <i>line shaft</i>	US\$ 42.282,45
02	Acionamento elétrico rolo de sucção	US\$ 43.129,11
03	Acionamento elétrico rolos prensa de colagem	US\$ 30.875,73
04	Acionamento elétrico calandra	US\$ 35.440,29
05	Motores elétricos	US\$ 44.029,07
06	Modificações físicas	US\$ 38.075,45
07	Redutores	US\$ 96.919,34
TOTAL DO INVESTIMENTO		<b>US\$ 330.751,44</b>

Valor referência: R\$2,889/Dólares

#### 4.2 Avaliação do ponto de vista técnico

Para atestar a eficiência do trabalho concebido e atender aos requisitos de incremento de velocidade proposto neste trabalho, foi realizada a avaliação técnica dos novos acionamentos instalados, através da análise dos gráficos de velocidade adquiridos durante o regime normal de produção, que puderam ser comparados com os gráficos adquiridos através da simulação apresentada no item 3.6.7 deste trabalho, além da realização de comparativo do consumo de corrente do acionamento do *line shaft* antes e após a substituição do acionamento desta posição.

Durante o período compreendido entre os anos de 2002 e 2003, foram levantados os valores de corrente consumidos pelo acionamento do *line shaft* originalmente instalado na máquina, conforme mostrado na tabela 14, e os valores de corrente consumidos pelo novo acionamento do *line shaft*, conforme mostrado na tabela 15.

Tabela 14 – Consumo de corrente pelo acionamento do *line shaft* x tipos de papéis produzidos em 2002

Meses/Ano (Análise)	Período	Tipo	Amperagem Média (A)	Veloc. da Máquina (m/min)
abr-02	02:00	404/38	216	297
	08:00	404/38	502	303
	14:00	404/38	456	299
	20:00	404/38	470	299
mai-02	02:00	B17/55	471	298
	08:00	B17/55	485	296
	14:00	B17/55	431	296
	20:00	B17/55	450	283
ago-02	02:00	406/36	446	283
	08:00	406/36	463	283
	14:00	406/36	460	283
	20:00	406/36	440	283
out-02	02:00	E1302/65	520	298
	08:00	E1302/65	530	300
	14:00	E1302/65	522	300
	20:00	E1302/65	529	300

Tabela 15 – Consumo de corrente pelo acionamento do *line shaft* x tipos de papéis produzidos em 2003

Meses/Ano (Análise)	Período	Tipo	Amperagem Média (A)	Veloc. da Máquina (m/min)
mar-03	02:00h às 20:00h	B17	473,66	298
abr-03	02:00h às 20:00h	B17	468,25	300
mai-03	02:00h às 20:00h	B17	466,51	298
jun-03	02:00h às 20:00h	B17	446	298
jul-03	02:00h às 20:00h	E4998	447	298
jul-03	02:00h às 20:00h	E4998	445	298
jul-03	02:00h às 20:00h	E4998	465	298
jul-03	02:00h às 20:00h	E4998	467	298
mai-03	02:00h às 20:00h	B16	464	180
mai-03	02:00h às 20:00h	B16	481	180
mai-03	02:00h às 20:00h	B16	458	180
mai-03	02:00h às 20:00h	B16	455	180
fev-03	02:00h às 20:00h	E1302	397	298
fev-03	02:00h às 20:00h	E1302	400	298
fev-03	02:00h às 20:00h	E1302	376	298
fev-03	02:00h às 20:00h	E1302	388	298
fev-03	02:00h às 20:00h	404	491	300
fev-03	02:00h às 20:00h	404	500	300
fev-03	02:00h às 20:00h	404	473	299
fev-03	02:00h às 20:00h	404	476	300
12/5/2002	02:00	405	443	299
	08:00	405	461	300
	14:00	405	465	305
	20:00	405	502	305

Para facilitar a compreensão do impacto causado pela substituição do acionamento do *line shaft*, basta observar os valores de corrente nas figuras 27 e 28, que foram obtidos durante a produção do tipo E1302/65, onde pode-se constatar que houve uma redução média de **25,70%** no consumo de corrente.

#### 4.2.1 Análise gráfica dos novos acionamentos da máquina de fabricação de papéis

Neste momento são apresentados os gráficos de velocidade dos novos acionamentos (rolo de sucção, prensa de colagem rolos fixo e móvel e calandra rolos superior e inferior).

Vale ressaltar que todos os gráficos foram aquisitados com a máquina de fabricação de papéis a uma velocidade de 300m/min, apesar da mesma estar habilitada a funcionar até 600m/min. Porém, por solicitação do setor de matéria prima e pela área técnica de processos da empresa, foi estabelecida uma meta de incremento de velocidade de 50m/min para o primeiro semestre deste ano, com o objetivo de evitar grandes impactos na qualidade do produto produzido.

##### 4.2.1.1 Gráfico de velocidade do novo acionamento do rolo de sucção

O gráfico da figura 29 apresenta a rampa de velocidade e estabilização de velocidade no valor requerido pelo processo, para o acionamento do rolo de sucção.

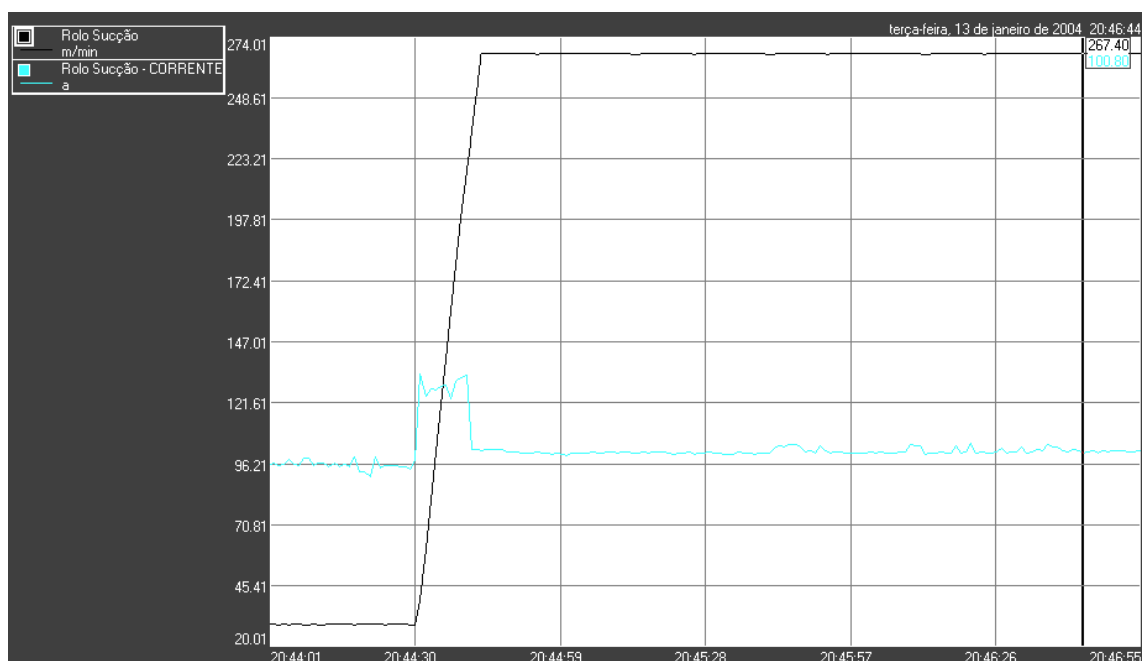


Figura 29 – Controle de velocidade do acionamento do rolo de sucção

Apesar da máquina estar ajustada para a velocidade de 300m/min, o setor do rolo de sucção possui um decréscimo de velocidade, necessário para a manutenção do esticamento do papel. O valor real de Kp foi ajustado em 411 e Ti igual a 36,0 segundos.

