

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 749

**INVESTIGAÇÃO SOBRE A VIABILIDADE  
TÉCNICA DA EXTENSÃO DO LIMITE DA  
VELOCIDADE DE UMA LINHA CONTÍNUA  
DE PRODUÇÃO DE AÇO PARA O  
INCREMENTO DE SUA PRODUTIVIDADE**

**Ronaldo de Araújo Rodrigues**

DATA DA DEFESA: 03/08/2012

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**INVESTIGAÇÃO SOBRE A VIABILIDADE TÉCNICA DA  
EXTENSÃO DO LIMITE DA VELOCIDADE DE UMA LINHA  
CONTÍNUA DE PRODUÇÃO DE AÇO PARA O INCREMENTO DE  
SUA PRODUTIVIDADE**

Ronaldo de Araújo Rodrigues

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Helder de Paula

Belo Horizonte – MG

Agosto de 2012

**"Investigação sobre a Viabilidade Técnica da Extensão do Limite da Velocidade de uma Linha Contínua de Produção de Aço para o Incremento de sua Produtividade"**

**Ronaldo de Araújo Rodrigues**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 03 de agosto de 2012.


Por:



Prof. Dr. Helder de Paula  
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes  
Engenharia Elétrica (Universidade Federal de Uberlândia)



Prof. Dr. Braz de Jesus Cardoso Filho  
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Sidelmo Magalhães Silva  
DEE (UFMG)

A Deus, essência do meu ser, à minha família, Rode, Vinícius e Iago, pelo incentivo e apoio por mais esta importante etapa da minha vida profissional.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todas as pessoas que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho e, em particular:

À Aperam Inox America do Sul, na pessoa dos gerentes Geraldo Magela Mendes Assis, Leonam Oliveira de Almeida, Paulo Marcelo de Andrade Novaes, Fernando Cláudio de Oliveira e Marco Pinto de Souza, pela confiança, oportunidade de crescimento profissional, apoio financeiro e pelas vezes que precisei me ausentar do trabalho para poder concluir esta dissertação.

Ao meu orientador, professor Hélder de Paula, pela atenção, amizade, dedicação e enorme incentivo para a realização deste trabalho.

Ao amigo Luciano Lellis Miranda, pelo apoio e incansável ajuda.

Aos amigos Ricardo Augusto Nunes Toledo, Romero de Sousa Araújo, José Menino de Oliveira e Nilton Cezar Lourenço pelo incentivo durante a pesquisa.

Aos amigos Sergio Rolla, Adolfo Kalergis e Reginaldo Barbosa, pelo apoio durante a pesquisa.

Aos amigos que hoje estão perto de mim ou que um dia estiveram, pelos momentos felizes que vivemos e por tanta partilha, conversas e alegrias.

A toda equipe de Assistentes, Metalurgistas, Técnicos de controle processo, Operadores e Analistas da linha de recozimento e decapagem da Aperam, pelo apoio nas análises dos processos.

A UFMG/CPDEE, pela oportunidade de realização do mestrado.

## RESUMO

O aumento da produção de uma linha de processamento contínua está diretamente relacionado ao aumento da velocidade de processamento do material. Neste contexto, é apresentado no presente trabalho uma análise técnica envolvendo os diversos equipamentos que compõem uma linha contínua de recozimento e decapagem de aço, com foco na caracterização e possível extensão do seu limite de velocidade. Fundamentada nas normas pertinentes, princípios de funcionamento e características operacionais de cada equipamento, tal avaliação identificou a máxima capacidade dos mesmos no tocante à maior velocidade possível de acionamento da linha de produção em estudo. De fato, aplicando a metodologia proposta com a análise das características do processo, formas de controle das máquinas, levantamentos de dados dos equipamentos e processos chegou-se aos valores máximos de velocidade para cada equipamento. Os resultados indicaram que os comprimentos dos acumuladores, rotações e potências dos motores elétricos, potência térmica do forno e capacidade da decapagem eletrolítica não se encontram em seus limites, apontando para a possibilidade de ganhos significativos de velocidade. Por outro lado, conclui-se que os conjuntos redutores de velocidade apresentam-se subdimensionados, indicando a necessidade de repotencialização, mesmo operando com a velocidade atual. À exceção dos redutores, a próxima limitação de velocidade foi imposta pelos motores elétricos, mas que ainda assim permitem um aumento de velocidade de 17 metros por minuto. Vale ressaltar que a adoção desta metodologia permitirá a avaliação da capacidade de outros projetos de linhas de produção, a fim de otimizar o seu processo.

Palavras-chave: Linha contínua de recozimento e decapagem, laminador de encruamento, incremento de velocidade de linha contínua de produção, motores elétricos, redutores de velocidade.

## **ABSTRACT**

Production increase of a continuous processing line is directly related to an increased processing speed for the material. In this context, this work presents a technical analysis involving the various equipment comprising a continuous Annealing and Pickling Line of steels, with a focus on characterization and possible expansion of its speed limit. Based on the relevant rules, theory of operation and operational characteristics of each section of equipment, the evaluation identified the maximum capacity of such sections concerning their highest running speed achievable for the production line under study. In fact, applying the proposed methodology by analyzing the process characteristics, machines control methods, and data surveyed from equipment and processes, the maximum speed value of each section of equipment was determined. The results indicated that the accumulation lengths of loop cars, revolutions and power capacity of electric motors, furnace heat capacity and electrolytic pickling capacity are not right on their limits, pointing to the possibility of significant speed gains. Step-down gearboxes, on the other hand, proved to be undersized, indicating the need for re-powering, even if they are to operate on the current speed. Apart from the gearboxes, the next speed limitation was imposed by electric motors; however, they can still deliver a speed increase of 17 m/min. It is worthy mentioning that the adoption of this methodology will make possible an assessment of other production lines designs, thus, with the possibility to optimize them.

Keywords: Continuous Annealing and Pickling Line, Skin-pass Mill, speed increase of continuous production line, electric motors, step-down gearboxes.

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	20
1.1	Motivação do trabalho .....	22
1.2	Objetivos do trabalho.....	22
1.3	Estrutura e organização do trabalho.....	23
2	CARACTERÍSTICAS DA LINHA CONTÍNUA DE RECOZIMENTO E DECAPAGEM DE AÇO .....	24
2.1	Considerações iniciais .....	24
2.2	Fluxo produtivo de aços na Aperam .....	24
2.3	Linha de recozimento e decapagem.....	26
2.3.1	Seção da entrada .....	27
2.3.1.1	Desbobinadeira.....	28
2.3.1.2	Máquina de solda.....	29
2.3.1.3	Unidade de desengraxe.....	30
2.3.1.4	Acumulador de tiras da entrada.....	30
2.3.2	Seção do processo.....	31
2.3.2.1	Forno de recozimento .....	32
2.3.2.2	Unidade de resfriamento.....	33
2.3.2.3	Decapagem eletrolítica .....	34
2.3.2.4	Decapagem química .....	35
2.3.3	Seção da saída.....	36
2.3.3.1	Acumulador de tiras do LE2.....	36
2.3.3.2	Laminador de encruamento nº 2.....	37
2.3.3.3	Acumulador de tiras da saída .....	37
2.3.3.4	Bobinadeira da saída .....	38
2.4	Considerações finais .....	38
3	AUMENTO DA VELOCIDADE DA LINHA: AVALIAÇÃO DOS MOTORES, REDUTORES E ACUMULADORES DA ENTRADA.....	39
3.1	Considerações iniciais .....	39
3.2	Metodologia adotada para avaliação da possibilidade do aumento da velocidade ..	39
3.3	O conjugado necessário aos acionamentos.....	41
3.3.1	Acionamentos para a sustentação da tira na linha de passe do equipamento	41
3.3.2	Acionamentos tensores - BSs .....	42
3.3.2.1	Balanco de cargas nos motores dos BSs .....	44



3.3.3	Acionamentos para desbobinar e bobinar o material .....	45
3.4	Parâmetros do processo de produção.....	46
3.5	Redutores de velocidade .....	48
3.6	Motores elétricos de indução.....	55
3.6.1	Enfraquecimento de campo em motores elétricos de indução.....	55
3.6.2	Rotação de motores de indução.....	57
3.6.2.1	Análise da rotação máxima dos motores desta linha de produção segundo o critério da máxima velocidade periférica permissível.....	60
3.6.2.2	Análise da velocidade máxima dos motores elétricos desta linha de produção conforme a norma IEC 60034-1.....	62
3.6.2.3	Análise da velocidade máxima dos motores em função do limite de rotação dos seus rolamentos .....	67
3.6.3	Conjugado de motores de indução trifásicos .....	68
3.6.4	Influência da temperatura na vida útil do motor .....	74
3.6.4.1	Análise da condição atual dos motores elétricos da linha de recozimento e decapagem no que se refere à sua temperatura .....	75
3.7	Condições durante a introdução do material .....	76
3.8	Uma metodologia de controle dos acionamentos de linhas contínuas de processamento.....	78
3.8.1	Controle da velocidade e da força de tração das máquinas rotativas.....	78
3.8.1.1	Fator de dobramento do material.....	79
3.8.1.2	Conjugado de aceleração e desaceleração das máquinas rotativas.....	80
3.8.2	Controle dos motores de acionamento dos rolos dos BSs e dos rolos do laminador de encruamento .....	81
3.8.3	Controle dos motores de acionamento dos rolos da unidade de desengraxe e decapagem .....	85
3.8.4	Controle dos motores de acionamento dos acumuladores .....	86
3.8.5	Controle dos motores de acionamento da bobinadeira e das desbobinadeiras principais e do papel.....	87
3.9	Considerações finais .....	88
4	AUMENTO DA VELOCIDADE DA LINHA: FORNO DE RECOZIMENTO, PROCESSOS DE DECAPAGEM QUÍMICA E ELETROLÍTICA, LAMINADOR DE ENCRUAMENTO (LE2) E ACUMULADORES (LE2 E SAÍDA) .....	90
4.1	Considerações iniciais .....	90
4.2	Forno para aquecimento contínuo do material .....	90
4.2.1	Teorias de combustão de forno.....	90
4.2.1.1	Combustão.....	91

4.2.1.2	Combustão estequiométrica e combustão completa .....	91
4.2.1.3	Ar de combustão teórico .....	91
4.2.1.4	Relação entre gases de combustão e ar de combustão teórico .....	92
4.2.1.5	Excesso de ar de combustão .....	92
4.2.1.6	Poder calorífico .....	93
4.2.1.7	Entalpia de combustão .....	93
4.2.2	Modelo matemático e balanço de energia .....	94
4.2.3	Temperatura x velocidade do forno .....	96
4.2.4	Poder calorífico da mistura dos gases GAF e GN .....	98
4.2.5	Aplicação do modelo matemático e balanço de energia do forno para o aço tipo A .....	99
4.2.6	Simulação com aumento de velocidade aplicando o modelo matemático e o balanço de energia do forno para o aço tipo A .....	101
4.3	Decapagem eletrolítica .....	103
4.4	Condições durante a retirada de material .....	105
4.5	Laminador de encruamento .....	106
4.6	Considerações finais .....	107
5	ANÁLISES, RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	109
5.1	Considerações iniciais .....	109
5.2	Espessura dos materiais aplicados ao trabalho .....	109
5.3	Resultados das análises da velocidade, conjugado e temperatura dos motores elétricos .....	109
5.4	Resultados dos tempos de introdução do material .....	112
5.5	Resultados referentes à capacidade de aquecimento do forno .....	113
5.6	Resultados da capacidade da decapagem eletrolítica .....	114
5.7	Resultados relativos aos tempos para retirada do material da linha .....	115
5.8	Resultados referentes às potências dos redutores de velocidade .....	115
5.9	Resultados referentes aos controles dos conjuntos rotativos .....	120
5.10	Considerações finais .....	121
6	CONCLUSÕES .....	122
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	124
	ANEXO A .....	127
	ANEXO B .....	129
	ANEXO C .....	130
	ANEXO D .....	131

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxo produtivo da Aperam para fabricação de aços inoxidáveis e siliciosos.....	25
Figura 2.2 - Fluxo de processamento do material na linha de recozimento e decapagem. ....	27
Figura 2.3 - Principais conjuntos de equipamentos da seção da entrada, envolvidos na análise do limitador de velocidade.....	28
Figura 2.4 - (a) Desbobinadeira com bobina e (b) Mandril, Redutor; Fonte: (GUIMARÃES, 2009).....	29
Figura 2.5 - (a) vista lateral da Máquina de Solda por costura e (b) vista superior da tira em processo de soldagem.....	29
Figura 2.6 - Vista lateral da unidade de desengraxa.....	30
Figura 2.7 - Carro acumulador de tiras com: (a) dois rolos, (b) quatro lances de material, (c) percurso do carro e (d) tambor com cabo de aço.....	31
Figura 2.8 - Equipamentos da seção do processo. ....	32
Figura 2.9 - Vista lateral do forno de recozimento.....	33
Figura 2.10 - Sistema de resfriamento com: (a) resfriamento com ar, (b) resfriamento com ar e água e (c) secador.....	34
Figura 2.11 - Vista lateral dos tanques para decapagem eletrolítica.....	35
Figura 2.12 - Equipamentos da seção da saída. ....	36
Figura 2.13 - Vista lateral do LE2. ....	37
Figura 2.14 - Bobinamento da tira no mandril da bobinadeira da saída.....	38
Figura 3.1 - Fluxograma da sequência de aplicação da metodologia. ....	40
Figura 3.2 - BS com dois rolos. ....	42
Figura 3.3 - BS: (a) diagrama do conjunto e em (b) a foto de um conjunto montado com a tira sobre os rolos. ....	44
Figura 3.4 - Forma de controle para o balanço de carga entre os motores mestre e escravo do mesmo BS. ....	45
Figura 3.5 - Fluxograma para avaliação dos redutores.....	50
Figura 3.6 - Curvas típicas de conjugado, corrente e tensão de estator e escorregamento em função da velocidade dada em p.u. Fonte: (MURPHY e TURNBULL, 1989).....	57
Figura 3.7 - Termograma da temperatura do motor do acumulador de saída: (a) termograma do motor e (b) fotografia do motor no respectivo termograma. ....	75
Figura 3.8 - Conjuntos de equipamentos utilizados na preparação do material na entrada da linha de recozimento e decapagem.....	76

Figura 3.9 - Controle dos motores de acionamento dos rolos dos BSs e LE2: (a) - controle dos motores mestres dos BS2, BS4, BS5 e BS6, (b) - controle dos motores escravos dos BS1, BS2, BS3, BS4, BS8 e motor superior do LE2, (c) - controle dos motores mestres dos BS1, BS3, BS8 e motor inferior do LE2 e (d) - controle dos motores escravos dos BS5, BS6 e BS7.....	83
Figura 3.10 - Medições de conjugado e velocidade dos motores do BS1; (a) motor mestre - M1 e (b) motor escravo - M2. ....	84
Figura 3.11 - Medições de conjugado e velocidade de dois motores da unidade de desengraxe da entrada; (a) motor 248ACM18 e (b) motor 246ACM11.....	86
Figura 3.12 - Forma de controle dos acumuladores da entrada, LE2 e saída. ....	87
Figura 3.13 - Forma de controle da bobinadeira e desbobinadeiras. ....	87
Figura 4.1 - Concentração de gás em função do ar teórico .....	92
Figura 4.2 - Estação de mistura do gás natural e gás de alto-forno da Linha de Recozimento e Decapagem. ....	98
Figura 4.3 - Temperaturas do forno e material para a velocidade 70 m/min no aço tipo A. .	100
Figura 4.4 - Temperaturas do forno e material para a velocidade 95 m/min no aço tipo A. .	102
Figura 4.5 - Relação entre o tempo de exposição (a direita), corrente por área (inferior) e redução total no tempo de decapagem (a esquerda).....	104
Figura 4.6 - Conjugado medido e calculado em função da velocidade da tira no LE2.....	107
Figura 5.1 - Velocidades de processamento da linha com os respectivos número de motores limitadores. ....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Especificações técnicas da linha de recozimento e decapagem 04 da Aperam.	26
Tabela 3.1 - Coeficiente de atrito para diferentes superfícies de rolos. ....	43
Tabela 3.2 - Tipos de aço e espessuras processadas na velocidade de 70 m/min. ....	46
Tabela 3.3 - Referências de força de tração para os BSs na espessura de 0,74 mm conforme NTA.....	47
Tabela 3.4 - Potências dos redutores da seção da entrada, indicando o valor requerido, de acordo com a capacidade mecânica, corrigida conforme o fator de serviço e corrigida pela capacidade térmica.....	51
Tabela 3.5 - Potências dos redutores da seção do processo, indicando o valor requerido, de acordo com a capacidade mecânica, corrigida conforme o fator de serviço e também pela capacidade térmica.....	52
Tabela 3.6 - Potências dos redutores da seção da saída, indicando o valor requerido, de acordo com a capacidade mecânica, corrigida conforme o fator de serviço e também pela capacidade térmica.....	53
Tabela 3.7 - Resultado das potências dos redutores e coeficiente de atrito necessário entre a tira e rolo, nas velocidades de 70 e 90 metros por minuto na linha. ....	54
Tabela 3.8 - Motores elétricos responsáveis em conduzir a tira com as suas respectivas rotações nominais e rotações na velocidade nominal da tira, de 70 e 90 metros por minuto.	59
Tabela 3.9 - Relação dos tipos de carcaças dos motores desta linha com a respectiva rotação na velocidade periférica de 100 m/s. ....	61
Tabela 3.10 - Velocidade da linha de produção para diferentes carcaças, considerando a velocidade periférica do rotor dos motores em 100 m/s.....	62
Tabela 3.11 - Relação de motores da seção da entrada com seus dados nominais de potência e rotação e o resultado da velocidade da linha quando os motores operam na rotação limite conforme a norma IEC. ....	63
Tabela 3.12 - Relação de motores da seção do processo com seus dados nominais de potência e rotação e o resultado da velocidade da linha quando os motores operam na rotação limite conforme a norma IEC. ....	64
Tabela 3.13 - Relação de motores da seção da saída com seus dados nominais de potência e rotação e o resultado da velocidade da linha quando os motores operam na rotação limite conforme a norma IEC.....	64

Tabela 3.14 - Relação de motores elétricos com seu numero de pólos, limite de rotação atual de operação e limite de rotação utilizado para os cálculos da velocidade limite da linha em 101 metros por minuto.....	66
Tabela 3.15 - Velocidade da linha conforme o limite de rotação dos rolamentos dos motores elétricos. ....	68
Tabela 3.16 - Relação de motores da seção da entrada com os conjugados máximos extraídos na velocidade máxima permitida pela norma IEC e os conjugados necessários para produzir a força de tração da linha. ....	70
Tabela 3.17 - Relação de motores da seção do processo com os conjugados máximos extraídos na velocidade máxima permitida pela norma IEC e os conjugados necessários para produzir a força de tração da linha. ....	71
Tabela 3.18 - Relação de motores da seção da saída com os conjugados máximos extraídos na velocidade máxima permitida pela norma IEC e os conjugados necessários para produzir a força de tração da linha. ....	72
Tabela 3.19 - Resultado das potências dos motores e coeficiente de atrito necessário entre a tira e o rolo para atingir a força necessária nas velocidades atuais de 70 metros por minuto na seção do processo e 90 metros por minuto na seção da entrada e saída. ....	73
Tabela 3.20 - Levantamento dos tempos mínimos da seção da entrada.....	77
Tabela 3.21 - Levantamento dos tempos médios da seção da entrada.....	77
Tabela 3.22 - Levantamento dos tempos máximos da seção da entrada. ....	77
Tabela 4.1 - Temperatura das zonas do forno para cada tipo de aço. Primeira linha: maior espessura; Segunda linha: maior velocidade. ....	96
Tabela 4.2 - Balanço de energia do forno para o aço tipo A na velocidade de 70 metros por minuto. ....	101
Tabela 4.3 - Resultados do balanço de energia para a velocidade máxima do aço tipo A. .	102
Tabela 4.4 - Densidade de corrente para os aços decapados na linha de recozimento e decapagem.....	105
Tabela 4.5 - Capacidade de corrente máxima dos retificadores. ....	105
Tabela 5.1 – Primeiro limite de velocidade da linha conforme avaliação da velocidade periférica motores. ....	110
Tabela 5.2 - Máxima velocidade da linha, de acordo com os tamanhos carcaça e tipos de rolamentos utilizados nos motores elétricos.....	110
Tabela 5.3 - Primeiros limitadores da velocidade da linha conforme estabelecido pela norma IEC e motores especiais.....	111
Tabela 5.4 - Resumo dos tempos de introdução e velocidade simulada sendo o comprimento do acumulador de 280 metros. ....	113
Tabela 5.5 - Balanço de energia do forno, na velocidade máxima.....	114

Tabela 5.6 - Densidade de corrente, utilizada e a máxima permitido pelo equipamento. ....	114
Tabela 5.7 - Simulado da velocidade do acumulador de tiras do LE2. ....	115
Tabela 5.8 - Relação dos redutores que não atendem a linha, pelo critério da capacidade mecânica na velocidade atual. ....	116
Tabela 5.9 - Resultado das potências dos redutores com equalização de carga no BS5 e coeficiente de atrito necessário entre a tira e rolo, nas velocidades de 70 e 90 metros por minuto na linha. ....	117
Tabela 5.10 - Relação dos redutores que não atendem a linha, pelo critério da capacidade mecânica na velocidade proposta para o primeiro limitador. ....	118
Tabela 5.11 - Resumo das velocidades de cada limitador. ....	119
Tabela 5.12 - Redutores para adquirir e reposicionar em outro local da linha para o aumento da velocidade.....	119

## SIGLAS E ABREVIATURAS

**ABNT** – Associação Brasileira Normas Técnicas

**APC** – *Application Program Control*

**Bending** – Ato de dobrar ou curvar algo muito duro

**BS** – Bloco em S – Rolo tensor - *Bridles Roll*

**Conjunto** – Reunião de equipamentos

**Drive** – Conversor de frequência

**FCEM** – Força contra eletromotriz

**GAF** – Gás de Alto-forno

**GLP** – Gás Liquefeito de Petróleo

**GN** – Gás Natural

**LE2** – Laminador de Encruamento Nº 2

**Linha de passe** – Posição em que a tira é conduzida no equipamento

**NEMA** – *National Electrical Manufacturers Association*

**NTA** – Norma Técnica Aperam

**PCI** – Poder Calorífico Inferior

**PCS** – Poder Calorífico Superior

**Seção da entrada** – Parte inicial da linha de produção utilizada na preparação e introdução da tira

**Seção do processo** – Parte central da linha de produção onde a tira recebe o recozimento e decapagem

**Seção da saída** – Parte final da linha de produção onde é realizada a inspeção e retirada da bobina

**Tira** – Material em aço inoxidável processado na linha de produção



## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	aceleração [m/s <sup>2</sup> ]
$C_p^{aco}$	calor específico do ar aço enforado e desenforado [kcal/Nm <sup>3</sup> .°C]
$C_p^{ar}$	calor específico do ar de combustão [kcal/Nm <sup>3</sup> .°C]
$C_p^{fumaca}$	calor específico das fumaças de exaustão [kcal/Nm <sup>3</sup> .°C]
$d_a$	diâmetro do rolo ou bobina [m]
$d_r$	diâmetro do rolo [m]
$d_{Rot}$	diâmetro do rotor [m]
$e$	neperiano
$f_1$	frequência da tensão de alimentação do estator [Hz]
$F$	força [kgf]
$F_a$	fator de ajuste da temperatura ambiente
$F_d$	fator de correção conforme o tempo de funcionamento por hora
$F_h$	fator de ajuste da altitude
$F_m$	fator de serviço mecânico, conforme classificação da carga acionada
$F_s$	fator número de partidas por hora
$F_t$	força de tração na tira [kgf]
$F_v$	fator de correção da velocidade do ar ambiente
$g$	força da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
$h$	espessura do material [m]
$i$	relação de redução do redutor
$I_2$	corrente do estator [A]
$J$	momento de inércia de massa [kgm <sup>2</sup> ]
$l_b$	largura da bobina [m]
$m_r$	massa do rolo [kg]
$\dot{m}$	vazão mássica de aço (t/h)
$N$	nitrogênio
$n_m$	rotação do motor [rpm]
$O$	oxigênio
$p$	número de pólos do motor
$P_a$	potência necessária absorvida pelo sistema [W]
$P_c$	capacidade corrigida do redutor [W]

$PCI$	potência calorífica inferior [kcal/Nm <sup>3</sup> ]
$PCI_{GAF}$	potência calorífica do gás de alto-forno [kcal/Nm <sup>3</sup> ]
$PCI_{GLP}$	potência calorífica do gás liquefeito de petróleo [kcal/Nm <sup>3</sup> ]
$PCI_{GN}$	potência calorífica do gás natural [kcal/Nm <sup>3</sup> ]
$P_{db}$	potência de dobramento [kW]
$P_{dl}$	potência dinâmica [W]
$P_m$	potência nominal do motor [W]
$P_{nr}$	potência nominal do redutor [W]
$P_r$	potência requerida ao redutor [W]
$P_s$	potência estática [W]
$P_t$	potência térmica nominal do redutor [W]
$P_{tc}$	capacidade térmica do redutor [W]
$Q_{ar}$	vazão de ar de combustão [Nm <sup>3</sup> /h]
$Q_{GAF}$	vazão do gás de alto-forno [Nm <sup>3</sup> /h]
$Q_{GN}$	vazão do gás natural [Nm <sup>3</sup> /h]
$Q_{GLP}$	vazão do gás liquefeito de petróleo [Nm <sup>3</sup> /h]
$r_r$	raio do rolo [m]
$S$	escorregamento do motor
$t_a$	tempo de aceleração [s]
$T_a$	conjugado de aceleração ou desaceleração [Nm]
$T_{ar}$	temperatura do ar [C°]
$T_d$	temperatura do aço desenfundado [C°]
$T_{db}$	conjugado de dobramento da tira [Nm]
$T_e$	temperatura do aço enfundado [C°]
$T_m$	conjugado do motor [Nm]
$T_r$	conjugado no rolo [Nm]
$T_s$	conjugado estático [Nm]
$V_L$	velocidade linear da tira [m/min]
$V_{Lmax}$	velocidade máxima [m/min]
$V_{Per}$	velocidade periférica [m/s]

## Letras gregas

$\alpha$	ângulo de abraçamento do rolo em [graus]
$\eta$	rendimento
$\mu$	coeficiente de atrito
$\mu_L$	coeficiente de atrito rolante
$\tau_D$	fator de estiramento [N/m <sup>2</sup> ]
$\varphi_m$	fluxo de magnetização
$\omega$	velocidade angular [rad/s]

# 1 INTRODUÇÃO

Há, na indústria siderúrgica, uma demanda crescente para a produção de tiras de aço inoxidável em maiores volumes; conseqüentemente é necessário se obter com maior eficiência um processo com seu máximo potencial de utilização.

A linha de recozimento e decapagem da Aperam, com capacidade de produção de 180.000 t/ano, possui um índice de funcionamento<sup>1</sup> de 84,24% (SIP, 2010). A máxima velocidade de processamento atual é de 70 metros/minuto na região do processo e de 90 metros/minuto na região das bobinadeiras e desbobinadeiras. Nesta velocidade, é possível processar todo o material com largura abaixo de 1240 mm e espessuras inferiores a 0,7 mm, o que representa 42,8 % da produção total desta linha de produção.

Embora esta linha de processamento já trabalhe na velocidade de projeto, a disponibilização de uma maior velocidade, caso seja possível, permitirá um ganho significativo de produção. Vale ressaltar que esta linha possui uma filosofia de controle moderna, com acionamento através de motores assíncronos supridos por conversores de frequência, o que potencialmente permite maiores condições para melhorias.

Neste contexto, o objetivo dessa dissertação é identificar os limites de cada conjunto que, individualmente, torna-se um limitador da velocidade do processo como um todo. A premissa da análise é a de se manter os atuais equipamentos, potencializando sua utilização. Esta é uma alternativa econômica e interessante, uma vez que minimiza os investimentos e aproveita todo o potencial já instalado da planta, em funcionamento.

O presente trabalho desenvolve uma metodologia para a avaliação da capacidade individual dos conjuntos e equipamentos de uma linha contínua de recozimento e decapagem de aço, com vistas à aplicação de velocidades acima dos valores nominais nos motores elétricos e redutores de velocidade.

No caso do forno de recozimento, para que este tenha a capacidade de manter o recozimento dos aços inoxidáveis de uma forma contínua, é efetuado um levantamento de suas vazões nominais e reais dos gases durante a produção. Diante dos resultados, são

---

<sup>1</sup> Índice de funcionamento: é o percentual de funcionamento da linha em relação ao tempo calendário subtraído do tempo de paradas programadas.

identificadas as perdas térmicas e simulada a sua máxima capacidade, através do balanço da energia de entrada e saída.

Durante o recozimento do material, uma camada de óxido é formada em sua superfície, sendo esta um inconveniente; para o aço inoxidável, é utilizado a decapagem eletrolítica para a sua eliminação. Através de levantamentos da corrente por área e do tempo de exposição do material decapado, foi identificada a máxima capacidade deste equipamento.

Uma vez que se trata de uma linha contínua de processamento, existem acumuladores de tira que possuem a função de fornecer e absorver o material da seção do processo, durante a introdução e retirada do material, respectivamente. Com o comprimento limitado destes acumuladores, faz-se necessário um levantamento dos tempos envolvidos na introdução, inspeção e retirada das bobinas, a fim de avaliar a sua capacidade, a qual também afeta a máxima velocidade possível de se acionar a linha.

Em face do exposto, percebe-se que um estudo do aumento da velocidade, em uma linha contínua de produção, mostra-se bastante abrangente ao envolver diferentes áreas do conhecimento, necessárias ao seu completo entendimento, estudo, análise e solução. É, neste contexto que se pretende, ao longo da elaboração deste trabalho, gerar contribuições significativas ao tema em questão.

## **1.1 Motivação do trabalho**

Sendo a Aperam pertencente a um grupo siderúrgico mundial, e considerando que o mercado internacional de aços inoxidáveis está se tornando cada vez mais competitivo, a utilização dos equipamentos em seu maior nível de produtividade mostra-se imperiosa, diminuindo os custos fixos dos processos e tornando a produção mais rentável e competitiva.

Neste cenário, a motivação principal deste trabalho está ligada ao aumento da atual capacidade de produção de uma das linhas de recozimento e decapagem da área da Laminação a Frio de Aços Inoxidáveis da Aperam, através de estudos das condições e limites de seus equipamentos atuais.

Outra motivação é a disponibilização de uma referência para avaliações da capacidade de produção de linhas contínuas de produção, visto que a mesma compila e complementa um grande montante de informações relevantes encontradas na literatura, acerca das questões associadas aos limites de velocidade dos conjuntos, bem como apresenta uma metodologia para a extensão dos mesmos.

Além disso, a possibilidade de ganhos de produção em avaliações de outras linhas de produção similares, com o uso da metodologia proposta, mostrar-se-á bastante atrativa, frente ao baixo valor do investimento devido ao aproveitamento de sua capacidade instalada.

## **1.2 Objetivos do trabalho**

O propósito geral deste trabalho é o de identificar a máxima capacidade da linha de recozimento e decapagem da Aperam no tocante à sua velocidade de processamento.

Com objetivo de se determinar o seu potencial de produção, é feito um estudo das características do processo, além de levantamentos detalhados das condições de operação, princípio de funcionamento e do uso da potência nominal de cada equipamento. Mais especificamente, serão analisadas as condições das máquinas rotativas (motores e redutores), a capacidade dos acumuladores de tira, as condições do forno, as questões

associadas aos processos de decapagem eletrolítica e química e os aspectos pertinentes ao laminador de encruamento nº2 (LE2).

### **1.3 Estrutura e organização do trabalho**

Uma apresentação da linha de produção em estudo, com seus principais equipamentos, é feita no capítulo 2. Neste, pretende-se situar o leitor no contexto geral desta da linha de processamento e no que diz respeito às divisões da mesma em seções de entrada, processo e saída, para um melhor entendimento do local de aplicação do trabalho.

No capítulo 3 são apresentados os equipamentos rotativos (motores e redutores) com seus fundamentos específicos, assim como os acumuladores, juntamente a análise dos tempos envolvidos para a introdução dos materiais. São apresentadas também todas as equações relacionadas aos equipamentos envolvidos na condução e processamento do material.

O capítulo 4 analisa o forno de recozimento no tocante a suas vazões e capacidade de manter a tira aquecida, bem como o tempo necessário para o recozimento do material, enquanto que para a decapagem é analisada a sua capacidade de eliminar os resíduos da superfície do material. E analisada também a operação dos acumuladores de saída, analisando-se os tempos envolvidos na retirada do material.

No capítulo 5 são sintetizados os resultados associados a cada equipamento, apresentados nos capítulos precedentes. A sua análise, de forma conjunta, permite se obter um único valor que seja viável para o aumento de velocidade, cumprindo com os objetivos do trabalho realizado.

Finalmente, o anexo A apresenta as tabelas para o cálculo da capacidade de conjugado dos redutores, enquanto que o anexo B mostra os valores de rotação máxima para motores de indução, em função de seu tamanho de carcaça e do número de pólos, tal como estabelecido pela norma IEC. Já o anexo C apresenta os valores, em porcentagem, admitidos para a máxima velocidade de segurança dos motores de indução, em função de sua potência e número de pólos, conforme definido pela norma NEMA. Por fim, o anexo D apresenta as principais características dos equipamentos utilizados na coleta e análise dos dados.

## 2 CARACTERÍSTICAS DA LINHA CONTÍNUA DE RECOZIMENTO E DECAPAGEM DE AÇO

### 2.1 Considerações iniciais

A capacidade de atingir e manter um nível de desempenho das linhas contínuas de produção, que resultará na degradação zero da qualidade do produto, é o principal requisito de um sistema de controle de processo. Portanto, é importante entender as condições que influenciam tanto mecanicamente, quanto no tocante à configuração do seu sistema de controle.

Tais fatores mecânicos e a configuração de sistema resultaram, no passado, em projetos de equipamentos mecânicos e arranjos de linha de passe<sup>2</sup>, que renderam bandas com tolerância ampla o suficiente para absorver limitações inerentes do sistema elétrico. Criação de projetos de equipamentos com rolos mais do que fisicamente necessários para transportar a tira com as forças de trações utilizadas na linha de produção. Máquinas complexas foram projetadas para permitir a coordenação dos processos mecânicos. Estas considerações de projeto levaram à elevação dos custos de equipamentos mecânicos, bem como aumentos no número de máquinas elétricas e potência total aplicada (TAINER, P.JEKIELEK e E.NEMURA, 2011).

Neste contexto, o capítulo presente apresenta as etapas e as características mais relevantes da linha contínua de recozimento e decapagem da Aperam.

### 2.2 Fluxo produtivo de aços na Aperam

A então Acesita S.A., fundada em 31 de outubro de 1944, entrou em operação em abril de 1949, com o objetivo de produzir aços especiais para o abastecimento do mercado nacional.

Localizada no município de Timóteo, em Minas Gerais, a usina passou por grandes expansões até atingir a atual capacidade instalada de 860 mil toneladas de aço líquido por ano.

---

<sup>2</sup> Linha de Passe – Posição determinada para a condução do material no equipamento



Com a integração mundial, em 29 de maio de 2007, quando ocorreu o lançamento mundial da marca ArcelorMittal, na cidade de Cannes (França), a Acesita passa a se chamar ArcelorMittal Inox Brasil, com mudança também da logomarca, que é única para todas as empresas do grupo, no mundo inteiro.

Em 25 de Janeiro de 2011, foi lançada oficialmente a formação do grupo Aperam, que é formado pela ex-ArcelorMittal Inox Brasil e outras sete plantas industriais principais localizadas na França e Bélgica, além de uma rede de distribuição, processamento e serviços altamente integrada.

Segundo GUIMARÃES (2009) e ATAÍDE (2010), em uma usina integrada, ilustrada pela Figura 2.1, a produção de aços planos é realizada a partir de placas produzidas na aciaria, que são transferidas para a laminação a quente.

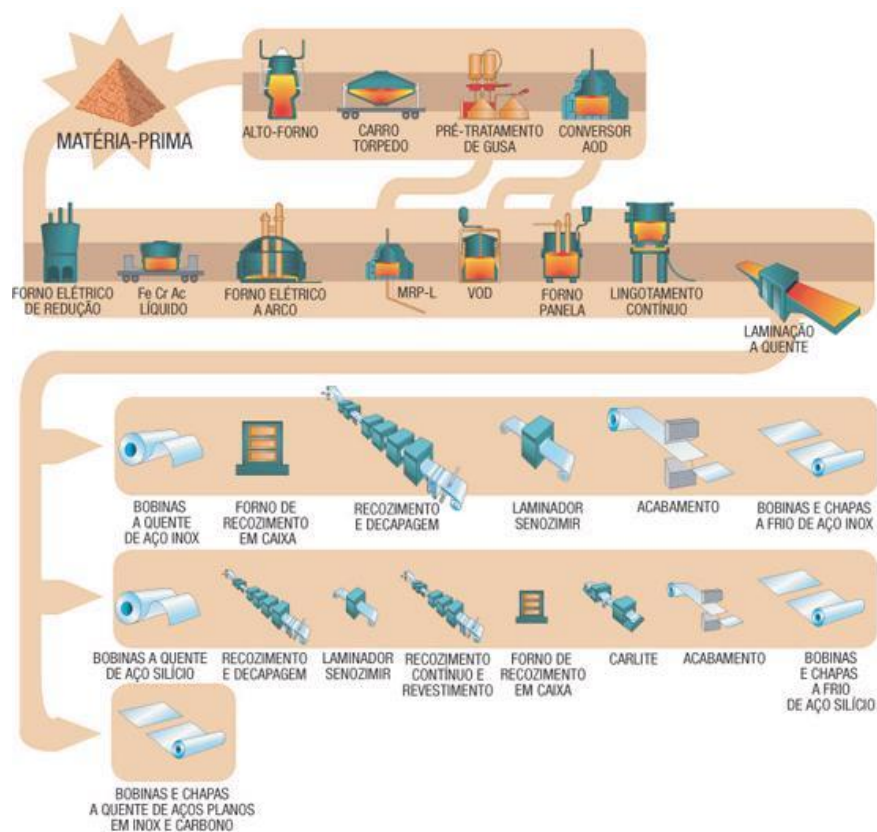


Figura 2.1 - Fluxo produtivo da Aperam para fabricação de aços inoxidáveis e siliciosos.

As placas são conformadas mecanicamente em laminadores a quente, sendo, em seguida, enroladas em forma de bobinas denominadas bobinas a quente, com peso em torno de vinte toneladas. A etapa seguinte é a de laminação a frio, que se inicia na linha de

recozimento e decapagem, a fim de promover o recozimento e a remoção de carepas, deixando o material pronto para ser laminado. O laminador *Sendzimir* promove a laminação propriamente dita do material e, finalmente, o processo de acabamento envolve o corte do material em bobinas ou tiras, de acordo com o peso especificado pelo cliente, além da embalagem para transporte.

Em 1998, foi implantada a linha de Recozimento e Decapagem pelo consórcio formado com empresas ABB / *Davis / Drever*, com recursos oriundos da parceria entre BNDS e ex-Acesita. Dentre os fornecedores, destacam-se: *Kvaerner Davy* (principal), *Drever* (forno), KCH (decapagem), *Cosim* (laminador de encruamento), *Mieback* (máquina de solda) e ABB (elétrica/automação).

### 2.3 Linha de recozimento e decapagem

Com a evolução contínua da tecnologia, automação/controle e sistemas com modelo *online*, dentre outros, adquirem-se ferramentas vitais para a fabricação de produtos de alta qualidade, possibilitando o atendimento a demandas com critérios de produção cada vez mais rigorosos, com menor ocorrência de desvio causada pela má qualidade de produto.

Com relação à referida linha de produção, a Tabela 2.1 apresenta as informações mais relevantes retiradas de ASEA BROWN BOVERI (1996), oferecendo ao leitor subsídios para um melhor entendimento do trabalho.

Tabela 2.1 - Especificações técnicas da linha de recozimento e decapagem 04 da Aperam.

Características	Especificação
Data do projeto	14/6/1995
Fabricante mecânico	Davy
Controle elétrico	ABB
Máquina de solda	Mieback
Capacidade de produção (projeto)	180.000 toneladas/ano
Velocidade máxima do processo	70 m/min
Velocidade máxima da entrada e saída	90 m/min
Espessura de entrada máxima	2,5 mm
Espessura de entrada mínima	0,3 mm
Largura da tira	600 a 1350 mm
Capacidade do acumulador de tiras da entrada	4 x 70 = 280 m
Capacidade do acumulador de tiras do LE2	4 x 87,5 = 350 m
Capacidade do acumulador de tiras da saída	2 x 15 = 30 m

Nesta linha de produção é realizado o tratamento térmico e decapagem superficial no aço inoxidável, utilizando um laminador de encruamento (*Temper Rolling ou Skin Pass*), que se caracteriza por uma pequena redução a frio (inferior a 3%), que promove um encruamento superficial do metal. Ela é responsável pelo acabamento fino, aspecto superficial e pela forma do material processado (CÔRTEZ, 2009). Através da Figura 2.2 tem-se uma visão geral da linha de recozimento e decapagem com seus equipamentos.

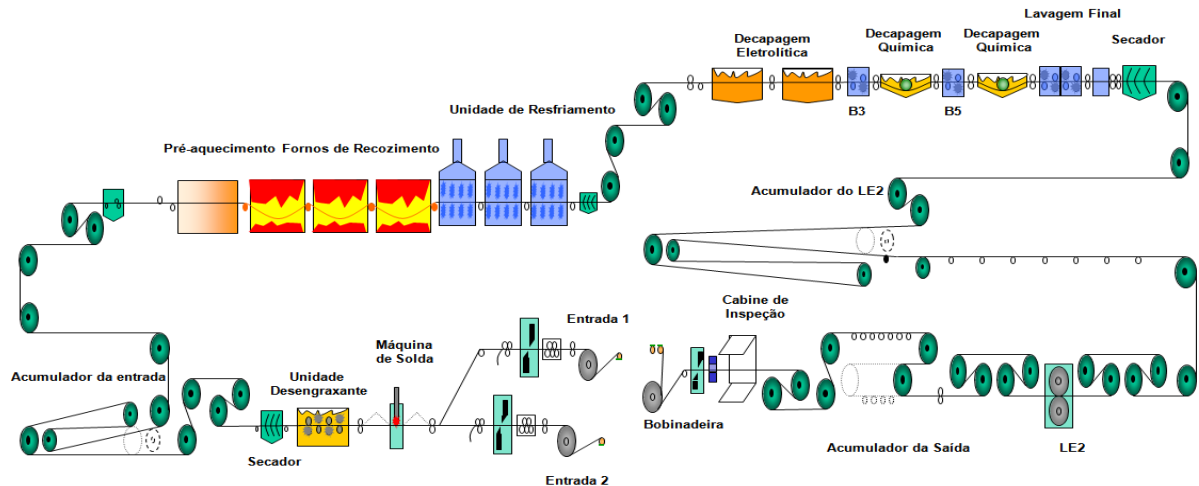


Figura 2.2 - Fluxo de processamento do material na linha de recozimento e decapagem.

Para um perfeito controle das variáveis dos equipamentos e de acordo com a funcionalidade de cada um, a linha de processamento foi dividida em seções, da seguinte forma: seção da entrada, seção do processo e seção da saída, as quais possuem as funções de introduzir, processar e retirar o material respectivamente. Cada seção possui um elemento, aspecto ou questão, limitadores de velocidade intrínsecos, de forma que, para uma melhor compreensão desta questão, uma breve apresentação dos equipamentos envolvidos é feita na sequência.

### 2.3.1 Seção da entrada

Esta seção é identificada pela preparação do material que será processado na seção do processo.

No que diz respeito a esta seção, tem-se que, resumidamente, o material é introduzido pela desbobinadeira 1 ou 2 (Figura 2.3), passando pela máquina de solda, que irá soldar a calda da bobina em processo, com a ponta inicial da bobina a ser processada. Em seguida, o material passa por uma unidade de desengraxe e, por fim, pela seção do

acumulador de tiras da entrada, que viabiliza a parada da calda do material em processamento para efetuar a solda sem interromper as seções seguintes.

Nesta seção de entrada se encontram os conjuntos de equipamentos: desbobinadeiras de papel 1 e 2, desbobinadeira principal 1 e 2, máquina de solda, unidade de desengraxe, BS1 (rolo tensor 1) e acumulador de tiras da entrada, representados pela Figura 2.3, os quais possuem a velocidade máxima de projeto de 90 metros por minuto.

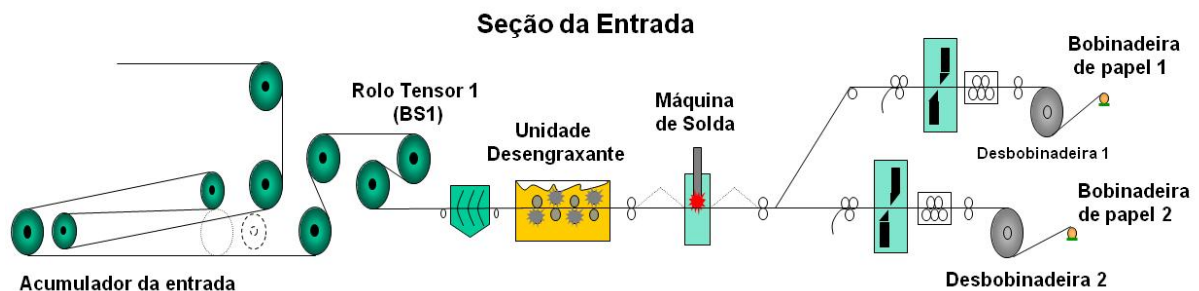


Figura 2.3 - Principais conjuntos de equipamentos da seção da entrada, envolvidos na análise do limitador de velocidade.

Além de outros periféricos, dois motores fazem parte das desbobinadeiras, que são utilizados para desbobinar a tira de aço, sendo que um motor permanece alimentando a seção do processo, enquanto que pelo outro é realizada a preparação da bobina de aço a ser processada (introdução da bobina no mandril, corte de pontas e movimentação da tira até a máquina de solda). Em função do limite de comprimento acumulado no acumulador de tiras da entrada, o tempo para efetuar a preparação da ponta e solda é limitado.

Para um aumento na velocidade da tira nesta seção, deve-se avaliar a capacidade do conjugado e o limite da velocidade de cada máquina. Além disso, deve ser avaliada a eficiência da remoção das impurezas sobre a tira através da seção de desengraxe, bem como os tempos necessários para a preparação e solda da ponta final do material em processamento com a ponta inicial da bobina a ser processada, sem que ocorra a paralisação da seção do processo.

### 2.3.1.1 Desbobinadeira

Este conjunto possui a função de desenrolar a bobina localizada sobre um mandril expansível, mantendo uma força de tração na tira adequada a cada tipo de material processado. Ela é composta de um mandril e um redutor, sendo acionada por um motor

elétrico. Na Figura 2.4, em (a) é apresentado o conjunto de equipamentos que a compõem e em (b) é ilustrado um mandril expansível e contraível com a caixa de redutor, mostrando o seu interior.

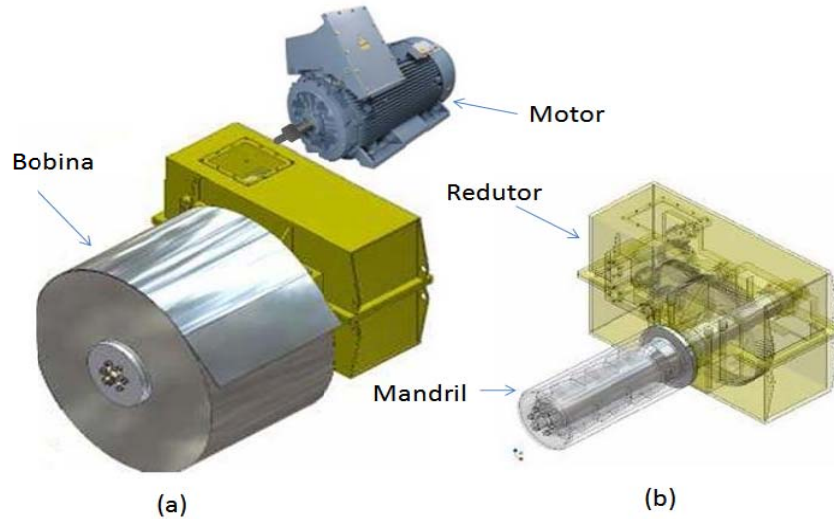


Figura 2.4 - (a) Desbobinadeira com bobina e (b) Mandril, Redutor; Fonte: (GUIMARÃES, 2009).

### 2.3.1.2 Máquina de solda

Como neste equipamento de produção se trata de um processo contínuo faz-se necessária a união da ponta final da bobina em processamento com a bobina a ser processada de forma que a máquina de solda é de suma importância no processo de produção. A título de ilustração a Figura 2.5 apresenta em (a) a sua vista lateral e em (b) a face superior da tira, em final de soldagem.

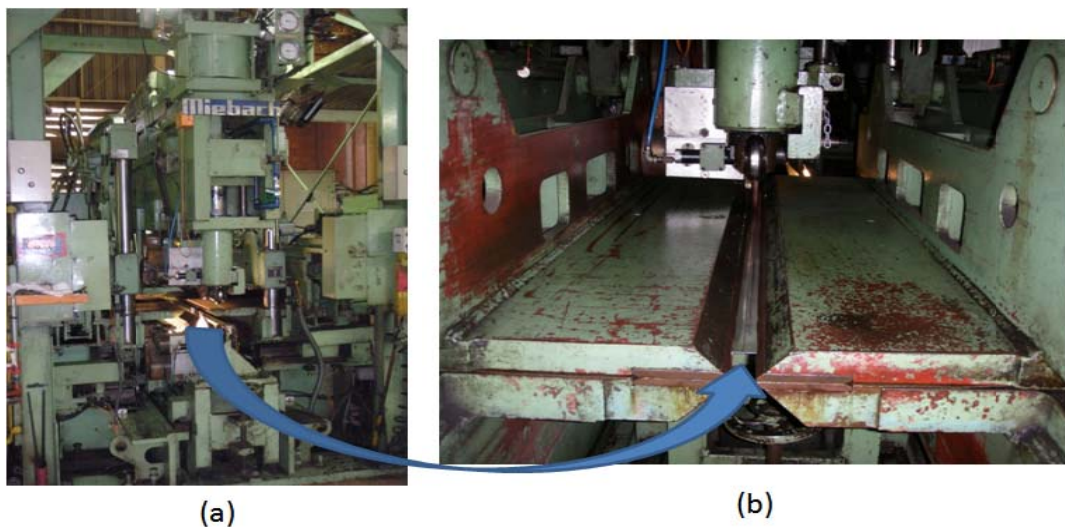


Figura 2.5 - (a) vista lateral da Máquina de Solda por costura e (b) vista superior da tira em processo de soldagem.

### 2.3.1.3 Unidade de desengraxe

Para a manutenção da qualidade superficial do material que será recozido no forno, faz-se necessária a remoção do óleo mineral, oriundo dos laminadores a frio, sobre a superfície da tira. Com a função de limpeza, a unidade de desengraxe apresentada na Figura 2.6, é dividida em seções contendo: *sprays* em alta pressão com água quente, *sprays* com solução alcalina, duplas escovas juntamente com *sprays* de solução alcalina, três estágios de água para lavar e, finalmente, um jato de ar quente e seco.



Figura 2.6 - Vista lateral da unidade de desengraxe.

### 2.3.1.4 Acumulador de tiras da entrada

O acumulador de tiras possui a função de fornecer material à seção do processo durante as paralisações da tira nas desbobinadeiras, que ocorrem durante inspeções superficiais do material e introdução de nova bobina.

Formado por um carro contendo dois rolos, tal como ilustrado pela Figura 2.7(a), este permite a obtenção de quatro lances de material (Figura 2.7(b)) dispostos na horizontal e com capacidade de acumular 280 metros de tira, conforme apresentado na Figura 2.7(c). Com o carro interligado por um cabo de aço a um tambor (Figura 2.7(d)), que é acionado por um motor elétrico provido de redutor, o acumulador mantém a tira tracionada na linha de produção.

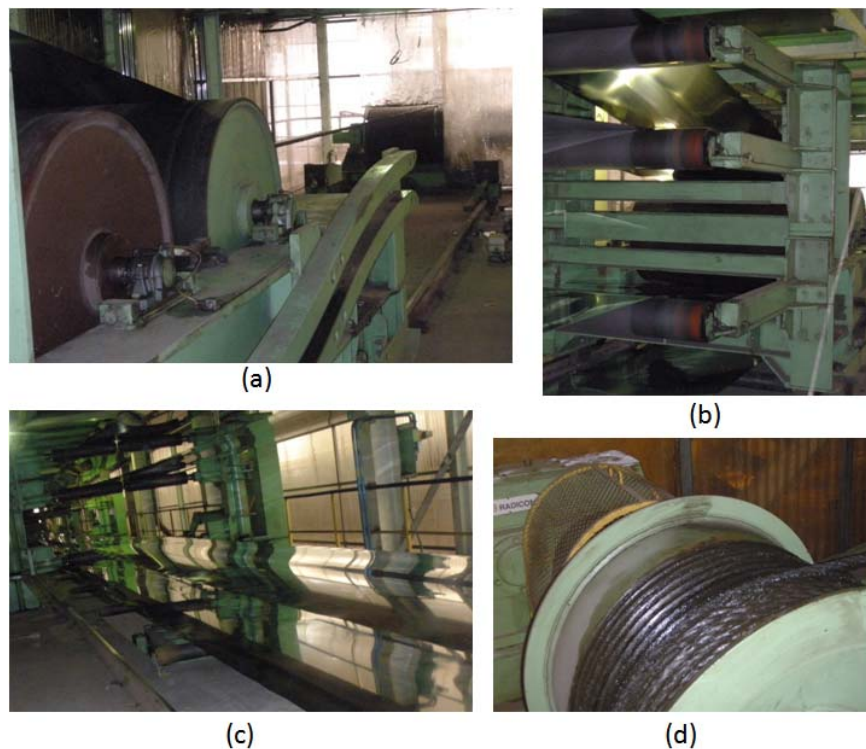


Figura 2.7 - Carro acumulador de tiras com: (a) dois rolos, (b) quatro lances de material, (c) percurso do carro e (d) tambor com cabo de aço.

Durante o enchimento do acumulador de tiras, sua velocidade será a máxima permitida pela seção da entrada, até o mesmo atingir a posição de trabalho solicitada pelo operador subtraído da constante de 2 metros e do comprimento necessário para desacelerar a seção da entrada, quando, então, a velocidade diminui em 10 metros por minuto do valor máximo. Assim, esta velocidade é mantida até o acumulador chegar à posição de trabalho estabelecida, quando, então, a velocidade real da entrada diminuirá novamente, igualando-se à velocidade real do processo mantendo o posicionamento do acumulador.

### 2.3.2 Seção do processo

Esta seção é considerada a mais crítica, por definir aqui a qualidade requerida ao produto, tais como: brilho, dureza, resistência mecânica, resistência à corrosão etc. Nesta, encontram-se o forno e a decapagem, que realizam o tratamento térmico e superficial, respectivamente, devendo, assim, possuir a sua velocidade constante, de acordo com as características de cada material. A paralisação da tira, nesta seção, além de causar perda de produção, poderá provocar uma série de problemas no material, tais como: manchas superficiais, marcas de queimado, super decapagem dentre outras.

Como apresentado na Figura 2.8, a seção do processo contém o forno para recozimento, a unidade de resfriamento, a decapagem eletrolítica e química, finalizando com a lavagem final do material processado.

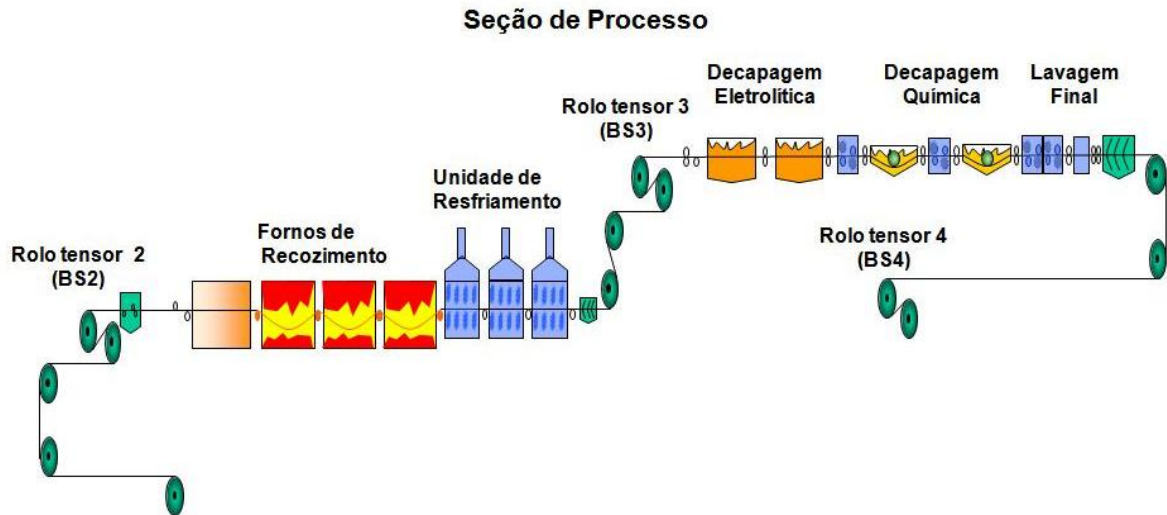


Figura 2.8 - Equipamentos da seção do processo.

Assim sendo, para o objetivo proposto nesta dissertação, que é o aumento da velocidade da tira, deve-se avaliar:

- A capacidade do conjugado e o limite da velocidade de cada máquina rotativa;
- A temperatura máxima e a potência térmica do forno;
- O potencial da unidade de resfriamento do material, após o forno de recozimento;
- A capacidade da decapagem eletrolítica e química de efetuar a limpeza superficial do material, causado pela oxidação originada do forno;
- A lavagem superficial do material após a decapagem química, onde retiram-se os produtos químicos existentes na superfície da tira, oriundos das decapagens.

### 2.3.2.1 Forno de recozimento

Dividido em 4 seções: pré-aquecimento, forno 1 com as zonas 1, 2 e 3, forno 2 com as zonas 4, 5 e 6 e forno 3 com as zonas 7, 8 e 9, este efetua o recozimento da tira em processo contínuo, retirando as tensões do material proveniente do processo de laminação fazendo com que o mesmo atinja algumas propriedades metalúrgicas, tais como tamanho de grão, recristalização, dureza etc (REED-HILL, 1973).



Apesar de projetado para trabalhar com alimentação de gás constituinte da mistura de GAF (Gás de Alto-forno), com GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) ou GAF com GN (Gás Natural), objetiva-se suprir este forno preferencialmente com maior vazão de GAF, visto que o mesmo é de fabricação própria nos altos-fornos da empresa a custo baixo.

À medida que o material é introduzido em cada zona do forno, diz-se que o aço está atingindo o ciclo de temperatura; a Figura 2.9 apresenta uma vista lateral do equipamento, para fins de melhor visualização.

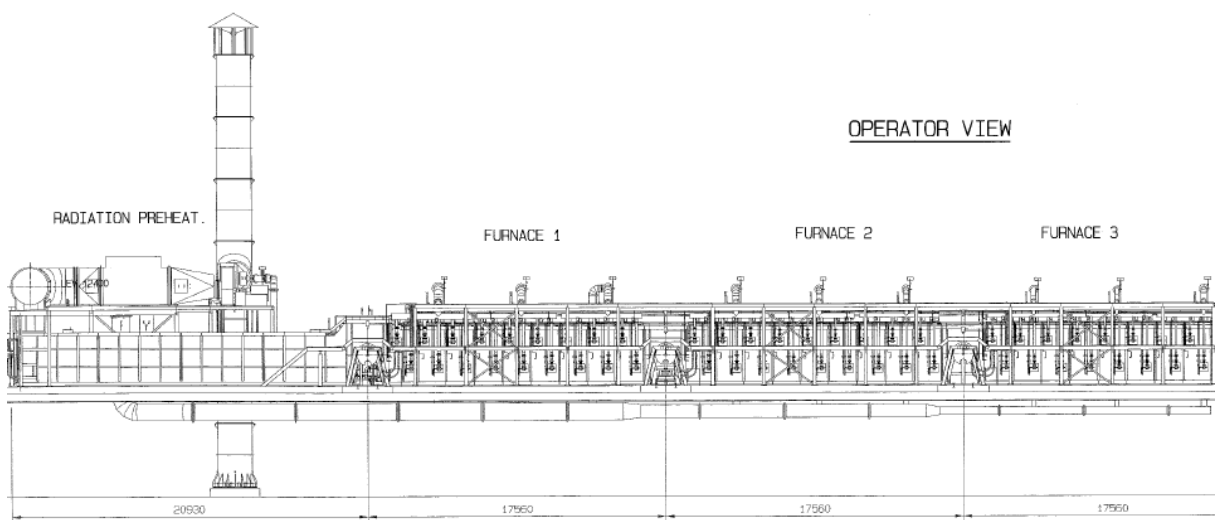


Figura 2.9 - Vista lateral do forno de recozimento.

### 2.3.2.2 Unidade de resfriamento

Esta unidade é utilizada para resfriar a tira após sua passagem pelo forno de recozimento, sendo dividida em três etapas, tal como apresentado na Figura 2.10: (a) o resfriamento com ar, (b) o resfriamento com a mistura de ar e água e (c) o secador a ar.

- O resfriamento com ar abrange o maior comprimento de tira, sendo realizado através de seis motores acionados como ventiladores e três como exaustores. Esta parte do resfriamento, por ser a maior, é responsável por diminuir 50% da temperatura da tira;
- O resfriamento com água e ar é realizado através de bicos *sprays*, que injetam a mistura de água e ar sobre a tira, reduzindo ainda mais a temperatura sobre a mesma;
- O secador possui a função de retirar a umidade da superfície da tira causada pelo resfriamento anterior.

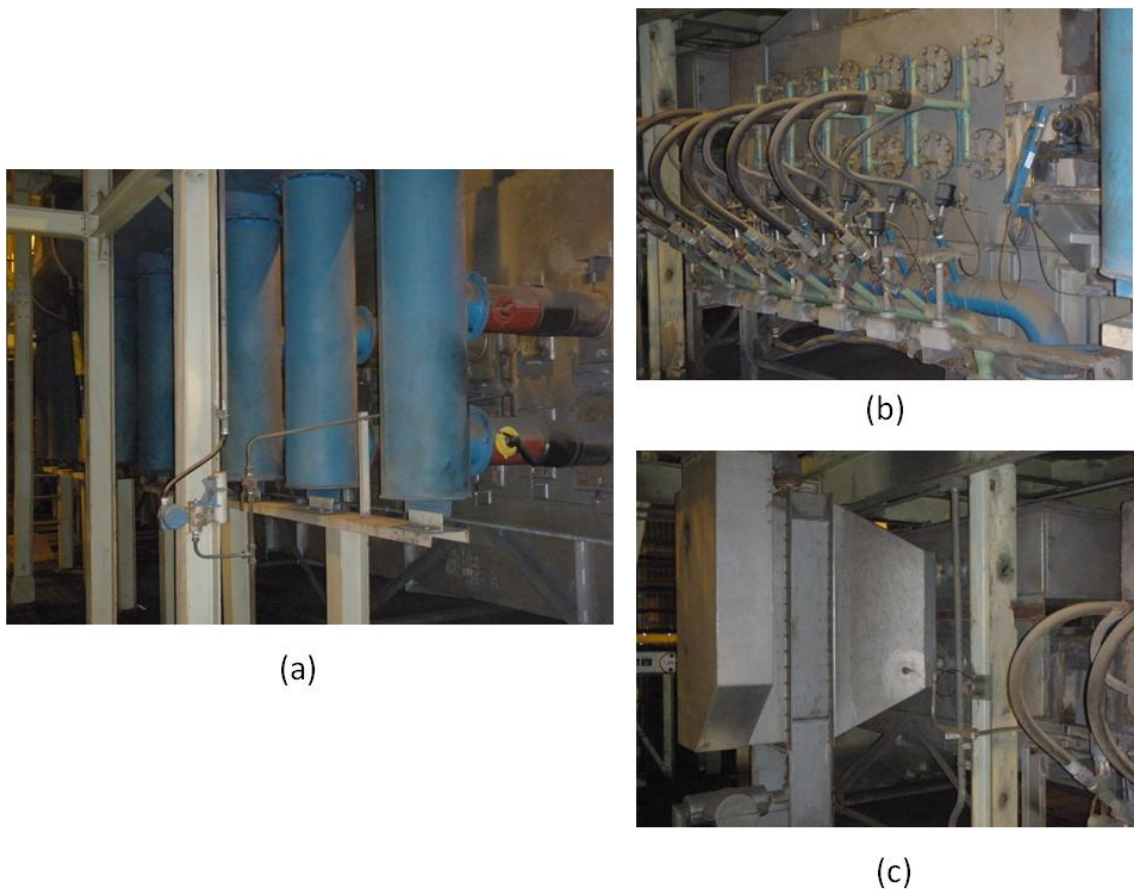


Figura 2.10 - Sistema de resfriamento com: (a) resfriamento com ar, (b) resfriamento com ar e água e (c) secador.

### 2.3.2.3 Decapagem eletrolítica

A carepa é um produto oriundo da oxidação da superfície do aço, quando este passa por aquecimento, resfriamento, tratamento de superfície e/ou ação do tempo (oxidação lenta sobre a superfície) (CUNHA, FILHO, *et al.*, 2006). Para determinados materiais, esta oxidação se torna um inconveniente necessitando, então, da realização de uma decapagem.

Esta decapagem é realizada através de dois tanques chamados de B2.1 e B2.2, os quais contém os eletrodos que são alimentados por 12 retificadores com suas correntes calculadas, através de modelo matemático, e controladas, objetivando evitar a baixa decapagem ou sobredecapagem.

Nos tanques, conforme apresentado na Figura 2.11, a tira de aço inoxidável é mergulhada em solução de sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) numa concentração de 200g/l,

ocorrendo a decapagem eletrolítica. O controle da concentração da solução é realizado pela adição de água purificada ou eletrólito novo (KERAMCHEMIE GMBH, 1997). A temperatura é um fator muito importante para manter a homogeneização da solução, sendo a mesma controlada a 35°C ou 60°C, de acordo com o tipo de aço em processamento, que se encontra referenciado na NTA (Normas Técnicas da Aperam) 17-0041.v25.



Figura 2.11 - Vista lateral dos tanques para decapagem eletrolítica.

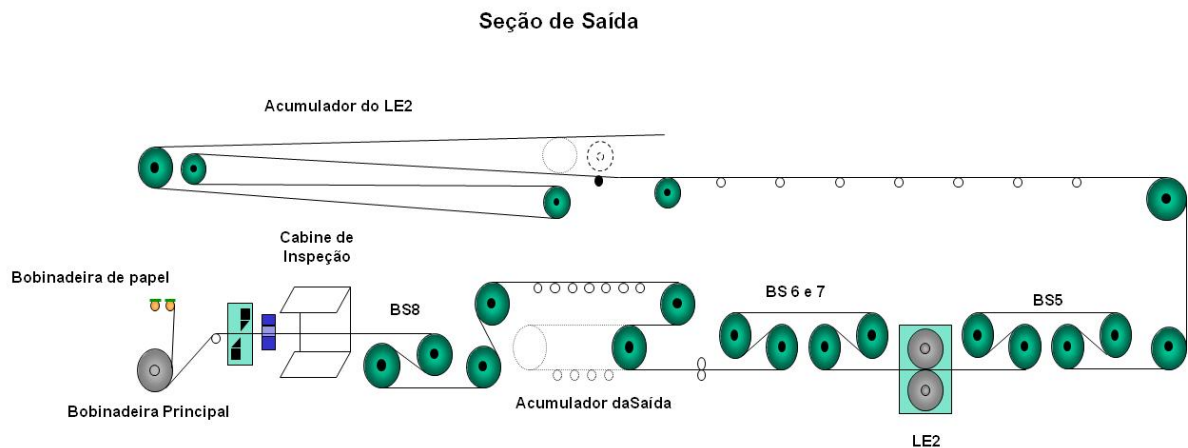
#### 2.3.2.4 Decapagem química

Realizada em dois tanques chamados de B4 e B6, a decapagem química complementa a decapagem eletrolítica eliminando as impurezas da superfície da tira. Neste processo são controladas a temperatura da mistura ácida, a relação de turbulência e a concentração do ácido.

Para decapar os aços inoxidáveis ferríticos são utilizados, nestes tanques, ácidos nítricos ( $\text{HNO}_3$ ) a uma temperatura entre 30 a 40°C; para os aços inoxidáveis austeníticos, são utilizadas as misturas de ácido nítrico com ácido fluorídrico (HF), à temperatura entre 50 a 60°C.

### 2.3.3 Seção da saída

Esta seção é caracterizada pelo laminador de encruamento número 2 (LE2), pelos acumuladores de tiras da saída e LE2, e pelos equipamentos responsáveis pela retirada da bobina processada, tal como apresentado na Figura 2.12.



Com o aumento da velocidade da tira na seção do processo, faz-se necessário, também, o aumento da velocidade nesta seção e para viabilizá-lo deve-se avaliar:

- A capacidade do conjugado e o limite da velocidade de cada máquina rotativa;
- A influência do aumento de velocidade da linha no conjugado requerido aos motores elétricos do LE2;
- Os tempos necessários para inspeção e retirada da bobina processada da bobinadeira de saída.

#### 2.3.3.1 Acumulador de tiras do LE2

Com funcionamento similar ao acumulador de tiras da entrada, este possui maior capacidade de acúmulo de tiras, com 350 metros. Sua função é absorver o material originado da seção do processo, durante as paralisações da tira no LE2 e na desbobinadeira, para inspeções superficiais do material e/ou retirada da bobina processada.

O controle de posição deste acumulador, quando habilitado, aumenta ou diminui a velocidade da seção da saída, para que a sua posição de referência seja atingida. Tal

posição é definida pelo operador que, preferencialmente, deverá estar próximo da posição de vazio, para maior eficiência.

### **2.3.3.2 Laminador de encruamento nº 2**

Com a função de promover o encruamento ao material, este laminador aplica a energia necessária para a deformação da tira, que se encontra sob seus cilindros de trabalho (Figura 2.13) que, por sua vez, é imposta por atuadores hidráulicos, dispostos sob os mancais.



Figura 2.13 - Vista lateral do LE2.

### **2.3.3.3 Acumulador de tiras da saída**

Também com o funcionamento similar ao acumulador de tiras da entrada, este possui a função, juntamente com o acumulador de tiras do LE2, de absorver o material originado da seção do processo durante as paralisações da tira na bobinadeira, para inspeções superficiais no material e/ou retirada da bobina processada. Com capacidade de acúmulo de 30 metros de tira, este acumulador também possui sua maior eficiência na posição vazio.

Em condições de paradas somente da bobinadeira de saída, a velocidade real do LE2 diminui automaticamente para 8 ou 5 metros por minuto, quando o acumulador de tiras da saída estiver vazio ou acima de 50 %, respectivamente. Nesta situação, este irá encher na proporção da velocidade real do LE2.

Ao reiniciar o giro da bobinadeira, a mesma irá assumir o valor máximo de velocidade, permitindo o restabelecimento das condições iniciais (de vazios) deste acumulador e do acumulador do LE2. Durante esta etapa, a velocidade real do LE2 também restabelecerá automaticamente, ficando com 3 metros por minuto menor que a velocidade real de saída, até que este acumulador atinja a posição de referência de trabalho, estabelecida para a sua operação. Após este acumulador e o acumulador de tiras do LE2 atingirem as posições de trabalho, as referências de velocidade para o laminador de encruamento e para a seção da saída serão iguais à velocidade real do processo.

#### 2.3.3.4 Bobinadeira da saída

Dotada de um conjunto de equipamentos similares aos das desbobinadeiras da entrada, a bobinadeira de saída possui a função de enrolar o material processado em formas de bobinas de até 30 toneladas. A título de ilustração, a Figura 2.14 ilustra um bobinamento de tira.



Figura 2.14 - Bobinamento da tira no mandril da bobinadeira da saída.

## 2.4 Considerações finais

Este capítulo destinou apresentar uma visão geral dos equipamentos constituintes da linha de recozimento e decapagem nº 4. Da forma sequencial foi mostrado as suas divisões: seções da entrada, do processo e da saída, o que permitiu o seu entendimento como um todo. Assim pode-se observar que os equipamentos rotativos envolvidos no transporte e na manutenção da força de tração da tira devem ser analisados. Além disso, o forno de recozimento, a decapagem e o laminador de encruamento apresentaram também como equipamentos chaves para as análises da viabilidade do aumento da velocidade desta linha de produção.

### **3 AUMENTO DA VELOCIDADE DA LINHA: AVALIAÇÃO DOS MOTORES, REDUTORES E ACUMULADORES DA ENTRADA**

#### **3.1 Considerações iniciais**

Dentre uma série de considerações acerca da possibilidade técnica de se elevar a velocidade desta linha de produção, destaca-se a preocupação com a garantia da força de tração aplicada à tira, durante a sua condução nos equipamentos. Diante disto, este capítulo trata das questões relacionadas às máquinas rotativas e dos tempos envolvidos, durante a introdução do material.

De forma a cumprir os objetivos definidos nesta dissertação, uma análise mais detalhada das condições de cada conjunto, que possui influência direta no limitador de velocidade, foi realizada, mais especificamente: as condições nominais e reais de trabalho das máquinas rotativas (reduzidores e motores elétricos), a metodologia de controle e as potências necessárias aos acionamentos, bem como a capacidade dos acumuladores de tira da entrada.

Em TAINER, P.JEKIELEK e E.NEMURA (2011) encontra-se descrita a filosofia utilizada pela *TMEIC GE - TOSHIBA MITSUBISHI-ELECTRIC INDUSTRIAL SYSTEMS-CORPORATION* para a concepção de projetos e análises de linhas de processos contínuos. Tal abordagem analisa o processo e equipamentos mecânicos no início do projeto, a fim de programar uma estratégia de controle para garantir o transporte eficaz da tira e o correto dimensionamento dos equipamentos. Uma análise similar foi aplicada neste trabalho, embora, no presente caso, esta linha de processamento já se encontre com sua concepção e montagem concluídas.

#### **3.2 Metodologia adotada para avaliação da possibilidade do aumento da velocidade**

Para a avaliação da capacidade dos equipamentos, foi adotada a metodologia ilustrada pelo fluxograma da Figura 3.1 que, além da avaliação, sugere a implantação ou a repotencialização dos equipamentos que se encontrarem diagnosticados como primeiros limitadores.

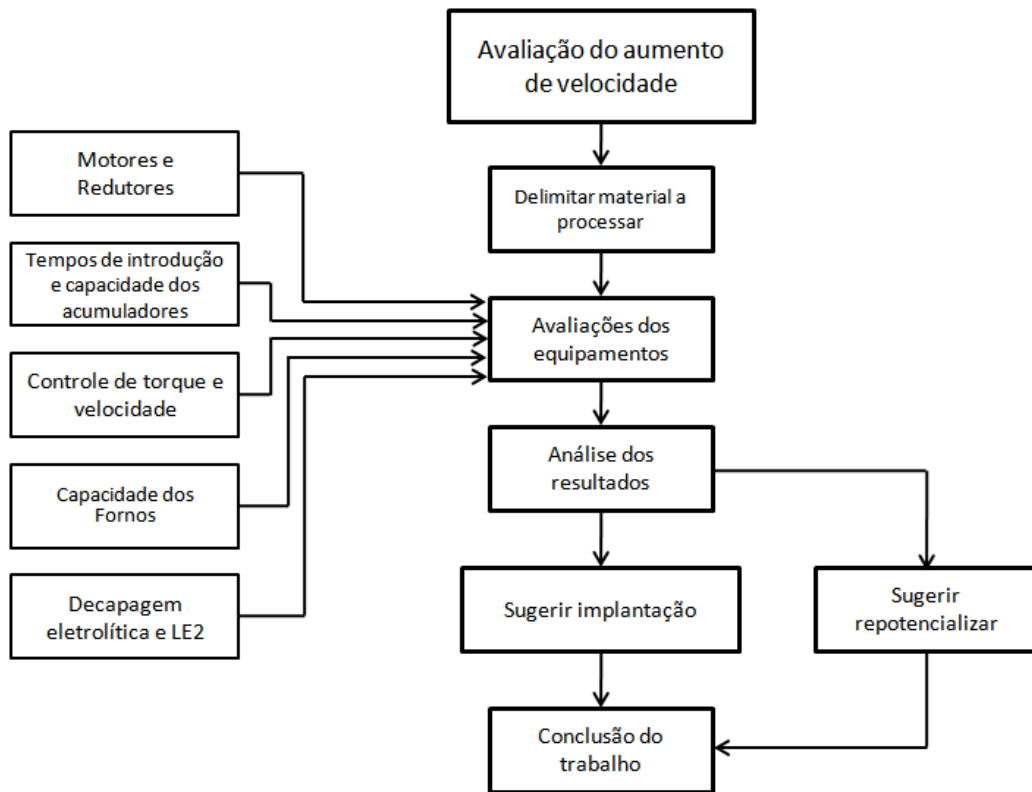


Figura 3.1 - Fluxograma da sequência de aplicação da metodologia.