#### 4.2.1.2 Gráfico de velocidade do novo acionamento da prensa de colagem rolo fixo

O gráfico da figura 30 apresenta a rampa de velocidade e estabilização de velocidade no valor requerido pelo processo, para o acionamento do rolo fixo da prensa de colagem.

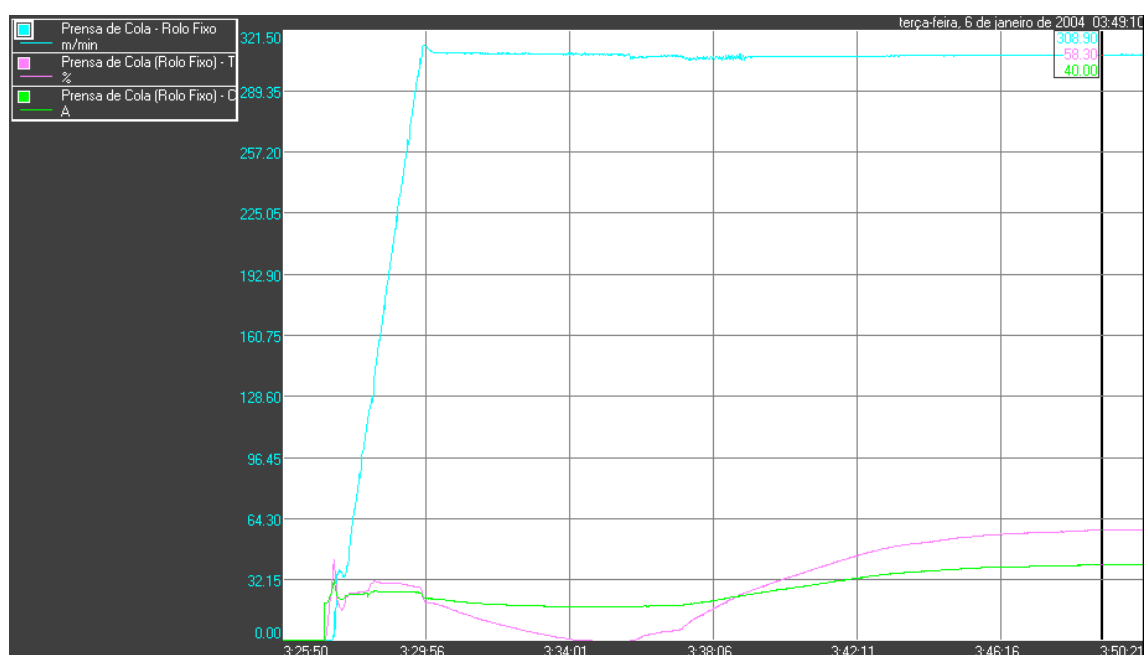


Figura 30 – Controle de velocidade do acionamento do rolo fixo da prensa de colagem

O gráfico da figura 30 mostra a estabilidade da corrente e torque do motor durante a aceleração e após a estabilização da velocidade. O valor real de Kp foi ajustado em 300 e Ti igual a 27,0 segundos.



#### 4.2.1.3 Gráfico de velocidade do novo acionamento da prensa de colagem rolo móvel

O gráfico da figura 31 apresenta a rampa de velocidade e estabilização de velocidade no valor requerido pelo processo, para o acionamento do rolo móvel da prensa de colagem.