Através das configurações mecânicas e elétricas dos equipamentos existentes, dados dos produtos processados e parâmetros do processo de produção, foram identificadas as potências necessárias para cada equipamento. Posteriormente, as mesmas foram confrontadas com a capacidade de cada equipamento existente possibilitando a identificação da viabilidade do aumento da velocidade na linha de produção em questão.

Conforme relatado em TAINER, P.JEKIELEK e E.NEMURA (2011), historicamente, três fatores têm sido limitadores da eficácia do processo e controle de uma linha contínua, a saber: a prática comum de agrupamento de motores ou rolos, dentro de um conjunto com um único barramento CC; a capacidade limitada das primeiras gerações de tecnologia de controle e a falta geral de compreensão da dinâmica eletromecânica de linhas de processo contínuo. Dentro deste contexto, tem-se que, a linha de recozimento e decapagem encontra-se em patamares avançados de tecnologia, sendo os seus motores assíncronos alimentados por conversores de frequência independentes, o que facilita o diagnóstico e o controle.



### 3.3 O conjugado necessário aos acionamentos

Uma das principais características desta linha de produção está na manutenção do material em processamento com força e velocidade constante dentro dos fornos de recozimento e tanques de decapagem. Para atingir tal característica, será realizada uma análise dos diferentes acionamentos, responsáveis diretamente pela movimentação da tira. Dentre eles, serão destacados os acionamentos com a função de sustentar a tira ao longo da linha, os conjuntos tensionadores (com a função de tracionar e conduzir a tira) e os conjuntos bobinadores e desbobinadores.

#### 3.3.1 Acionamentos para a sustentação da tira na linha de passe do equipamento

Com o intuito exclusivamente de sustentar e conduzir a tira pelo equipamento, sem efetuar forças de tração sobre o material, o que poderia causar defeitos e, conseqüentemente, má qualidade ao produto, os rolos para a sustentação da tira são controlados em velocidade. Neste caso, o dimensionamento do acionamento é especificado para manter os rolos na mesma velocidade linear da tira na seção em que está inserida.

Diante do exposto acima, para o acionamento dos rolos para a sustentação da tira em regime constante, é requerido somente o conjugado estático ( $T_s$ ), que manterá a massa do rolo em rotação na velocidade exigida pela linha de produção. Para a determinação do mesmo na saída do motor, é utilizada a equação (3.1), encontrada em SEW (2007).

$$T_s = \frac{m_r \cdot g \cdot \mu_L \cdot d_r}{2 \cdot i} \quad (3.1)$$

onde  $m_r$  é a massa do rolo,  $g$  é a força da gravidade,  $\mu_L$  é o coeficiente de atrito rolante,  $d_r$  é o diâmetro do rolo e  $i$  é a relação de redução do redutor.

Para se determinar a potência estática ( $P_s$ ) necessária para manter o giro dos rolos, utiliza-se a equação (3.2), extraída de SEW (2007).

$$P_s = \frac{T_s \cdot n_m}{9,549 \cdot \eta} \quad (3.2)$$

onde  $\eta$  é o rendimento do conjunto,  $n_m$  é a rotação do motor e a constante 9,549 esta relacionada à conversão de “rpm” para “rad/s”.

Dentre os rolos para a sustentação da tira na linha de passe do equipamento, pode-se citar os rolos dos equipamentos para desengraxar e decapagem.

### 3.3.2 Acionamentos tensores - BSs

Os rolos tensores, cujo objetivo é o de promover força de tração na tira, são também chamados de “BS” ou “Bloco em S”, que podem ser definidos como um grupo de rolos onde o material é tracionado e conduzido.

O conjugado de cada rolo é transmitido para a tira e produzido de acordo com o coeficiente de atrito entre o rolo e tira, sem necessariamente ser envolvido por outro rolo externo. Uma configuração típica é apresentada na Figura 3.2, onde a amplificação é realizada duas vezes, iniciando através da força  $F_1$  para a força de tração  $F_2$  e força de tração  $F_2$  para a força de tração  $F_3$ , nos rolos 1 e 2 respectivamente, que são acionados por dois motores chamados de mestre e escravo.

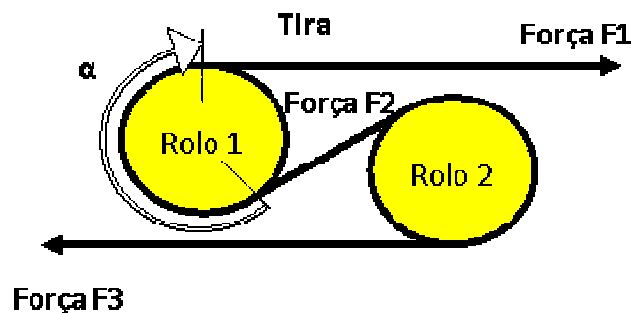


Figura 3.2 - BS com dois rolos.

Com o intuito de verificar o coeficiente de atrito, necessário em cada rolo, para atingir a força de tração solicitada pelo equipamento, é utilizada a equação (3.3).

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{\mu\alpha} \quad (3.3)$$

onde  $F1$  é a força de tração entrada,  $F2$  é a força de tração da saída, " $\alpha$ " é o ângulo de abraçamento da tira, " $\mu$ " é o coeficiente de atrito e " $e$ " é a base do logaritmo neperiano (aproximadamente 2,718).

Vale ressaltar que esta equação também define a máxima capacidade do rolo de modificar a tensão da tira, sem que ocorra deslizamento, quando aplicado o coeficiente de atrito correto do material utilizado no rolo. Assim,  $e^{\mu\alpha}$  é chamado de fator de amplificação. No caso particular de um rolo, o fator de amplificação da força de tração  $F1$  para  $F2$  pode ser calculado através da equação (3.3) (RELIANCE, 19--?). Na existência de mais rolos, aplica-se a equação (3.3) quantas vezes forem necessárias.

A título de informação, a Tabela 3.1 apresenta o coeficiente de atrito para os principais materiais utilizados em revestimentos de rolos (G.C.TURNER, 1965), os quais serão úteis para verificação da capacidade de cada rolo, durante as análises das potências disponíveis em cada BS.

Tabela 3.1 - Coeficiente de atrito para diferentes superfícies de rolos.

ROLL SURFACE	MATERIAL	CONDITION	DESIGN VALUES OF
POLISHED STEEL	STEEL	DRY	0,15 ..... 0,18
POLISHED STEEL	STEEL	OILED	*
GROUND STEEL	STEEL	DRY	0,15 ..... 0,18
GROUND STEEL	STEEL	OILED	*
PLASTIC RUBBER	STEEL	DRY	0,18 ..... 0,20
PLASTIC RUBBER	STEEL	OILED	0,13 ..... 0,15
RUBBER	STEEL	DRY	0,25 ..... 0,28
LAMINATED FENOLIT	STEEL	DRY	0,18 ..... 0,20

\* Inconsistent to be useful

Neste contexto, o conjugado necessário em cada rolo ( $T_r$ ) é determinado de acordo com a equação (3.4), em função da força de tração na tira, solicitada para cada equipamento.

$$T_r = 9,80665 \cdot F_t \cdot r_r \quad (3.4)$$

onde  $F_t$  é a força de tração na tira,  $r_r$  é o raio do rolo e 9,80665 é a constante de transformação de kgf para Newton.

Entretanto para se obter o conjugado requerido ao motor ( $T_m$ ) deve-se dividir o conjugado necessário em cada rolo ( $T_r$ ) pela relação de redução do redutor ( $i$ ).

Assim, de acordo com o conjugado e rotação necessários ao processo, pode-se obter a potência nominal do motor ( $P_m$ ), aplicando a equação (3.5), extraída da norma NBR-5383-1 (2002), em seu item 5.3.1.

$$P_m = \omega \cdot T_m = \frac{T_m \cdot n_m}{k} \quad (3.5)$$

onde  $\omega$  é a velocidade angular,  $T_m$  é o conjugado do motor,  $n_m$  é a rotação do motor e  $k$  é a constante igual a 9,549, relacionada à conversão de “rpm” para “rad/s”.

Para uma melhor compreensão por parte do leitor, a Figura 3.3 apresenta em (a) o conjunto BS em forma de diagrama e em (b) o BS com a tira sendo tracionada.

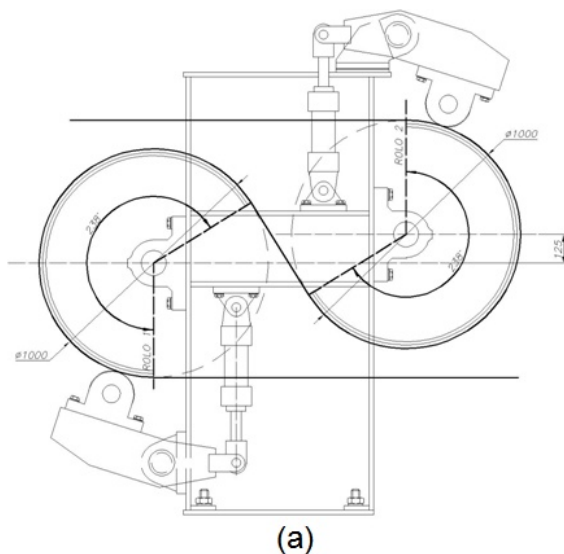


Figura 3.3 - BS: (a) diagrama do conjunto e em (b) a foto de um conjunto montado com a tira sobre os rolos.

### 3.3.2.1 Balanço de cargas nos motores dos BSs

Diante da existência de dois e/ou quatro rolos nos conjuntos BSs, há a necessidade de realizar um balanço de cargas entre os mesmos, independentemente da forma de controle (velocidade ou força) utilizada nos acionamentos dos conjuntos. Dentre os rolos do conjunto BS, um deles terá a funcionalidade de mestre, enquanto os demais terão a

funcionalidade de escravos. Uma breve explicação deste controle será realizada, a seguir, para um melhor entendimento do processo. Através do PLC (Controlador lógico programável), a referência de velocidade para os motores mestre e escravos é gerada. O motor mestre é controlado exclusivamente em velocidade e a mantém com valor igual à referência desejada. Já o motor escravo também recebe a mesma referência de velocidade, no entanto é adicionada a esta referência de velocidade a porcentagem do conjugado desenvolvido pelo motor mestre. Desta forma, em função da potência de cada motor, ambos realizam a mesma porcentagem de seus conjugados nominais.

Através da Figura 3.4, é apresentado, resumidamente, um diagrama com a forma de controle de conjugado, realizado entre os motores mestre e escravo. Assim, com o aumento da velocidade, ambos os motores terão seus conjugados corrigidos, simultaneamente.

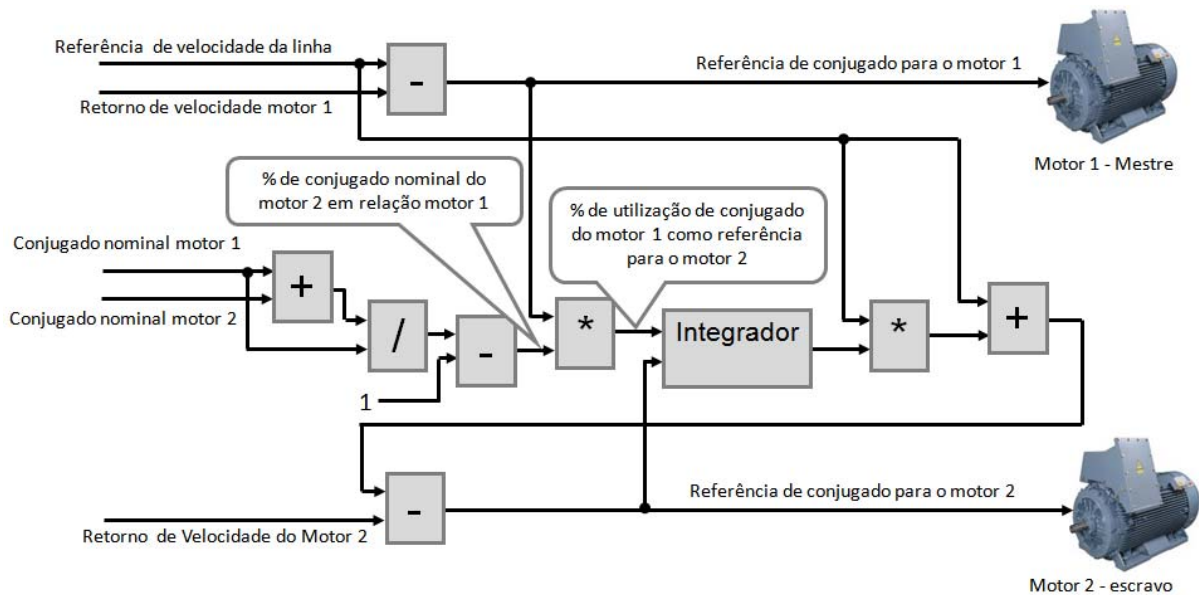


Figura 3.4 - Forma de controle para o balanço de carga entre os motores mestre e escravo do mesmo BS.

### 3.3.3 Acionamentos para desbobinar e bobinar o material

Os equipamentos responsáveis por bobinar e desbobinar o material possuem uma forma de controle diferenciada dos demais motores, pois a todo instante do seu funcionamento o conjugado gerado pelo motor é alterado. Com a variação do diâmetro da bobina de aço inoxidável ou do papel de intercalação na bobina, um maior ou menor conjugado do motor é requerido, para manter constante a força de tração na tira. Dessa

forma trabalham os motores das desbobinadeiras principais 1 e 2, bobinadeiras de papel 1 e 2 da seção da entrada, bobinadeira principal da saída e bobinadeira de papel 1 e 2 da saída.

### 3.4 Parâmetros do processo de produção

A fim de identificar as variáveis atuais do equipamento, que constituem as referências operacionais da linha de recozimento e decapagem, tais como trações, velocidades, temperaturas do forno e correntes dos retificadores, as NTAs números 17-0032, 17-0054, 17-0156, 17-0179, 17-0216, 17-0217 e 17-0231 foram consultadas.

No que se refere à velocidade de processamento, o plano de trabalho do operador, determinado pelas NTAs, é delimitado em alta produtividade, média produtividade e baixa produtividade. Assim, conforme a produtividade escolhida, os parâmetros do processo tais como: temperatura do forno de recozimento, corrente dos retificadores da decapagem eletrolítica, trações e velocidade dos BSs, acumuladores, desbobinadeira e bobinadeiras são ajustados no equipamento. A escolha da produtividade utilizada na linha é realizada de acordo com a qualidade final do material processado, que por muito, é influenciada pelas características do material que chega a esta linha de produção. Apesar da existência desses três patamares de produtividade, acredita-se neste trabalho que a alta produtividade (com seus 70 m/min) ainda não é o maior potencial desta linha de produção.

Para um entendimento de quais aços e espessuras são processados na velocidade máxima, atualmente de 70 metros por minuto, foi consultado as NTAs e identificado que todos os aços produzidos nesta linha de produção chegam ao limite de velocidade desta linha de produção antes de atingir a menor espessura de processamento. Através da Tabela 3.2 observa-se que, nas espessuras abaixo de 0,64 mm, todos os aços são produzidos nesta velocidade, não havendo opções de maiores velocidades devido a limitações impostas pelo controle eletroeletrônico.

Tabela 3.2 - Tipos de aço e espessuras processadas na velocidade de 70 m/min.

<b>Aço</b>	<b>Produtividade</b>	<b>Velocidade [m/min]</b>	<b>Espessura [mm]</b>
A	Velocidade alta	70	0,35 a 0,64
B	Velocidade alta	70	0,35 a 0,64
C	Velocidade alta	70	0,4, 0,5 e 0,6
D	Velocidade alta	70	0,35 a 0,64
E	Velocidade alta	70	0,4, 0,5 e 0,6
F	Velocidade alta	70	0,35 a 0,64
G	Velocidade alta	70	0,35 a 0,64
H	Velocidade alta	70	0,35 a 0,64
I	Velocidade alta para redução direta	70	0,4, 0,5 e 0,6
J	Velocidade alta para redução direta, relaminação ou intermediária	70	0,35 a 0,64

No tocante à força de tração necessária em cada seção, recorre-se aos parâmetros atuais de processamento, contidos nas normas da empresa. A NTA17-0032 (Ajuste de tração na linha de recozimento e decapagem) descreve os valores de força de tração para cada seção, em função da espessura e largura do material a ser processado. Estes valores foram testados ao longo dos anos e se encontram suficientemente seguros, para manter a tira na linha de passe, sem provocar má qualidade ao produto. Com base nestes valores, o conjugado ( $T_r$ ) necessário aos acionamentos foi avaliado, através da equação (3.4).

Com objetivo de permitir um ajuste nos valores da força de tração, exercida sobre a tira, que dependerá da qualidade superficial do material em processamento, a NTA17-0032 estabelece uma margem mínima e máxima de tração, como exposto na Tabela 3.3. Diante disto, os valores utilizados neste trabalho, durante as análises da capacidade do conjugado dos motores e redutores, são os maiores valores, apresentados em negrito, garantindo assim a capacidade dos conjuntos para o pior caso.

Tabela 3.3 - Referências de força de tração para os BSs na espessura de 0,74 mm conforme NTA.

Origem da referência	Valor da referência de força [kgf]	Valor mínimo da referência de força [kgf]	Valor máximo da referência de força [kgf]	Rolo tensor responsável em promover a força	Maior e Menor diferença de força [kgf]
Entrada	2000	1600	<b>2400</b>	BS 1	<b>960</b>
Acumulador da entrada	1800	<b>1440</b>	2160		-560
Acumulador da entrada	1800	1440	<b>2160</b>	BS 2	<b>1774</b>
Forno	482	<b>386</b>	578		862
Forno	482	<b>386</b>	578	BS 3	-541
Decapagem	1399	1119	<b>1679</b>		<b>-1293</b>
Decapagem	1399	<b>1119</b>	1679	BS 4	-401
Acumulador do LE	2600	2080	<b>3120</b>		<b>-2001</b>
Acumulador LE	2600	<b>2080</b>	3120	BS 5	-10080
Entrada do LE	16500	13200	<b>19800</b>		<b>-17720</b>
Saída do LE	19500	15600	<b>23400</b>	BS 6 e 7	<b>20963</b>
Acumulador da Saída	3046	<b>2437</b>	3655		11945
Acumulador da Saída	3046	2437	<b>3655</b>	BS 8	<b>1258</b>
Saída	2996	<b>2397</b>	3595		-1158

Obs.: Valores coletados da NTA17-0032 na espessura de 0,74 mm

O diferencial de força dos rolos BS1 e BS8, apresentados na sexta coluna da Tabela 3.3, com valores positivos e negativos, indicam que os mesmos trabalham tanto como amplificador quanto como redutor de força. Isto é devido à proximidade de seus

valores de referência de força, frente aos limites permissíveis de variação admitidos pela NTA, sendo que tais inversões não comprometem os resultados das avaliações neste trabalho, pois as potências dos referidos redutores no mesmo BS são iguais.

### 3.5 Redutores de velocidade

Sabe-se que o conjugado de saída dos motores elétricos está diretamente relacionado ao seu tamanho de carcaça, ao passo que a sua potência está diretamente relacionada à sua rotação (SOBRINHO, 2008). Assim sendo, motores de baixo conjugado e alta rotação fornecem grandes potências com baixos custos de fabricação. Neste contexto, a utilização de motores com rotações maiores torna a aplicação mais atrativa viabilizando, então, a utilização de redutores de velocidade, que aumentam o conjugado final do sistema.

Na linha de processamento em questão, foram utilizados redutores de velocidade em todos os acionamentos. Assim, para um aumento da velocidade, faz-se necessário uma avaliação de suas capacidades.

Quanto à velocidade dos redutores, é sabido que o seu funcionamento com rotações maiores que 1500 rpm geralmente provoca a emissão de ruídos elevados, reduz a vida útil de seus rolamentos, afeta suas propriedades térmicas e intervalos de serviços, embora isto dependa da relação de transmissão e do tamanho de cada redutor. Em geral, a máxima velocidade de redutores em utilizações industriais é 3.600 rpm (SIEMENS, 2008).

No tocante à sua potência, foram utilizados dois métodos de avaliação da sua capacidade: o primeiro pela sua capacidade mecânica e térmica, de acordo com DAVID BROWN RADICON (2011); Já o segundo método, dependente da potência de aceleração e dobramento da tira, tal como mencionado em RELIANCE (19--?).

Através do primeiro método se obtém os resultados da capacidade mecânica e térmica do redutor, separadamente. Na avaliação de acordo com a capacidade mecânica, aplica-se uma correção, conforme suas condições de operação, tanto no valor da potência necessária absorvida pelo sistema ( $P_a$ ), quanto no valor da potência nominal do redutor ( $P_{nr}$ ). No entanto para o cálculo baseado na potência térmica nominal do redutor ( $P_t$ ), também são aplicados outros fatores de correção que dependem de suas condições de funcionamento.



A potência necessária absorvida pelo sistema ( $P_a$ ) pode ser obtida através das equações (3.2) e (3.5) para os redutores que possuem rolos com a função de manter a tira na linha de passe e os que promovem força de tração na tira respectivamente.

No tocante à sua capacidade mecânica para se obter a potência requerida ao redutor ( $P_r$ ) é aplicado um fator de serviço mecânico ( $F_m$ ) (relacionado ao tipo de carga - normal, moderada ou severa) sobre a potência necessária absorvida pelo sistema ( $P_a$ ), de acordo com a equação (3.6).

$$P_r = P_a \cdot F_m \quad (3.6)$$

Para se determinar a capacidade do redutor ( $P_c$ ), é aplicado o fator número de partidas por hora ( $F_s$ ) sobre a potência nominal do redutor, ( $P_{nr}$ ) de acordo com a equação (3.7). O redutor se encontra corretamente dimensionado, no que se refere à sua potência, quando a potência requerida ao redutor ( $P_r$ ) se encontrar igual ou menor do que a capacidade do redutor ( $P_c$ ).

$$P_c = P_{nr} \cdot F_s \quad (3.7)$$

No que se refere à capacidade térmica do redutor ( $P_{tc}$ ), é utilizada a equação (3.8), sendo que esta deve ser maior que a potência necessária absorvida pelo sistema ( $P_a$ ).

$$P_{tc} = P_t \cdot F_a \cdot F_d \cdot F_v \cdot F_h \quad (3.8)$$

onde  $P_t$  é a potência térmica nominal do redutor,  $F_a$  é fator de ajuste da temperatura ambiente,  $F_d$  é fator de funcionamento intermitente,  $F_v$  é o fator de correção da velocidade do ar ambiente e  $F_h$  é o fator de ajuste da altitude.

Com o intuito de melhor entendimento das formas adotadas para se determinar a capacidade dos redutores, a Figura 3.5 apresenta um fluxograma da aplicação. Vale destacar que o não atendimento em apenas um dos métodos indica que o referido redutor não está corretamente dimensionado.

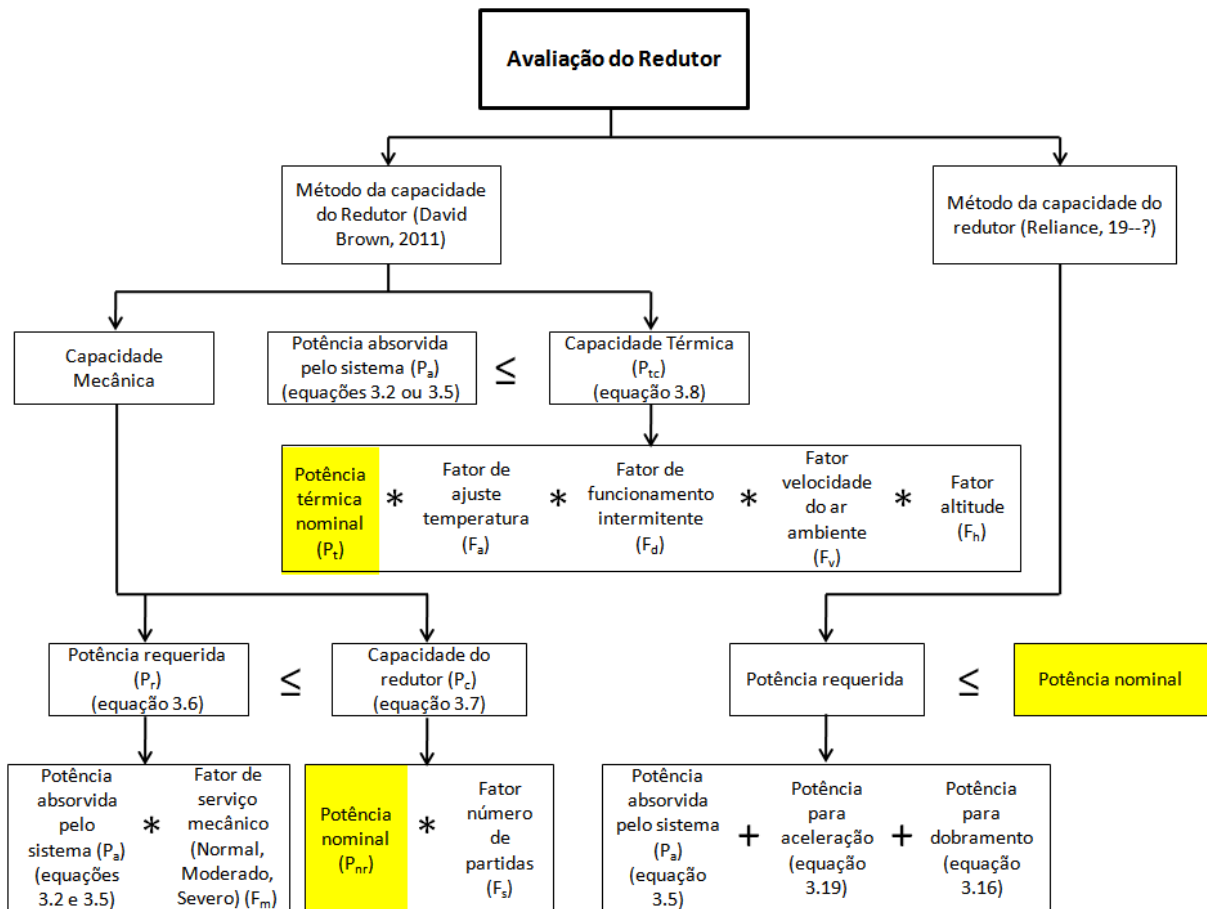


Figura 3.5 - Fluxograma para avaliação dos redutores

- **Análise das potências dos redutores**

Para as avaliações dos redutores da seção de entrada as análises iniciarão com a velocidade da linha com 90 metros por minuto e a força de tração requerida conforme Tabela 3.3 - Referências de força de tração para os BSs na espessura de 0,74 mm conforme NTA.Tabela 3.3, assim, foi aplicada as equações (3.4) e (3.5) para os redutores dos BSs, desbobinadeira e bobinadeiras e a equação (3.2) para os redutores responsáveis unicamente em manter a tira na linha de passe obtendo então a potência absorvida pelo sistema ( $P_a$ ).

Através da equação (3.6), foi obtido a potência requerida ao redutor ( $P_r$ ) com a utilização do fator de serviço mecânico ( $F_m$ ) igual a 1,5 (carga moderada). Na sequência foi aplicada a equação (3.7) utilizando o fator número de partidas por hora ( $F_s$ ) igual a 0,9, determinando-se, assim, a capacidade de cada redutor ( $P_c$ ), apresentada na Tabela 3.4.

No que se refere à capacidade térmica do redutor ( $P_{tc}$ ), (Tabela 3.4) foi utilizada a equação (3.8), aplicando os seguintes fatores:  $F_a$  igual a 0,86,  $F_d$  igual a 1,  $F_v$  igual a 1 e, finalmente,  $F_h$  igual a 0,98. As exceções na aplicação dos fatores se encontram nos redutores das desbobinadeiras de papel e desbobinadeira principal que utilizaram o fator de funcionamento intermitente ( $F_d$ ) igual a 1,6. A escolha do fator apropriado foi realizada conforme referências encontradas em DAVID BROWN RADICON (2011), os quais no anexo A, se encontram maiores detalhes.

Tabela 3.4 - Potências dos redutores da seção da entrada, indicando o valor requerido, de acordo com a capacidade mecânica, corrigida conforme o fator de serviço e corrigida pela capacidade térmica.

Localização	Fabricante Redutor	Força máxima de referência na linha de produção [kgf]	Potência nominal do Redutor [kW]	( $P_r$ )	( $P_c$ )	( $P_a$ )	( $P_{tc}$ )
				Potência requerida aos redutores conforme método da capacidade mecânica [kW]	Potência do Redutor corrigida pelo fator de serviço [kW]	Potência necessária absorvida pelo sistema [kW]	Potência do Redutor corrigida pela capacidade térmica [kW]
Bobinadeira de papel 1	Flender ATB-Loher	72,9	25	1,61	22,12	1,07	34,68
Desbobinadeira Principal 1	David Brown Radicon	-2100	35	46,34	31,50	30,89	43,90
Bobinadeira de papel 2	Flender ATB-Loher	72,9	25	1,61	22,12	1,07	33,14
Desbobinadeira Principal 2	David Brown Radicon	-2100	35	46,34	31,50	30,89	43,90
Desengraxe, Rolo Espremedor	Flender ATB-Loher	(*)	25	0,39	22,12	0,26	20,71
Desengraxe, Rolo Encosto - Escovas	Flender ATB-Loher	(*)	25	0,41	22,12	0,28	20,71
BS1 - rolo nº01	SEW do Brasil LTDA	960	25	10,09	22,50	6,72	21,07
BS1 - rolo nº02	David Brown Radicon	(**)	25	10,09	22,50	6,72	21,07
Acumulador da entrada	David Brown Radicon	8800	50	35,96	45,00	23,97	42,14

(\*) O rolo não possui a função de promover força de tração no material.

(\*\*) A força necessária é dividida entre os rolos do mesmo BS.

Os rolos da unidade de desengraxe, exibidos na Tabela 3.4, não possuem a função de promover a força de tração na tira, mas conduzi-la sem provocar arranhões superficiais. Para tanto, as potências necessárias ao equipamento são somente para produzir os conjugados estáticos e dinâmicos. As potências estáticas e dinâmicas foram calculadas por meio das equações (3.2) (com coeficiente de atrito rolante dos rolamentos dos mancais igual a  $\mu_L = 0,03$ ) e (3.19), respectivamente.

Uma análise similar a seção da entrada foi aplicada à seção do processo, com os resultados apresentados na Tabela 3.5. O diferencial desta seção é que a mesma mantém sua velocidade constante, 70 metros por minuto, exceto em casos de paradas para manutenção ou mudança de produtividade. Neste caso, para se calcular a potência

requerida ao redutor ( $P_r$ ), foi utilizado o fator de serviço mecânico ( $F_m$ ) igual a 1,5 (carga moderada).

Para se calcular a capacidade de cada redutor ( $P_c$ ), foi utilizado o fator número de partidas por hora ( $F_s$ ) igual a 0,9, cujos resultados foram mostrados na Tabela 3.5.

Já para se calcular a capacidade térmica do redutor ( $P_{tc}$ ) (Tabela 3.5), foi utilizado os fatores:  $F_a$  igual a 0,86,  $F_d$  igual a 1,  $F_v$  igual a 1 e, finalmente,  $F_h$  igual a 0,98, conforme as referências encontradas em DAVID BROWN RADICON (2011).

Tabela 3.5 - Potências dos redutores da seção do processo, indicando o valor requerido, de acordo com a capacidade mecânica, corrigida conforme o fator de serviço e também pela capacidade térmica.

Localização	Fabricante Redutor	Força máxima de referência na linha de produção [kgf]	Potência nominal do Redutor [kW]	( $P_r$ ) Potência requerida aos redutores conforme método da capacidade mecânica [kW]	( $P_c$ ) Potência do Redutor corrigida pelo fator de serviço [kW]	( $P_a$ ) Potência necessária absorvida pelo sistema [kW]	( $P_{tc}$ ) Potência do Redutor corrigida pela capacidade térmica [kW]
BS2 - rolo nº01	David Brown Radicon	1774	25	18,63	25,00	12,42	21,07
BS2 - rolo nº02	David Brown Radicon	(**)	25	10,37	25,00	6,91	21,07
BS3 - rolo nº01	David Brown Radicon	-1293	25	7,56	25,00	5,04	21,07
BS3 - rolo nº02	David Brown Radicon	(**)	25	13,58	25,00	9,05	21,07
Decapagem, Rolo Espremedor	Flender ATB-Loher	(*)	25	0,16	24,57	0,10	20,71
Decapagem, Rolo Mergulhador	Flender ATB-Loher	(*)	123	0,28	122,87	0,19	103,56
Decapagem, Rolo Defletor	Flender ATB-Loher	(*)	25	0,27	24,57	0,18	20,71
BS4 - rolo nº01	David Brown Radicon	-2001	25	23,01	25,00	15,34	21,07
BS4 - rolo nº02	David Brown Radicon	(**)	25	11,33	25,00	7,55	21,07

(\*) O rolo não possui a função de promover força de tração no material.

(\*\*) A força necessária é dividida entre os rolos do mesmo BS.

Igualmente aos redutores da seção da entrada foi aplicada a seção da saída com a velocidade de 90 metros por minuto. No que se refere ao cálculo da potência requerida ao redutor ( $P_r$ ), foi utilizado o fator de serviço mecânico ( $F_m$ ) igual a 1,5 (carga moderada). Já para se calcular a capacidade de cada redutor ( $P_c$ ), foi utilizado o fator número de partidas por hora ( $F_s$ ) igual a 0,9, cujos resultados foram apresentados na Tabela 3.6.

Enquanto para se calcular a capacidade térmica do redutor ( $P_{tc}$ ) (Tabela 3.6), foi utilizado os fatores:  $F_a$  igual a 0,83,  $F_d$  igual a 1,  $F_v$  igual a 1 e, finalmente,  $F_h$  igual a 0,98. A exceção entre os redutores da saída se encontra nas bobinadeiras de papel que utilizaram o fator de funcionamento intermitente ( $F_d$ ) igual a 1,6, devido ao fato das mesmas possuírem funcionamento intermitente.

Tabela 3.6 - Potências dos redutores da seção da saída, indicando o valor requerido, de acordo com a capacidade mecânica, corrigida conforme o fator de serviço e também pela capacidade térmica.

Localização	Fabricante Redutor	Força máxima de referência na linha de produção [kgf]	Potência nominal do Redutor [kW]	$(P_r)$	$(P_c)$	$(P_a)$	$(P_{tc})$
				Potência requerida aos redutores conforme método da capacidade mecânica [kW]	Potência do Redutor corrigida pelo fator de serviço [kW]	Potência necessária absorvida pelo sistema [kW]	Potência do Redutor corrigida pela capacidade térmica [kW]
Acumulador do LE2	David Brown Radicon	12000	50	49,03	45,00	32,69	42,14
BS5 - rolo nº01	David Brown Radicon	-17720	30	30,21	27,00	20,14	24,40
BS5 - rolo nº02	David Brown Radicon	(**)	45	45,29	40,50	30,19	36,60
BS5 - rolo nº03	David Brown Radicon	(**)	90	60,41	81,00	40,28	73,21
BS5 - rolo nº04	David Brown Radicon	(**)	210	221,56	189,00	147,71	176,99
LE2, Cilindro de Trabalho Superior	Cchesa S.A.	(*)	37	5,77	33,30	3,84	29,01
LE2, Cilindro de Trabalho Inferior	Cchesa S.A.	60	(*)	17,30	(*)	11,53	(*)
BS6 - rolo nº01	David Brown Radicon	20963	245	209,69	220,50	139,79	199,28
BS6 - rolo nº02	David Brown Radicon	(**)	160	136,56	144,00	91,04	134,85
BS7 - rolo nº01	David Brown Radicon	(**)	70	59,91	63,00	39,94	59,00
BS7 - rolo nº02	David Brown Radicon	(**)	40	34,36	36,00	22,91	32,54
Acumulador da saída	David Brown Radicon	6000	8	6,40	7,02	4,27	6,57
BS8 - rolo nº01	David Brown Radicon	1258	28	13,22	24,75	8,81	22,37
BS8 - rolo nº02	David Brown Radicon	(**)	28	13,22	24,75	8,81	22,37
Desbobinadeira de papel 1 da saída	Flender ATB-Loher	72,9	25	1,61	22,12	1,07	33,14
Desbobinadeira de papel 2 da saída	SEW do Brasil LTDA	72,9	15	1,61	13,82	1,07	20,71
Bobinadeira Principal	David Brown Radicon	3564	100	78,64	90,00	52,43	79,97

(\*) A força necessária é dividida entre os rolos do laminador de encruamento.

(\*\*) A força necessária é dividida entre os rolos do mesmo BS.

Referindo-se ao redutor do cilindro de trabalho inferior do LE2, não foram encontrados seus dados técnicos, de forma que não foi possível identificar a capacidade do mesmo. Para este caso, deverá ser realizada uma peritagem no redutor, identificando a sua real potência.

No segundo método de avaliação, conforme RELIANCE (19--?), foi considerada a velocidade nominal desta linha de produção (90 metros por minuto na entrada e saída e 70 metros por minuto na seção de processo) e a potência total necessária, originada da soma de três conjugados: o conjugado que irá promover a força de tração necessária para manter a tira na linha de passe, originado da Tabela 3.3, o conjugado de aceleração e o conjugado para o dobramento do material.

Para a obtenção das potências exigidas para manter a tira na linha de passe, foram utilizadas as equações (3.4) e (3.5). Já a potência para a aceleração foi obtida através de (3.19), ao passo que a potência para o dobramento do material sobre o respectivo rolo foi calculada por meio de (3.16). Por fim a comparação da potência necessária com a potência nominal dos redutores resultou na porcentagem de utilização de cada redutor, apresentada na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Resultado das potências dos redutores e coeficiente de atrito necessário entre a tira e rolo, nas velocidades de 70 e 90 metros por minuto na linha.

Rolo Tensor	Força de tração na entrada do BS [kgf]	Força de tração na saída do BS [kgf]		Potência necessária total [kW]	Potência nominal do redutor [kW]	Potência utilizada pelo redutor [%]	Coeficiente de atrito necessário [ $\mu$ ]	Velocidade da linha [m/min]	Divisão de carga sobre os redutores [%]
<b>BS 1</b>	2400	1442	2º rolo	13,64	25	54,6	0,07	90	50
			1º rolo	13,62	25	54,5	0,05		50
<b>BS 2</b>	2160	388	2º rolo	13,19	25	52,8	0,17	70	50
			1º rolo	23,46	25	93,8	0,25		50
<b>BS 3</b>	386	1678	2º rolo	16,54	25	66,2	0,16	70	50
			1º rolo	9,30	25	37,2	0,20		50
<b>BS 4</b>	1119	3121	1º rolo	19,78	25	79,1	0,12	70	50
			2º rolo	19,77	25	79,1	0,13		50
<b>BS 5</b>	2080	19803	1º rolo	32,73	30	109,1	0,13	90	8,45
			2º rolo	49,08	45	109,1	0,13		12,67
			3º rolo	65,46	90	72,7	0,06		16,90
			4º rolo	240,07	210	114,3	0,22		61,98
<b>BS 6</b>	23400	2445	1º rolo	215,10	245	87,8	0,14	90	47,6
			2º rolo	140,09	160	87,6	0,20		31,1
<b>BS 7</b>			1º rolo	61,47	70	87,8	0,09		13,6
			2º rolo	35,24	40	88,1	0,11		7,8
<b>BS 8</b>	3655	2399	1º rolo	14,47	25	57,9	0,05	90	50
			2º rolo	14,49	25	57,9	0,06		50

Conforme pode ser observado na Tabela 3.7, os redutores do BS5, nos rolos 1, 2 e 4 encontra-se seus valores de potência utilizada, na condição atual, acima de 100 %. Assim, pode-se notar que uma maior solicitação de conjugado desses redutores, seguramente provocará a danificação dos mesmos.

Já o rolo 1 do BS2 apresentou seu coeficiente de atrito com a tira próximo do valor máximo permitido com  $\mu = 0,25$ , sendo que, de acordo com a Tabela 3.1, para rolos com revestimento de borracha o coeficiente de atrito máximo esta entre 0,25 a 0,28. Neste caso um aumento no diferencial de tração sobre o BS irá provocar um deslizamento entre a tira e o rolo.

No tocante aos redutores de velocidade, os resultados indicaram, já na velocidade de 70 e 90 metros por minuto, a existência de subdimensionamentos tanto pelo primeiro cálculo realizado através do método da capacidade mecânica, quanto pelo segundo método desenvolvido conforme referências encontradas em RELIANCE (19--?), que utiliza o conjugado de aceleração e dobramento da tira durante as análises.

### **3.6 Motores elétricos de indução**

No que se refere aos motores de indução, as análises foram iniciadas pela identificação dos fatores que impõem limitação em sua velocidade máxima de operação. Em CASADEI, SERRA, *et al.* (2003) encontram-se listados três fatores limitadores para altas rotações de motores de indução quais sejam: a tensão e corrente máxima fornecida pelo conversor e a classificação térmica da máquina. Além disso, é afirmado em MURPHY e TURNBULL (1989) que as forças centrífugas também são limitadoras de altas rotações.

#### **3.6.1 Enfraquecimento de campo em motores elétricos de indução**

Não é o objetivo deste item descrever todas as aplicações dos motores elétricos de indução em regime de enfraquecimento de campo, mas situar o leitor sobre o método proposto para o aumento da velocidade nos motores desta linha de processamento em questão.

Em GOMES (2008) foi apresentado de forma bastante abrangente a definição de “enfraquecimento de campo”. Durante o aumento da rotação do motor de indução é mantida constante a relação entre a força contra-eletromotriz e a frequência de alimentação. Uma vez que a tensão nos terminais do motor de indução atinge o valor nominal a força contra-eletromotriz permanece constante, devido às limitações do *link* CC (Corrente Contínua) e da capacidade de isolamento dos enrolamentos do estator. Assim, aumentando a rotação através do aumento da frequência de alimentação e mantendo constante a força contra-eletromotriz, tem-se como consequência a redução da corrente de magnetização, e,

consequentemente, a redução na amplitude da onda de fluxo no entreferro, chegando então ao enfraquecimento de campo.

O motor de indução preserva a sua capacidade do seu conjugado quando o fluxo magnético de entreferro é mantido constante (LAMEIRAS, 1987). Na região de enfraquecimento de campo, a tensão do motor é mantida no seu valor nominal e a frequência do estator continua aumentando, conforme a solicitação do aumento da velocidade, o que reduz o fluxo magnético de entreferro.

No contexto do enfraquecimento de campo, GOMES (2008) apresentou uma abordagem acerca de dois modos de operação de motor de indução. O primeiro com a tensão nos terminais constante e o segundo, mais elaborado, baseado nas equações de regime permanente da máquina de indução. Nas duas técnicas avaliadas, apesar da segunda GOMES (2008) relatar que apresentou melhores resultados, o conjugado máximo do motor é afetado pelo enfraquecimento de campo. Apesar da existência de diferentes formas de se controlar um motor de indução, o presente trabalho aborda as velocidades e conjugados atuais e aqueles necessários aos equipamentos, considerando a diminuição de conjugado dos motores na região de enfraquecimento de campo na proporção inversa da velocidade.

Como bem se conhece, a velocidade de rotação dos motores de indução ( $n_m$ ) pode ser obtida pela equação (3.9), que revela a possibilidade de controle da velocidade do motor por meio da frequência da tensão de alimentação.

$$n_m = \frac{120 \cdot f_1(1 - S)}{p} \quad (3.9)$$

onde  $f_1$  é a frequência da tensão de alimentação,  $p$  é número de pólos do motor e  $S$  é o escorregamento.

Do equacionamento da máquina assíncrona, sabe-se que o conjugado ( $T_m$ ), desenvolvido pelo motor de indução, é dado por

$$T_m = k_1 \cdot \varphi_m \cdot I_2 \quad (3.10)$$



Desprezando-se a queda de tensão na impedância do estator, pode-se dizer que o fluxo de magnetização ( $\varphi_m$ ) é determinado por:

$$\varphi_m = k_2 \frac{V_1}{f_1} \quad (3.11)$$

onde  $V_1$  é a tensão aplicada ao estator,  $I_2$  é a corrente do estator,  $f_1$  é a frequência da tensão aplicada ao estator e  $k_1, k_2$  são constantes.

Como se pode observar através das equações (3.10) e (3.11), durante o aumento da velocidade do motor, a sua capacidade de produção de conjugado permanece constante à medida que a tensão é aumentada, proporcionalmente, com a frequência do motor (região 1 da Figura 3.6). Quando a tensão do motor atinge o seu valor nominal e não mais pode ser aumentada para proteger o isolamento do estator, a continuação no aumento da frequência resultará em perda de disponibilidade de seu conjugado. Na faixa de 1.0 a 2.0 p.u. o conjugado do motor é inversamente proporcional à velocidade (região 2 da Figura 3.6) e, acima de 2 p.u., o mesmo é inversamente proporcional ao quadrado da velocidade (região 3 da Figura 3.6) (MURPHY e TURNBULL, 1989), (GOMES, 2008) e (HAIDONG e BABAK, 2009).

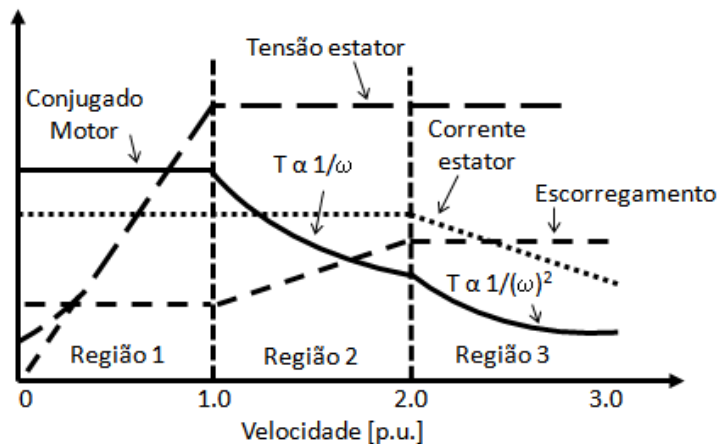


Figura 3.6 - Curvas típicas de conjugado, corrente e tensão de estator e escorregamento em função da velocidade dada em p.u. Fonte: (MURPHY e TURNBULL, 1989).

### 3.6.2 Rotação de motores de indução

Como mencionado em MURPHY e TURNBULL (1989), o tamanho físico de um motor é determinado pelo pico de conjugado requerido, que ocorre na rotação mais baixa da sua faixa de potência constante. A máxima velocidade pode ser limitada pela potência do

conversor ou por forças centrífugas no motor ao passo que a mínima rotação pode ser definida pela rotação irregular ou pela baixa refrigeração do motor. Neste contexto, para a máxima velocidade dos motores, foi realizada uma avaliação levando-se em consideração o efeito das forças centrífugas sobre o rotor.

A fim de agregar informações ao leitor, é relatado neste trabalho o estudo realizado por SOBRINHO (2008) a respeito das máquinas de indução de alta rotação, indicando a necessidade de atenção especial ao rotor. Maiores rotações impõem maiores forças centrífugas, principalmente no que diz respeito à resistência do material, além de tornar crítico o balanceamento da massa girante que, se não for criteriosamente efetuado, acarretará vibrações em toda a máquina e, dependendo do nível de vibração, pode inviabilizar o seu funcionamento. Em sua avaliação é relatado ainda que motores de indução de alta rotação estão situados nas rotações acima de 5000 rpm que, como poderá ser observado ao longo deste trabalho, não será a rotação em que os motores em estudo irão operar.

No que se refere ao estator da máquina de indução, em SOBRINHO (2008) conclui-se que, eletricamente, com exceção do volume de perdas decorrente do acionamento em altas frequências e o suprimento através de conversor de frequência, o estator de uma máquina de alta rotação é o mesmo que de uma máquina normal. Assim sendo, o aumento da velocidade para um motor normal, mantendo as mesmas características da alimentação de tensão e corrente, não implica em modificações no estator do mesmo.

- **Análise do limite da velocidade dos motores elétricos da linha de recozimento e decapagem**

Para esta avaliação foi efetuado um levantamento dos valores das velocidades e forças de tração exigidas pelo processo, bem como os valores nominais de cada acionamento. Com estes dados foi gerada uma planilha, que confrontou os valores dos conjugados e rotações necessários com aqueles máximos admissíveis pelos motores elétricos em estudo.

Inicialmente, a Tabela 3.8 apresenta os valores nominais de rotação dos motores juntamente aos valores praticados pelos mesmos quando a linha opera em sua velocidade nominal, sendo estes últimos calculados por:

$$n_m = \frac{V_L \cdot i}{\pi \cdot d_a} \quad (3.12)$$

onde  $n_m$  é a rotação do motor,  $V_L$  é a velocidade periférica do rotor,  $d_a$  é o diâmetro do rolo ou bobina, e  $i$  é a relação de redução do redutor.

Tabela 3.8 - Motores elétricos responsáveis em conduzir a tira com as suas respectivas rotações nominais e rotações na velocidade nominal da tira, de 70 e 90 metros por minuto.

Seção de entrada com velocidade da tira em 90 m/min				Seção de saída com velocidade da tira em 90 m/min			
Localização	Motor	Rotação Nominal do motor [rpm]	Rotação do Motor para a velocidade da linha em 90 metros por minuto [rpm]	Localização	Motor	Rotação Nominal do motor [rpm]	Rotação do Motor para a velocidade da linha em 90 metros por minuto [rpm]
Bobinadeira de papel 1 (Diâmetro mínimo, Velocidade alta)	=03ACM10	1740	959	BS5 - rolo nº01	=44ACM10	1780	1717
Bobinadeira de papel 1 (Diâmetro máximo, Velocidade baixa)	=03ACM10	1740	288	BS5 - rolo nº02	=44ACM30	1780	1736
Desbobinadeira Principal 1 (Diâmetro mínimo, Velocidade alta)	=04ACM10	<b>714</b>	<b>1743</b>	BS5 - rolo nº03	=44ACM40	1785	1739
Desbobinadeira Principal 1 (Diâmetro máximo, Velocidade baixa)	=04ACM10	714	506	BS5 - rolo nº04	=44ACM60	1789	1767
Bobinadeira de papel 2 (Diâmetro mínimo, Velocidade alta)	=11ACM10	1740	959	LE2 Cilindro de Trabalho Superior	=4511ACM20	889	813
Bobinadeira de papel 2 (Diâmetro máximo, Velocidade baixa)	=11ACM10	1740	288	LE2 Cilindro de Trabalho Inferior	=4511ACM10	714	707
Desbobinadeira Principal 2 (Diâmetro mínimo, Velocidade alta)	=12ACM10	<b>714</b>	<b>1743</b>	BS6 - rolo nº01	=46ACM10	1789	1727
Desbobinadeira principal 2 (Diâmetro máximo, Velocidade baixa)	=12ACM10	714	506	BS6 - rolo nº02	=46ACM20	1785	1767
Desengraxe Rolo Espremedor	=242ACM10	1750	1479	BS7 - rolo nº01	=47ACM10	1786	1774
Desengraxe Rolo Encosto - Escovas	=246ACM11	1750	1701	BS7 - rolo nº02	=47ACM30	1780	1717
BS1 - rolo nº01	=25ACM10	1774	1804	BS8 - rolo nº01	=51ACM10	1774	1717
BS1 - rolo nº02	=25ACM30	1774	1818	BS8 - rolo nº02	=51ACM30	1774	1717
<b>Seção de Processo com velocidade da tira em 70 m/min</b>				Desbobinadeira de papel 1 da saída (Diâmetro máximo, Velocidade baixa)	=60ACM10	1740	959
				Desbobinadeira de papel 1 da saída (Diâmetro mínimo, Velocidade alta)	=60ACM10	1740	288
				Desbobinadeira de papel 2 da saída (Diâmetro máximo, Velocidade baixa)	=60ACM40	1740	1012
				Desbobinadeira de papel 2 da saída (Diâmetro mínimo, Velocidade alta)	=60ACM40	1740	304
				Bobinadeira Principal (Diâmetro mínimo, Velocidade alta)	=55ACM10	<b>894</b>	<b>1743</b>
				Bobinadeira Principal (Diâmetro máximo, Velocidade baixa)	=55ACM10	894	506
BS2 - rolo nº1	=32ACM10	1774	1717	<b>Acumuladores da entrada e LE com velocidade linear do tambor em 17,5 m/min e acumulador de saída com velocidade linear do tambor em 4 m/min</b>			
BS2 - rolo nº2	=32ACM30	1765	1840	Acumulador da entrada	=27ACM10	444	272
BS3 - rolo nº1	=36ACM10	1765	1841	Acumulador do LE2	=41ACM10	444	378
BS3 - rolo nº2	=36ACM30	1774	1717	Acumulador da saída	=49ACM10	591	309
Decapagem, Rolo Espremedor	=248ACM12	1750	1479				
Decapagem, Rolo Mergulhador	=382ACM30	1740	1799				
Decapagem, Rolo Defletor	=382ACM40	1750	1742				
BS4 - rolo nº1	=40ACM10	1780	1717				
BS4 - rolo nº2	=40ACM10	1775	1841				

Diante do exposto na Tabela 3.8, conclui-se que somente os motores da bobinadeira e das desbobinadeiras, indicados em negrito, encontram-se operando na região de enfraquecimento de campo, pois, durante o processamento, à medida que o diâmetro do material no mandril diminui, o conjugado requerido ao motor também reduz-se. Para os demais motores, verifica-se que, na velocidade nominal de 90 metros por minuto, nas seções de entrada e saída, e 70 metros por minuto, na seção do processo, já se encontram próximos de suas rotações nominais. Sendo assim, para a implantação do projeto proposto, todos os motores deverão trabalhar na região de enfraquecimento de campo, mesmo não existindo variações de diâmetros em seus rolos.

Face ao exposto acima, torna-se necessário uma avaliação das condições mecânicas e elétricas dos motores envolvidos, identificando os seus limites de rotação.

### **3.6.2.1 Análise da rotação máxima dos motores desta linha de produção segundo o critério da máxima velocidade periférica permissível**

Neste item, a condição de máxima velocidade dos motores foi analisada baseando-se nas pesquisas realizadas em SOBRINHO (2008), onde foi relatado que é seguro operações dos motores assíncronos, fabricados atualmente, na velocidade periférica de até 100 m/s. Conceito tal está relacionado diretamente com o nível das tensões mecânicas geradas no rotor, devido ao efeito das forças centrífugas. Tendo em vista o valor da velocidade periférica de 100 m/s e o diâmetro do rotor do motor, pode-se obter a rotação da máquina ( $n_m$ ) a partir de:

$$n_m = \frac{V_{Per}}{\pi \cdot d_{Rot}} \quad (3.13)$$

onde  $V_{Per}$  é a velocidade periférica do rotor e  $d_{Rot}$  é o diâmetro do rotor.

Sendo assim, para a obtenção da máxima rotação dos motores, segundo o critério da máxima velocidade periférica de seus rotores, foi aplicada a equação (3.13). Sabendo que as máquinas em análise têm carcaças na faixa de tamanhos compreendendo entre 112 a 355, a Tabela 3.9 apresenta as dimensões correspondentes dos seus rotores. Diante dos resultados obtidos, observa-se que o menor valor de rotação encontrado está no motor modelo M2BA 355SMA 4B3, com 3.131 rpm, enquanto que a máxima rotação calculada se refere ao motor modelo GBVAF 112M / 4K-11, com o valor de 10.052 rpm.

Tabela 3.9 - Relação dos tipos de carcaças dos motores desta linha com a respectiva rotação na velocidade periférica de 100 m/s.

Carcaça do Motor	Potência [kW]	Rotação Nominal [rpm]	* Diâmetro aproximado do rotor [mm]	Rotação do rotor a velocidade periférica de 100 metros por segundo [rpm]
GVAFV 112M / 4K-11	4	1750	190	10052
GVAFV 132M / 4C-11	7,5	1740	216	8842
M2BA 200ML	36	1765	318	6006
M2BA 225SM	44	1775	356	5365
M2BA 250SM	65	1774	406	4704
M2BA 280SM	88	1780	457	4179
M2BA 315SM C4B3	176	1786	508	3760
M2BA 355SMA4B3	360	1789	610	3131
M2BA 4001K B10B3	285	714	710	2690

Vale ressaltar que os valores do diâmetro do rotor, exibidos na Tabela 3.9, foram obtidos através de um catálogo (ABB MOTORS AND GENERATORS, 2011), sendo que não foi possível identificar o diâmetro exato do rotor. Portanto, foram considerados os valores de diâmetro da carcaça do estator que, naturalmente, são maiores que o diâmetro real do rotor, garantindo uma análise segura (conservadora) da rotação máxima admissível para o rotor.

De posse do máximo valor de rotação que os motores podem atingir, foi aplicada a equação (3.14) e utilizado o diâmetro do rolo de trabalho na linha, obtendo-se, então, o valor da velocidade máxima ( $V_{Lmax}$ ) da linha de processamento.

$$V_{Lmax} = \frac{\pi \cdot d_a \cdot n_m}{i} \quad (3.14)$$

onde  $d_a$  é o diâmetro do rolo ou bobina,  $n_m$  é a rotação do motor e  $i$  é a relação de redução do redutor.

Conforme apresentado na Tabela 3.10, observa-se que, no tocante a este critério, a velocidade poderá atingir o valor de pelo menos 159,51 metros por minuto em todos os conjuntos.

Tabela 3.10 - Velocidade da linha de produção para diferentes carcaças, considerando a velocidade periférica do rotor dos motores em 100 m/s.

Carcaça do Motor	Rotação do motor na velocidade periférica de 100 m/s [rpm]	Diâmetro Rolo utilizado [mm]	Taxa de redução do Redutor [i]	Velocidade linear na tira na rotação calculada pela velocidade periférica de 100m/s [m/min]
GVAFV 112M / 4K-11	10052	190	31	403,82
GVAFV 132M / 4C-11	8842	216	81	343,95
M2BA 200ML	6006	318	87	228,48
M2BA 225SM	5365	356	87	203,97
M2BA 250SM	4704	406	81	191,77
M2BA 280SM	4179	457	81	170,37
M2BA 315SM C4B3	3760	508	65	190,73
M2BA 355SMA4B3	3131	610	65	159,51
M2BA 4001K B10B3	2690	710	19	342,54

### 3.6.2.2 Análise da velocidade máxima dos motores elétricos desta linha de produção conforme a norma IEC 60034-1

Num segundo momento, a máxima velocidade de operação possível dos motores foi analisada com base na norma em que os mesmos foram fabricados. Em pesquisas referentes às normas de fabricação de motores de indução, pode-se citar que a norma IEC-60034-1 (2004), em seu item 9.6, relata o valor máximo de rotação a que todo motor de indução trifásico de uma velocidade, com tensão inferior ou igual a 1000 V, carcaça inferior e igual ao número 315, deve estar apto a operar com segurança, exceto quando especificado valor contrário em sua placa de identificação. Observa-se em nota, na tabela 17 da página 113, que os seus valores foram reduzidos para atendimento à norma IEC 60079 (Equipamentos elétricos para atmosferas explosivas). Adicionalmente, existem limites de sobrevelocidades definidos, com os quais os motores devem ser capazes de operar pelo tempo de 2 minutos numa rotação de 20%, acima da sua faixa contínua segura. O anexo B apresenta o trecho da norma que trata de tais questões.

Complementando, a norma IEC-60034-1 (2004) descreve que para operar com motores em velocidades acima dos valores dos dados nominais, por exemplo, utilizando-se um conversor de frequência, o nível de ruído e vibrações irá aumentar. Neste caso, deve ser requerido um fino balanceamento do rotor do motor para possibilitar operações acima da velocidade nominal. Contudo, ressaltado que o tempo de vida dos mancais será reduzido e deve ser dada atenção especial ao intervalo de relubrificação e o tempo de vida útil da graxa utilizada nos mesmos.

Semelhantemente, a norma NEMA MG 1 - Parte 12 apud SOBRINHO (2008), especifica os valores máximos da velocidade para operação contínua e segura dos motores de indução de gaiola, de acordo com a potência e o número de pólos da máquina. Os limites de sobrevelocidade, para os quais os motores devem estar aptos a operar por um período de 2 minutos (sem conexão elétrica com a fonte), também são especificados, variando de 20% a 25% acima dos limites para a operação contínua segura. Tais informações estão detalhadas no anexo C.

Uma vez identificado que estes motores foram fabricados, segundo a norma IEC 60034-1 pelas empresas ABB e FLENDER HIMMEL, foi possível identificar a sua máxima velocidade de rotação através da verificação de seu tamanho de carcaça e número de pólos, cujos valores podem ser verificados nas tabelas 3.11, 3.12 e 3.13.

Tabela 3.11 - Relação de motores da seção da entrada com seus dados nominais de potência e rotação e o resultado da velocidade da linha quando os motores operam na rotação limite conforme a norma IEC.

Localização	Tipo de Motor	Potência [kW]	Rotação Nominal [rpm]	Rotação Máxima Motor IEC 60034-1 [rpm]		Diâmetro do rolo de trabalho [mm]	Relação da Redutora [i]	Velocidade da linha com motor na rotação máxima IEC60034-1 [m/min]
<b>Bobinadeira de papel 1 da entrada</b>	GBVAFV 132M/4C-11	7,5	1740	2700		150	5,02	253
<b>Desbobinadeira Principal 1</b>	M2BA 355S	125	714	1950	(*)	610	37,108	101
<b>Bobinadeira de papel 2 da entrada</b>	GBVAFV 132M/4C-11	7,5	1740	2700		150	5,02	253
<b>Desbobinadeira Principal 2</b>	M2BA 355S	125	714	1950	(*)	610	37,108	101
<b>Desengraxe, Rolo Espremedor</b>	GVAFV 132S/4F-11	5,5	1750	2700		280	14,46	164
<b>Desengraxe, Rolo Encosto - Escovas</b>	GVAFV 132S/4F-11	5,5	1750	2700		330	19,59	143
<b>BS1 - rolo nº01</b>	M2BA 250SM A4B3	65	1774	2300		1050	66,11	115
<b>BS1 - rolo nº02</b>	M2BA 250SM A4B3	65	1774	2300		1050	66,65	114
<b>Acumulador da Entrada (quatro lances de tira)</b>	M2BA 355S	80	444	500	(*)	1050	51,204	129

(\*) Rotação não consta na norma IEC 60034-1

Tabela 3.12 - Relação de motores da seção do processo com seus dados nominais de potência e rotação e o resultado da velocidade da linha quando os motores operam na rotação limite conforme a norma IEC.

Localização	Tipo de Motor	Potência [kW]	Rotação Nominal [rpm]	Rotação Máxima Motor IEC 60034-1 [rpm]	Diâmetro do rolo de trabalho [mm]	Relação da Redutora [i]	Velocidade da linha com motor na rotação máxima IEC60034-1 [m/min]
BS2 - rolo nº01	M2BA 250SM	65	1774	2300	1050	80,917	94
BS2 - rolo nº02	M2BA 200ML	36	1765	2300	1050	86,71	87
BS3 - rolo nº01	M2BA 200ML	36	1765	2300	1050	86,76	87
BS3 - rolo nº02	M2BA 250SM	65	1774	2300	1050	80,917	94
Decapagem, Rolo Espremedor	GVAFV 112M / 4K-11	4	1750	3600	305	22,29	155
Decapagem, Rolo Mergulhador	GVAFV 132M / 4C-11	7,5	1740	2700	1000	80,76	105
Decapagem, Rolo Defletor	GVAFV 112M / 4K-11	4	1750	3600	400	31,28	145
BS4 - rolo nº01	M2BA 280SM	88	1780	2300	1050	80,917	94
BS4 - rolo nº02	M2BA 225SM	44	1775	2300	1050	86,76	87

Tabela 3.13 - Relação de motores da seção da saída com seus dados nominais de potência e rotação e o resultado da velocidade da linha quando os motores operam na rotação limite conforme a norma IEC.

Localização	Tipo de Motor	Potência Lev. Campo [kW]	Rotação Nominal [rpm]	Rotação Máxima Motor IEC 60034-1 [rpm]	Diâmetro do rolo de trabalho [mm]	Relação da Redutora [i]	Velocidade da linha com motor na rotação máxima IEC60034-1 [m/min]
Acumulador LE2 (quatro lances de tira)	M2BA 355SM	80	444	500 (*)	1050	71,34	92
BS5 - rolo nº01	M2BA280SMA4B3	88	1780	2300	1050	62,936	121
BS5 - rolo nº02	M2BA280SMB4B3	105	1780	2300	1050	63,61	119
BS5 - rolo nº03	M2BA315 MLA4B3	220	1785	2300	1050	63,75	119
BS5 - rolo nº04	M2BA355SMA4B3	360	1789	2300	1050	65	117
LE2, Cilindro de Trabalho Superior	M2BA 280SM B8 B3	55	889	913 (*)	775	22,003	101
LE2, Cilindro de Trabalho Inferior	M2BA 4001K B10B3	285	714	794 (*)	775	19,12	101
BS6 - rolo nº01	M2BA355 SM A4B3	360	1789	2300	1050	63,29	120
BS6 - rolo nº02	M2BA315ML A4B3	220	1785	2300	1050	65	117
BS7 - rolo nº01	M2BA 315SM C4B3	176	1786	2300	1050	65,02	117
BS7 - rolo nº02	M2BA 280SM B3-4	105	1780	2300	1050	63	121
Acumulador Saída, (dois lances de tira)	M2BA 280SM	37	591	600	1050	255,022	16
BS8 - rolo nº01	M2BA 250SM A4B3	65	1774	2300	1050	62,94	121
BS8 - rolo nº02	M2BA 250SM A4B3	65	1774	2300	1050	62,94	121
Desbobinadeira de papel 1 da saída	GBVAFV 132M/4C-11	7,5	1740	2700	150	5,02	253
Desbobinadeira de papel 2 da saída	GBVAFV 132M/4C-11	7,5	1740	2700	150	5,3	240
Bobinadeira Principal	M2BA 355M LCBB3	285	894	1950 (*)	610	37,108	101

(\*) Rotação máxima não consta na norma IEC 60034-1.



De posse dos valores das rotações seguras, utilizou-se a equação (3.14) para a determinação da velocidade máxima ( $V_{Lmax}$ ) da linha de processamento.

Com base no limite de rotação dos motores, exibidos na Tabela 3.11, pode-se observar que os primeiros limitadores da velocidade se encontram com 101 metros por minutos nos cilindros de trabalho do LE2 e nas desbobinadeiras e bobinadeira principais quando o diâmetro da bobina de aço inoxidável estiver com 610 mm. Sendo atualmente a velocidade nominal desta seção de 90 metros por minuto, quando aplicado a máxima velocidade de rotação dos motores permitida pela norma IEC-60034-1 (2004), tem-se a possibilidade de incremento da velocidade da linha em 11 metros por minuto nesta seção.

Com relação aos motores da seção do processo, cujos resultados encontram-se na Tabela 3.12, observa-se que os primeiros limitadores se encontram no BS2 (rolos 2), BS3 (rolo 1) e no BS4 (rolo 2), com 87 metros por minuto. Como a velocidade desta seção é de 70 metros por minuto, tem-se que, no que diz respeito aos motores elétricos há a possibilidade de incremento de 17 metros por minuto na velocidade da linha, até o encontro dos primeiros limitadores.

Fazendo-se esta mesma análise para os motores da seção de saída, cujos resultados encontram-se na Tabela 3.13, tem-se que os primeiros limitadores estão na bobinadeira principal e no LE2, com a velocidade de 101 metros por minuto, o que representa a possibilidade de aumento de 11 metros por minuto em relação ao valor atualmente praticado.

No tocante à avaliação da possibilidade do aumento de velocidade da linha de produção, há, nesta seção, uma particularidade: a existência dos acumuladores de tiras, que possuem os rolos que conduzem a tira livre de acionamentos. A única função dos mesmos é absorver ou fornecer material durante a paralisação da tira na seção da entrada ou saída da linha. O acumulador de tiras do LE2 possui 4 lances de tira com velocidade de enchimento ou esvaziamento de 23 metros por minuto, resultando na velocidade total da tira de 92 metros por minuto. Já o acumulador de tiras da saída, com 2 lances de tira, na velocidade de enchimento ou esvaziamento de 8 metros por minuto, resulta na velocidade da tira de 16 metros por minuto. Vale ressaltar que o acumulador de tiras da saída funciona somente quando a velocidade do LE2 é reduzida. Portanto, os acumuladores tanto do LE2 quanto da

saída, não apresentam como os primeiros limitadores da velocidade desta linha de produção.

Com relação aos motores contidos nas tabelas 3.11, 3.12 e 3.13 que não foram analisados com seus limites de rotação baseados na norma IEC (devido possuírem número de pólos superior aos valores contidos nesta norma), foi considerado dois fatores para a determinação de suas rotações máximas:

- Operar com valores de conjugado abaixo do nominal;
- Possuir baixo tempo em operação.

Sendo assim, os motores das bobinadeiras e desbobinadeiras, conforme apresentado na Tabela 3.14, irão funcionar com rotações 11% acima de seus valores atuais de operação. Isto ocorrerá quando o conjugado requerido pela carga solicitar valores abaixo de 22%, que ocorre quando o diâmetro da bobina se encontra inferior a 682 mm (sendo o diâmetro mínimo de operação deste equipamento 610 mm).

Tabela 3.14 - Relação de motores elétricos com seu número de pólos, limite de rotação atual de operação e limite de rotação utilizado para os cálculos da velocidade limite da linha em 101 metros por minuto.

Localização	Carcaça do Motor	Potência [kW]	Número de pólos	Limite de rotação atual dos motores [rpm]	Rotação para o aumento de velocidade na linha [rpm]	Aumento na rotação [%]
Desbobinadeira Principal 1 (Diâmetro mínimo, Velocidade alta)	M2BA 355S	125	10	1750	1950	11%
Desbobinadeira Principal 2 (Diâmetro mínimo, Velocidade alta)	M2BA 355S	125	10	1750	1950	11%
Acumulador da entrada	M2BA 355S	80	16	500	444	
Acumulador do LE2	M2BA 355SM	80	16	500	444	
LE2 Cilindro de Trabalho Superior	M2BA 280SM B8 B3	55	8	900	913	1%
LE2 Cilindro de Trabalho Inferior	M2BA 4001K B10B3	285	10	750	794	6%
Acumulador da saída	M2BA 280SM	37	12	600	591	
Bobinadeira Principal (Diâmetro mínimo, Velocidade alta)	M2BA 355M LCBB3	285	8	1750	1950	11%

Do mesmo modo, para os motores elétricos do LE2, a velocidade estará acima de seus valores nominais, em 1% para o rolo superior e 6% para o rolo inferior e ocorrerá durante o esvaziamento do acumulador do LE2 durante as inspeções e retirada de bobinas.

Além disso, o tempo para tal será de 100 segundos, enquanto que o tempo médio para processamento de uma bobina é de 50 minutos.

Para os motores elétricos de acionamento dos acumuladores, não foi necessário ultrapassar a sua máxima rotação atual para obter o aumento de velocidade proposto neste trabalho, tal como apresentado Tabela 3.14.

### **3.6.2.3 Análise da velocidade máxima dos motores em função do limite de rotação dos seus rolamentos**

Em se tratando dos rolamentos dos motores elétricos, cada qual apresenta certos limites de rotação, conforme suas características. Quando os mesmos estão em operação, quanto maior o aumento de sua rotação, maior será a temperatura originada pelo atrito interno. O seu limite de rotação é a velocidade permissível obtida, empiricamente, que permite a sua operação contínua, sem ocorrer travamentos por superaquecimento ou mesmo geração de calor acima de certo limite. Assim sendo, depende do tamanho, tipo de anel, carga, método lubrificante, dissipação de calor etc (SKF, 2012).

Nos motores elétricos em questão, a determinação da capacidade de giro de seus rolamentos foi obtida através de um levantamento de seus limites de rotação de acordo com os dados do fabricante SKF (2012), e simulada a máxima velocidade que podem atingir em seus respectivos conjuntos, tal como mostrado no item a seguir.

- **Análise do limite da velocidade dos rolamentos dos motores elétricos da linha de recozimento e decapagem**

Como descrito por SKF (2012), a rotação de referência representa o valor de rotação de funcionamento permitida pelo rolamento, quando submetido a uma determinada carga e girando com uma determinada viscosidade de lubrificante. A sua rotação limite é determinada por critérios que incluem a estabilidade de forma ou resistência da gaiola, lubrificação das superfícies-guia da gaiola, forças centrífugas e giratórias que atuam nos corpos rolantes e outros fatores limitadores da velocidade. Como fator de segurança em sua especificação, deve-se considerar o menor valor encontrado entre as rotações de referência e limite.

Tal como citado anteriormente, no que se refere à forma de avaliação dos rolamentos, tem-se que para cada tipo de carcaça dos motores elétricos aqui utilizados, os dados de seus rolamentos foram coletados. A identificação de sua máxima rotação, de acordo com seus limites estabelecidos pelo fabricante (SKF, 2012) foram levantados. De posse do menor valor encontrado entre as rotações de referência e limite, em que os rolamentos dos motores podem atingir, foi aplicada a equação (3.14), obtendo-se, então, o valor da velocidade da linha. A Tabela 3.15 apresenta a velocidade da linha de produção, os valores de rotação de referência e rotação limite para os respectivos rolamentos, assim como a rotação nominal dos motores. Observa-se que, para todos os tipos de rolamento, a sua rotação máxima é bastante superior à rotação nominal do motor. Além disso, no tocante a este critério, a velocidade poderá atingir o valor de pelo menos 166,46 metros por minuto em todos os conjuntos.

Tabela 3.15 - Velocidade da linha conforme o limite de rotação dos rolamentos dos motores elétricos.

Motor			Rolamento			Velocidade linear na tira [m/min]
Tipo	Potência [kW]	Rotação Nominal [rpm]	Lado acionamento e lado oposto acionamento	Rotação de referência [rpm]	Rotação limite [rpm]	
M2BA200ML	36	1765	6312/C3	11000	5600	212,92
			6312/C3	11000	5600	212,92
M2BA225SM	44	1775	6313/C3	10000	5300	201,51
			6313/C3	10000	5300	201,51
M2BA250SMA4B3	65	1774	6315/C3	9000	4500	183,51
			6315/C3	9000	4500	183,51
M2BA280SMB4B3	105	1780	6316/C3	8500	4300	175,29
			6316/C3	8500	4300	175,29
M2BA315MLA4B3	220	1785	6319/C3	7000	3600	170,31
			6316/C3	8500	4300	203,43
M2BA355SMA4B3	360	1789	6322/C3	6000	3800	175,71
			6319	7000	3600	166,46
M2BA4001KB10B3	285	714	6322/C3	6000	3800	483,89
			6319M/C4VL024	7000	4500	458,42

### 3.6.3 Conjugado de motores de indução trifásicos

Em face ao exposto anteriormente, conclui-se que, para aumentar a velocidade da linha, os motores elétricos, deverão trabalhar na região de enfraquecimento de campo. Sendo assim, especificamente para esta região de operação, é necessário se analisar o comportamento do seu conjugado, confrontando os seus valores com a força necessária ao processo de produção.

Em SEW (2007) encontra-se relatado que, durante a análise de acionamentos através de motores elétricos, devem ser observados três limitadores, no que se refere à curva característica de conjugado x rotação: o conjugado máximo do motor, a limitação do conjugado disponível pelo motor na faixa superior da rotação e a capacidade térmica da máquina.

Como exposto no item 3.6.1, o conjugado disponibilizado pelos motores é reduzido na região de enfraquecimento de campo, sendo que, neste trabalho, tal redução será considerada para a avaliação da capacidade do aumento da velocidade da linha de recozimento e decapagem.

Observando os limitadores térmicos e elétricos do motor e do conversor estático, em KIN e SUL (1995) foi apresentada uma metodologia para a obtenção do conjugado máximo em todas as regiões de operação do motor de indução. Em sua análise, propôs-se a obtenção do conjugado máximo pelo método convencional da potência ( $P_m$ ) pelo inverso da rotação ( $1/\omega$ ), método este que, no presente trabalho, será utilizado para se determinar a possibilidade do funcionamento dos motores na região de enfraquecimento de campo.

- **Análise do conjugado dos motores da linha de recozimento e decapagem**

Para a identificação da capacidade dos motores elétrico, quanto ao seu conjugado, inicialmente foi realizada uma análise da potência requerida pelo sistema para manter a força de tração necessária aos equipamentos desta linha e na sequência uma análise do conjugado disponível pelo motor em sua velocidade máxima.

Assim, foi obtido o conjugado necessário para cada equipamento envolvido no processo utilizando-se da soma dos resultados das equações (3.1), (3.4) e (3.17). E com um pequeno rearranjo na equação (3.5), foram calculados os valores admissíveis de conjugado para os motores, considerando a sua potência nominal e a rotação máxima admissível de acordo com a norma IEC-60034-1 (2004).

O conjugado necessário no eixo dos motores elétricos das bobinadeiras e desbobinadeiras foi obtido para duas condições: diâmetros mínimos e máximos do papel ou bobina de aço inoxidável. Vale ressaltar que, para a condição de diâmetro máximo, a rotação do motor se torna tão baixa que não há necessidade de redução no conjugado

disponibilizado pelo motor. Já para os motores da bobinadeira e dos BSs, além do conjugado necessário para tracionar a tira foi adicionado os conjugados dinâmico e estático de cada máquina.