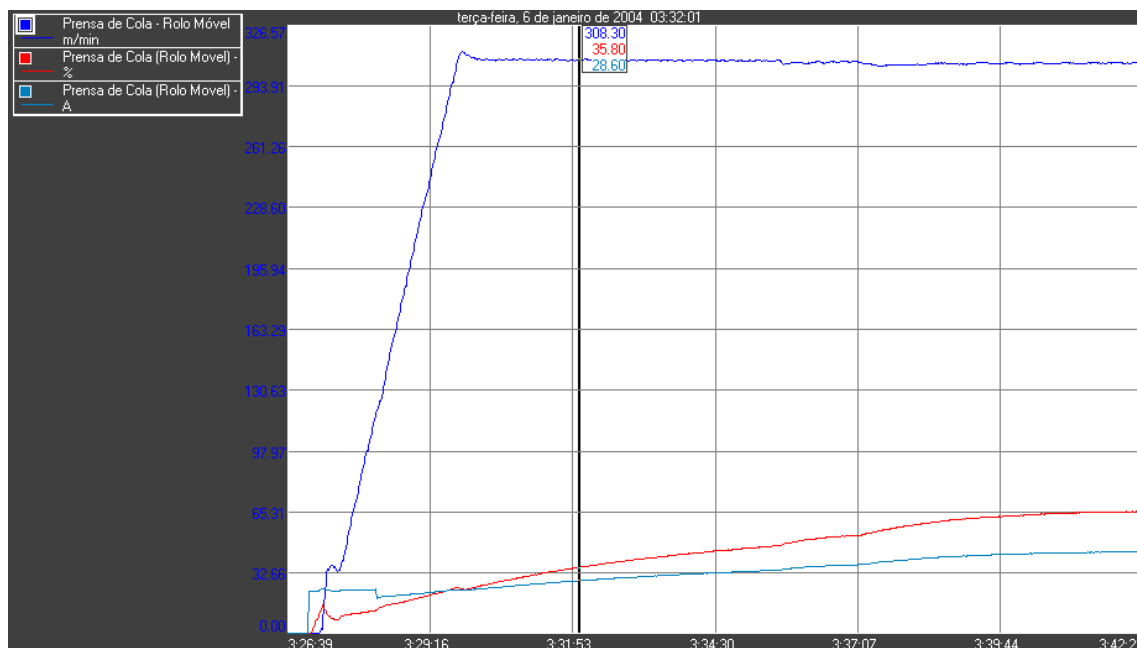


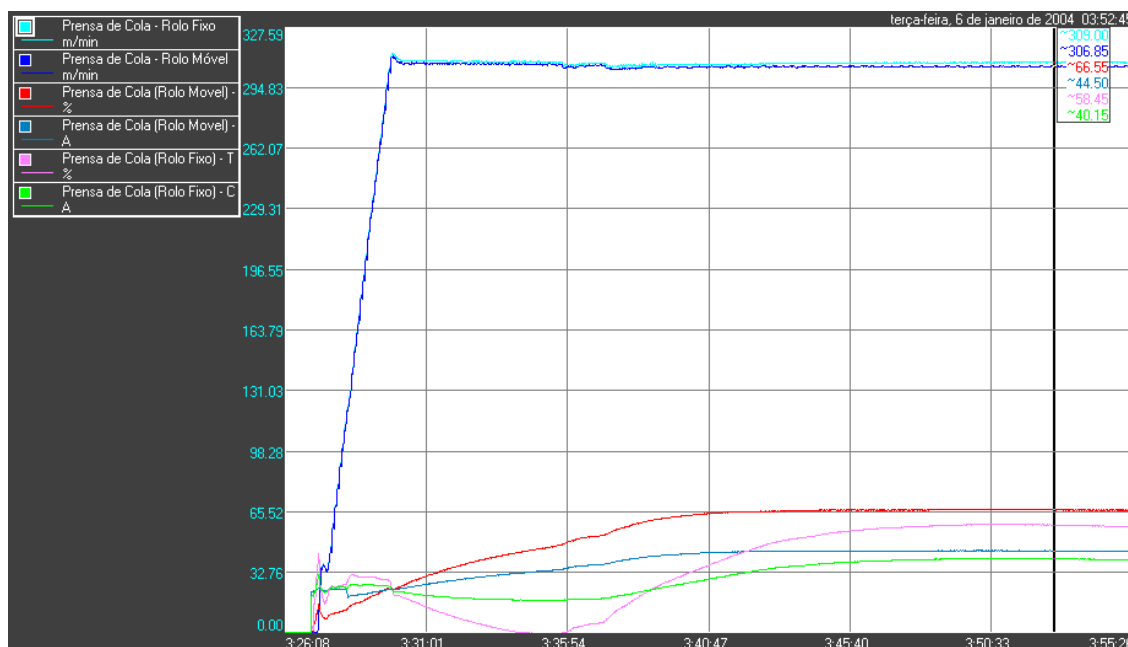
Figura 31 – Controle de velocidade do acionamento do rolo móvel da prensa de colagem

O gráfico da figura 31 mostra a estabilidade da corrente e torque do motor durante a aceleração e após a estabilização da velocidade. Para o acionamento do rolo móvel, os valores de Kp e Ti são semelhantes aos ajustados para o acionamento do rolo fixo.

#### 4.2.1.4 Gráfico de sincronismo de velocidade entre os acionamentos do rolo fixo e móvel da prensa de colagem

Para a área de colagem, um fator de grande importância é o sincronismo de velocidade entre os acionamentos do rolo fixo e móvel, pois este sincronismo tem influência direta na uniformidade da aplicação de cola na superfície da folha. O gráfico da figura 32 mostra o sincronismo de velocidade entre os rolos fixo e móvel

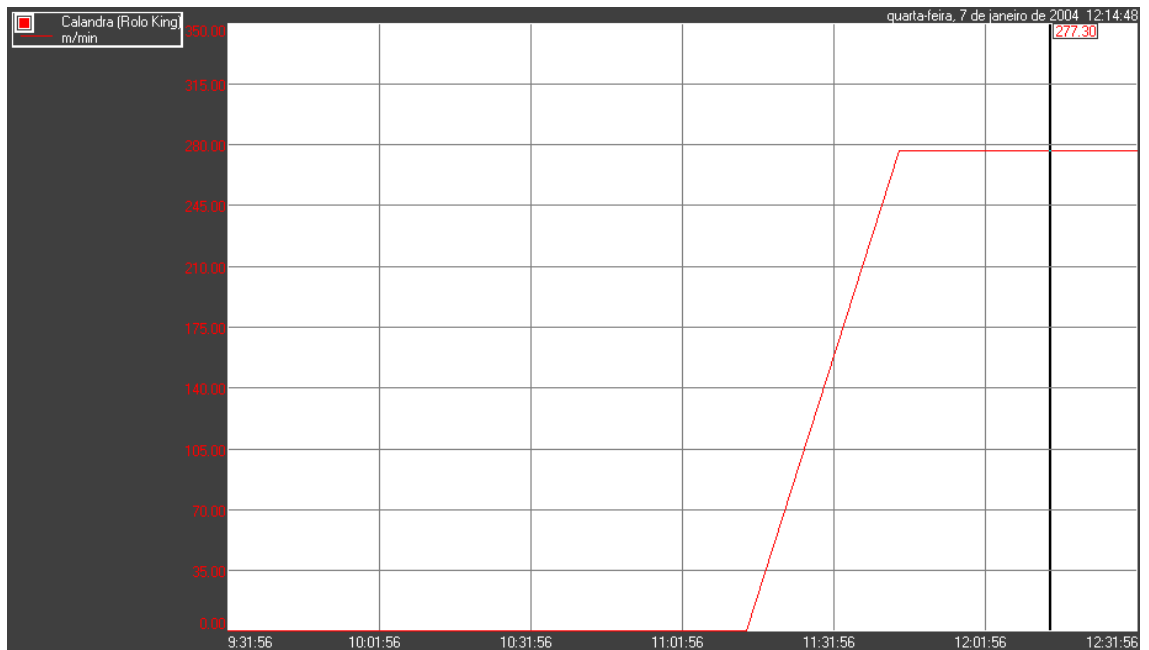
durante a aceleração e após a estabilização da velocidade, além do comportamento da corrente e torque dos motores.



**Figura 32 – Sincronismo de velocidade entre os acionamentos dos rolos móvel e fixo da prensa de colagem**

#### 4.2.1.5 Gráfico de velocidade do novo acionamento do rolo superior da calandra

O gráfico da figura 33 apresenta a rampa de velocidade e estabilização de velocidade no valor requerido pelo processo, para o acionamento do rolo superior da calandra.

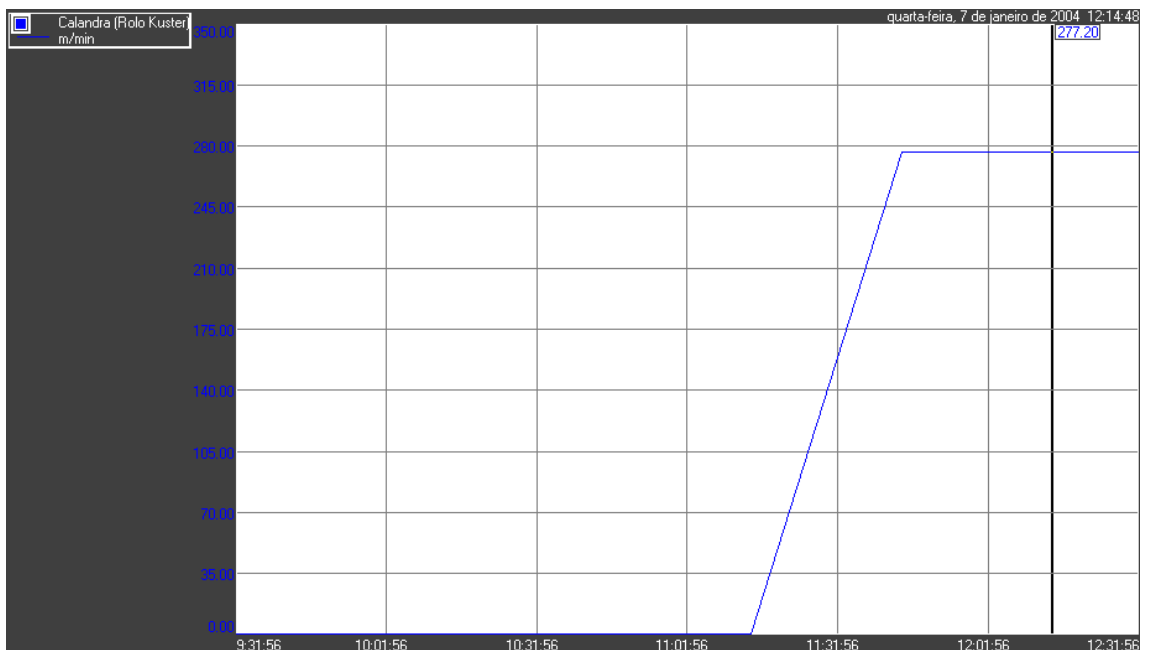


**Figura 33 – Controle de velocidade do acionamento do rolo superior da calandra**

O valor real de  $K_p$  foi ajustado em 600 e  $T_i$  igual a 32,0 segundos.

#### 4.2.1.6 Gráfico de velocidade do novo acionamento do rolo inferior da calandra

O gráfico da figura 34 apresenta a rampa de velocidade e estabilização de velocidade no valor requerido pelo processo, para o acionamento do rolo inferior da calandra.



**Figura 34 – Controle de velocidade do acionamento do rolo inferior da calandra**

O valor real de  $K_p$  foi ajustado em 447 e  $T_i$  igual a 18,4 segundos.

#### 4.2.1.7 Gráfico de sincronismo de velocidade entre os acionamentos do rolo superior e inferior da calandra

O sincronismo de velocidade entre os acionamentos do rolo superior e inferior, possui relevância pelo fato da calandra ter como uma das principais funções a melhora do perfil transversal da folha. O gráfico figura 35 mostra o sincronismo de velocidade entre os rolos superior e inferior durante a aceleração e após a estabilização da velocidade.



Figura 35 – Sincronismo de velocidade entre os acionamentos dos rolos superior e inferior da calandra

## 5. Conclusão

Analisando-se os resultados apresentados pelo estudo do impacto financeiro relacionados às duas propostas apresentadas nas tabelas 12 e 13, para o incremento de velocidade da máquina de fabricação de papéis, pôde-se concluir que utilizando-se a base de cálculos proposta por este trabalho alcançou-se uma economia de **37,16%**, em relação à proposta inicial apresentada pela consultoria do fabricante.

Conclui-se também que ao comparar o consumo de corrente do acionamento do *line shaft* originalmente instalado, durante a fabricação do tipo E1302/65, em relação ao consumo pós-instalação do novo acionamento, foi possível perceber uma redução média de **25,70%** no consumo de corrente, para as mesmas condições de ajuste de máquina e processo.

Nas simulações apresentadas nas figuras 29 a 35, pôde-se concluir que a implementação dos novos acionamentos eletromecânicos viabilizou um incremento de 300m/min para 600m/min, sem sobrepor os valores máximos especificados pelos fabricantes para os motores do rolo de sucção, prensa de colagem rolos fixo e móvel, calandra rolos superior e inferior e *line shaft*. Além do fato de que mesmo o novo acionamento do *line shaft* seja ajustado para a velocidade de 600m/min, este ainda poderá ser otimizado para velocidades superiores, pois mesmo que a velocidade na ponta do eixo do motor atinja os 800 RPM, o fabricante garante ainda uma sobre velocidade de 15% acima da velocidade nominal especificada para o equipamento.

Realizando-se a análise comparativa entre os gráficos das figuras 23 a 26 da simulação matemática dos acionamentos, com os gráficos das figuras 29 a 35 adquiridos durante o processo produtivo, pôde-se concluir que a resposta obtida na

análise teórica condiz com o resultado obtido na prática, o que garante a eficácia do embasamento teórico utilizado neste trabalho.

Analisando-se os gráficos das figuras 27 a 35, pôde-se concluir que após a instalação dos novos acionamentos eletromecânicos, obteve-se uma maior estabilidade no que diz respeito ao controle de velocidade, que por conseqüência reduziram sensivelmente variações de corrente apresentadas no gráfico da figura 27 e a garantia de estabilidade demonstrada nos gráficos das figuras 29 a 35. Esta variação é prejudicial às características do papel fabricado, tais como: estabilidade do perfil longitudinal e transversal, perfil de espessura e orientação de fibras.

Pelos resultados apresentados pelo presente trabalho, concluiu-se que a metodologia desenvolvida apresenta eficácia e confiabilidade para o processo produtivo, garante a melhoria das características dos produtos fabricados, além da viabilização da concepção de um projeto que apresentou custos reduzidos com garantia de qualidade técnica e robustez.

Não foi possível avaliar, durante o período posterior a implementação dos novos acionamentos, o aspecto de redução das intervenções pela área de manutenção e a validação da redução de consumo de energia elétrica, em função do curto espaço de tempo em que o sistema foi instalado.

Proposta para futuros trabalhos:

- Efetuar uma avaliação para substituição dos retificadores trifásicos por conversores de freqüência e motores C.A..

## 6. Referências Bibliográficas

- [1] Carvalho, J.L. Sistemas de Controle Automático, 1ª Edição. Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, 2000, 388p., 85-216-1210-9.
- [2] Dorf, R.C. Bishop, R.H. Sistemas de Controle Modernos. 8ª Edição. Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, 2001, 656p., 85-216-1242-7.
- [3] Ogata, K. Engenharia de Controle Moderno. 3ª Edição. Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, 2000, 809p., 85-216-1243-5.
- [4] Phillips, C.L. Harbo, R.D. Sistemas de Controle e Realimentação. Makron Books do Brasil Editora Ltda., São Paulo, 1997, 558p., 85-346-0596-3.
- [5] LAMAS, W.Q. RIBEIRO, G.W. GROH, F. Análise do Sistema de Controle Realimentado de Motor DC Aplicado em Máquina de Revestimento de Papéis Especiais. Taubaté, 2001. 29p. Monografia - Universidade de Taubaté.
- [6] ALLEN BRADLEY Inc. Drives & Motion Controllers Catalog. Allen Bradley, 1985.
- [7] ALLEN BRADLEY Inc. Automation Today. Allen Bradley, 2002.
- [8] WEG MOTORES. Catálogo Geral – Motores Elétricos. Weg Motores, 2002.
- [9] ALLEN BRADLEY Inc. Instruction Manual for DC Drivers. Allen Bradley, 1998.
- [10] Collings, T.D., Wilson, W.J. “A fast-response current controller for microprocessor-based SCR-DC motor drives”, IEEE Industry Applications, pp 921-927, Oct 1991.
- [11] Salmon, J.C. “A three-phase PWM strategy using a stepped reference waveform”, IEEE Industry Applications, pp 914-920, Oct 1991.
- [12] Yao, G. “New transfer function model for PWM power converter”, IEEE Industrial Electronics Society, vol.2, pp 1135-1142, Nov 1990.
- [13] Kazerani, M. “A high performance current controlled regenerative AC-DC convertor for DC motor drives”, IEEE Industrial Electronics Society, vol.2, pp 1169-1175, Nov 1990.

[14] Christiansen, C.F. "Digital measurement of angular velocity for speed control", IEEE Industrial Electronics, pp 78-83, Feb 1989.

[15] VOITH. NRJ 4143/2003, Lista de Potência Requerida Máquina de Papel, São Paulo, 2003.

**Sites:**

- <http://www.weg.com.br/>
- <http://www.abb.com/>
- <http://www.rockwellautomation.com/>

**Marcas Registradas**

Todos os nomes registrados, marcas registradas ou direitos de uso citados nesta dissertação pertencem aos seus respectivos fabricantes.