Durante as acelerações das máquinas rotativas um conjugado extra é exigido. Entretanto, quando a máquina está operando no sentido de frenagem (para tracionar a tira) seu conjugado gerado será contrário à direção de funcionamento da linha. Assim, durante as acelerações o conjugado resultante na máquina será menor que o conjugado em regime constante. Neste caso, para obter a pior condição de trabalho, o conjugado para aceleração da linha não foi adicionado aos cálculos do conjugado necessário no eixo do motor.

As tabelas 3.16, 3.17 e 3.18 apresentam os conjugados nominais dos motores e os máximos valores de conjugado extraídos na velocidade máxima, conforme estabelecida pela norma IEC, além dos conjugados necessários para manter a força de tração solicitada pela linha de produção, estabelecida através das NTA's.

Tabela 3.16 - Relação de motores da seção da entrada com os conjugados máximos extraídos na velocidade máxima permitida pela norma IEC e os conjugados necessários para produzir a força de tração da linha.

Localização	Tipo de Motor	Conjugado Nominal do motor [N.m]	Diâmetro do rolo de trabalho [mm]	Conjugado disponível com o motor na Rotação IEC 60034-1 [N.m]	Força necessária na linha [kgf]	Conjugado necessário no eixo do motor [N.m]
<b>Bobinadeira de papel 1 da entrada</b> Diâmetro mínimo	GBVAFV 132M/4C-11	41,16	150,00	26,53	72,90	11,73
<b>Bobinadeira de papel 1 da entrada</b> Diâmetro máximo		41,16	500,00	(***)	72,90	39,89
<b>Desbobinadeira Principal 1</b> Diâmetro mínimo	M2BA 355S	1671,80	610,00	612,13	-2100	-161,77
<b>Desbobinadeira Principal 1</b> Diâmetro máximo		1671,80	2100,00	(***)	-2100	-231,74
<b>Bobinadeira de papel 2 da entrada</b> Diâmetro mínimo	GBVAFV 132M/4C-11	41,16	150,00	26,53	72,90	11,73
<b>Bobinadeira de papel 2 da entrada</b> Diâmetro máximo		41,16	500,00	(***)	72,90	39,89
<b>Desbobinadeira Principal 2</b> Diâmetro mínimo	M2BA 355S	1671,80	610,00	612,13	-2100	-161,77
<b>Desbobinadeira Principal 2</b> Diâmetro máximo		1671,80	2100,00	(***)	-2100	-231,74
<b>Desengraxe, Rolo Espremedor</b>	GVAFV 132S/4F-11	30,01	280,00	19,45	(*)	1,66
<b>Desengraxe, Rolo Encosto - Escovas</b>	GVAFV 132S/4F-11	30,01	330,00	19,45	(*)	1,55
<b>BS1 - rolo nº01</b>	M2BA 250SM A4B3	349,89	1050,00	269,87	960	52,05
<b>BS1 - rolo nº02</b>	M2BA 250SM A4B3	349,89	1050,00	269,87	(**)	51,85
<b>Acumulador da Entrada (quatro lances de tira)</b>	M2BA 355S	1720,59	1050,00	1527,89	8800	873,49

(\*) O rolo não possui a função de promover força de tração no material.

(\*\*) A força necessária é dividida entre os rolos do mesmo BS.

(\*\*\*) O conjugado disponível é igual ao conjugado nominal, pois não há necessidade de enfraquecimento de campo quando o diâmetro é máximo.

Tal como citado anteriormente, os rolos responsáveis exclusivamente em manter a tira na linha de passe não possuem a função de promover força de tração na mesma, mas apenas de conduzi-la no equipamento, sem provocar arranhões superficiais no material. Para o rolo da unidade de desengraxar, exibido na Tabela 3.16, o conjugado necessário no eixo do motor é oriundo somente das forças necessárias para vencer as perdas e o conjugado de aceleração do conjunto. Para a determinação dos conjugados estáticos foi utilizada a equação (3.1), considerado o coeficiente de atrito rolante dos rolamentos dos mancais igual a  $\mu_L = 0,03$ . Quanto ao BS1, a força de tração necessária à linha é obtida através da soma dos conjugados dos motores dos rolos nº1 e nº2, conforme já explanado no item 3.3.2.1.

Similar estudo desenvolvido na seção de entrada foi aplicado para o cálculo dos valores de conjugado dos motores da seção do processo, exibidos na Tabela 3.17. Vale ressaltar que a mesma análise direcionada aos rolos da unidade de desengraxar foi aplicada aos rolos da decapagem e as mesmas considerações realizadas durante as análises do BS1 foi aplicado aos rolos dos BS2, BS3 e BS4 quanto à divisão de cargas entre os rolos nº1 e nº2.

Tabela 3.17 - Relação de motores da seção do processo com os conjugados máximos extraídos na velocidade máxima permitida pela norma IEC e os conjugados necessários para produzir a força de tração da linha.

Localização	Tipo de Motor	Conjugado Nominal do motor [N.m]	Diâmetro do rolo de trabalho [mm]	Conjugado disponível com o motor na Rotação IEC 60034-1 [N.m]	Força necessária na linha [kgf]	Conjugado necessário no eixo do motor [N.m]
<b>BS2 - rolo nº01</b>	M2BA 250SM	349,89	1050	269,87	1774	92,87
<b>BS2 - rolo nº02</b>	M2BA 200ML	194,77	1050	149,47	(**)	48,56
<b>BS3 - rolo nº01</b>	M2BA 200ML	194,77	1050	149,47	-1293	-25,54
<b>BS3 - rolo nº02</b>	M2BA 250SM	349,89	1050	269,87	(**)	-49,70
<b>Decapagem, Rolo Espremedor</b>	GVAFV 112M / 4K-11	21,83	305	10,61	(*)	0,61
<b>Decapagem, Rolo Mergulhador</b>	GVAFV 132M / 4C-11	41,16	1000	26,53	(*)	1,01
<b>Decapagem, Rolo Defletor</b>	GVAFV 112M / 4K-11	21,83	400	10,61	(*)	0,99
<b>BS4 - rolo nº01</b>	M2BA 280SM	472,10	1050	365,36	-2001	-84,67
<b>BS4 - rolo nº02</b>	M2BA 225SM	236,71	1050	182,68	(**)	-38,59

(\*) O rolo não possui a função de promover força no material

(\*\*) A força necessária é dividida entre os rolos do mesmo BS

As mesmas análises empregadas nos motores das seções de entrada e processo foram aplicadas também aos motores da seção da saída. A força de tração necessária para o BS5 é dividida nas devidas proporções da potência nominal de cada motor, com seus rolos nº1, nº2, nº3 e nº4. Tal divisão foi também utilizada no BS6, BS7 e BS8 entre seus rolos nº1 e nº2, conforme apresentado na Tabela 3.18.

Tabela 3.18 - Relação de motores da seção da saída com os conjugados máximos extraídos na velocidade máxima permitida pela norma IEC e os conjugados necessários para produzir a força de tração da linha.

Localização	Tipo de Motor	Conjugado Nominal do motor [N.m]	Diâmetro do rolo de trabalho [mm]	Conjugado disponível com o motor na Rotação IEC 60034-1 [N.m]	Força necessária na linha [kgf]	Conjugado necessário no eixo do motor [N.m]
Acumulador LE2 (quatro lances de tira)	M2BA 355SM	1720,59	1050	1528	12000	875,90
BS5 - rolo nº01	M2BA280SMA4B3	472,10	1050	365	-17720	-111,17
BS5 - rolo nº02	M2BA280SMB4B3	563,30	1050	436	(**)	-165,33
BS5 - rolo nº03	M2BA315 MLA4B3	1176,94	1050	913	(**)	-220,32
BS5 - rolo nº04	M2BA355SMA4B3	1921,60	1050	1495	(**)	-797,69
LE2, Cilindro de Trabalho Superior	M2BA 280SM B8 B3	590,79	775	575	(*)	45,13
LE2, Cilindro de Trabalho Inferior	M2BA 4001K B10B3	3811,69	775	3428	(*)	155,83
BS6 - rolo nº01	M2BA355 SM A4B3	1921,60	1050	1495	20963	958,46
BS6 - rolo nº02	M2BA315ML A4B3	1176,94	1050	913	(**)	590,58
BS7 - rolo nº01	M2BA 315SM C4B3	941,03	1050	731	(**)	298,81
BS7 - rolo nº02	M2BA 280SM B3-4	563,30	1050	436	(**)	156,98
Acumulador da Saída (dois lances de tira)	M2BA 280SM	597,84	1050	589	6000	386,87
BS8 - rolo nº01	M2BA 250SM A4B3	349,89	1050	270	1258	65,80
BS8 - rolo nº02	M2BA 250SM A4B3	349,89	1050	270	(**)	65,80
Desbobinadeira de papel 1 da saída Diâmetro mínimo	GBVAFV 132M/4C-11	41,16	150	27	73	11,54
Desbobinadeira de papel 1 da saída Diâmetro máximo	GBVAFV 132M/4C-11	41,16	500	(***)	73	37,18
Desbobinadeira de papel 2 da saída Diâmetro mínimo	GBVAFV 132M/4C-11	41,16	150	27	73	10,86
Desbobinadeira de papel 2 da saída Diâmetro máximo	GBVAFV 132M/4C-11	41,16	500	(***)	73	35,20
Bobinadeira Principal Diâmetro mínimo	M2BA 355M LCBB3	3044,24	610	1396	3564	854,85
Bobinadeira Principal Diâmetro máximo	M2BA 355M LCBB3	3044,24	2100	(***)	3564	1255,80

(\*) O rolo não possui a função de promover força no material

(\*\*) A força necessária é dividida entre os rolos do mesmo BS

(\*\*\*) O conjugado disponível é igual ao conjugado nominal, pois não há necessidade de enfraquecimento de campo quando o diâmetro é máximo

Diante das análises realizadas (Tabela 3.18) foi possível confirmar que todos os motores da seção de saída possuem conjugado suficiente para conduzir e tracionar a tira



nesta linha de produção, mesmo após ter aplicado a redução de conjugado em função do enfraquecimento de campo durante o aumento da velocidade.

- **Utilização de um segundo método de análise do conjugado necessário aos motores**

No que tange os motores dos BSs, foi utilizado um segundo método de análise para o cálculo do conjugado requerido para os motores, no qual se leva em consideração a divisão de cargas entre os motores mestre e escravos, conforme sua potência nominal. Nesta avaliação, foram consideradas a velocidade nominal da linha de produção e a potência total necessárias, como sendo originada de três conjugados distintos: (i) o conjugado que irá promover a força de tração necessária para manter a tira na linha de passe, calculado através da equação (3.4) com referências da Tabela 3.3, (ii) o conjugado de aceleração (3.17) e (iii) o conjugado para o dobramento do material (3.15). A comparação da potência necessária com a potência nominal dos motores resultou na porcentagem de utilização de cada motor, cujos valores são apresentados na Tabela 3.19.

Tabela 3.19 - Resultado das potências dos motores e coeficiente de atrito necessário entre a tira e o rolo para atingir a força necessária nas velocidades atuais de 70 metros por minuto na seção do processo e 90 metros por minuto na seção da entrada e saída.

Rolo Tensor	Força de tração na entrada do BS [kgf]	Força de tração na saída do BS [kgf]		Potência necessária total [kW]	Potência nominal do motor [kW]	Potência utilizada pelo motor [%]	Coeficiente de atrito necessário [μ]	Velocidade da linha [m/min]	Divisão de carga sobre os motores [%]
<b>BS 1</b>	2400	1442	2º rolo	13,64	65	<b>21,0</b>	0,07	90	50
			<b>1º rolo</b>	13,62	65	<b>21,0</b>	0,05		50
<b>BS 2</b>	2160	388	2º rolo	13,19	36	<b>36,6</b>	0,17	70	36
			<b>1º rolo</b>	23,46	65	<b>36,1</b>	<b>0,25</b>		64
<b>BS 3</b>	386	1678	2º rolo	16,54	65	<b>25,4</b>	0,16	70	64
			<b>1º rolo</b>	9,30	36	<b>25,8</b>	0,20		36
<b>BS 4</b>	1119	3121	1º rolo	19,78	88	<b>22,5</b>	0,12	70	50
			2º rolo	19,77	44	<b>44,9</b>	0,13		50
<b>BS 5</b>	2080	19801	1º rolo	32,73	88	<b>37,2</b>	0,13	90	8,45
			2º rolo	49,08	105	<b>46,7</b>	0,13		12,67
			3º rolo	65,46	220	<b>29,8</b>	0,06		16,90
			<b>4º rolo</b>	240,07	360	<b>66,7</b>	0,22		61,98
<b>BS 6</b>	23400	2445	<b>1º rolo</b>	215,10	360	<b>59,7</b>	0,14	90	47,6
			2º rolo	140,09	220	<b>63,7</b>	0,20		31,0
<b>BS 7</b>			1º rolo	61,47	176	<b>34,9</b>	0,09		13,6
			2º rolo	35,24	105	<b>33,6</b>	0,11		7,8
<b>BS 8</b>	3655	2399	1º rolo	14,47	65	<b>22,3</b>	0,05	90	50
			2º rolo	14,49	65	<b>22,3</b>	0,06		50

Com base nos resultados da Tabela 3.19, verifica-se que, no quesito capacidade de potência dos motores elétricos, todos se encontram sobredimensionados, indicando a possibilidade de um aumento da velocidade.

Em ambos os métodos adotados para as avaliações da capacidade de potência dos motores, pôde-se constatar que são eficientes. Além disso, o segundo método apresentou também o coeficiente de atrito necessário entre o rolo e a tira, possibilitando diagnosticar um possível deslizamento entre o rolo e o material.

### **3.6.4 Influência da temperatura na vida útil do motor**

Tal como afirmado em SOBRINHO (2008), a temperatura é um dos limitadores na obtenção de motores de indução convencionais com elevadas rotações, pois um dos motivos de se fabricar máquinas para altas rotações é reduzir a relação peso/potência. Nesse caso, a relação peso/perdas também se reduz, aumentando a temperatura de operação da máquina. Portanto, para se manter a integridade física dos componentes do motor, é necessário que os seus limites térmicos sejam respeitados.

Neste trabalho, ao se elevar a velocidade de operação dos motores, estabeleceu-se como premissa a obediência ao valor nominal de sua potência, garantindo a operação dentro de patamares seguros de temperatura e a preservação da vida útil da máquina.

Sabendo-se que estes motores são alimentados por conversores de frequência, as formas de onda da tensão e corrente não são mais senoidais, de forma que perdas adicionais são introduzidas no motor. Com isto, a sua temperatura sofrerá elevação. As perdas por correntes parasitas são fortemente dependentes da frequência de alimentação do motor. Como mencionado em SOBRINHO (2008), eletricamente, com exceção do volume de perdas decorrentes de um acionamento em altas frequências, e logicamente o uso de inversores de frequência, pode-se considerar o estator de um motor para altas rotações como igual ao de um motor normal

De maneira geral, a temperatura máxima de funcionamento, ou classe de temperatura de uma máquina elétrica, vai depender exclusivamente das características físico-químicas dos materiais que constituem sua isolação. Para os materiais isolantes

comumente encontrados, existem valores tabelados de máxima temperatura suportável presentes na maioria das normas regulamentadoras internacionais (IEC, ANSI, NBR etc).

O funcionamento de motores com temperaturas elevadas reduz significativamente a vida útil do isolamento das bobinas do estator. Neste caso, a expressão “vida útil do isolamento”, em termos de temperatura de trabalho, mesmo abaixo daquela temperatura em que o material se deteriora, diz respeito ao envelhecimento gradual e cumulativo do isolante, que vai deteriorando e tornando-se ressecado, perdendo a rigidez dielétrica, até que não suporte mais a tensão aplicada e leve a um curto-circuito entre as espiras, por exemplo, (SILVA, 2009).

#### 3.6.4.1 Análise da condição atual dos motores elétricos da linha de recozimento e decapagem no que se refere à sua temperatura

Em seus valores máximos de velocidade, as temperaturas dos motores foram coletadas utilizando um medidor de temperatura por termografia, cujas características detalhadas se encontram no anexo D. Dentre as temperaturas registradas, o maior valor, com 62,8 °C (detalhe em (a) da Figura 3.7), encontra-se no motor do acumulador da saída (49ACM10), sendo que todos os motores foram fabricados de acordo com as classes de temperaturas F (155°C) e H (180°C) (NBR-5383-1, 2002). Embora sabendo que as temperaturas referenciadas em norma dizem a respeito ao ponto mais quente no enrolamento, as temperaturas encontradas nas carcaças dos motores estão bastante inferiores.

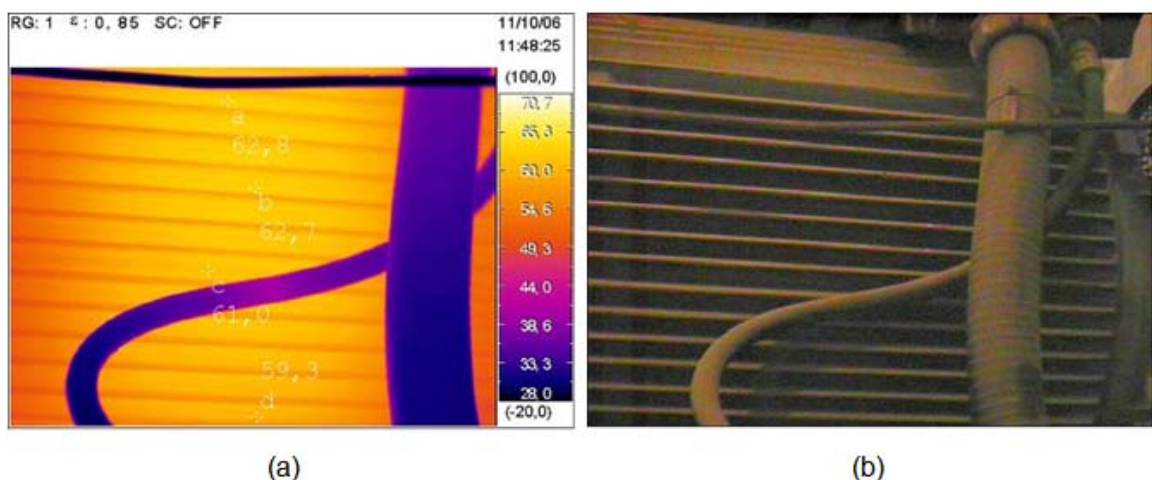


Figura 3.7 - Termograma da temperatura do motor do acumulador de saída: (a) termograma do motor e (b) fotografia do motor no respectivo termograma.

### 3.7 Condições durante a introdução do material

Para a introdução de novas bobinas de aço inoxidável sem a paralisação da seção do processo, torna-se necessário uma análise criteriosa das etapas da seção da entrada. Assim, verificando a distância da ponta inicial da tira, que se encontra preparada no rolo puxador nº 4, até a máquina de solda, onde a mesma é soldada na calda da bobina em processamento, observa-se que a mesma é de 4 metros, conforme apresentado na Figura 3.8. Neste trajeto é gasto o maior tempo entre as etapas, sendo que os demais também foram analisados para um completo entendimento dos tempos desta seção.

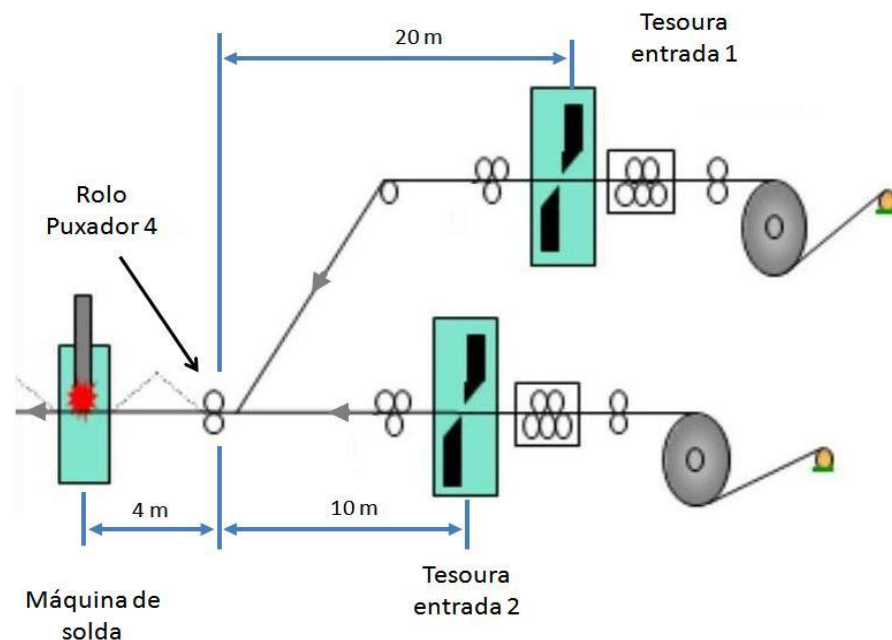


Figura 3.8 - Conjuntos de equipamentos utilizados na preparação do material na entrada da linha de recozimento e decapagem.

Durante um período de dois meses foram efetuados levantamentos dos tempos envolvidos na introdução do material. Este intervalo representa uma amostra da forma de trabalho dos operadores da linha de recozimento e decapagem, que laboram na seção da entrada. Uma análise criteriosa foi realizada, focando nos tempos envolvidos durante o esvaziamento do acumulador de tiras da entrada, com objetivo de avaliar se o seu comprimento permitirá um aumento da velocidade.

Os tempos mínimos, médios e máximos encontrados durante os levantamentos realizados para cada etapa na seção da entrada, são exibidos nas tabelas 3.20, 3.21 e 3.22.

Tabela 3.20 - Levantamento dos tempos mínimos da seção da entrada.

<b>Etapas</b>	<b>Desbobinadeira 1</b>	<b>Desbobinadeira 2</b>
Mínimo de DESLOCAMENTO DA PONTA FINAL ATÉ A MÁQUINA DE SOLDA APÓS O CORTE [s]	00:00:40	00:00:23
Mínimo de AJUSTE DE PONTA FINAL FECHAR CLAMP [s]	00:00:08	00:00:09
Mínimo de DESLOCAMENTO DA PONTA INICIAL ATÉ A MÁQUINA DE SOLDA [s]	00:00:20	00:00:19
Mínimo de AJUSTE DE PONTA INICIAL FECHAR CLAMP [s]	00:00:08	00:00:10
Mínimo de CORTE DE PONTAS NA MÁQUINA DE SOLDA E INSPEÇÃO [s]	00:00:07	00:00:06
Mínimo de SOLDA [s]	00:00:12	00:00:12
Mínimo de DESLOCAMENTO DA TIRA E EFETUAR NOTCH [s]	00:00:19	00:00:19
<b>SOMA</b>	<b>00:01:54</b>	<b>00:01:38</b>

Tabela 3.21 - Levantamento dos tempos médios da seção da entrada.

<b>Etapas</b>	<b>Desbobinadeira 1</b>	<b>Desbobinadeira 2</b>
Média de DESLOCAMENTO DA PONTA FINAL ATÉ A MÁQUINA DE SOLDA APÓS O CORTE [s]	00:00:51	00:00:27
Média de AJUSTE DE PONTA FINAL FECHAR CLAMP [s]	00:00:14	00:00:14
Média de DESLOCAMENTO DA PONTA INICIAL ATÉ A MÁQUINA DE SOLDA [s]	00:00:26	00:00:26
Média de AJUSTE DE PONTA INICIAL FECHAR CLAMP [s]	00:00:18	00:00:17
Média de CORTE DE PONTAS NA MÁQUINA DE SOLDA E INSPEÇÃO [s]	00:00:08	00:00:09
Média de SOLDA [s]	00:00:15	00:00:15
Média de DESLOCAMENTO DA TIRA E EFETUAR O NOTCH [s]	00:00:21	00:00:21
<b>SOMA</b>	<b>00:02:33</b>	<b>00:02:08</b>

Tabela 3.22 - Levantamento dos tempos máximos da seção da entrada.

<b>Etapas</b>	<b>Desbobinadeira 1</b>	<b>Desbobinadeira 2</b>
Máx de DESLOCAMENTO DA PONTA FINAL ATÉ A MÁQUINA DE SOLDA APÓS O CORTE [s]	00:01:15	00:00:29
Máx de AJUSTE DE PONTA FINAL E FECHAR CLAMP [s]	00:00:21	00:00:19
Máx de DESLOCAMENTO DA PONTA INICIAL ATÉ A MÁQUINA DE SOLDA [s]	00:00:46	00:01:06
Máx de AJUSTE DE PONTA INICIAL E FECHAR CLAMP [s]	00:00:54	00:00:45
Máx de CORTE DE PONTAS NA MÁQUINA DE SOLDA E INSPEÇÃO [s]	00:00:10	00:00:17
Máx de SOLDA [s]	00:00:20	00:00:22
Máx de DESLOCAMENTO DA TIRA E EFETUAR O NOTCH [s]	00:00:23	00:00:26
<b>SOMA</b>	<b>00:04:09</b>	<b>00:03:44</b>

A partir da avaliação supracitada apresentaram-se, na Tabela 3.22, as condições com o tempo máximo encontrado nos levantamentos, onde se destacam dois tempos como demasiadamente elevados:

- a)- Deslocamento da ponta final da tira até à máquina de solda após o corte, com o valor de 00:01:15, causado pela retirada do papel em operação manual, o que não é comum nesta etapa;
- b)- Deslocamento da ponta inicial até a máquina de solda, com o valor de 00:01:06, devido ao fato da ponta inicial ter passado por cima do rolo puxador, sendo necessário efetuar uma reversão na bobina para a sua correta a introdução.

Durante a execução das etapas citados acima é necessário que a tira esteja parada na seção da entrada. Desta forma, o acumulador da entrada deve suprir a seção do processo para não ocorrer paralisação da mesma.

Com o acumulador da entrada possuindo 70 metros de comprimento e quatro lances de tira o mesmo tem a capacidade de acumular 280 metros de material. Estando a

seção do processo na velocidade de 70 metros por minuto, este acumulador é capaz de suprir a seção do processo durante 4 minutos, sem que ocorra a paralisação da linha de produção.

Diante do contexto citado acima, conclui-se que o acumulador da entrada possui uma capacidade de acúmulo tira superior ao necessário para a produção na velocidade atual de 70 metros por minuto. Convertendo esta capacidade extra em comprimento de material, entende-se que o mesmo irá permitir um aumento de velocidade na seção do processo.

### **3.8 Uma metodologia de controle dos acionamentos de linhas contínuas de processamento**

Pelo fato da linha de recozimento, decapagem e laminador de encruamento ser, praticamente, o último processo de tratamento e conformação mecânica do material, torna-se ainda mais preocupante, do ponto de vista da qualidade final do produto, o controle da velocidade e das forças de tração aplicadas sobre a tira.

Possuir a capacidade de atingir e manter um nível de desempenho que resulte na degradação zero da qualidade do produto é o principal requisito para um sistema de controle de uma linha contínua de produção.

Em face do exposto acima, percebe-se que a análise da metodologia de controle dos acionamentos, embora conceitualmente bem fundamentada nas teorias de controle, mostra-se bastante relevante em se identificar o método aplicado nesta linha de produção. É neste contexto que se pretende apresentar ao leitor os pontos mais críticos do controle aqui empregado.

#### **3.8.1 Controle da velocidade e da força de tração das máquinas rotativas**

As técnicas de controle da velocidade e do controle de força de tração em motores elétricos encontram-se bastante maduras e difundidas. Sendo assim, a particularidade encontrada, no controle desta linha de processamento, está no fato da utilização de uma malha externa de controle de força de tração, atuando em uma malha interna de controle da velocidade da máquina. A malha externa de controle de força de

tração gera um incremento ou decremento na referência de velocidade que, por sua vez, é controlada pelo conversor.

O controle de força de tração é aplicado de duas formas, a saber: controle através do retorno do conjugado do motor e controle com medição da força de tração, através de dispositivos para medição instalada na linha de produção, tal como “células de carga”<sup>3</sup>. A referência de força de tração é comparada com o valor real de força de tração medida, gerando um erro que, através de um controlador Proporcional Integral (PI), é enviado ao conversor para o acionamento do motor.

Os controles eletrônicos dos acionamentos garantem trações constantes na tira e com os valores apropriados para cada seção da linha de produção, mesmo em períodos de aceleração e desaceleração das máquinas. Além disso, os controles eletrônicos mantêm a velocidade constante, exceto durante as alterações solicitadas pelo operador da linha de produção. Para um correto controle da força de tração, as compensações, tais como perdas, inércia dos equipamentos e fator de dobramento do material (*Bending*), devem ser consideradas.

### 3.8.1.1 Fator de dobramento do material

Para o transporte da tira na linha de produção, uma força extra, contabilizada/associada ao fator de dobramento, é requerida, principalmente durante a sua passagem sobre os rolos, onde ocorre uma curvatura. O fator de dobramento é determinado pelo conjugado necessário para a deformação mecânica no dobramento da mesma.

A equação (3.15), encontrada em ASEA BROWN BOVERI (1996), apresenta o conjugado necessário para efetuar o dobramento da tira ( $T_{db}$ ), referenciado ao eixo do motor.

$$T_{db} = \frac{h^3 \cdot l_b \cdot \tau_D}{d_r \cdot i \cdot 6} \quad (3.15)$$

---

<sup>3</sup> Células de carga - Equipamento utilizado para medição de força

onde  $h$  é a espessura do material,  $l_b$  é a largura da bobina,  $d_r$  é o diâmetro do rolo e  $\tau_D$  é o fator de estiramento do material. Para o aço inoxidável, o fator de estiramento utilizado no conjugado de dobramento da tira é de  $592 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ .

A potência para o dobramento do material ( $P_{db}$ ) é obtida por:

$$P_{db} = \frac{T_{db} \cdot n_m}{9,549} \quad (3.16)$$

onde 9,549 refere-se à constante de transformação de “rpm” para “rad/s”.

### 3.8.1.2 Conjugado de aceleração e desaceleração das máquinas rotativas

De forma a se elevar a velocidade, deve ser fornecido um conjugado extra pelo motor a fim de acelerar a massa girante (SCHRÖDER, 2003). Se o conjugado produzido pelo motor for mantido no mesmo valor durante a aceleração, parte dele será consumido para acelerar a massa do motor, da bobina, dos eixos, dos rolos, das engrenagens e dos acoplamentos. Somente o restante, se houver, transforma-se em tração na tira. A amplitude do adicional de conjugado depende do momento de inércia de massa e da taxa de aceleração desejada.

A equação (3.17), encontrada em ASEA BROWN BOVERI (1996), apresenta o conjugado ( $T_a$ ) necessário para promover a aceleração da máquina baseada na inércia, aceleração e diâmetro do rolo ou bobina.

$$T_a = J \cdot \frac{2}{d_a} \cdot i \cdot a \quad (3.17)$$

onde  $J$  é o momento de inércia,  $i$  é a relação de redução do redutor,  $d_a$  é o diâmetro do rolo ou bobina e  $a$  é a aceleração.

Neste contexto, em SEW (2007) encontra-se uma proposta diferente para o cálculo do conjugado de aceleração ( $T_a$ ), utilizando-se a equação (3.18), que leva em consideração o tempo de aceleração ( $t_a$ ) como variável para o cálculo.



$$T_a = \frac{J \cdot n_m}{9,549 \cdot t_a} \quad (3.18)$$

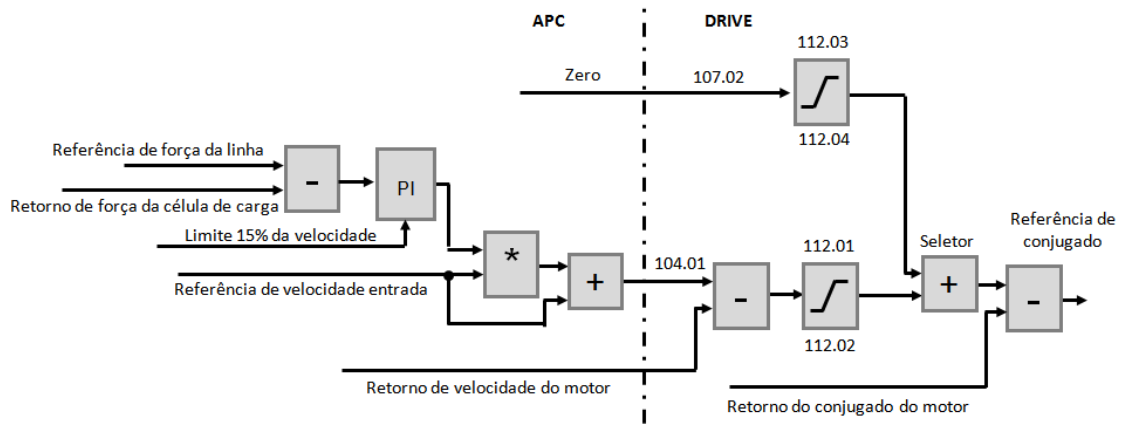
A potência dinâmica ( $P_{dl}$ ) será calculada pela equação (3.19):

$$P_{dl} = \frac{T_a \cdot n_m}{9,549} \quad (3.19)$$

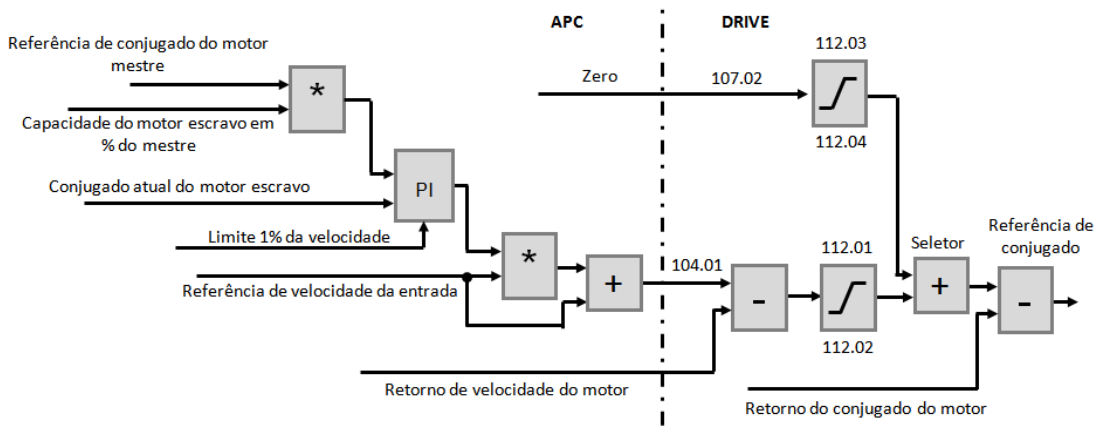
onde  $n_m$  é a rotação do motor e 9,549 refere-se à constante de transformação de “rpm” para “rad/s”.

### 3.8.2 Controle dos motores de acionamento dos rolos dos BSs e dos rolos do laminador de encruamento

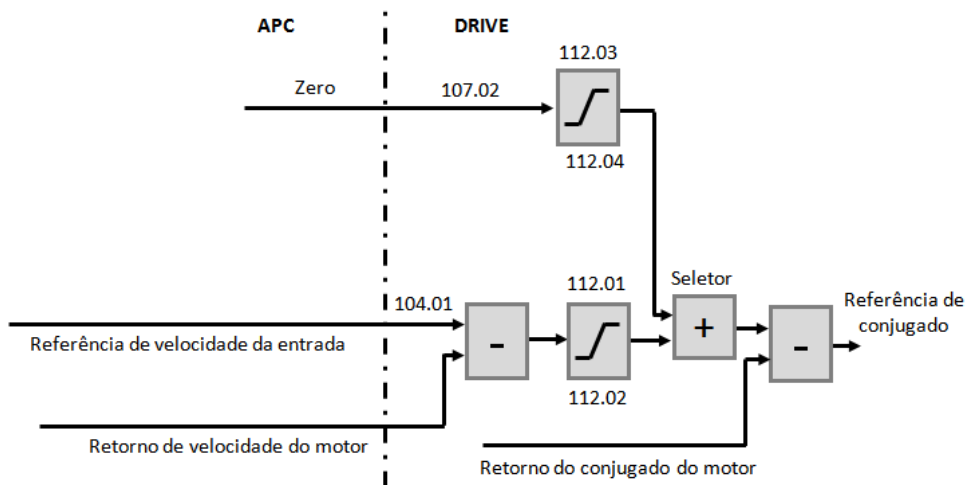
Com o objetivo de se identificar o impacto do aumento da velocidade sobre o controle das máquinas rotativas, foi efetuado um levantamento das formas de controle aplicado aos motores de acionamento de cada rolo. Como discutido no item 3.3.2.1 deste trabalho, a Figura 3.9 apresenta as formas de controle para os motores dos rolos BSs identificando suas particularidades. Em (a) é mostrado o controle aplicado aos motores de acionamento dos rolos dos BS2, BS4, BS5 e BS6 (mestres). Nestes, a referência de velocidade é somada a um diferencial de até 15 % da velocidade, de acordo com o controle da força de tração requerida na tira. Em (b) é mostrado o controle empregado aos motores de acionamento dos BS1, BS2, BS3, BS4 (escravos) e motor de acionamento do rolo superior do LE2. Nestes, os motores recebem a referência de velocidade e, somados a esta, um diferencial de até 10% da velocidade, de acordo com a necessidade do balanço de carga entre os motores mestre e escravos. Em (c) é mostrado a forma de controle direcionado aos motores de acionamento dos rolos dos BS1, BS3, BS8 (mestres) e rolo inferior do LE2. Nestes o controle é realizado unicamente em velocidade. Em (d) é mostrado a forma de controle direcionada aos motores de acionamento dos rolos dos BS5, BS6, BS7 (escravos), que recebem referência de velocidade e, somados a esta, um diferencial de velocidade em função do balanço de carga entre motores mestre–escravo e uma compensação extra de conjugado que esta relacionada ao desvio do controlador de conjugado entre motores mestre e escravo.



(a)



(b)



(c)



uma coleta de dados referente às grandezas de velocidade e conjugado, tal como apresentado na Figura 3.10.

O balanço de carga entre os motores é realizado através do motor escravo, tal como ilustrado na Figura 3.9 (b e d), com limites entre 1 a 2% da velocidade de referência para os respectivos motores. Nas medições realizadas nos BSs, foi detectado que, no BS1 o conjugado atual (curva azul (4) da Figura 3.10 a) do motor 25ACM10 - M1 (mestre) está negativo, indicando que o motor está desenvolvendo um conjugado de frenagem, enquanto que o motor 25ACM30 - M2 (escravo) está produzindo um conjugado (curva azul (4) da Figura 3.10 b) à frente, conforme imposto pela referência de força de tração da linha de produção. Isto indica que o controle está insatisfatório para manter um correto balanço de cargas entre os motores, tal como apresentado na Figura 3.10. Para a realização dos registros foi utilizado um sistema coletor de dados ABB - *DDC Tool*, cujo detalhamento se encontra no anexo D.