## **7. Apêndice**

### **7.1 Detalhamento técnico de uma máquina para fabricação de papéis.**

É um equipamento projetado para realizar a formação de diversos tipos de papéis, conforme as necessidades do mercado consumidor, através de um processo contínuo e estável a partir de um material fibroso bruto (Polpa de Celulose), proveniente da madeira.

A máquina para fabricação de papéis pode ser dividida em alguns setores, que são responsáveis pela formação, qualidade e uniformidade do papel a ser produzido, são eles:

- 7.1.1 Caixa de entrada,
- 7.1.2 Mesa plana,
- 7.1.3 Parte úmida (prensagem),
- 7.1.4 Seção de secagem,
- 7.1.5 Prensa de cola,
- 7.1.6 Calandra,
- 7.1.7 Enroladeira,
- 7.1.8 Central de comando de motores.

#### **7.1.1 Caixa de entrada**

É um dos principais setores para o desenvolvimento da estrutura da folha de papel, no processo de fabricação.

A uniformidade do papel produzido em uma máquina de fabricação de papéis depende da dispersão uniforme das fibras e partículas de carga mineral em suspensão que formarão a folha. Por isso, o projeto e a operação da caixa de entrada são elementos absolutamente críticos para o sucesso da fabricação do papel.

A caixa de entrada tem duas funções principais:

A primeira: puramente hidrodinâmica, é de distribuir o fluxo de um tubo circular em um jato fino, largo, de espessura e velocidade constantes ao longo de toda largura da máquina de fabricação de papel.

Esta função determina a macro distribuição das fibras na folha de papel e pode ser interpretada através da distribuição de gramatura.

A segunda: É de distribuir as fibras uniformemente no jato.

Esta última determina a micro distribuição ou formação da folha de papel.

#### 7.1.2 Mesa plana

É o setor da máquina onde a folha de papel é formada pela deposição de fibras, de uma suspensão aquosa com consistência variando de 0,2 a 0,5%, sobre uma tela onde a água é drenada. Existem 2 processos principais de formação da folha: mesa plana (máquina *Fourdrinier*) e forma redonda ou tambor rotativo.

A tela é suportada, primeiramente, pelo rolo cabeceira e, a partir daí, já com a massa, é apoiada nos "hidrofoils" e nos roletes esgotadores, os quais ajudam na retirada da água da massa.

A tela passa então pelas caixas e rolos de sucção, onde a retirada de água da massa atinge a faixa de 93 a 99% da água inicial. Nesse ponto, a folha formada já com certa resistência mecânica é destacada da tela, entrando na seção de prensagem da máquina de fabricação de papel.

### 7.1.3 Parte úmida (prensagem)

A função primordial da prensagem úmida de uma máquina de fabricação de papel é remover a quantidade máxima possível de água da folha de papel antes de submetê-la a secagem por calor. Concomitantemente tem-se a redução do volume específico e o aumento da lisura da folha. A capacidade da prensa, ao desempenhar estas funções, sem causar danos ao papel, como esmagamento, perda de finos, rearranjo das fibras e enrugamento, depende do projeto da prensa, do feltro e das características operacionais.

### 7.1.4 Seção de secagem

Divide-se em 1º setor de Secagem e 2º setor de Secagem, onde a folha de papel sai da seção de prensas com umidade que pode variar de 50 a 75% (base úmida), dependendo do tipo de papel, da máquina de fabricação de papéis e da seção de prensas. Entretanto, na produção de papel procura-se obter um produto com umidade próxima à de equilíbrio com o ambiente, ou seja, com menos de 10% de umidade.

Na prática, nenhum método de extração direta de líquido foi desenvolvido de forma a reduzir a umidade a valores abaixo de 50% (base úmida), sendo necessário recorrer ao processo de evaporação, cujo o custo é superior, quando comparado com o custo de extração de água por prensas.

A seção de secagem de uma máquina de fabricação de papéis convencional é formada por uma série de cilindros secadores. A folha de papel é aquecida através do contato com a superfície externa dos cilindros e a energia necessária à secagem é fornecida por meio de vapor que entra no interior dos cilindros.

#### 7.1.5 Prensa de cola

A principal função deste setor é gerar resistência a penetração de líquidos no papel produzido.

#### 7.1.6 Calandra

Este setor possui a função de melhorar a qualidade do perfil transversal da folha produzida e em alguns casos prover certa quantidade de brilho ao papel.

#### 7.1.7 Enroladeira

Como o próprio nome diz, destina-se a efetuar o enrolamento do papel produzido.

#### 7.1.8 Central de comando de motores

Define-se como um alojamento devidamente dimensionado para acondicionar todos os componentes que integram o acionamento elétrico de máquinas girantes (Motores elétricos).

## 7.2 Perfil Técnico Voith

O primeiro contato do Brasil com a Voith foi no início do século quando, em 1903, a empresa enviou para o país uma turbina hidráulica de 46 KW. Depois disso, em 1912, vieram três turbinas com potência unitária de 12880 KW, que com 195 metros eram na época as turbinas Francis de mais alta queda no mundo.

Depois seguiram-se mais e mais fornecimentos, marcando a presença da empresa na área de turbinas e de papel também, a partir de 1923.

Até 1957, a Voith alemã exportou para o Brasil 330 turbinas, com potência de 700.000 KW e 10 máquinas de fabricação de papel completas. Esta demanda mostrou potencial de desenvolvimento industrial do país, despertando interesse por parte da matriz para atuar localmente.

Assim sendo, em 57 a Voith associou-se à Bardella, tradicional empresa brasileira de bens de capital. O departamento Voith da Bardella contava com funcionários da matriz e outros contratados no Brasil registrando um número expressivo de equipamentos produzidos parcialmente na Alemanha e complementado no Brasil.

Passados alguns anos, a Voith já tinha adquirido profundo conhecimento sobre o mercado local e suas necessidades, o que fez com que fosse tomando corpo a idéia de fundar uma empresa própria no Brasil, mais ágil e mais competitiva, oferecendo produtos com tecnologia de ponta para os brasileiros.

Já no início do ano de 64, o presidente do Grupo Voith, Dr. Hugo Rup, convenceu a família Voith a investir na construção de uma fábrica própria no Brasil. Ele acentuou que esta seria uma indústria planejada para o final do século, afirmando que o Brasil foi criado por Deus para a Voith, numa alusão ao imenso potencial hidráulico e florestal do país.

A partir desta decisão foi feito um acordo de separação entre a Bardella e a Voith.

Um pouco menos de 100 anos depois da fundação da Voith na Alemanha, em 16 de julho de 1964 foi realizada a assembléia geral de constituição da Voith no Brasil, conforme publicado no diário Oficial do Estado de São Paulo.

Assim sendo, em 1964 foi adquirida uma área de 300.000 m<sup>2</sup> no bairro do Jaraguá. Afastada do centro da cidade, a área era praticamente dominada pelo mato, de difícil acesso, sem ruas pavimentadas nem rede de água e esgoto muito menos rede de telefonia e de alta tensão - a comunicação da obra com o escritório instalado no centro de São Paulo era feita apenas por meio de um transmissor de rádio.