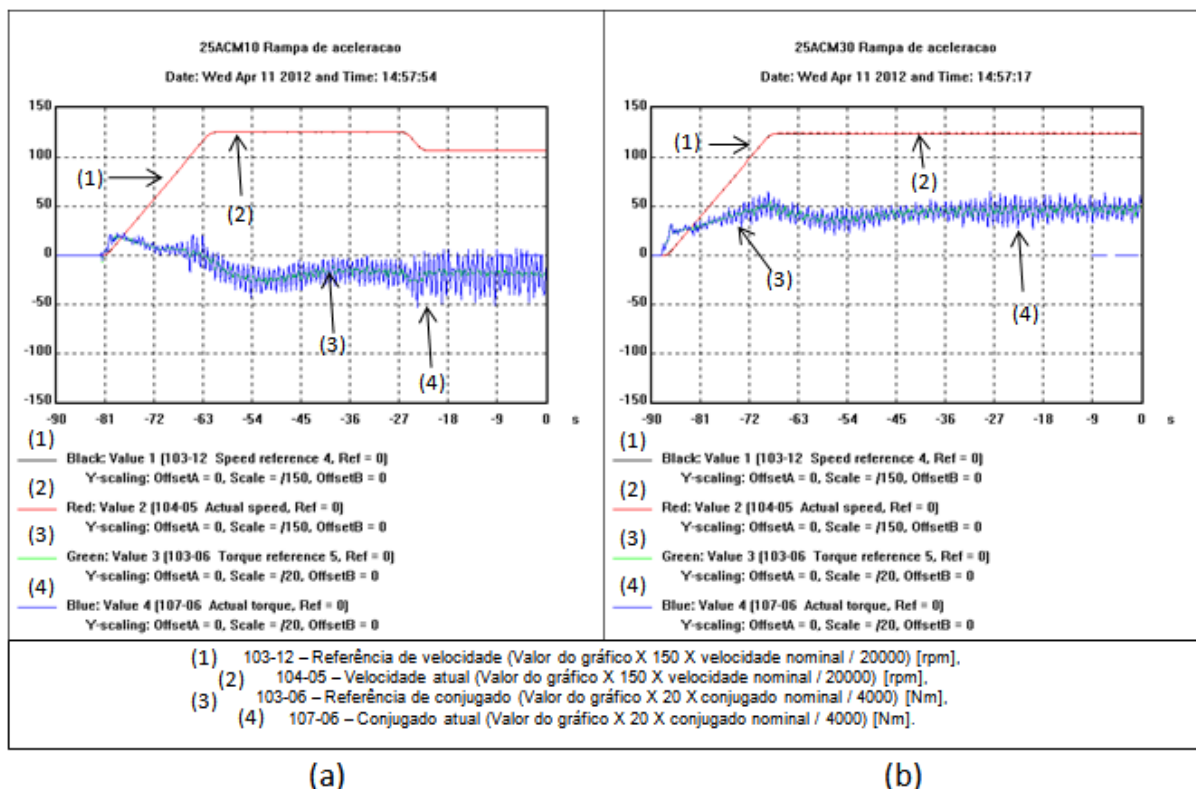


Figura 3.10 - Medições de conjugado e velocidade dos motores do BS1; (a) motor mestre - M1 e (b) motor escravo - M2.

Portanto, diante do apresentado na Figura 3.10, para um aumento de velocidade nesta linha de produção deve-se realizar um ajuste no controle dos motores dos BSs. Caso

contrário, os conjugados dos motores poderão atingir seus valores máximos, e ainda assim, não produzir a força de tração requerida pela linha.

### **3.8.3 Controle dos motores de acionamento dos rolos da unidade de desengraxe e decapagem**

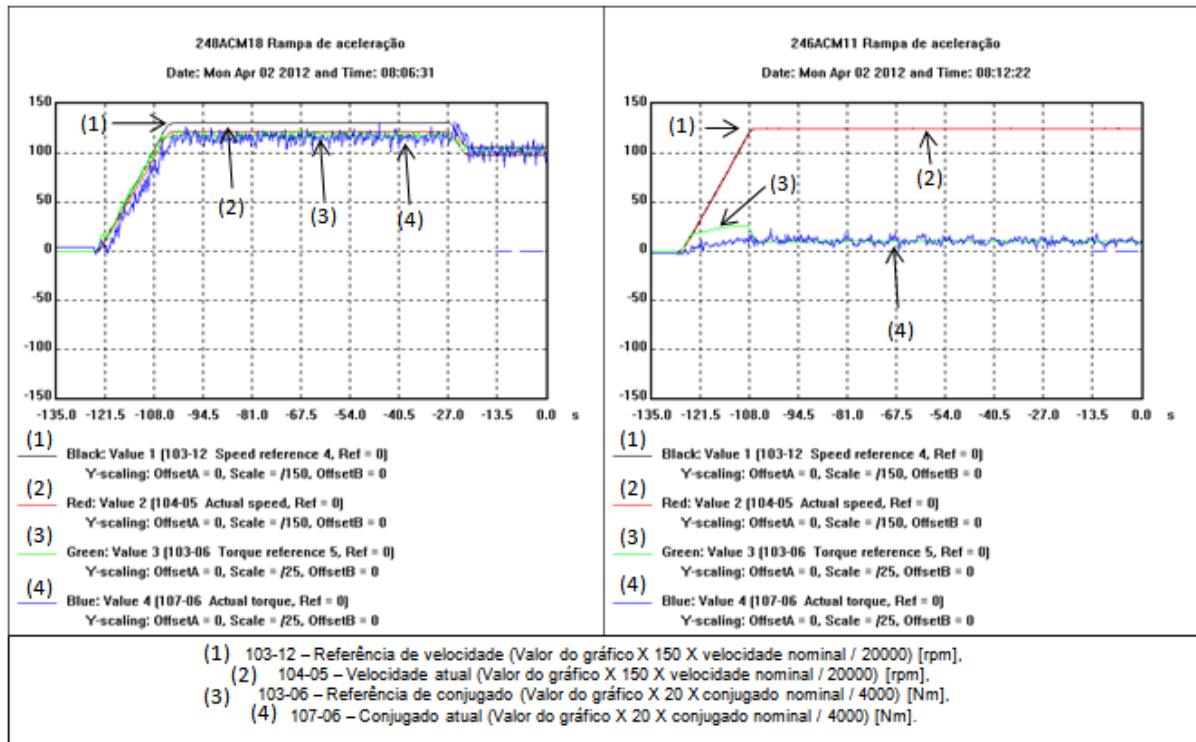
Um controle similar àquele mostrado na Figura 3.9 (c) é aplicado aos rolos dos tanques da unidade de desengraxe, decapagem eletrolítica e decapagem química, nos quais somente a referência de velocidade é enviada aos controles dos motores.

No sistema de controle por velocidade, o conjugado realizado pelo motor elétrico é somente o necessário, para que o mesmo atinja a rotação solicitada pelo controle. Para tanto, se a velocidade da tira for igual à velocidade produzida pelo rolo, quando aplicada a equação (3.14), o conjugado do motor em regime contínuo será somente o conjugado estático. Na ocorrência de desgaste natural do revestimento dos rolos, devido ao contato com a tira, seu diâmetro deverá ser corrigido no programa de controle do PLC, para que as velocidades da tira e rolo seja iguais, não provocando arranhão no material, o que degradaria qualidade do produto.

Na ocorrência da referência de velocidade para o motor se encontrar diferente da velocidade atual da tira, um conjugado elevado do motor será solicitado. Além disso, o rolo poderá deslizar em relação a tira, e por sua vez, provocar sobrecorrente culminando no desligamento do conversor.

Com intuito de se identificar as condições atuais de operação dos motores dos rolos da unidade de desengraxe e decapagem, foi realizada uma coleta dos valores de velocidade e conjugado desenvolvidos pelos mesmos, apresentados na Figura 3.11.

O motor 248ACM18 apresentou um valor elevado de conjugado, (curva azul (4) da Figura 3.11 a), e ainda, sua velocidade atual, (curva vermelha (2) da Figura 3.11 a), não atingiu a referência de velocidade, (curva preta (1) da Figura 3.11 a), solicitada pela linha indicando um mau funcionamento do mesmo. Já o motor 246ACM11, apresentou o conjugado (curva azul (4) da Figura 3.11 b), apenas com o suficiente para manter a rotação do conjunto e sua velocidade atual (curva vermelha (2) da Figura 3.11 b) atingiu a referência (curva preta (1) da Figura 3.11 b), indicando a normalidade do seu funcionamento.



(a)

(b)

Figura 3.11 - Medições de conjugado e velocidade de dois motores da unidade de desengraxa da entrada; (a) motor 248ACM18 e (b) motor 246ACM11.

Diante do exposto acima, conclui-se que, para um incremento da velocidade desta linha de produção, uma verificação nos parâmetros dos controles dos motores deve ser realizado, caso contrário os motores poderão atingir seu limite de conjugado, e ainda assim, não girar na velocidade requerida pela linha, causando a má qualidade ao produto.

### 3.8.4 Controle dos motores de acionamento dos acumuladores

Com uma forma diferenciada de controle na função de acumular tiras durante a paralisação da seção da entrada, LE2 ou saída, o controle do acumulador é selecionado em força de tração e é adicionado a este o controle de velocidade, durante o enchimento e esvaziamento do mesmo, conforme mostra a Figura 3.12.

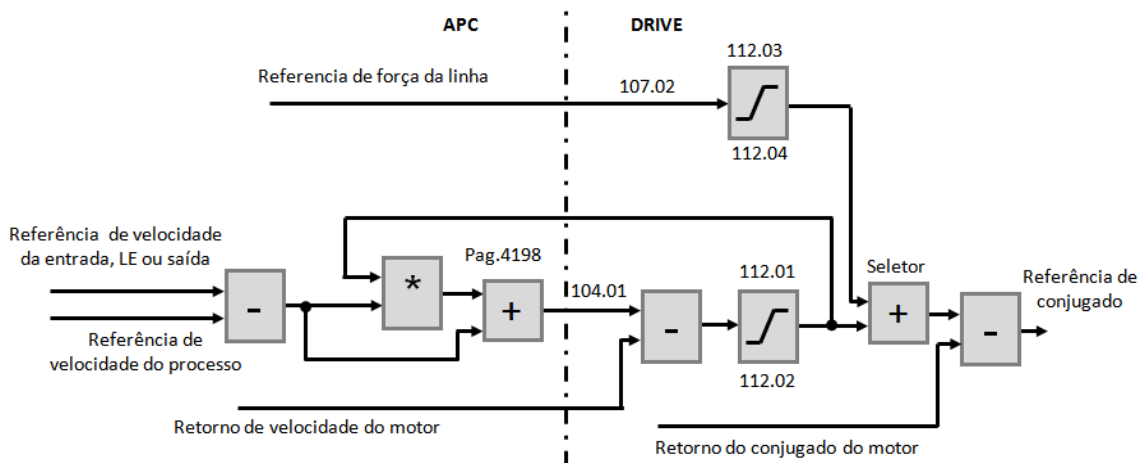


Figura 3.12 - Forma de controle dos acumuladores da entrada, LE2 e saída.

Diante da forma de controle aplicado aos acumuladores de tira e a manutenção da mesma rampa de aceleração e desaceleração utilizada atualmente, entende-se que o comportamento dos mesmos não será alterado durante o aumento de velocidade da linha, assim não será necessário alterações em seu controle para implantação do trabalho.

### 3.8.5 Controle dos motores de acionamento da bobinadeira e das desbobinadeiras principais e do papel

Com pequenas diferenças dos controles já apresentados nos itens 3.8.2 e 3.8.4, este controle (Figura 3.13) funciona com a referência de conjugado para o motor, corrigida conforme o diâmetro atual da bobina. A referência de velocidade, também corrigida pelo diâmetro, possui a função de controlar a velocidade do motor em caso de ruptura de tira.

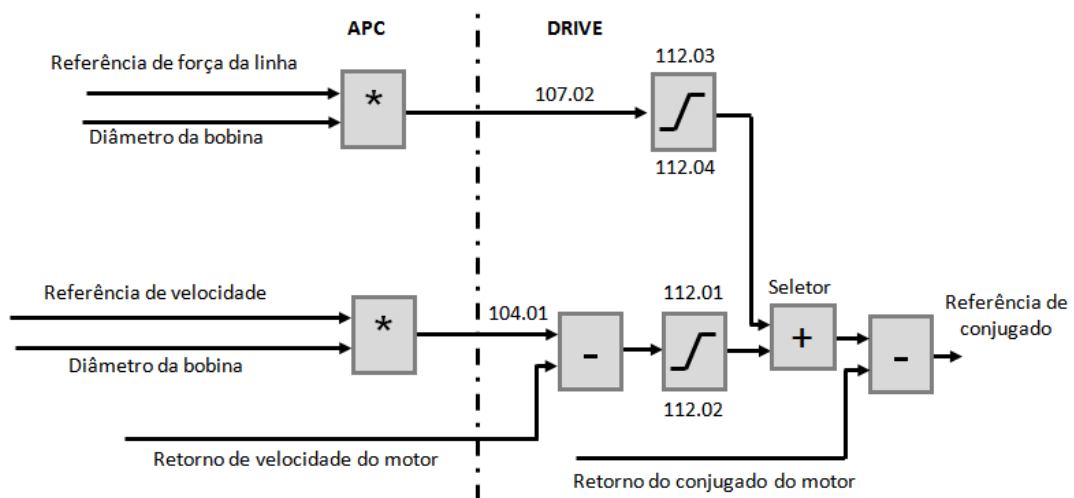


Figura 3.13 - Forma de controle da bobinadeira e desbobinadeiras.

Tendo como base a forma de controle apresentada na Figura 3.13 e a manutenção da mesma rampa de aceleração e desaceleração utilizada atualmente, entende-se que o comportamento dos motores das desbobinadeiras e bobinadeira não será alterado durante o aumento de velocidade desta linha.

### **3.9 Considerações finais**

Este capítulo apresentou a metodologia adotada, a qual se mostrou bastante completa para a identificação dos limitadores da velocidade. Com o mesmo objetivo foi realizado um resumo dos conjugados necessários às máquinas rotativas (motores e redutores) juntamente, com as características dos materiais empregados durante as pesquisas. Para os materiais processados foi definida a aplicação nas espessuras abaixo de 0,64 mm com as respectivas forças de tração estabelecidas em NTA. Vale ressaltar, que para os valores da força de tração, foi considerada a possibilidade de incremento ou decréscimo em até 20% conforme estabelecido também pela NTA da Aperam.

No que se refere aos motores elétricos, concluem-se que seus conjugados apresentam suficientemente altos para atender aos valores necessários a linha, entretanto, suas velocidades já se encontram nos seus limites nominais. Assim, aplicando os limites estabelecidos pela norma IEC, será possível obter um acréscimo de 17 metros por minuto na seção do processo e 11 metros por minutos na seção de entrada e saída.

Quanto aos redutores de velocidade, para análise da sua capacidade, foram utilizados dois métodos de avaliação: o primeiro pela sua capacidade mecânica e térmica, de acordo com DAVID BROWN RADICON (2011); Já o segundo método, dependente do conjugado de aceleração e dobramento da tira, tal como mencionado em RELIANCE (19--?). Para os dois métodos avaliados, conclui-se que, seis redutores já se encontram subdimensionados, assim para um aumento de velocidade desta linha se faz necessário a substituição dos mesmos.

No tocante ao tempo necessário para introdução do material nesta linha, foram encontrados os tempos médios de 2,55 minutos, quando a introdução foi realizada através da desbobinadeira 1 e 2,13 minutos quando pela desbobinadeira 2. Sendo que, o acumulador de tiras da entrada é capaz de fornecer material para a seção do processo durante 4 minutos na velocidade atual de 70 metros por minutos, assim conclui-se que pelo menos estes 1,45 minutos poderão ser utilizados para o aumento de velocidade.



Um outro ponto de destaque neste capítulo foram as análises do controle dos motores elétricos. Neste contexto, foi constatado a existência de motores com o seu conjugado imposto maior que o necessário para conduzir e tracionar a tira. Isto devido a limitações no balanço de cargas dos BSs e aos valores incorretos dos diâmetros dos rolos no PLC.

## **4 AUMENTO DA VELOCIDADE DA LINHA: FORNO DE RECOZIMENTO, PROCESSOS DE DECAPAGEM QUÍMICA E ELETROLÍTICA, LAMINADOR DE ENCRUAMENTO (LE2) E ACUMULADORES (LE2 E SAÍDA)**

### **4.1 Considerações iniciais**

Neste capítulo disserta-se a respeito do tempo necessário de exposição do material no interior do forno de recozimento, bem como a capacidade de aquecimento do mesmo. Para tal, foram realizados levantamentos de campo, aplicação de um modelo matemático bem como o balanço de energia, dentre outras questões. Disserta-se também, sobre a capacidade da decapagem eletrolítica, das condições dos equipamentos da seção da saída e questões relacionadas ao aumento da velocidade no LE2.

### **4.2 Forno para aquecimento contínuo do material**

A operação adequada dos fornos pode ser medida, através de sua produtividade, seu consumo específico e seu rendimento metálico. A qualidade da combustão dos gases em seu interior é de fundamental importância para que esses requisitos sejam atingidos. Um dos principais fatores que garante a qualidade da combustão é o controle das variáveis do gás fornecido para a queima (MOREIRA, MACHADO, *et al.*, 2006). Neste contexto, este trabalho avalia suas características objetivando conhecer o seu máximo potencial.

Para a avaliação de sua capacidade, inicialmente foi aplicado um modelo matemático, desenvolvido para o forno em questão (KAWASAKI STEEL CORPORATION, 1987), indicando o valor ideal de temperatura para cada zona do forno<sup>5</sup>, além do valor da energia absorvida pelo material, baseado nas características do aço, dimensões do forno e velocidades de processamento. Em seguida foi realizado o balanço de energia do forno de forma a verificar a sua capacidade de vazão de gases e fumaças.

#### **4.2.1 Teorias de combustão de forno**

Para a avaliação da capacidade do forno, é necessário o entendimento de algumas teorias sobre combustão, as quais terão uma breve explanação a seguir.

---

<sup>5</sup> Zona do forno = Divisões interna do mesmo com controle de temperatura independente.

#### **4.2.1.1 Combustão**

Este é um processo de reações químicas que se produzem durante a oxidação completa ou parcial do carbono, do hidrogênio e do enxofre em um combustível (GASNET, 2011). A combustão é caracterizada por uma reação exotérmica, muito rápida, entre combustível e oxidante, acompanhada por liberação de calor (JUNIOR e MACQUAY, 2007).

Combustível é uma substância química que, quando em contato com um oxidante, pode produzir uma reação exotérmica, ou seja, uma reação que libera energia na forma de calor (JUNIOR e MACQUAY, 2007).

Oxidante é a fonte do oxigênio necessário para a reação de combustão. Na maior parte das aplicações de combustão o oxidante é o ar atmosférico, cuja composição volumétrica aproximada é 78,08% de nitrogênio, 20,95% de oxigênio, 0,93% de argônio, 0,03% de dióxido de carbono e 0,01% de outros gases tais como neônio, hélio, metano etc (PERRY e CHILTON, 1978) apud (JUNIOR e MACQUAY, 2007).

#### **4.2.1.2 Combustão estequiométrica e combustão completa**

A combustão estequiométrica é aquela em que o combustível e oxidante reagem, em quantidades exatas de moléculas de oxigênio requeridas para oxidar todo o carbono, o hidrogênio e o enxofre presentes no combustível. Desta forma, os gases de exaustão, ou produtos da combustão, não contêm nenhum componente oxidado de forma incompleta e nenhum oxigênio sem reagir.

Combustão completa é a reação ideal de combustão, quando todo carbono do combustível é oxidado para dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), todo hidrogênio para água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e todo enxofre para dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), (CARVALHO JR. e MCQUAY, 2007).

#### **4.2.1.3 Ar de combustão teórico**

É a quantidade de ar atmosférico, que fornece a quantidade exata de moléculas de oxigênio, necessária para efetuar a combustão estequiométrica.

#### 4.2.1.4 Relação entre gases de combustão e ar de combustão teórico

A Figura 4.1 apresenta a relação genérica entre o  $O_2$  fornecido e a concentração de CO e  $CO_2$  na exaustão. À medida que o nível de ar se eleva e se aproxima de 100% do ar teórico (estequiométrico), a concentração de moléculas de CO decresce rapidamente, já que, aproveitando átomos de  $O_2$  adicionais, formam moléculas de  $CO_2$ , que atingem o seu valor máximo. Depois disso, o ar começa a diluir os gases de exaustão, causando a queda da concentração do  $CO_2$ . O valor máximo atingido, todavia, depende do combustível (SAUER, 2008).

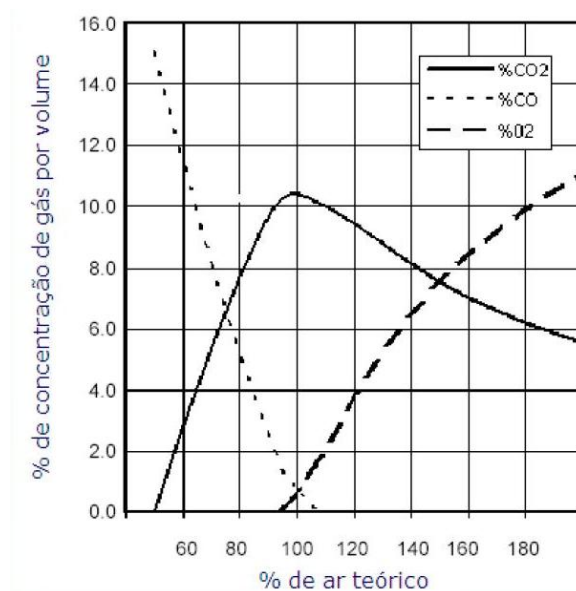


Figura 4.1 - Concentração de gás em função do ar teórico

Fonte: (SAUER, 2008).

#### 4.2.1.5 Excesso de ar de combustão

A reação de combustão gera uma necessidade de um excesso de ar para sustentar a queima completa de um combustível. Porém, uma queima eficiente, com baixa emissão de gases poluentes (CO,  $NO_x$ , HC), é conseguida quando se utiliza uma faixa estreita de excesso de ar. A falta de ar é caracterizada geralmente por fumaça preta e o aparecimento do CO, produto da combustão incompleta. O excesso de ar acaba levando uma maior quantidade de calor sensível pela chaminé, esfriando e aumentando o consumo de combustível no forno (CONFOR, 2011).

Em aplicações industriais, o excesso de ar, definido como percentual acima da quantidade estequiométrica de ar, é quase sempre necessário para completar as reações do processo real de combustão. Para combustíveis gasosos, fornece-se um excesso de ar em torno de 1 a 2 %, enquanto que, para combustíveis líquidos, entre 5 e 10%. Para combustíveis sólidos, como o carvão não pulverizado, o excesso de ar pode chegar a 25% (GILL, CARVALHO e BASTOS-NETTO, 1987) apud (JUNIOR e MACQUAY, 2007).

#### **4.2.1.6 Poder calorífico**

É a quantidade de energia liberada pela combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de uma substância combustível.

Devido à formação de água ( $H_2O$ ) nos produtos da combustão, foram definidos dois valores de poder calorífico para as substâncias combustíveis:

- Poder Calorífico Superior (PCS) – é a energia liberada pela combustão com a água ( $H_2O$ ) dos produtos da combustão em estado líquido;
- Poder Calorífico Inferior (PCI) – é a energia liberada pela combustão com a água ( $H_2O$ ) dos produtos da combustão em estado vapor (GASNET, 2011);

O PCI de uma mistura de gases é o resultado da soma de calor dos seus gases constituintes. Portanto, a partir da composição química e volumétrica de um gás é possível calcular o seu PCI.

#### **4.2.1.7 Entalpia de combustão**

É a diferença de entalpia ( $\Delta H$ ) gerada através de uma reação química exotérmica entre o combustível e o comburente, usualmente o oxigênio, para liberar calor.

A entalpia é o conteúdo de energia de cada componente e, na prática, é possível determinar a variação de entalpia de um processo (USBERCO e SALVADOR, 2009).

Como descrito por JUNIOR e MACQUAY (2007) a entalpia dos reagentes é mais alta que a entalpia dos produtos e, portanto, a reação química de determinada mistura é exotérmica, isto é, ocorre com a liberação de calor. Como a entalpia varia com a temperatura, então se convencionou que a temperatura de referência seja 25°C.

Diante do exposto acima para, uma correta combustão, deve-se obter uma mistura estequiométrica dos gases no interior do forno. Para isto as variações das vazões de combustível e ar de combustão devem ser proporcionais. Caso ocorra, por exemplo, um aumento no volume do ar de combustão, sem o respectivo aumento no volume do combustível, haverá excesso de ar no interior do forno. Ocorrerão desta forma, uma boa queima dos gases e baixa emissão de poluente na atmosfera, mas também uma maior perda de calor sensível pela chaminé. Na ocorrência de uma variação elevada da concentração dos gases, pode-se atingir o limite inferior ou superior de inflamabilidade e a queima não continuar.

#### 4.2.2 Modelo matemático e balanço de energia

Em função das características do aço, o seu ciclo de temperatura é definido. Assim, as tensões provenientes do processo de laminação são eliminadas e o mesmo atinge algumas propriedades metalúrgicas tais como: tamanho de grão, recristalização etc (DREVER SYSTEMS, 1996) e (REED-HILL, 1973). Para identificar a temperatura e o ciclo ideal de trabalho, para cada aço na linha de recozimento e decapagem em questão, é utilizado modelo matemático KAWASAKI (1987) no qual, através de simulações, é possível identificar as temperaturas das zonas do forno mediante a aplicação das características do material e da velocidade de processamento.

Com um balanço de energia do forno, agregado ao modelo matemático, é possível obter as energias envolvidas no processo de combustão. Portanto, de forma resumida, o balanço de energia de um forno é:

**Energia que entra = Energia acumulada + Energia que sai**

Na forma de variação de entalpia ( $\Delta H$ ), o balanço de energia de forma simplificada pode ser expresso como apresentado na equação (4.1) (HEILIGENSTAEDT, 1971).

$$\begin{aligned} \Delta H_{combustao} + \Delta H_{ar\_combustao} + \Delta H_{aco\_enfornado} \\ = \Delta H_{aco\_desenfornado} + \Delta H_{fumacas} + Perdas \end{aligned} \quad (4.1)$$

onde  $\Delta H_{combust\tilde{a}o}$  é a variação da entalpia da combustão,  $\Delta H_{ar\_combust\tilde{a}o}$  é a variação da entalpia do ar de combustão,  $\Delta H_{aco\_enfornado}$  é a variação da entalpia do aço enornado,  $\Delta H_{aco\_desenfornado}$  é a variação da entalpia do aço desenornado e  $\Delta H_{fuma\tilde{c}as}$  é a variação da entalpia das fumaças.

A parcela de energia fornecida pela combustão ( $\Delta H_{combust\tilde{a}o}$ ) é expressa pela equação (4.2).

$$\Delta H_{combust\tilde{a}o} = Q_{GM} \cdot PCI_{GM} \quad (4.2)$$

Considerando que cada combustível fornece uma parcela de energia a equação (4.2) pode ser reescrita pela equação (4.3).

$$\Delta H_{combust\tilde{a}o} = Q_{GN} \cdot PCI_{GN} + Q_{GLP} \cdot PCI_{GLP} + Q_{GAF} \cdot PCI_{GAF} \quad (4.3)$$

onde  $Q_{GN}$  é a vazão do gás natural,  $PCI_{GN}$  é o poder calorífico do gás natural,  $Q_{GLP}$  é a vazão do gás liquefeito de petróleo,  $PCI_{GLP}$  é o poder calorífico do gás liquefeito de petróleo,  $Q_{GAF}$  é a vazão do gás de alto-forno e  $PCI_{GAF}$  é o poder calorífico do gás de alto-forno.

A energia fornecida pelo ar de combustão ( $\Delta H_{ar\_combust\tilde{a}o}$ ) é expressa pela equação (4.4).

$$\Delta H_{ar\_combust\tilde{a}o} = Q_{ar} \cdot C_p^{ar} \cdot T_{ar} \quad (4.4)$$

onde  $Q_{ar}$  é a vazão de ar de combustão,  $C_p^{ar}$  é o calor específico do ar de combustão e  $T_{ar}$  é a temperatura do ar.

As energias contidas no aço enornado ( $\Delta H_{aco\_enfornado}$ ) e no aço desenornado ( $\Delta H_{aco\_desenfornado}$ ) são expressas pelas equações (4.5) e (4.6).

$$\Delta H_{aco\_enfornado} = \dot{m} \cdot C_p^{aco} \cdot T_e \quad (4.5)$$

$$\Delta H_{aco\_desenfornado} = \dot{m} \cdot C_p^{aco} \cdot T_d \quad (4.6)$$

onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica do aço,  $C_p^{aco}$  é o calor específico do aço,  $T_e$  é a temperatura do aço enforado e  $T_d$  é a temperatura do aço desenforado.

A energia retirada pelas fumaças de exaustão ( $\Delta H_{fumaças}$ ) é expressa pela variação de entalpia na equação (4.7).

$$\Delta H_{fumaças} = Q_{fumaças} \cdot C_p^{fumaças} \cdot T_{fumaças} \quad (4.7)$$

onde  $Q_{fumaças}$  é a vazão das fumaças de exaustão,  $C_p^{fumaças}$  é o calor específico da fumaça de exaustão e  $T_{fumaças}$  é a temperatura das fumaças.

#### 4.2.3 Temperatura x velocidade do forno

Diante da forma de trabalho atual desta linha de processamento, foram levantados os valores de temperatura contidos nas NTA's e realizado um comparativo das mesmas nas zonas do forno em duas condições: na maior espessura e na maior velocidade de processamento, os quais foram apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Temperatura das zonas do forno para cada tipo de aço. Primeira linha: maior espessura; Segunda linha: maior velocidade.

Tipo de Aço	Espessura [mm]	Velocidade [m/min]	Temperatura nas zonas do forno [C°]									Temperatura na tira entre as zonas 5 e 6 [C°]
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
A	1,45 a 1,54	40	1150	1140	1120	1090	1050	1020	960	920	910	925
A	0,55 a 0,64	70	1110	1090	1060	1040	1010	970	930	910	910	925
B	1,95 a 2,04	26	deslig	1090	1120	1130	1140	1140	1140	1150	1160	1050
B	0,55 a 0,64	70	deslig	1030	1040	1060	1070	1080	1130	1140	1150	1050
C	2	30	1101	1120	1130	1160	1160	1160	1180	1190	1190	1075
C	0,6	70	1020	1080	1090	1110	1120	1130	1170	1180	1190	1075
D	1,95 a 2,04	26	deslig	1090	1110	1130	1140	1150	1160	1170	1180	1025
D	0,55 a 0,64	70	deslig	1050	1060	1080	1080	1090	1130	1140	1150	1025
E	1,95 a 2,04	26	deslig	1100	1110	1120	1130	1130	1140	1150	1150	1005
E	0,6	70	deslig	1030	1040	1060	1070	1070	1130	1140	1150	1005
F	1,95 a 2,04	30	deslig	1120	1140	1150	1160	1160	1160	1160	1170	1050
F	0,55 a 0,64	70	deslig	1060	1090	1100	1110	1120	1130	1140	1150	1050
G	1,95 a 2,04	26	deslig	1050	1080	1090	1100	1100	1120	1120	1130	1005
G	0,55 a 0,64	70	deslig	deslig	1050	1060	1070	1080	1110	1120	1130	1005
H	1,95 a 2,04	30	deslig	1090	1110	1130	1140	1150	1160	1170	1180	1005
H	0,55 a 0,64	70	deslig	deslig	1040	1050	1060	1070	1110	1120	1120	1005
I	1,55 a 1,64	24	1060	1040	1010	970	920	900	840	840	840	835
I	0,6	70	1100	1090	1060	1020	960	920	850	850	850	835
J	1,55 a 1,64	38	1150	1140	1130	1100	1060	990	920	880	880	895
J	0,55 a 0,64	70	1080	1070	1060	1020	980	940	890	880	880	895

Fonte: NTA's 17-0032, 0054, 0156, 0179, 0216, 0217 e 0231



Verifica-se que, para cada tipo de aço processado, na maior espessura, a velocidade não atinge o seu valor máximo. Já no atual limite da velocidade, 70 metros por minuto, a espessura do material é bem menor que a máxima. Entretanto, não está no limite de espessura mínima de processamento que é 0,3 mm, indicando assim, a possibilidade de se obter ganhos com o aumento da velocidade de processamento. Para confirmar esta análise, neste capítulo, foi aplicado o modelo matemático KAWASAKI (1987), juntamente com o balanço de energia deste forno.

Como se pode observar na Tabela 4.1, a temperatura da tira, em cada tipo aço, é a mesma em diferentes velocidades, sendo um requisito do processo. Portanto, uma premissa para este trabalho é a manutenção das mesmas condições de desenformamento e encharque da tira.

As condições de encharque foram determinadas com base no processo atual, considerando os tempos e temperatura atualmente praticados nas zonas 7, 8 e 9.

Ainda que, se referindo, ao tempo de permanência da tira no interior do forno, a título de exemplificação, encontram-se, os resultados de análises da influência do tempo e da temperatura na recristalização do cobre puro (REED-HILL, 1973). Suas conclusões indicam que, com maior temperatura, menor será o tempo necessário, para atingir 100% de recristalização do material e destaca-se que, uma pequena variação na temperatura gera uma redução acentuada no tempo de recristalização. Essa sensibilidade do processo de recristalização a pequenas variações de temperatura faz parecer que o metal tem uma temperatura determinada, abaixo da qual não haverá recristalização e, por essa razão, há uma tendência de se considerar a temperatura de recristalização como uma propriedade do metal e de se desprezar o tempo como variável da recristalização.

Conforme bibliografias pesquisadas em SILVA (1992) e REED-HILL (1973), uma variação de 900°C para 920°C na temperatura da tira é suficiente para atendimento ou não de suas necessidades de dureza.

Entretanto, não é o objetivo aqui, descrever o complexo processo de recristalização do aço inoxidável, mas situar o leitor sobre a influência da temperatura e da velocidade em que o material ficará exposto no interior do forno.



em menor geração de gases na exaustão, entretanto, maiores custos de produção, devido à maior aquisição de gás (GN ou GLP) para enriquecimento da mistura.

O GAF é um subproduto dos altos-fornos da própria empresa. Sendo, portanto, de baixo custo, objetiva-se a sua máxima utilização para o aquecimento dos fornos, em substituição ao GN e GLP, visto que os dois últimos são adquiridos externamente e seu custo é elevado. Embora, sabendo que PCI da mistura esta diretamente relacionada às vazões de cada gás. Neste trabalho as avaliações foram limitas a utilização do PCI do gás, obtido no levantamento real do forno.

#### **4.2.5 Aplicação do modelo matemático e balanço de energia do forno para o aço tipo A**

Através de um modelo matemático, pode-se obter a curva de aquecimento do material no interior de um forno. Este se utiliza de cálculos da transferência de calor do forno para o material, das temperaturas, velocidade de processamento, dados dimensionais da tira, comprimento do forno e propriedades térmicas do material, tais como: calor específico, condutividade térmica bem como a densidade. Seus resultados indicam a energia absorvida pelo material dentro do forno em função de sua velocidade e temperatura.

Inicialmente foi obtida a curva de temperatura, apresentada na Figura 4.3, e a energia absorvida pelo material, através do modelo matemático KAWASAKI (1987), aplicando os dados reais de uma bobina processada. Nesta curva também foram obtidos os valores de tempo e temperatura de encharque. Para a coleta das variáveis de campo foi utilizado o sistema coletor de dados de processo PIMS<sup>6</sup>, cujas características detalhadas se encontram no anexo D. O material escolhido foi o aço tipo A, com a espessura de 0,5 mm e processado na velocidade máxima atual de processamento de 70 metros por minuto. Neste caso, a energia absorvida pelo material foi de 3.131 kWh.

---

<sup>6</sup> PIMS - *Plant Information Management System*

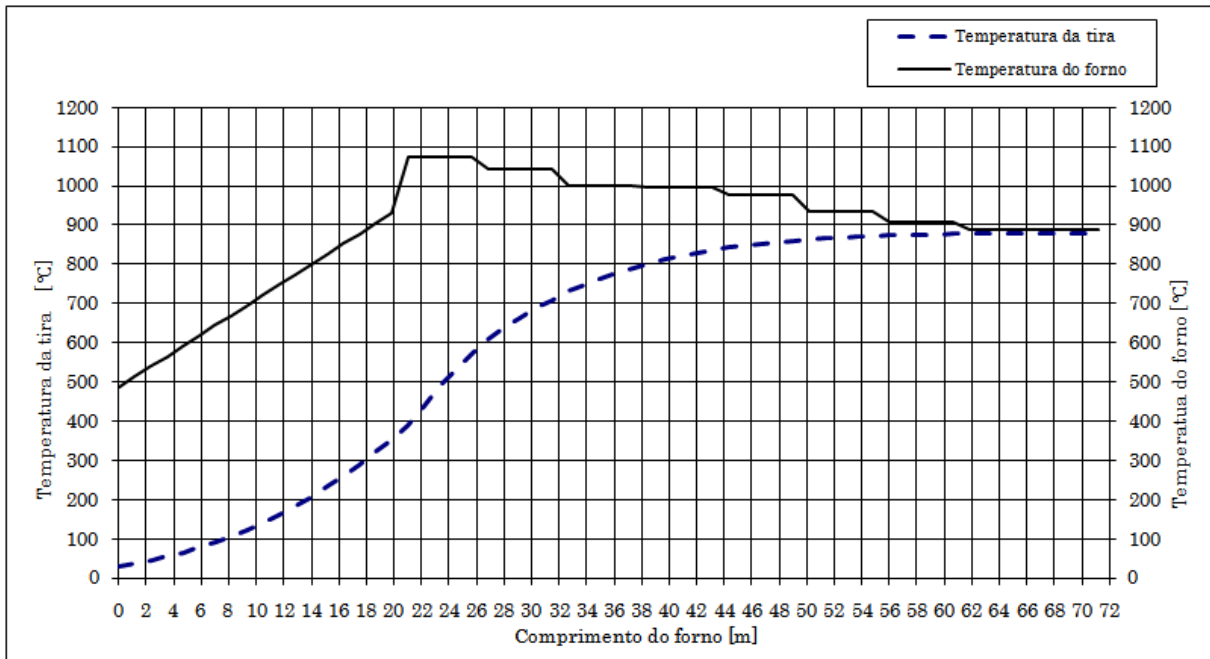


Figura 4.3 - Temperaturas do forno e material para a velocidade 70 m/min no aço tipo A.