Durante as obras, tiveram de ser abertos 2,2 km de ruas e deslocados 400.000 m<sup>3</sup> de terra. O verão de 1965 trouxe muitas chuvas: às vezes, num mesmo dia, até dez caminhões atolavam na lama. Os mais velhos se lembram bem que havia uma motoniveladora unicamente para rebocar os veículos encalhados. A cena era mais parecida com uma barragem que com uma instalação fabril em construção, mas acabou resultando em uma área construída de 134.000 m<sup>2</sup>.

Os problemas não apareciam só na obra. As equipes de montagem externa de turbina também passaram por grandes dificuldades. Pela distância das usinas e total falta de estrutura existente na época, eles chegavam a ficar até 6 meses na obra, isolados do mundo, distantes de suas famílias e da civilização. Para chegar às usinas, andavam mata adentro, atravessando terrenos perigosos, dormiam em redes, sem falar das comidas estranhas com que se deparavam. Às vezes, para se comunicar com a empresa ou com a família, precisavam viajar até 14 horas para chegar até um telefone. Esses são os verdadeiros heróis cujos nomes não ficaram registrados em nenhum livro de história, mas que possibilitaram o desenvolvimento da Voith no Brasil.

Depois desta grande aventura, já no primeiro semestre de 66 a Voith tinha um parque industrial considerável onde era possível soldar, recozer e usinar peças de até 100 toneladas. Em 22 de setembro de 66 a fábrica foi oficialmente inaugurada pelo

então governador do Estado de São Paulo, Laudo Natel, tornando-se a maior filial do Grupo em todo o mundo.

Apesar de ter nascido num cenário político adverso, em um país dominado por uma inflação de 90% ao ano - assustadora para a época, a nova empresa pôde contar com a iniciativa de pessoas jovens, com pouca experiência, mas muito dinâmicas e com grande entusiasmo.

O fato mais marcante deste início de vida no Brasil foi uma encomenda feita no ano da inauguração, quando a fábrica mal começara suas operações: as quatro primeiras turbinas da usina de Estreito (Furnas). Cada turbina, com capacidade de gerar 160 MW, tinha um rotor com diâmetro de seis metros que pesava cerca de 100 toneladas. Na ocasião eram os maiores rotores do tipo Francis projetados, produzidos e instalados no mundo ocidental.

Se a década de 60 foi a da implantação da empresa, a de 70 foi a do seu desenvolvimento, quando foi inaugurada a fundição para suprir a grande demanda do mercado. O setor de papel também se desenvolveu no mesmo ritmo da indústria brasileira que conheceu pela Voith as mais modernas tecnologias para fabricação de papel de boa qualidade, colocando o país como fornecedor para todo o mundo. Nesta fase também se firmaram as exportações para Europa, América do Norte e América Latina.

O setor de turbinas também teve importante crescimento nessa década. O mais importante pedido dessa época e um dos mais significativos de toda a história do grupo Voith foi Itaipu, uma das maiores hidrelétricas do mundo e que teve participação nacional superior a 80%. Dos 18 rotores, cada um pesando 300 toneladas e com capacidade de geração de 715 MW, 12 foram produzidos pela Voith.

### 7.3 Perfil Técnico Beloit

O primeiro projeto de uma máquina destinada a produção de polpa de celulose integrada foi em meados da década de 60, na Índia.

Harry Moore Beloit se tornou um dos principais construtores de máquinas de fabricação de papel dos Estados Unidos e do mundo. Como a demanda relacionada ao produto era muito grande as vendas cresciam ano após ano. A dianteira técnica adquirida pela Beloit era surpreendente. Então a grande quantidade de patentes e inovações técnicas, levaram Moore a se tornar o presidente ao término de 1974, o cargo que ele ocupou até a aposentadoria dele em 1978.

Crescimento de companhia continuou com a compra de Lenox Machine Company, as Companhias Rader e a divisão de rolos de cobre da Raybestos Manhattan. Uma nova sociedade foi firmada e uma planta industrial foi instalada no Brasil em 1980.

Em 1987, a Beloit e seus afiliados, possuíam escritórios de vendas de produtos de floresta, polpa e indústrias de papel ao redor do mundo. Suas plantas estavam situadas na Inglaterra, Itália, Canadá, Brasil e EUA, além das representações no Japão, Índia, Polônia e Austrália.



## 7.4 Detalhamento técnico da rede de comunicação Ethernet

O padrão Ethernet é, atualmente, o padrão de redes locais (LANs) que conheceu maior difusão.

É definido fundamentalmente ao nível da camada de Ligação de Dados (*Data-Link Layer*) e a sua implementação começa por ser feita nas próprias placas de rede.

O protocolo Ethernet é propriedade de um consórcio formado pela DEC Intel e Xerox.

Existe um protocolo aberto (desenvolvido no âmbito do modelo OSI) muito semelhante ao Ethernet, com o qual por vezes é confundido - o padrão IEEE802.3.

As redes Ethernet conheceram grande difusão em topologias bus com cabos coaxiais. Entretanto, com a difusão da tecnologia dos hubs, tornaram-se mais comuns em topologias, com cabos UTP.

As taxas de transmissão das redes Ethernet situam-se, à partida, na casa dos 10 Mbits/seg. Porém, à medida que aumenta o tráfego na rede, essa taxa baixa drasticamente.

### 7.4.1 Funcionamento das redes Ethernet

As redes Ethernet qualquer que seja a sua topologia física (bus ou estrela), têm uma topologia lógica do tipo bus, ou seja, as transmissões de cada computador são feitas por difusão (*broadcast*), através de um cabo comum - meio físico compartilhado. O acesso ao meio físico, por parte dos computadores, é feito por um método baseado em contenção, conhecido como CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection*).

As interfaces (placas) que ligam os computadores ao cabo da rede estão sempre a receber a informação que circula pelo canal comum (o bus). Num dado instante em que está em curso uma transmissão, todos os outros computadores da

rede são obrigados a ficar em estado de contenção, isto é, sem poderem transmitir. Apesar das mensagens transmitidas serem detectadas por todas as interfaces dos computadores ligados á rede, apenas aqueles a quem essas mensagens se destinam se encarregarão de as receber e interpretar-las. Se um computador pretende iniciar uma transmissão, terá de esperar por um momento em que o canal (bus) esteja livre.

Pode acontecer que dois ou mais computadores iniciem uma transmissão num mesmo lapso de tempo, sem que nenhum deles tenha detectado que o canal já estava a ser ocupado com uma transmissão. Neste caso, ocorrerá uma colisão.

Uma vez que o canal é partilhado por todos os nós da rede e em *baseband*, isto é, ocupando toda a largura de banda disponível, quando dois computadores iniciam transmissões sem se terem detectado um ao outro, os sinais colidem no meio físico de transmissão e nenhuma das transmissões terá sucesso. Quando ocorre uma colisão, as interfaces dos computadores que tinham tentado iniciar a sua transmissão, detectam o ruído e ficam em contenção por um pequeno período de tempo (gerado aleatoriamente pela interface de rede); em seguida, voltam a tentar, afim que a transmissão seja bem sucedida.

Este é, em suma, o método CSMA/CD (*Cauier Sense Multiple Access / Colision Detection*). Os computadores ligados ao meio físico estando atentos à onda portadora (carrier); a ocorrência de mais do que um acesso ao mesmo tempo dá origem a colisões; as colisões terão de ser detectadas e resolvidas, por forma a viabilizar as transmissões.

O modo de funcionamento das redes Ethernet, como acabamos de ver, coloca um problema potencial que é precisamente o das colisões.

Em redes de pequenas dimensões ou em que o tráfego de mensagens não seja muito intenso, o método de resolução dessas colisões é perfeitamente satisfatório (e uma prova disso é o sucesso que este padrão conheceu).

Todavia, em redes de maiores dimensões, com grande intensidade de tráfego ou com exigências de taxas de transmissão elevadas, o padrão Ethernet poderá não satisfazer inteiramente. Recentemente foi criada uma nova versão muito mais rápida do Ethernet, chamada *Fast Ethernet*, que consegue taxas de transmissão na ordem dos 100 Mbits/s. Isto é, conseguido graças à utilização de hubs evoluídos e um novo

método de acesso ao meio de transmissão chamado *Denand Priority Access Method* - um hub central controla o acesso à rede, conferindo prioridades a certas mensagens relativamente a outras, em conformidade com critérios lógicos.

## 7.5 Detalhamento técnico da rede de comunicação Controlnet

Estável, previsível e segura para as aplicações mais exigentes, tais como: lógica e movimento.

É uma rede que assim como a Devicenet utiliza modelo produtor/consumidor para a realização da transmissão de informações, ou seja:

- Um dispositivo (produtor) informa a hora marcada em seu relógio (dado) a todos os presentes (consumidores)
- Todas os dispositivos recebem a informação simultaneamente
- Alguns dispositivos decidem utilizar os dados (consumi-los) para ajustar seu relógio, verificar alguma pendência etc.; outros ignoram (não consomem).
- Altamente determinístico

O tempo que os dados necessitam para chegar aos dispositivos não depende do número destes que estão presentes na rede, nem se estão entrando ou saindo.

### 7.5.1 Principais vantagens:

#### NÍVEL DO DISPOSITIVO

Permite aos usuários reduzir em fiações, em tempo e custos de instalação, e obter diagnósticos valiosos dos diversos sensores, atuadores e outros dispositivos que se conectem ao sistema de controle.

#### NÍVEL DE CONTROLE

Oferece desempenho previsível e repetitivo para E/S, programação, comunicação peer-to-peer e coleta de dados, pois abrange todo o processo de produção, da matéria prima até o produto final.

#### NÍVEL DA EMPRESA

Oferece a vários sistemas IS, MES e de Arquivamento de Dados o acesso aos dados do chão-de-fábrica para fins financeiros, de qualidade, produção e desenvolvimento.

## 8. Anexos

8.1 Anexo A – Estudo Voith (lista de potencia requerida para acionamentos)

# PIRAHY VI

## V = 600 m/min.

# LISTA DE POTÊNCIA REQUERIDA

<u>Dados da Máquina</u>			
Largura da tela	S		
Largura do papel-enrol.	Pu		
Tipo de papel	CIGARRO, XEROX E	HELIOGRÁFICO	
Gramatura papel base	Fg min. [g/m <sup>2</sup> ]	15,0	máx. 80
Gramatura papel pintado	Fg min. [g/m <sup>2</sup> ]		máx.

Esquema de Acio. No. VP 1.12 - 337

Revisão	Data	Nome	Modificações
	2003-08-06	HOLF	

---

---

**Plant Engineering**

---

---



VOITH PAPER

## Lista de Potência Requerida

Código: PIRAHY VI

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pos. No	Grupo do Acionamento	Dim Rolo/Cil. mm Quant.	Relação i z1   z2 D1   D2 (D in mm)	- atrs + avan %	rotaç n min n max rpm	pres L min max KN/m	pespec KW	NRL P min P max KW	RDC KW P Ho KW	P Mot KW n Mot rpm	Observação
1	ROLO DE SUCCAO da Tela	1010 1 W	1,00000 	-8 -8	15 132		1,200	20 197	276 201		ACIONAMENTO INDIVIDUAL
2	PRENSA DE COLAGEM ROLO MÓVEL	800 1 W	1,00000 	0 0	20 179		0,090 40	21 14,80	21 17,2		ACIONAMENTO INDIVIDUAL
3	PRENSA DE COLAGEM ROLO FIXO	780 1 W	1,00000 	0 0	20 184		0,090 40	21 14,80	21 17,2		ACIONAMENTO INDIVIDUAL
4	TAMBOR DA ENROLADEIRA	410 1 W	0,61039 385   235	0 0	24 213		0,020	0,50 3	4,6 3,3		ACIONAMENTO INDIVIDUAL
5	TRANSMISSÃO LONGITUDINAL		1,00000 				1,570	37 256	362 318		ROT. TRANS. N 747 rpm
6	1ª PRENSA DE SUCÇÃO	915 1 W	1,00000 	-6 -6	16 147		0,290 60	6,80 48	67 54		ACIONADO PELO Nº 5
7	2ª PRENSA ALISADORA (FABRIC)	800 1 W	1,00000 	-5 -5	19 170		0,300 80	7,10 49	69 56		ACIONADO PELO Nº 5
8	3ª PRENSA OFF-SET	780 1 W	1,00000 	-4 -4	20 176		0,220 40	5,20 36	51 41		ACIONADO PELO Nº 5
9	1º GRUPO SECADOR	1500 1 P	2,37778 45   107	-3 -3	24 220		0,040	0,90 6,6	9,2 8,1		ACIONADO PELO Nº 5
10	2º GRUPO SECADOR	1500 1 P	2,37778 45   107	-3 -3	24 220		0,040	0,90 6,6	9,2 8,1		ACIONADO PELO Nº 5
11	3º GRUPO SECADOR	1500 1 P	2,37778 45   107	-2 -2	25 223		0,100	2,40 16,5	23,0 25		ACIONADO PELO Nº 5
12	4º GRUPO SECADOR	1500 1 P	2,37778 45   107	-1 -1	25 225		0,100	2,40 16,5	23,0 25		ACIONADO PELO Nº 5
13	5º GRUPO SECADOR	1500 1 P	2,37778 45   107	0 0	25 227		0,100	2,40 16,5	23,0 25		ACIONADO PELO Nº 5
14	6º GRUPO SECADOR CILINDRO CROMADO	1500 1 P	2,37778 45   107	0 0	25 227		0,040	0,90 6,6	9,2 8,1		ACIONADO PELO Nº 5
15	7º GRUPO SECADOR	1500 1 P	2,37778 45   107	0 0	25 227		0,050	1,20 5,2	11,5 9,8		ACIONADO PELO Nº 5
16	8º GRUPO SECADOR	900 1 P	2,37778 45   107	1 1	25 229		0,110	2,60 18,1	25,0 27		ACIONADO PELO Nº 5
17	9º GRUPO SECADOR CIL. RESFRIADOR CR.	900 1 P	2,37778 45   107	1 1	25 229		0,060	1,40 9,9	13,8 11,4		ACIONADO PELO Nº 5
18	ENROLADEIRA	900 1 P	1,00000 	2 2	18 162		0,120	2,80 19,7	28,0 19,9		ACIONADO PELO Nº 5

**VOITH PAPER****Lista de Potência Requerida****Código: PIRAHY VI**

1. As abreviaturas constantes da coluna 3 referentes a rolos e cilindros tem o seguinte significado:

W	= Rolo	P	= Secador de papel	K	= Resfriador
SW	= Rolo Flutuante	PL	= Rolo Guia Papel	FL	= Rolo Guia Feltro
Br	= Rolo Abridor	SFL	= Rolo Guia Feltro de Sucção		