Para determinação da entalpia do material no enforamento e no desenforamento foi utilizado o calor específico do aço, obtido através de tabelas originadas da KAWASAKI (1987). A entalpia do ar de combustão foi obtida considerando a composição do ar com 79% de  $N_2$  e 21% de  $O_2$  e a entalpia dos gases de exaustão foi obtida considerando a formação de fumaças originadas da reação de combustão, com os calores específicos de cada componente pesquisados na literatura CARVALHO JR. e MCQUAY (2007).

Com os dados coletados foi aplicada a equação (4.1) realizando o balanço de energia do forno. Os resultados, exibidos na Tabela 4.2, indicaram que a energia que sai na tira é de 3.144 kWh que representa 40,7% da energia total de saída do sistema. A utilização do forno, nesta condição, foi de 19% de GN, 56% de GAF, 57% de gás misto, 38% de ar de combustão e 43% da capacidade do exaustor de fumaças, estando o poder calorífico do gás misto no valor de  $1.591 \text{ kcal/Nm}^3$ . As perdas apresentadas são oriundas, basicamente, das paredes do forno, das aberturas (portas) de entrada e saída do forno e regiões de ligações entre um forno e outro, onde se situam os rolos carrosséis.

Tabela 4.2 - Balanço de energia do forno para o aço tipo A na velocidade de 70 metros por minuto.

Material	Espessura	Velocidade		
Aço A	0,50 mm	70,0 m/min		
<b>Entradas de energia</b>		<b>Saídas de energia</b>		
1. Combustão	6.829 kWh	1. Material	3.144 kWh	
2. Ar de comb.	875 kWh	2. Fumaças	2.388 kWh	
3. Material	13 kWh	3. Outras perdas.	2.186 kWh	
	<u>7.718 kWh</u>		<u>7.718 kWh</u>	
<b>Dados entradas</b>				
<b>A. Estação de mistura</b>	<b>Vazão</b>	<b>% de utilização</b>	<b>C. Material</b>	
GN	250,7 Nm <sup>3</sup> /h	(19%)	Massa material	20.155 kg/h
GAF	<u>3.425,0 Nm<sup>3</sup>/h</u>	(56%)	Temp. enformamento	30 °C
GM	3.675,7 Nm <sup>3</sup> /h	(57%)	Temp. desenformamento	878 °C
PCI <sub>GN</sub>	9.104 kcal/Nm <sup>3</sup>		Peso específico chapa	5 kg/m
PCI <sub>GAF</sub>	1.041 kcal/Nm <sup>3</sup>		Velocidade chapa	4.200 m/h
PCI <sub>GM</sub>	1.591 kcal/Nm <sup>3</sup>			
<b>B. Ar de combustão</b>	<b>Vazão</b>	<b>% de utilização</b>	<b>D. Gases de exaustão (fumaças)</b>	
Ar combustão	7.617 Nm <sup>3</sup> /h	(38%)	Q <sub>fumos</sub>	10.750 Nm <sup>3</sup> /h (43%)
T <sub>ar comb.</sub>			T <sub>fumos</sub>	565 °C
Fator excesso ar	1,38			

#### 4.2.6 Simulação com aumento de velocidade aplicando o modelo matemático e o balanço de energia do forno para o aço tipo A

Aumentar a velocidade da linha de recozimento e decapagem significa naturalmente diminuir o tempo em que o material estará exposto ao calor no interior do forno. Sendo assim, para que o mesmo cumpra com a sua função, que é realizar o tratamento térmico necessário, sem diminuir a sua temperatura interna, deve-se realizar o seu balanço de energia, levando em consideração o incremento de energia retirada pelo material.

Durante as simulações foi respeitado o limite de 1200 C°, referente a temperatura de projeto dos refratários, no interior do forno. Dentro deste limite, foram escalonadas as temperaturas de todas as zonas do forno de forma a obter as mesmas condições de desenformamento determinadas anteriormente.

Utilizando o modelo matemático KAWASAKI (1987) para o aço tipo A, na espessura 0,5 mm, o mesmo indicou a possibilidade de a velocidade atingir 95 metros por minuto, enquanto que a velocidade praticada atualmente nesta linha de produção é de 70 metros por minuto. Neste caso específico, a energia absorvida pelo material foi de 4.255 kWh. Na Figura 4.4 apresenta o comportamento da temperatura da tira e do forno depois de aplicado o aumento de velocidade.

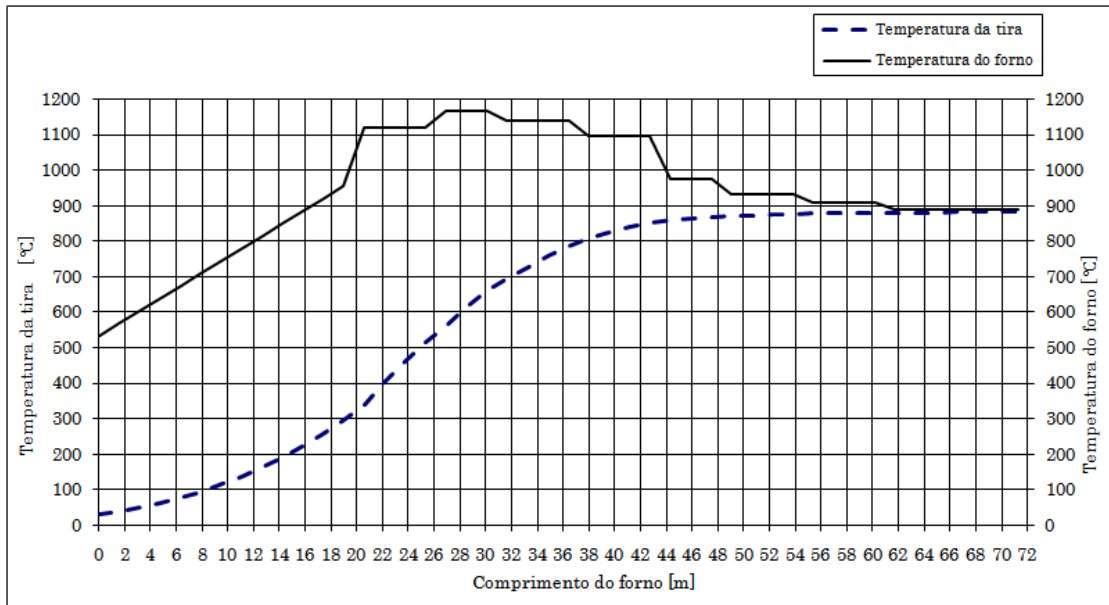


Figura 4.4 - Temperaturas do forno e material para a velocidade 95 m/min no aço tipo A.

Aplicando a simulação com o balanço de energia neste forno, para a velocidade obtida pelo modelo matemático, 95 metros por minuto, mantendo o poder calorífico da mistura, excesso de ar e temperatura da tira praticada nesta linha de produção. A utilização do forno, nesta condição, foi de 24% de GN, 71% de GAF, 72% de gás misto, 49% de ar de combustão e 55% da capacidade do exaustor de fumaças conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resultados do balanço de energia para a velocidade máxima do aço tipo A.

Material	Espessura	Velocidade
Aço A	0,50 mm	95,0 m/min
<b>Entradas de energia</b>		
1. Combustão	8.630 kWh	
2. Ar de comb.	1.106 kWh	
3. Material	18 kWh	
	<b>9.754 kWh</b>	
<b>Saidas de energia</b>		
1. Material	4.273 kWh	
2. Fumaças	3.296 kWh	
3. Outras perdas.	2.186 kWh	
	<b>9.754 kWh</b>	
<b>Dados entradas</b>		
<b>A. Estação de mistura</b>		<b>C. Material</b>
	<b>Vazão</b>	<b>% de utilização</b>
GN	316,8 Nm³/h	(24%)
GAF	4.328,3 Nm³/h	(71%)
GM	4.645,1 Nm³/h	(72%)
PCI <sub>GN</sub>	9.104 kcal/Nm³	
PCI <sub>GAF</sub>	1.041 kcal/Nm³	
PCI <sub>GM</sub>	1.591 kcal/Nm³	
<b>B. Ar de combustão</b>		<b>D. Gases de exaustão (fumaças)</b>
	<b>Vazão</b>	<b>% de utilização</b>
Ar combustão	9.626 Nm³/h	(49%)
T <sub>ar comb.</sub>		
Fator excesso ar	1,38	
	<b>Vazão</b>	<b>% de utilização</b>
Q <sub>fumos</sub>	13.585 Nm³/h	(55%)
T <sub>fumos</sub>	611 °C	

### 4.3 Decapagem eletrolítica

Durante o processamento do material no forno, uma camada de óxido de ferro mais ou menos espessa é formada sobre a superfície da tira. A decapagem é utilizada para retirar esta camada deixando, a superfície do material limpa de tais impurezas.

De acordo com NASCIMENTO e BARBOSA (2012), quanto menor o tempo de exposição e/ou menor a temperatura de recozimento do material no forno, mais fácil será a decapagem. Na condição do trabalho proposto, com o aumento da velocidade, ocorrerá um aumento na temperatura do forno, tal como mencionado no item 4.2, porém terá uma diminuição do tempo de exposição do material em seu interior.

Como descrito por NASCIMENTO e BARBOSA (2012) e IPEK, HOLM, *et al.* (2005) a qualidade da decapagem depende do potencial hidrogeniônico da mistura (pH), da densidade de corrente e do tempo de exposição do material. Com a proposta do aumento da velocidade da linha, o tempo de exposição do material será menor, tornando-se necessário uma análise da sua capacidade em decapar.

Em MORELLATO (2006) também se encontra que a qualidade da decapagem eletrolítica é influenciada pela rugosidade da superfície do material, a composição e temperatura do eletrólito, a voltagem e a densidade de corrente nos eletrodos, bem como o tempo de execução do processo. Contudo, neste trabalho será avaliada a capacidade da decapagem, levando em consideração somente a corrente por unidade de área de exposição da tira, devendo, então, ser evoluída em outros momentos a capacidade do equipamento, quanto às características do eletrólito.

O trabalho em questão traz ainda informações interessantes, como, por exemplo, os resultados encontrados em IPEK, HOLM, *et al.* (2005) demonstrando que, em decapagem com mistura ácida, para o aço recozido inoxidável duplex 2205, aumentando o tempo ou a densidade de corrente, ocorre uma diminuição quase linear no tempo total de decapagem. O efeito do tempo de decapagem, lado direito da Figura 4.5, e a redução do tempo total de decapagem, lado esquerdo da Figura 4.5, com a densidade de corrente, indicam o comportamento geral da decapagem. Assim, observa-se, que estes parâmetros podem ser ajustados, quer através do tempo ou da corrente elétrica, a fim de otimizar o processo.

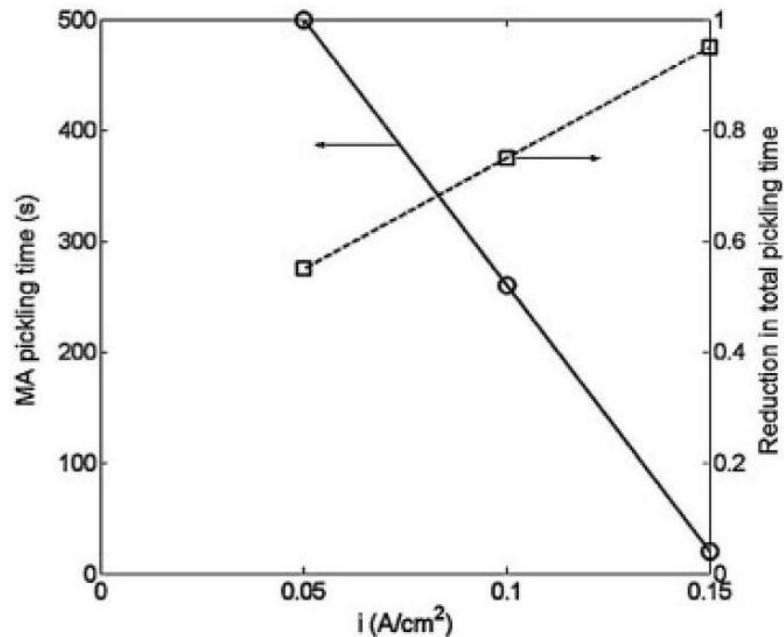


Figura 4.5 - Relação entre o tempo de exposição (a direita), corrente por área (inferior) e redução total no tempo de decapagem (a esquerda)  
 Fonte: (IPEK, HOLM, et al., 2005).

Sabe-se, através de experiências nesta linha de produção e pesquisas realizadas por NASCIMENTO e BARBOSA (2012), que a espessura do material não influencia na sua capacidade de decapar, confirmando tal afirmação, verifica-se através do sistema PIMS, que a corrente atualmente utilizada nos retificadores desta linha é a mesma para diferentes espessuras.

Tal como mencionado em IPEK, HOLM, *et al.* (2005) e NASCIMENTO e BARBOSA (2012), uma diminuição no tempo de decapagem pode ser compensado com o aumento da densidade de corrente no interior do tanque. Sendo assim, foram realizados levantamentos no sistema coletor de dados de processo PIMS, para as mais variadas velocidades de processamento, indicando que as correntes dos retificadores permanecem com os mesmos valores, variando somente conforme a gama de largura e tipo de aço.

Neste primeiro momento, foram coletados os dados de largura, corrente e velocidade de processamento para cada tipo de aço, sendo então encontrado o valor da densidade de corrente e apresentado na Tabela 4.4. O cálculo da área catódica foi realizado considerando a quantidade e largura dos eletrodos juntamente com a largura do material em processamento. Observa-se que os valores de densidade de corrente, variam de  $0,09 A/cm^2$  nos aços tipo I e J, até  $0,16 A/cm^2$  para o aço tipo A até H.



Tabela 4.4 - Densidade de corrente para os aços decapados na linha de recozimento e decapagem.

		Numero de catodos	144			
		Largura de catodos (mm)	200			
		Numero de retificadores	12			
		Comprimento da área anódico (mm)	14400			
		Velocidade [m/min]	70			
Tipo de Aço	Largura [mm]	Corrente conforme NTA [A]	Corrente total dos retificadores [A]	Área catódica [cm <sup>2</sup> ]	Densidade de corrente [A/cm <sup>2</sup> ]	Tempo de exposição [s]
A até H	1100	4100	49200	316800	0,16	12,34
	1250	4550	54600	360000	0,15	12,34
	1350	4800	57600	388800	0,15	12,34
I	1100	2300	27600	316800	0,09	12,34
	1250	2650	31800	360000	0,09	12,34
	1350	2800	33600	388800	0,09	12,34
J	1100	2500	30000	316800	0,09	12,34
	1250	2850	34200	360000	0,10	12,34
	1350	3000	36000	388800	0,09	12,34

Num segundo momento, foi calculada a capacidade de corrente máxima dos retificadores. Diante dos 5.000 A de corrente de cada retificador sendo o total de 12 retificadores, resulta na corrente máxima de 60.000 A que, na condição de largura mínima do material, 1000 mm, obtém-se 0,21 A/cm<sup>2</sup> enquanto para largura máxima, 1350 mm, obtém-se a densidade de corrente igual a 0,15 A/cm<sup>2</sup>, ambos exibidos na Tabela 4.5. Assim sendo, pode-se diminuir o tempo de exposição do material, com o aumento da velocidade, para os aços de menor largura e nos aços que exigem menor densidade de corrente, já apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.5 - Capacidade de corrente máxima dos retificadores.

Tipo de Aço	Largura [mm]	Corrente conforme NTA [A]	Corrente total dos retificadores [A]	Área catódica [cm <sup>2</sup> ]	Densidade de corrente [A/cm <sup>2</sup> ]	Tempo de exposição [s]
Capacidade	1000	5000	60000	288000	0,21	12,34
Máxima	1350	5000	60000	388800	0,15	12,34

#### 4.4 Condições durante a retirada de material

Como o material processado, nesta linha de produção, é retirado em formas de bobinas, com peso aproximado de 25 toneladas, a cada final de processamento é requerido

um tempo de paralisação da bobinadeira para a retirada da bobina, introdução da próxima ponta no mandril, antes de reiniciar o bobinamento.

Durante a paralisação citada, os acumuladores de tiras do LE2 e saída devem iniciar o seu enchimento de forma a manter a seção do processo em constante funcionamento. Nesta fase, a velocidade do LE2 diminui para 8 metros por minuto, sendo o acumulador de saída com a capacidade de acumular 30 metros de bobina possibilitará uma paralisação da bobinadeira por 3,75 minutos até o seu completo enchimento. Em paralelo, ocorre o enchimento do acumulador do LE2, que possui a capacidade de acumular 350 metros de bobina, na velocidade de 62 metros por minuto (70 m/min menos 8 m/min), representando assim, 5,65 minutos até o seu completo enchimento.

Através de acompanhamentos de campo, verificou-se que é gasto o tempo de 40 segundos para retirada da bobina processada, até a liberação da bobinadeira para iniciar o novo bobinamento.

Vale salientar que, os acumuladores de tiras da saída e LE2 também possuem a função de permitir a paralisação da seção da saída, para inspeções superficiais na tira com duração média de 30 segundos.

#### **4.5 Laminador de encruamento**

Em continuidade aos equipamentos da seção do processo encontra-se o LE2 que, de acordo com NOVAES (2010), são também conhecidos como *Skin-Pass Mill* ou *Temper Mill* e possui a finalidade de promover o encruamento no material de forma contínua.

Aplicar encruamento aos materiais é inserir capacidade aos mesmos de aumentar o limite de escoamento, em resposta à deformação. De uma forma resumida, a tensão de escoamento dos materiais é definida como a tensão característica do material, na qual o mesmo deixa o regime elástico e ingressa no regime plástico.

Para a avaliação da capacidade do LE2, foi aplicado o modelo matemático de ROBERTS (1972) que, em se tratando de modelos matemáticos para laminadores de encruamento este é consagrado no meio metalúrgico.

Do ponto de vista de ROBERTS (1972), o conjugado necessário aos rolos do laminador de encruamento, depende do diâmetro do rolo de trabalho, do coeficiente de atrito, da diferença de tração na entrada e saída do laminador, da largura, espessura e taxa de redução do material e da velocidade da tira. Assim, foi aplicado este modelo e comparado com os valores reais de uma bobina processada no LE2. Seus resultados foram expostos na Figura 4.6.

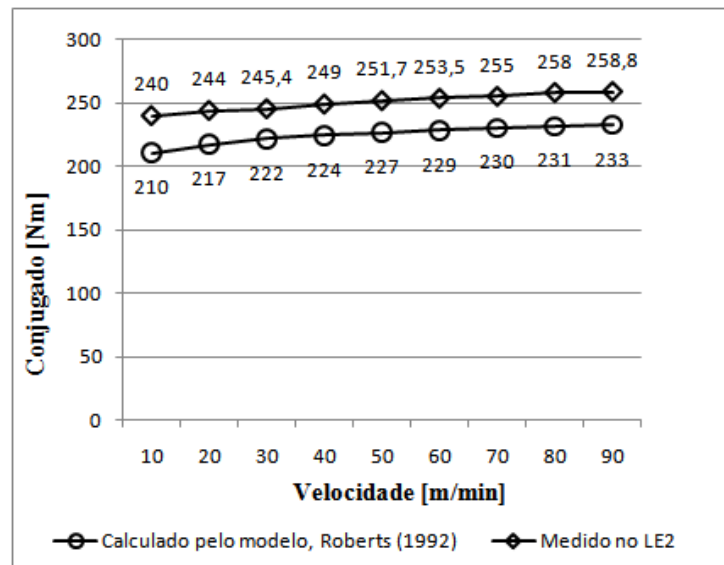


Figura 4.6 - Conjugado medido e calculado em função da velocidade da tira no LE2.

Diante dos resultados exibidos na Figura 4.6, observa-se que o conjugado calculado pelo modelo de ROBERTS (1972) apresentou o mesmo comportamento do conjugado medido no LE2. Assim, mesmo com suas simplificações o modelo apresentou aplicável neste trabalho, principalmente, para a verificação da influência do aumento da velocidade no LE2. Além disso, conclui-se que, com a variação de velocidade o conjugado exigido pelo processo de encruamento não apresenta aumento significativo. Neste contexto, a variação de 80 metros por minuto no LE2 acrescentou apenas 23 Nm o que representou 0,57% do conjugado total de seus motores.

#### 4.6 Considerações finais

Este capítulo apresentou a aplicação do modelo KAWASAKI (1987) para o forno de recozimento e na sequência foi aplicado o seu balanço de energia. Para tal, foi obedecido o limite de temperatura dos refratários do forno que é de 1200°C. Depois de aplicado a simulação do modelo e realizado o balanço de energia o forno indicou a

possibilidade de aumento da velocidade desta linha para 95 metros por minuto com as vazões estando em 24% de GN, 71% de GAF, 72% de gás misto, 49% de ar de combustão e 55% da capacidade do exaustor de fumaças.

Para a decapagem foi identificado pelas pesquisas realizadas em IPEK, HOLM, *et al.* (2005) que a sua eficiência será maior quando aumenta o tempo ou a corrente por área de exposição de material no tanque de mistura ácida. Assim para a velocidade atual de processamento foi identificado a densidade de corrente, variando entre  $0,09 \text{ A/cm}^2$  nos aços tipo I e J, até  $0,16 \text{ A/cm}^2$  para o aço tipo A até H. Sendo que para utilização de toda capacidade de corrente dos retificadores desta linha é possível obter a densidade de corrente na largura mínima do material, 1000 mm igual a  $0,21 \text{ A/cm}^2$  e na largura máxima, 1350 mm o valor de a  $0,15 \text{ A/cm}^2$ . Desta forma conclui-se que a decapagem possui um potencial de aumento da densidade de corrente na ordem de 233,3 %, principalmente para os materiais tipo I e J na espessura de 1000 mm.

No tocante ao tempo para retirada do material da linha foi verificado a capacidade dos acumuladores de tiras do LE2 e saída, e confrontado com o tempo necessário para as inspeções no material e retirada da bobina da linha. Assim, com o acumulador de tiras da saída foi obtido o tempo de 3,75 minutos na velocidade de 8 metros por minutos e no acumulador de tiras do LE2 foram obtidos 5,38 minutos na velocidade de 62 metros por minuto. Em contra partida o tempo médio de parada da bobinadeira para retirada da bobina processada e inspeções no material foi de 1,5 minutos. Portanto para o menor tempo encontrado (acumulador de tiras da saída) ainda é possível aumentar a velocidade desta linha.

No laminador de encruamento foi aplicado o modelo de ROBERTS (1972) que apresentou o mesmo comportamento do conjugado medido no LE2. Além disso, foi verificado que a variação de 80 metros por minuto na velocidade do LE2 acrescentou apenas 23 Nm representando 0,57% do conjugado total de seus motores. Desta forma conclui-se que o laminador de encruamento não apresenta como limitador da velocidade da tira nesta linha de produção.

## **5 ANÁLISES, RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1 Considerações iniciais**

Os equipamentos que constituem a linha de recozimento e decapagem, apresentados nos capítulos anteriores, se mostraram bastantes promissores para um maior aproveitamento de seu potencial, no tocante ao aumento de velocidade. Neste contexto, neste capítulo são analisados e discutidos conjuntamente os resultados pertinentes aos mesmos, no sentido de se definir qual é de fato a maior velocidade possível de acionamento da linha, tal estudo é mostrado nos itens a seguir.

### **5.2 Espessura dos materiais aplicados ao trabalho**

As espessuras dos materiais processados se encontram entre 0,3 mm e 2,5 mm, sendo que 42,7% desta produção (SIP, 2010), encontram-se na espessura abaixo de 0,64 mm. Nas análises realizadas no período de dois meses, verificou-se que 7,19% da produção total ou 16% da produção, nas espessuras abaixo de 0,64 mm, foram realizadas na velocidade de 70 metros por minuto. Diante deste volume de produção, nas espessuras inferiores a 0,64 mm, é que se pretende aplicar o aumento da velocidade.

### **5.3 Resultados das análises da velocidade, conjugado e temperatura dos motores elétricos**

Com base nos levantamentos efetuados e apresentados no item 3.6.2, observou-se que os motores elétricos já se encontram funcionando com suas rotações nos valores nominais. Assim, para o aumento de suas rotações, deverão funcionar na região de enfraquecimento de campo.

#### **Resultado da velocidade periférica do rotor**

No tocante a este quesito, tal como exposto no item 3.6.2.1, foi considerado o valor de limite da velocidade em 100 m/s para os rotores dos motores, conforme encontrado em SOBRINHO (2008). Dentro deste quesito, os primeiros motores elétricos limitadores surgiram na velocidade da linha de 159,51 metros por minuto, como exibido na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Primeiro limite de velocidade da linha conforme avaliação da velocidade periférica motores.

<b>Carcaça do Motor</b>	<b>Rotação do motor na velocidade periférica de 100 m/s [rpm]</b>	<b>Velocidade linear na tira na rotação calculada pela velocidade periférica de 100m/s [m/min]</b>
M2BA 355SMA4B3	3131	159,51

Portanto, no total de 80 motores que operam conjuntamente na condução da tira, cinco foram os primeiros limitadores da velocidade da linha, sendo que, os demais permitem a linha atingir velocidades superiores.

### Resultado da velocidade dos rolamentos dos motores

Verificando a máxima rotação possível dos motores elétricos, quanto ao limite de rotação de seus rolamentos, o primeiro limitador surge quando a velocidade da linha estiver em 166,46 metros por minuto, tal como mostrado na Tabela 5.2. Isto se deve, unicamente, ao limite de rotação imposto pelo rolamento montado no lado oposto ao acionamento do motor tamanho de carcaça 355.

Tabela 5.2 - Máxima velocidade da linha, de acordo com os tamanhos carcaça e tipos de rolamentos utilizados nos motores elétricos.

<b>Tipo de Motor</b>	<b>Rolamentos: lado acionamento e oposto acionamento</b>	<b>Velocidade linear na tira [m/min]</b>
M2BA355SMA4B3	6322/C3	175,71
	6319	166,46

### Limite de velocidade conforme norma IEC e motores especiais

Na avaliação da máxima velocidade de acordo com norma IEC-60034-1 (2004), os motores listados na Tabela 5.3 se apresentam como os primeiros limitadores. Vale ressaltar que a velocidade da entrada e saída deve ser maior que a velocidade do processo para compensar as necessidades de paralisações das mesmas, nos momentos de introduções e inspeções do material.

Tabela 5.3 - Primeiros limitadores da velocidade da linha conforme estabelecido pela norma IEC e motores especiais.

Localização	Tipo de Motor	Velocidade atual da linha [m/min]	Velocidade da linha com motor na rotação máxima IEC60034-1 e especiais [m/min]
Desbobinadeira Principal 1	M2BA 355S	90	101
Desbobinadeira Principal 2	M2BA 355S	90	101
BS2 - rolo nº02	M2BA 200ML	70	87
BS3 - rolo nº01	M2BA 200ML	70	87
BS4 - rolo nº02	M2BA 225SM	70	87
LE2 - Cilindro de Trabalho Superior	M2BA 280SM B8 B3	90	101
LE2 - Cilindro de Trabalho Inferior	M2BA 4001K B10B3	90	101
Bobinadeira Principal	M2BA 355M LCBB3	90	101

Diante do número de motores limitadores, que vão surgindo a cada nova tentativa de aumento de velocidade, tal como apresentado na Figura 5.1, observa-se que a partir de 87 metros por minuto na seção do processo e 101 metros por minuto na seção da entrada e saída, os motores encontram-se distribuídos. Assim sendo, quanto maior a velocidade da linha, mais motores limitadores vão surgindo.

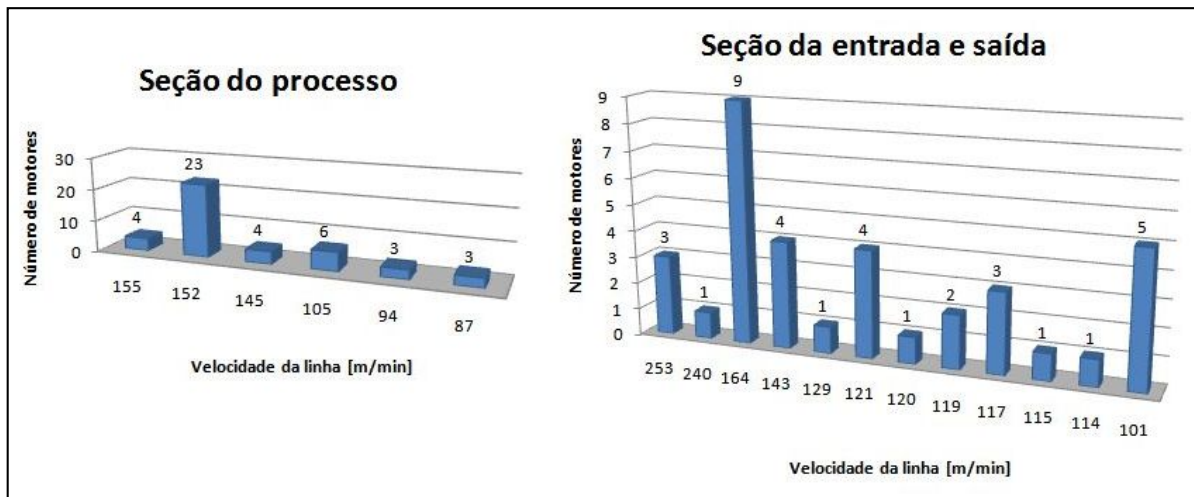


Figura 5.1 - Velocidades de processamento da linha com os respectivos número de motores limitadores.

Assim sendo, em função do critério presente na norma IEC-60034-1 (2004), a máxima velocidade da seção da entrada e saída deverá ser de 101 metros por minuto, ao passo que na seção do processo será de 87 metros por minuto, uma vez que tais limites não exige investimentos, para a substituição de motores elétricos.

### **Disponibilidade de conjugado por parte do motor**

Diante do que foi apresentado no capítulo 3, quanto ao conjugado dos motores na região de enfraquecimento de campo, observa-se pelas tabelas 3.16, 3.17 e 3.18, que os motores possuem valores de conjugado nominal e corrigidos após o enfraquecimento de campo, acima dos valores necessários para o aumento da velocidade. Isto é verdadeiro tanto pelo método do conjugado disponível pelo motor quanto pelo método da potência apresentado na Tabela 3.19, que indicou 66,7% de utilização do motor para o pior caso. Sendo assim, no tocante ao conjugado exigido aos mesmos, os motores elétricos não são limitadores da velocidade. Vale salientar que, para os rolos da unidade de desengraxe e decapagem, que possuem a função de manter a tira na linha de passe, a diferença entre o conjugado disponível e aquele necessário encontra-se ainda mais conservadora, com 9,29% de utilização para o motor, no pior caso encontrado.

### **Máxima temperatura do enrolamento**

Neste quesito, o maior valor encontrado foi de 62,7 °C na carcaça do motor do acumulador da saída (motor 49ACM10). Sabendo-se que estes foram fabricados para as classes de temperatura F (155°C) e H (180°C) (NBR-5383-1, 2002), as quais dizem a respeito ao ponto mais quente no enrolamento, conclui-se que suas temperaturas estão muito abaixo dos valores máximos toleráveis de forma que este critério não impõe qualquer restrição ao aumento da velocidade.

## **5.4 Resultados dos tempos de introdução do material**

Para a determinação do tempo disponível, para a introdução dos materiais, foi observada a condição necessária estando a seção do processo em funcionamento contínuo. As verificações tiveram início pela capacidade dos acumuladores, juntamente com o comprimento de material necessário, durante a aceleração e desaceleração em seu enchimento e esvaziamento, respectivamente.

Diante dos 280 metros de acúmulo de tiras pelo acumulador de entrada, e estando a seção do processo na velocidade de 70 metros por minuto, tem-se uma disponibilização da seção da entrada por 4 minutos. Deste tempo, deve-se subtrair 15,55 segundos, os quais representam o tempo da rampa de aceleração da entrada (que é 0,075 m/s<sup>2</sup>), resultando em 3 minutos e 44,45 segundos para introdução do material. Através dos



levantamentos de campo foram coletados e somados os tempos das etapas envolvidas na operação de introdução do material, sendo que o resultado para as desbobinadeiras 1 e 2 são apresentados na Tabela 5.4, indicando que existe a possibilidade do aumento da velocidade do processo.

Ainda com vistas à viabilidade do aumento da velocidade, foi simulada a velocidade do processo utilizando os tempos de introdução de material encontrados nas desbobinadeiras 1 e 2 (Tabela 5.4). Admitindo-se alguns atrasos durante as etapas de introdução, foi adotado como referência para as análises o tempo médio das etapas, encontrado durante os levantamentos. Como resultado, observou-se, que a velocidade da seção do processo poderá atingir 100 metros por minuto, quando analisada a desbobinadeira 1, e 116 metros por minuto no que se refere à desbobinadeira 2.

Tabela 5.4 - Resumo dos tempos de introdução e velocidade simulada sendo o comprimento do acumulador de 280 metros.

Total da etapas de introdução	Desbobinadeira 1 [min:s]	Velocidade Simulada para a seção do processo [m/min]	Desbobinadeira 2 [min:s]	Velocidade Simulada para a seção do processo [m/min]
Tempo mínimo	00:01:54	129,23	00:01:38	147,89
Tempo médio	00:02:33	100,00	00:02:08	116,83
Tempo máximo	00:04:09	63,4	00:03:44	70,15

É importante ressaltar que os tempos máximos encontrados nos levantamentos de campo (Tabela 5.4) estão superiores aos valores compatíveis com a capacidade de fornecimento de material pelo acumulador da entrada na velocidade de projeto 70 metros por minuto, no entanto, isto não caracteriza a ocorrência de interrupção do funcionamento da seção do processo, pois nem todas as etapas atingiram o tempo máximo, simultaneamente.

## 5.5 Resultados referentes à capacidade de aquecimento do forno

Para a identificação da sua máxima capacidade, foi aplicado ao forno o seu modelo matemático (KAWASAKI STEEL CORPORATION, 1987), obedecendo ao seu limite de temperatura determinado pelo refratário; na sequência, foi efetuado o seu balanço térmico.

Através do modelo matemático para o aço tipo A, com espessura de 0,5 mm, foi obtida a velocidade máxima de 95 metros por minuto. Aplicando a simulação com o balanço de energia, os resultados indicaram as vazões de 24% de GN, 71% de GAF, 72% de gás misto, 49% de ar de combustão e 55% da capacidade do exaustor de fumaças. Isto indica que as vazões do forno não atingiram seus limites máximos para o atendimento da energia requerida pelo forno, conforme apresentado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Balanço de energia do forno, na velocidade máxima.

Material	Espessura	Velocidade	
Aço A	0,50 mm	95,0 m/min	
<b>Entradas de energia</b>		<b>Saídas de energia</b>	
1. Combustão	8.630 kWh	1. Material	4.273 kWh
2. Ar de comb.	1.106 kWh	2. Fumaças	3.296 kWh
3. Material	18 kWh	3. Outras perdas.	2.186 kWh
	<b>9.754 kWh</b>		<b>9.754 kWh</b>

## 5.6 Resultados da capacidade da decapagem eletrolítica

Com o aumento da velocidade da tira, um maior valor de corrente é necessário para a correta decapagem do material. Como relatado por IPEK, HOLM, *et al.* (2005) e NASCIMENTO e BARBOSA (2012), uma diminuição no tempo de decapagem pode ser compensado com o aumento da corrente por área de exposição da tira no interior do tanque. Dessa forma, a Tabela 5.6 apresenta a comparação entre a densidade de corrente utilizada atualmente nos retificadores e a capacidade máxima admissível para esta linha de produção.

Tabela 5.6 - Densidade de corrente, utilizada e a máxima permitido pelo equipamento.

Tipo de Aço	Largura [mm]	Densidade de corrente utilizada [A/cm <sup>2</sup> ]	Capacidade máxima de densidade de corrente [A/cm <sup>2</sup> ]
A até H	1100	0,16	
	1250	0,15	
	1350	0,15	
I	1100	0,09	
	1250	0,09	
	1350	0,09	
J	1100	0,09	
	1250	0,10	
	1350	0,09	
Capacidade	1000		0,21
Máxima	1350		0,15

Os dados exibidos na Tabela 5.6, revelam que a decapagem eletrolítica possui uma capacidade maior que aquela utilizada atualmente. Todavia, para se determinar o quanto de aumento da velocidade será possível, sugere-se um experimento no qual a relação de diminuição no tempo de exposição do material no tanque seja alterada linearmente com o aumento das correntes dos retificadores. Vale ressaltar, que trabalhos similares já foram desenvolvidos por IPEK, HOLM, *et al.* (2005).

### 5.7 Resultados relativos aos tempos para retirada do material da linha

Neste caso, como demonstrado no capítulo 4, com os 350 metros de comprimento do acumulador do LE2, as paralisações da seção da saída podem ocorrer em até 5,65 minutos. Assim sendo, com os 40 segundos para a retirada de bobinas e os 60 segundos para as inspeções, os equipamentos da saída apresentam características suficientes para o objetivo proposto neste trabalho.

Além da verificação supracitada, foi realizada uma simulação para identificar a velocidade máxima que se pode atingir, de acordo com o tempo disponível em função do comprimento do acumulador do LE2 e os tempos necessários para inspeções e retirada de bobinas. Assim, conforme exibido na Tabela 5.7, observou-se que a velocidade do processo poderá chegar até 210 metros por minuto, no que se refere a este equipamento.

Tabela 5.7 - Simulado da velocidade do acumulador de tiras do LE2.

	Comprimento [m]	Tempo necessário para retirada de bobinas [s]	Tempo necessário para inspeções [s]	Velocidade Simulada [m/min]
Acumulador do LE	350	40	60	210

### 5.8 Resultados referentes às potências dos redutores de velocidade

Tendo como base o que foi apresentado no capítulo 3, quando do estudo dos redutores de velocidade, neste momento serão analisados os resultados de suas capacidades, obtidas através dos dois métodos de avaliação: (i) capacidade mecânica e térmica, de acordo com as referências de DAVID BROWN RADICON (2011) e (ii) potência, dependente do conjugado de aceleração e dobramento da tira, tal como mencionado nas referências de RELIANCE (19--?).

No primeiro método, a capacidade requerida pela carga já se encontra acima dos valores suportáveis pelos redutores citados na Tabela 5.8, quando analisados pela potência do redutor corrigida pelo fator de serviço ou até mesmo pela potência nominal do redutor na velocidade atual de 90 metros por minuto na entrada e saída e 70 metros por minuto na seção de processo.

Tabela 5.8 - Relação dos redutores que não atendem a linha, pelo critério da capacidade mecânica na velocidade atual.