- Os diâmetros indicados na figura 3 referem-se a rolos ou cilindros em estado novo.
- Quando a transmissão do acionamento do eixo de entrada do grupo para o rolo ou cilindro correspondente é efetuado por correia, corrente ou engrenagem, neste caso a proporção de velocidade, assim como os diâmetros das polias ou o número de dentes são especificados na coluna 4.
- O avanço ou recuo indicados na coluna 5, referem-se ao 1º grupo secador.
- As rotações indicadas na coluna 6, referem-se ao eixo de acionamento do grupo e correspondem a rolos em estado novo. Quando na coluna 12 houver indicação de motor ou motoredutor direto, a rotação do motor ou a saída do motoredutor, corresponde a indicada na coluna 6. Quando na coluna 12 não houver indicação, para se chegar à rotação do motor selecionado, será utilizado redutor mecânico e preliminarmente a rotação do motor deve ser considerada em torno de 1800 RPM. Em alguns casos, a rotação dos motores, podem estar indicadas na coluna 12. Em caso de reaproveitamento de motores, as considerações acima podem ser alteradas.
- Sob designação "pespec" na coluna 8 estão indicados os valores de potência em kW para cada 1 metro de largura de tela. Com 10m/min de velocidade do papel. Estes valores não recebem de forma alguma acréscimos dependentes da velocidade (aumento do momento torsor).
- A potência NRL (carga operacional normal), indicada na coluna 9, corresponde, aos valores médios que conforme experiência ocorrem no eixo de acionamento do grupo com cuidadosa manutenção e revisão da máquina já amaciada e sob condições normais de funcionamento.

Quando na coluna 6, sob Vmin e Vmáx, forem indicadas respectivamente 2 rotações, a potência indicada se refere à ambas rotações.

As potências min. e máx., são determinadas conforme o torque máximo resultante, de modo que resulta basicamente um torque constante, mesmo que isto, na realidade, nem seja o caso.

- A potência RDC (capacidade recomendada de acionamento), especificada na coluna 10, deve ser fornecida pelo motor em condições normais de operação, a qualquer instante.
- A potência PHo para elevar a velocidade da máquina em operação, indicada na coluna 10, a soma da potência de aceleração mais a NRL (PHo – Pcel+NRL). O motor dimensionado desta forma não trabalhará em sobrecarga. Caso o motor admita sobrecarga, o fornecedor do motor poderá propor motores de potências menores. Desde que não seja abaixo da potência RDC. A potência de aceleração Pcel é calculada em função do momento de inércia do grupo acionado e do tempo de aceleração escolhido. Normalmente para máquina de papel, o tempo de aceleração previsto é de 25 segundos/100m/min.
- Para o acionamento dos diversos grupos individuais da máquina, são necessários motores de corrente contínua ou alternada com regulação de frequência. Sendo utilizado motores de corrente alternada, cada motor deverá ser equipado com um conversor de frequência. Além, disso deve-se observar que a potência do conversor de frequência deve corresponder no mínimo a potência RDC.
- As pontas de eixo dos motores deverão ser providas de furos pequenos, para os dispositivos de montagens e desmontagens dos elementos de acionamentos.
- Todas as indicações foram determinadas e verificadas de acordo com o nível atual da técnica. Entretanto, também o fornecedor elétrico em conjunto com o cliente, com base nas respectivas experiências, devem analisar as potências e demais informações da presente lista e definir da melhor forma possível o escopo do fornecimento elétrico.
- Outras especificações sobre o controle de tensão, operação conjunta, distribuição de cargas, momento de partida, tempo de aceleração, operação como gerador, condições de regulação e notas de regulação e de modo de operação, só serão fornecidos com listas de potência requerida definitivas (status final F).

8.2 Anexo B – Estudo Voith revisado conforme características eletromecânicas em regime produtivo (lista de potencia requerida para acionamentos)

VOITH PAPER

Data for Speed Reducers

August. 28.2003

Codeword : PIRAHY-VI

Pos LP No	Drive Group	Power				Low Shaft		High Shaft		Asse mbly	Ratio i=1: Exact	Ambient Temp. C°	OBSERVAÇÃO
		NRL kW		RDC kW		Speed 1/min		Speed 1/min					
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.				
1	ROLO DE SUCCAO	28	254	39,5	356	15	176	106,00	1780	A / B	16,79	25	AC. IND.
2	1º PRENSA DE SUCCAO	6,8	48	9,5	67,2	16,35	196,20	106,18	1274,17	C	6,4943	25	AC. PELO Nº. 05
3	2º PRENSA ALISADORA (FABRIC)	7,1	49	9,9	68,6	18,90	226,80	106,41	1276,95	C	5,6303	25	AC. PELO Nº. 05
4	3º PRENSA OFF-SET	5,2	36	7,2	50,4	19,59	235,06	106,72	1280,57	C	5,4479	25	AC. PELO Nº. 05
5	TRANSMISSÃO LONGITUDINAL	29,0	259	40,6	362,6	15,00	176,00	176,00	1280,40			30	ROT. TRANS. N=960 RPM
6	1º GRUPO SECADOR	0,9	6,6	1,3	9	24,47	293,67	105,65	1267,91	C	4,3175	30	AC. PELO Nº. 05
7	2º GRUPO SECADOR	0,9	6,6	1,3	9	24,47	293,67	105,65	1267,91	D	4,3175	30	AC. PELO Nº. 05
8	3º GRUPO SECADOR	2,4	7	3,3	9,2	24,72	296,69	106,08	1273,13	C	4,2911	30	AC. PELO Nº. 05
9	4º GRUPO SECADOR	2,4	17	3,3	23,1	24,98	299,72	106,73	1280,57	D	4,2726	30	AC. PELO Nº. 05
10	5º GRUPO SECADOR	2,4	17	3,3	23,1	25,23	302,75	106,72	1280,58	C	4,2298	30	AC. PELO Nº. 05
11	PRENSA DE COLAGEM ROLO MOVEL	2,1	25	2,9	35,0	20	239	107,00	1780,00	A / B	16,63	25	AC. IND.
12	PRENSA DE COLAGEM ROLO FIXO	2,1	25	3,0	35,0	20	245	107,00	1780,00	A / B	16,63	25	AC. IND.
13	6º GRUPO SECADOR	0,9	6,6	1,3	9,2	25,36	304,26	107,80	1293,37	C	4,2509	30	AC. PELO Nº. 05
14	7º GRUPO SECADOR	11,5	9,8	16,1	13,7	25,36	304,26	107,80	1293,37	D	4,2509	30	AC. PELO Nº. 05
15	8º GRUPO SECADOR	2,6	18	3,6	25,3	25,48	305,78	108,68	1304,26	D	4,2654	30	AC. PELO Nº. 05
16	9º GRUPO SECADOR	1,4	10	2,0	13,9	25,48	305,78	108,68	1304,26	D	4,2654	30	AC. PELO Nº. 05
17	CALANDRA	2,8	35	3,9	49,0	18,04	216,45	108,79	1780,00	D	16,36	25	AC. IND.
18	ENROLADEIRA	2,8	19,7	3,9	27,6	24	284	109,00	1300,00	A / B	11,9200	25	AC. PELO Nº. 05