Localização	Fabricante do redutor	Velocidade [m/min]	Força máxima de referência na linha de produção [kgf]	Potência nominal do redutor [kW]	( $P_r$ ) Potência requerida aos redutores conforme método da capacidade mecânica [kW]	( $P_c$ ) Potência do redutor corrigida pelo fator de serviço [kW]
Desbobinadeira Principal 1	David Brown Radicon	90	-2100	35	46,34	31,50
Desbobinadeira Principal 2	David Brown Radicon	90	-2100	35	46,34	31,50
Acumulador do LE2	David Brown Radicon	70	12000	50	49,03	45,00
BS5 - rolo nº01	David Brown Radicon	90	-17720	30	30,21	27,00
BS5 - rolo nº02	David Brown Radicon	90	(**)	45	45,29	40,50
BS5 - rolo nº04	David Brown Radicon	90	(**)	210	221,56	189,00

(\*\*) A força necessária é dividida entre os rolos do mesmo BS.

Dessa forma, no total de 80 redutores, seis redutores se encontram com as suas potências nominais abaixo dos valores necessários para o processamento, mesmo operando nas condições atuais. Vale ressaltar que, pelo método da capacidade térmica nenhum redutor apresentou potência inferior à requerida pela linha. Contudo, a indicação de subdimensionamento em apenas um dos critérios já sugere a substituição dos mesmos.

No segundo método de avaliação, foram encontrados os mesmos redutores do BS5, já identificados como subdimensionados no primeiro método. Todavia, foi aplicado um balanço de carga diferenciado para seus rolos. Assim, foi realizada uma equalização na potência utilizada pelos rolos, chegando a obter 103,3% de potência em cada redutor, o que mostra que ainda assim se encontram subdimensionados, conforme apresentado na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Resultado das potências dos redutores com equalização de carga no BS5 e coeficiente de atrito necessário entre a tira e rolo, nas velocidades de 70 e 90 metros por minuto na linha.

Rolo Tensor	Força de tração na entrada do BS [kgf]	Força de tração na saída do BS [kgf]		Potência necessária total [kW]	Potência nominal do redutor [kW]	Potência utilizada pelo redutor [%]	Coeficiente de atrito necessário [ $\mu$ ]	Velocidade da linha [m/min]	Divisão de carga sobre os redutores [%]
<b>BS 1</b>	2400	1442	2º rolo	13,64	25	54,6	0,07	90	50
			<b>1º rolo</b>	13,62	25	54,5	0,05		50
<b>BS 2</b>	2160	388	2º rolo	13,19	25	52,8	0,17	70	50
			<b>1º rolo</b>	23,46	25	93,8	<b>0,25</b>		50
<b>BS 3</b>	386	1678	2º rolo	16,54	25	66,2	0,16	70	50
			<b>1º rolo</b>	9,30	25	37,2	0,20		50
<b>BS 4</b>	1119	3121	1º rolo	19,78	25	79,1	0,12	70	50
			2º rolo	19,77	25	79,1	0,13		50
<b>BS 5</b>	2080	19803	1º rolo	30,98	30	<b>103,3</b>	0,12	90	8,0
			2º rolo	46,49	45	<b>103,3</b>	0,12		12,0
			3º rolo	92,95	90	<b>103,3</b>	0,12		24,0
			<b>4º rolo</b>	216,96	210	<b>103,3</b>	0,18		56,0
<b>BS 6</b>	23400	2445	<b>1º rolo</b>	215,10	245	87,8	0,14	90	47,6
			2º rolo	140,09	160	87,6	0,20		31,1
<b>BS 7</b>			1º rolo	61,47	70	87,8	0,09		13,6
			2º rolo	35,24	40	88,1	0,11		7,8
<b>BS 8</b>	3655	2399	1º rolo	14,47	25	57,9	0,05	90	50
			2º rolo	14,49	25	57,9	0,06		50

Conforme mostra a Tabela 5.9, no que se refere ao coeficiente de atrito necessário entre o rolo e a tira para que atinja força de tração solicitada na linha, o maior valor encontrado foi no rolo 1 do BS2 com  $\mu = 0,25$ . Comparando o resultado com os valores encontrados na Tabela 3.1, para o tipo de rolo empregado nesta linha, borracha (*rubber*), o coeficiente de atrito máximo admissível esta entre 0,25 e 0,28, conclui-se que este está próximo da ocorrência de um deslizamento da tira sobre o rolo, sugerindo também a realização de balanço de carga entre os dois rolos do BS2.

Diante da possibilidade de aumento da velocidade desta linha para 101 metros por minuto na entrada e saída e 87 metros por minuto na seção de processo, outros redutores devem ser repotencializados ou substituídos os quais são apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Relação dos redutores que não atendem a linha, pelo critério da capacidade mecânica na velocidade proposta para o primeiro limitador.

Localização	Fabricante do redutor	Velocidade [m/min]	Força máxima de referência na linha de produção [kgf]	Potência nominal do redutor [kW]	$(P_r)$	$(P_c)$
					Potência requerida aos redutores conforme método da capacidade mecânica [kW]	Potência do redutor corrigida pelo fator de serviço [kW]
Desbobinadeira Principal 1	David Brown Radicon	101	-2100	35	52,00	31,50
Desbobinadeira Principal 2	David Brown Radicon	101	-2100	35	52,00	31,50
BS4 - rolo nº01	David Brown Radicon	87	-2001	25	28,60	25,00
Acumulador do LE2	David Brown Radicon	87	12000	50	60,94	45,00
BS5 - rolo nº01	David Brown Radicon	101	-17720	30	33,90	27,00
BS5 - rolo nº02	David Brown Radicon	101	(**)	45	50,83	40,50
BS5 - rolo nº04	David Brown Radicon	101	(**)	210	248,64	189,00
BS6 - rolo nº01	David Brown Radicon	101	20963	245	235,32	220,50
BS6 - rolo nº02	David Brown Radicon	101	(**)	160	153,25	144,00
BS7 - rolo nº01	David Brown Radicon	101	(**)	70	67,23	63,00
BS7 - rolo nº02	David Brown Radicon	101	(**)	40	38,56	36,00

(\*\*) A força necessária é dividida entre os rolos do mesmo BS.

Com as análises dos redutores na velocidade do primeiro limitador, no total de 80 redutores, onze se encontram com as suas potências nominais abaixo dos valores necessários para o processamento. Vale ressaltar que, pelo método da capacidade térmica nenhum redutor apresentou potência inferior à requerida pela linha.

No tocante aos redutores de velocidade, os resultados indicaram a existência de subdimensionamentos tanto pelo primeiro cálculo realizado através do método da capacidade mecânica, quanto pelo segundo método desenvolvido conforme referências encontradas em RELIANCE (19--?), que utiliza o conjugado de aceleração e dobramento da tira durante as análises. Sugerindo assim, a substituição dos redutores indicado na Tabela 5.10 para implantar um aumento de velocidade nesta linha.

Diante das análises já realizadas, quanto aos valores limites da velocidade de cada equipamento, a Tabela 5.11 mostra o seu resumo.

Tabela 5.11 - Resumo das velocidades de cada limitador.

Equipamento / condição	Seção de entrada [m/min]	Seção de processo [m/min]	Seção de saída [m/min]
capacidade periférica	159,51	159,51	159,51
Motores pela capacidade dos rolamentos	158,73	158,73	158,73
capacidade conforme a norma IEC	101	87	101
Introdução do material		116,83	
Forno para recozimento		95	
Retirada do material		210	

Diante do exposto na Tabela 5.11, o primeiro limitador em destaque, foram os motores analisados pelos limites encontrados na norma IEC, com os valores de 101 metros por minuto na seção da entrada e saída e 87 metros por minuto na seção do processo. Assim, foram analisadas as possibilidades de realocação e o custo de aquisição e implantação dos redutores para atingimento deste limitador. Através da Tabela 5.12, observa-se que, dois redutores podem ser realocados e nove devem ser adquiridos. Ao confrontar o custo do investimento necessário para aquisição dos redutores somados ao custo para implantação do projeto com o ganho de disponibilidade de produção referente ao aumento da velocidade levando em consideração a margem de contribuição deste equipamento chega-se ao retorno do investimento em 5,74 meses.

Tabela 5.12 - Redutores para adquirir e reposicionar em outro local da linha para o aumento da velocidade.

Localização	( $P_r$ ) Potência requerida aos redutores conforme método da capacidade mecânica [kW]	Tipo de Redutor	Taxa de redução do Redutor [ $\lambda$ ]	( $P_c$ ) Potência do redutor corrigida pelo fator de serviço [kW]	Situação para o Redutor
Desbobinadeira Principal 1	52,00	C.A.P.	37,11	31,50	Adquirir
Desbobinadeira Principal 2	52,00	C.A.P.	37,11	31,50	Adquirir
BS4 - rolo nº01	28,60	H3 225	80,92	25,00	Adquirir
Acumulador do LE2	60,94	0,00	71,34	45,00	Adquirir
BS5 - rolo nº01	33,90	H3 225	62,94	27,00	Utilizar redutor disponibilizado pelo BS7 - rolo nº02
BS5 - rolo nº02	50,83	H3 250	63,61	40,50	Adquirir
BS5 - rolo nº04	248,64	H3 400	64,75	189,00	Adquirir
BS6 - rolo nº01	235,32	B3 450	63,29	220,50	Adquirir
BS6 - rolo nº02	153,25	H3 400	64,75	144,00	Utilizar redutor disponibilizado pelo BS5 - rolo nº04
BS7 - rolo nº01	67,23	H3 280	65,02	63,00	Adquirir
BS7 - rolo nº02	38,56	H3 225	62,94	36,00	Adquirir

## 5.9 Resultados referentes aos controles dos conjuntos rotativos

Para os BSs, o controle atual nem sempre garante o balanço de cargas entre os motores mestre e escravos. Seus limites de potência podem ser atingidos sem transferir força de tração na tira, no lado de entrada ou saída do mesmo. Isto ocorre somente na tira entre os rolos do respectivo BS. Para evitar tal inconveniência e manter a força de tração necessária à tira, recomenda-se liberar a atuação do controle de conjugado dos motores, através da referência de velocidade da linha, de acordo com o apresentado na Figura 3.9.

Por sua vez com nos rolos da unidade de desengraxe tal inconveniência também ocorre, como observado através da Figura 3.11 (a), com o conjugado medido no motor exibindo valores elevados diante do conjugado necessário para suportar a tira na linha de passe. Para este caso, sugere-se a criação de alarmes no sistema de supervisão do equipamento, informando a existência de conjugado elevado nos motores. Assim, detectando que o conjugado requerido ao motor seja superior ao conjugado das perdas, acelerações e desacelerações, uma inspeção minuciosa no conjunto deve ser realizada com objetivo de detectar agarramentos mecânicos e/ou diferenças elevadas, no valor diâmetro real do rolo com o valor existente na malha de controle do PLC. Outra solução a ser analisada é alterar a metodologia de controle de tais conjuntos adotando o método de janela, onde a referência de velocidade para o rolo é a velocidade real do mesmo.

Avaliando os rolos da unidade de desengraxe, que possuem a função de manter a tira na linha de passe, foi observado um conjugado elevado durante a sua operação como apresentado na Figura 3.11. Para o caso em questão, sugere-se a criação de um alarme no sistema supervisório informando da existência de conjugado elevado no motor. Caso o conjugado requerido pelo motor seja superior ao conjugado de perdas e aceleração, uma inspeção minuciosa no conjunto deve ser realizada, com o objetivo de detectar agarramentos mecânicos e/ou diferenças elevadas no diâmetro inserido no programa com o diâmetro real do rolo que conduz a tira. Outra solução a ser analisada é alterar a metodologia de controle de tais conjuntos, adotando o método de janela, onde a referência de velocidade para o rolo é a velocidade real do mesmo.

Diante dos levantamentos efetuados no item 3.8.3, quanto ao controle dos motores elétricos da unidade de desengraxe e decapagem, recomenda-se que sejam refinados. Ao passo que, pelo exposto no item 3.8.4, referente ao controle dos acumuladores, somente a abertura dos limites das referências, mantendo os limites de



conjugado dos motores no conversor, é suficiente para permitir o aumento da velocidade. Por sua vez, conforme exposto no item 3.8.5, quanto ao controle das desbobinadeira e bobinadeira, para o aumento da velocidade, dispensam-se melhorias.

## 5.10 Considerações finais

Este capítulo apresentou uma visão geral relacionado a limitação da velocidade da tira aplicado pelos equipamentos desta linha, assim pode-se destacar:

- A velocidade dos motores indicou um limite de 87 metros por minuto na seção do processo e 101 metros por minuto na seção da entrada e saída, quando avaliadas conforme limites contidos na norma IEC;
- O conjugado dos motores não apresentou limitações, mesmo depois de aplicado o enfraquecimento de campo, para atingir a velocidade máxima contida na norma IEC;
- Quanto aos redutores de velocidade seis deles já se apresentam subdimensionados ainda na velocidade atual desta linha, portanto para um incremento na velocidade da mesma se faz necessário a substituição de onze redutores;
- Os tempos para introdução do material permitem a velocidade de 116,8 metros por minuto na linha;
- O forno de recozimento permite a velocidade de até 95 metros por minuto no processo;
- A decapagem eletrolítica indicou um potencial de densidade de corrente de 0,21 A/cm<sup>2</sup> para largura de 1000 mm e 0,15 A/cm<sup>2</sup> para largura de 1350 mm, enquanto que atualmente é utilizado apenas 0,09 A/cm<sup>2</sup> para os aços tipo I e J especificamente, nesse contexto é sugerido um experimento para identificar o possível aumento da velocidade;
- Um aumento de velocidade no laminador de encruamento não representa significativa variação em seu conjugado. A variação de 80 metros por minuto acrescentou em 23 Nm no LE2 representando 0,57% do conjugado total de seus motores. Assim o laminador de encruamento não apresenta ser o limitador de velocidade desta linha;
- Os tempos para retirada do material da linha permitem a velocidade de até 210 metros por minuto.

## 6 CONCLUSÕES

Foi desenvolvida uma análise de cada conjunto da linha de recozimento e decapagem objetivando a identificação de sua capacidade para um aumento da velocidade, preservando os limitadores mecânicos, elétricos e a qualidade do produto processado.

Quanto ao conjugado dos motores elétricos responsáveis em conduzir e tracionar a tira, não foi encontrado nenhuma limitação. Mas, no tocante à sua rotação máxima, de acordo com a norma em que foram fabricados, IEC-60034-1 (2004), podem-se citar os primeiros limitadores, na seção da entrada e saída com 101 metros por minuto como sendo as desbobinadeiras e bobinadeira principais além dos motores do LE2 e na seção do processo com 87 metros por minuto os motores dos BS2 (rolo 2), BS3 (rolo 1) e BS4 (rolo 2).

Quanto ao tempo necessário para introdução de material, o acumulador de entrada indicou ser capaz de manter a seção do processo funcionando na velocidade de até 100 metros por minuto. Por outro lado, quanto ao tempo necessário para a retirada do material, o acumulador de saída e LE2 são capazes de manter o funcionamento desta linha de produção na velocidade de até 210 metros por minuto.

No tocante ao forno de recozimento, as simulações indicaram, através do modelo matemático e balanço de energia, a capacidade da linha atingir até 95 metros por minuto. Já os equipamentos da decapagem, apesar de não ser identificado um valor de aumento da velocidade, mostram que o padrão atual de densidade de corrente, é igual a  $0,16 \text{ A/cm}^2$  e que o mesmo possui capacidade de atingir até  $0,21 \text{ A/cm}^2$ , indicando um aumento em 31,25 % de densidade de corrente.

As piores condições encontradas se referem aos redutores, que na velocidade atual de 70 metros por minuto, já se apresentam subdimensionados no quesito capacidade de potência. Sendo que, para se atingir a velocidade do primeiro motor limitador, será necessário o reposicionamento de dois redutores e aquisição de nove.

Diante do potencial instalado, do imenso retorno financeiro que se pode obter e estando somente os redutores indicando limitações, conclui-se que um investimento nesta área poderá trazer grandes resultados para a empresa.

Objetivando-se dar continuidade e enriquecer as informações apresentadas neste trabalho, listam-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- 1- Realizar um estudo relacionado ao aumento de disponibilidade desta linha frente ao investimento necessário para implantação do projeto;
- 2- Avaliar o programa do PLC identificando os locais necessários de alteração, ajustes nos ganhos dos reguladores ou mesmo na própria estratégia de controle das máquinas para implantação do trabalho;
- 3- Realizar análises referentes às condições atuais dos rolamentos dos motores elétricos, objetivando identificar as suas condições atuais de funcionamento, através de espectro de vibração;
- 4- Sabendo-se que, a temperatura do material no forno possui influência direta na formação de óxido sobre a tira. Assim, sugere um estudo relacionado a temperatura necessária para se processar, contribuindo, então, com menor tempo de decapagem, além do ganho no consumo de energia no forno e na decapagem;
- 5- Determinar o menor valor de PCI para o gás misto, objetivando o maior aproveitamento do gás de alto-forno, o qual possui custo baixo para a Aperam.
- 6- Diante do aumento da velocidade, maiores desgastes, quebras, poderão ocorrer nos equipamentos, assim sugere uma análise deste impacto na disponibilidade da linha de produção.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB MOTORS AND GENERATORS. **Low voltage General performance IE2 high efficiency motors**. ABB. São Paulo. 2011.

ASEA BROWN BOVERI. **Anneal and pickle line, Automation concept document for the combined anneal and pickle line, electrical Project specification**. ABB. São Paulo. 1996.

ASEA BROWN BOVERI. **Controle dos Acionamentos, Flat Rolling Mills and Processing Lines, 3AD G 4 0031**. ABB Brasil. Osasco - SP. 1996.

ATAÍDE, A. C. **Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para avaliação da capacidade dos mordentes de mandris de bobinadeira de laminadores a frio tipo Sendzimir**. UFMG. Belo Horizonte-MG, p. 104p. 2010.

CARVALHO JR., J. A.; MCQUAY, M. Q. **Princípios de Combustão Aplicada**. Florianópolis: UFSC, 2007.

CASADEI, D. et al. Performance Analysis of a Speed-Sensorless Induction Motor Drive Based on a Constant-Switching-Frequency DTC Scheme. **IEEE- Transactions on industry applications**, Vol. 39, n. 2, 2003.

CONFOR. Queima com eficiência. **Site da Confor**, 2011. Disponível em: <[http://www.engenhariatermica.eng.br/catalogos/reducao\\_do\\_consumo\\_de\\_combustivel\\_em\\_fornos\\_e\\_caldeiras.pdf](http://www.engenhariatermica.eng.br/catalogos/reducao_do_consumo_de_combustivel_em_fornos_e_caldeiras.pdf)>. Acesso em: 20 Agosto 2011.

CÔRTEZ, P. E. F. **Desenvolvimento de Acabamento Rolled-On em Aço Inoxidável**. UFMG. Belo Horizonte, p. 126. 2009.

CUNHA, A. F. D. et al. **Aspectos Técnicos da utilização da Carepa gerada em processos siderúrgicos e tratada por desagregação ultra-sônica**. Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais - Internacional. Vitória: ABM. 2006. p. 36.

DAVID BROWN RADICON. **Series H Industrial Gearbox**. Huddersfield, Reino Unido. 2011. (Industrial Gearbox CH1.00GBD0111).

DREVER SYSTEMS. **FUNTIONAL ANALYSIS - ACESITA RB4**. Drever Company. Belgica, p. 131. 1996.

G.C.TURNER. **The Design and Application of Bridles for Process Lines**. [S.l.]: Iron and Steel Engineer Year Book, 1965. 211-218 p.

GASNET. Gas Natural. **GasNet - O site do gas natural**, 2011. Disponível em: <[http://www.gasnet.com.br/novo\\_gasnatural/combust\\_completo.asp#introd](http://www.gasnet.com.br/novo_gasnatural/combust_completo.asp#introd)>. Acesso em: 03 set. 2011.

GILL, W.; CARVALHO, J. A.; BASTOS-NETTO, D. **Termodinâmica da combustão**. INPE-4244-RPI/175. ed. São José dos Campos.: Instituto Nacional de Pesquisas, 1987.

GOMES, L. C. **Acionamento vetorial de motores de indução trifásicos com enfraquecimento de campo e maximização do conjugado por ampére**. UFU. Uberlândia, p. 180. 2008.

GUIMARÃES, S. R. **Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para previsão de vida de eixos de mandris de bobinadeiras de laminação a frio submetidos a danos acumulados por fadiga**. UFMG. Belo Horizonte - MG, p. 126p. 2009.

H Aidong, Y.; Babak, F. Maximum Force/Ampere Control of Linear Induction Motor Drives in Field Weakening Region. **IEEE**, Janeiro 2009. 592-597.

HEILIGENSTAEDT, W. **Thermique appliquée aux fours industriels**. Paris: Dunod, v. 1, 1971.

IEC-60034-1. **Rotation electrical machines - Part 1: Rating and Performance**. Geneva, Switzerland. 2004. (ISBN 2-8318-7455-6).

IPEK, N. et al. Electrolytic pickling of duplex stainless steel. **Materials and Corrosion**, 2005. 521-532.

JUNIOR, J. A. D. C.; MACQUAY, M. Q. **Princípios da Combustão Aplicada**. Florianópolis: UFSC, 2007.

KAWASAKI STEEL CORPORATION. **Análise da temperatura e velocidade do forno da RB4**. Acesita S. A. Timóteo. 1987.

KERAMCHEMIE GMBH. **Mathematical Model & Acid Management, RB4, Acesita**. KCH. Frankfurt, Alemanha. 1997.

KIN, S.-H.; SUL, S.-K. Maximum Torque Control of an Induction Machine in the Field Weakening Region. **IEEE - Transactions on Industry Applications**, Vol. 31, July/August 1995. pp 787 - 794.

LAMEIRAS, M. S. **Simulação de um Acionamento de Motor de Indução Alimentado em Corrente por Inversor Transistorizado**. UFMG. Belo Horizonte. 1987.

MOREIRA, J. G. D. S. et al. **Lógica de controle utilizando três combustíveis na estação de mistura do forno de reaquecimento da laminação de perfis gerdau açominas**. XI Seminário de Automação de Processos da ABM. Porto Alegre: ABM. 2006. p. 12.

MORELLATO, E. F. **Decapagem & Passivação de Aço Inoxidável**. Grupo Humma. São Paulo. 2006.

MURPHY, J. M. D.; TURNBULL, F. G. **Power Electronic Control Of AC Motores**. England: Pergamon Press, 1989.

NASCIMENTO, A. K. D.; BARBOSA, R. P. **Pickling of High Chromium Alloys - Duplex Grade**. Aperam. Timóteo. 2012.

NBR-5383-1. **Máquinas elétricas girantes - Parte 1: Motores de Indução trifásicos - Ensaios**. Rio de Janeiro: ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.

NOVAES, G. D. O. **Modelagem e Controle de Velocidade e Tensão de um Laminador de Encruamento**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 251p. 2010.

PERRY, R. E.; CHILTON, C. H. **Chemical Engineers' Handbook**. New York: McGraw-Hill, 1978.

REED-HILL, R. E. **Princípios de Metalurgia Física**. 2ª Edição. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara dois S. A., 1973.

RELIANCE. **Mechanical and electrical considerations in the application of bridles to strip processing**. [S.l.]. 19--?

ROBERTS, W. L. An Approximate Theory of Temper Rolling. **Iron and steel Engineer**, 1972. p 56-68.

SAUER, I. L. PROCESSOS TERMICOS. **Slideshare**, 2008. Disponível em: <<http://www.slideshare.net/ildosauerenergia/aula-8a-parte-3-3008-presentation>>. Acesso em: 04 set. 2011.

SCHRÖDER, K. H. **A basic understanding of the mechanics of rolling mill rolls**. Gateshead, UK. 2003.

SEW. **Seleção de Acionamentos Métodos de Cálculos e Exemplos, BR\_10523801**. SEW. Guarulhos, SP. 2007.

SIEMENS. **Motex Geared Motors**. Siemens AG Industry Sector Drive Technologies. Erlangen, Germany, p. 969. 2008. (Catalog D 87.1).

SILVA, J. N. D. **Tratamento Térmico e Decapagem dos Aços Inoxidáveis**. Acesita. Timóteo, p. 45. 1992. (IQ/IQM-I-801 / 303979).

SILVA, M. A. D. **Avaliação de parâmetros técnicos e econômicos na substituição de motores de indução trifásicos de 1CV a 10 CV**. UFMG. Belo Horizonte. 2009.

SIP. **Sistema de Informação de Processo, Versão 1.0.0, 25/05/2010**. Aperam. Timóteo. 2010.

SKF. Rolamentos rígidos de uma carreira de esferas. **SKF Group Headquarters**, 2012. Disponível em: <[http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=pt&newlink=1\\_1\\_1](http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=pt&newlink=1_1_1)>. Acesso em: Janeiro 2012.

SOBRINHO, A. P. **Critérios de projeto e construção de motores de indução trifásicos de alta rotação**. UFSC. Florianópolis, p. 133p. 2008.

TAINER, T. F.; P.JEKIELEK, S.; E.NEMURA, R. Process Line Application Engineer. **TMEIC**, Virginia, USA, 2011. Disponível em: <[http://www.tmge.com/upload/library\\_docs/english/ProcessLines-SYSAPRPL\\_1159879450.pdf](http://www.tmge.com/upload/library_docs/english/ProcessLines-SYSAPRPL_1159879450.pdf)>. Acesso em: 27 nov. 2011.

USBERCO, J.; SALVADOR, E. **Química Volume 2 Físico-Química**. SP: Saraiva, 2009.

## 8 ANEXO A

### A.1 Tabelas para cálculo de redutores DAVID BROWN

Reprodução das informações encontradas nas páginas 6, 8 e 9 da (DAVID BROWN RADICON, 2011)

Tabela A 1 - Fator de serviço mecânico ( $F_m$ ).

Prime mover	Duration of service-hrs per day	Load classification-driven machine		
		Uniform	Moderate Shock	Heavy Shock
Electric motor, steam turbine or hydraulic motor	Under 3	0.80	1.00	1.50
	3 to 10	1.00	1.25	1.75
	Over 10	1.25	1.50	2.00
Multi-cylinder internal combustion engine	Under 3	1.00	1.25	1.75
	3 to 10	1.25	1.50	2.00
	Over 10	1.50	1.75	2.25
Single cylinder internal combustion engine	Under 3	1.25	1.50	2.00
	3 to 10	1.50	1.75	2.25
	Over 10	1.75	2.00	2.50

Tabela A 2 - Fator numero de partidas ( $F_s$ ).

**Table 3. Number of Starts Factor ( $F_s$ )**

Start / Stops per hour (1)	Up to 1	3	5	10	20	40	60	100
Unidirectional	1.0	0.90	0.85	0.77	0.70	0.64	0.59	0.55
Reversing	0.71	0.65	0.61	0.55	0.50	0.46	0.42	0.39

Note: (1) Intermediate values are obtained by linear interpolation

Tabela A 3 - Fator de funcionamento intermitente ( $F_d$ ).

**Table 5. Intermittent Duty Factor ( $F_d$ ) (1)**

Number of Reductions	% Running time per hour							
	10	25	50	60	70	80	90	100
3	2.24	1.91	1.50	1.36	1.27	1.18	1.09	1.00
2	1.66	1.51	1.31	1.24	1.18	1.12	1.07	1.00
1	1.24	1.14	1.03	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabela A 4 - Fator de ajuste da temperatura ambiente (Fa).

Table 4. Ambient Temperature Adjustment Factor (Fa)(1)

Unit Type	Nominal Ratios Covered		Cooling Type	Ambient Temperature °C								
	From	To Including		-20	-10	0	10	20	30	40	50	
H1	1.22	2.25	No additional cooling	2.33	2.00	1.67	1.33	1.00	0.67	0.33	0	
H1	2.49	3.05	No additional cooling	2.0	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75	0.5	0.25	
	1.22	1.66	Fan(s) or cooling coil									
H2	5.60	8.40	No additional cooling	1.80	1.60	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	
B2	5.60	9.30	No additional cooling									
H1	3.38	5.06	No additional cooling	1.67	1.50	1.33	1.17	1.00	0.83	0.67	0.50	
	1.84	2.49	Fan(s) or cooling coil									
H2	9.30	25.6	No additional cooling	1.57	1.43	1.29	1.14	1.00	0.86	0.71	0.57	
	5.60	9.30	Fan(s) or cooling coil									
H3	25.6	38.4	No additional cooling	1.57	1.43	1.29	1.14	1.00	0.86	0.71	0.57	
	25.6	28.4	Fan(s) or cooling coil									
B2	10.3	18.9	No additional cooling	1.57	1.43	1.29	1.14	1.00	0.86	0.71	0.57	
	5.06	10.3	Fan(s) or cooling coil									
B3	14	31.4	No additional cooling	1.57	1.43	1.29	1.14	1.00	0.86	0.71	0.57	
	14	23.2	Fan(s) or cooling coil									
H1	2.49	5.06	Fan(s) or cooling coil	1.57	1.43	1.29	1.14	1.00	0.86	0.71	0.57	
	1.22	2.25	Fan(s) and cooling coil									
H2	10.3	25.6	Fan(s) or cooling coil	1.57	1.43	1.29	1.14	1.00	0.86	0.71	0.57	
	5.60	10.3	Fan(s) and cooling coil									
H3	42.5	63.8	No additional cooling	1.57	1.43	1.29	1.14	1.00	0.86	0.71	0.57	
	31.4	52.1	Fan(s) or cooling coil									
	25.6	42.5	Fan(s) and cooling coil	1.57	1.43	1.29	1.14	1.00	0.86	0.71	0.57	
B2	11.4	18.9	Fan(s) or cooling coil									
	5.06	11.4	Fan(s) and cooling coil	1.57	1.43	1.29	1.14	1.00	0.86	0.71	0.57	
B3	34.7	63.8	No additional cooling									
	25.6	47.1	Fan(s) or cooling coil	1.57	1.43	1.29	1.14	1.00	0.86	0.71	0.57	
	14.0	34.7	Fan(s) and cooling coil									
H1	2.49	5.06	Fan(s) and cooling coil	1.57	1.43	1.29	1.14	1.00	0.86	0.71	0.57	
H2	11.4	25.6	Fan(s) and cooling coil									
H3	70.6	130	No additional cooling	1.57	1.43	1.29	1.14	1.00	0.86	0.71	0.57	
	57.7	130	Fan(s) or cooling coil									
	47.1	130	Fan(s) and cooling coil	1.57	1.43	1.29	1.14	1.00	0.86	0.71	0.57	
B2	12.6	18.9	Fan(s) and cooling coil									
B3	70.6	95.7	No additional cooling	1.57	1.43	1.29	1.14	1.00	0.86	0.71	0.57	
	52.1	95.7	Fan(s) or cooling coil									
	38.4	95.7	Fan(s) and cooling coil									

Tabela A 5 - Fator de correção da velocidade do ar ambiente (Fv) e fator de ajuste da altitude (Fh).

Table 6. Ambient Air Velocity Correction Factor (Fv)

Air Velocity Vv m/sec	Factor Fv	Operating Area	If Vv is not known use this value for Fv
0 - 1.4	$Fv = 0.1 Vv + 0.86$	Small confined space	0.86
> 1.4 - < 6	$Fv = 0.2 Vv + 0.72$	Large indoor space	1.0
> 2 - < 6	$Fv = 0.17 Vv + 0.9$	Sheltered outdoor space	1.3
>2	$Fv = 0.17 Vv + 0.9$ (max Fv = 1.92)	Outdoor space	1.5

Table 7. Altitude Adjustment Factor (Fh)(1)

Altitude (m)	Factor Fh
Sea Level	1.0
500	0.97
1000	0.93
1500	0.90
2000	0.87
3000	0.81
4000	0.75
5000	0.70



## 9 ANEXO B

### B.1 Norma IEC

Reprodução das informações constantes nas páginas 113 e 115 da (IEC-60034-1, 2004).

Tabela B 1 - Máxima rotação de motores de indução conforme norma IEC.

**Table 17 – Maximum safe operating speed ( $\text{min}^{-1}$ ) of three-phase single-speed cage induction motors for voltages up to and including 1 000 V**

Frame number	2 pole	4 pole	6 pole
≤ 100	5 200	3 600	2 400
112	5 200	3 600	2 400
132	4 500	2 700	2 400
160	4 500	2 700	2 400
180	4 500	2 700	2 400
200	4 500	2 300	1 800
225	3 600	2 300	1 800
250	3 600	2 300	1 800
280	3 600	2 300	1 800
315	3 600	2 300	1 800

NOTE The above values may have to be reduced to meet the requirements of IEC 60079.

Tabela B 2 - Sobre velocidade de motores de indução conforme norma IEC.

**Table 18 – Overspeeds**

Item	Machine type	Overspeed
1	AC machines All machines other than those specified below:	1,2 times the maximum rated speed
1a)	Water-turbine driven generators, and any auxiliary machines connected directly (electrically or mechanically) to the main machine	Unless otherwise specified, the runaway speed of the set but not less than 1,2 times the maximum rated speed
1b)	Machines which may under certain circumstances be driven by the load	The specified runaway speed of the set but not less than 1,2 times the maximum rated speed.
1c)	Series and universal motors	1,1 times the no-load speed at rated voltage. For motors integrally attached to loads that cannot become accidentally disconnected, the words 'no-load speed' shall be interpreted to mean the lightest load condition possible with the load
1d)	Three-phase single-speed cage induction motors according to 9.6	1,2 times the maximum safe operating speed
2	DC machines	
2a)	Shunt and separately excited motor	1,2 times the highest rated speed or 1,15 times the corresponding no-load speed, whichever is greater
2b)	Compound excited motors having speed regulation of 35 % or less	1,2 times the higher rated speed or 1,15 times the corresponding no-load speed, whichever is greater but not exceeding 1,5 times the highest rated speed
2c)	Compound excited motors having speed regulation greater than 35 % and series motors	The manufacturer shall assign a maximum safe operating speed which shall be marked on the rating plate. The overspeed for these motors shall be 1,1 times the maximum safe operating speed. The safe operating speed marking is not required on motors that are capable of an overspeed of 1,1 times the no-load speed at rated voltage
2d)	Permanent-magnet excited motors	Overspeed as specified in item 2a) unless the motor has a series winding and, in such a case, they shall withstand the overspeeds specified in items 2b) or 2c) as appropriate
2e)	Generators	1,2 times the rated speed

# 10 ANEXO C

## C.1 Norma NEMA

Reprodução de informações das páginas 19 a 21 da NEMA MG 1 – Parte 12 (2003) apud (SOBRINHO, 2008).

Tabela C 1 - Máxima rotação de motores de indução conforme norma NEMA.

**Table 12-6**  
**CONTINUOUS SPEED CAPABILITY FOR GENERAL-PURPOSE DESIGN A AND B DIRECT COUPLED (TS SHAFT FOR MOTORS ABOVE THE 250 FRAME SIZE) SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTORS**

Horsepower	Totally Enclosed Fan-Cooled			Open Dripproof		
	Synchronous Speed at 60 Hz					
	3600	1800	1200	3600	1800	1200
	Minimum Design Speed					
1/4	7200	3600	2400	7200	3600	2400
1/3	7200	3600	2400	7200	3600	2400
1/2	7200	3600	2400	7200	3600	2400
3/4	7200	3600	2400	7200	3600	2400
1	7200	3600	2400	7200	3600	2400
1.5	7200	3600	2400	7200	3600	2400
2	7200	3600	2400	7200	3600	2400
3	7200	3600	2400	7200	3600	2400
5	7200	3600	2400	7200	3600	2400
7.5	5400	3600	2400	7200	3600	2400
10	5400	3600	2400	5400	3600	2400
15	5400	3600	2400	5400	3600	2400
20	5400	3600	2400	5400	3600	2400
25	5400	2700	2400	5400	2700	2400
30	5400	2700	2400	5400	2700	2400
40	4500	2700	2400	5400	2700	2400
50	4500	2700	2400	4500	2700	2400
60	3600	2700	2400	4500	2700	2400
75	3600	2700	2400	3600	2700	2400
100	3600	2700	1800	3600	2700	1800
125	3600	2700	1800	3600	2700	1800
150	3600	2700	1800	3600	2700	1800
200	3600	2300	1800	3600	2700	1800
250	3600	2300	1800	3600	2300	1800
300	3600	2300	1800	3600	2300	1800
350	3600	1800	1800	3600	1800	1800
400	3600	1800	-	3600	1800	-
450	3600	1800	-	3600	1800	-
500	3600	1800	-	3600	1800	-

Tabela C 2 - Sobre velocidade de motores de indução conforme norma NEMA.

### 12.52 OVERSPEEDS FOR MOTORS

#### 12.52.1 Squirrel-Cage and Wound-Rotor Motors

Hp	Synchronous Speed, Rpm	Overspeed, Percent of Synchronous Speed
200 and smaller	1801 and over	25
	1201 to 1800	25
	1200 and below	50
250-500, incl.	1801 and over	20
	1800 and below	25

## 11 ANEXO D

### D.1 Instrumentos utilizados

Durante a coleta de dados do sistema em análise, foram usados diversos equipamentos. Os dados de conjugado, velocidade, temperatura, para análise dos motores e redutores foram coletados através dos equipamentos apresentados nas tabelas seguintes:

#### Medidor de temperatura: Termovisor

Tabela D 1 - Termovisor infravermelho.

<b>Termovisor modelo TH9100WL - NEC San-ei</b>	
Termógrafo infravermelho	Tipo câmera
Série:	7031847
Módulo de medição:	-20 a 2000°C
Faixa espectral:	7,5 a 14 micras
Correção de emissividade:	0,01 - 1,00
Distancia focal:	0,3 a 25m
Precisão da medição:	± 2°C
Versão do programa:	VI5.6A, L nº 2

#### Coletor de dados: PIMS – *Plant Information Management System*

Fabricante: *OSIsoft; PI enterprise Server 3.4.375.80*; Capacidade: 60.000 pontos ;Taxa de amostragem máxima 0,5 kS/s; *Copyright © 2006-2007, OSIsoft, Inc.*;

Função de coleta e armazenamento em rede TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*). Utiliza-se de modelos matemáticos de guarda por exceção e compressão, permitindo armazenamento de longo prazo sem o consumo clássico de disco rígido; Acesso em computadores tipo *desktop* de uso convencional em rede corporativa; Executa cálculos matemáticos entre variáveis de forma programável;

#### Coletor de sinais: *DDCTool (Digital Drive Controller)*

- O programa *DDCTool* que trabalha em um computador com a placa dedicada SNAT 606 CMT conectado ao inversor ACV700 DDC por meio de fibra óptica na placa SNAT601 TAI. Tempo de amostragem 3 ms.

*DDC Tool for ACV 700 AC Drives, version 3.4, Copyright © 1993-1996 Industry Oy Helsinke, Filand.*