

Rafael da Cunha Campos

**SELEÇÃO DE TECNOLOGIA PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM DE GRANDES
CILINDROS SECADORES COM BASE EM CRITÉRIOS ECONÔMICOS**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título em Engenharia, área Mecânica, habilitação Produção Mecânica
Orientador: Prof. Antonio Cezar Bornia, Dr.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da
Biblioteca Universitária da UFSC

Campos, Rafael da Cunha

Seleção de tecnologia para o processo de soldagem de grandes cilindros secadores com base em critérios econômicos / Rafael da Cunha Campos ; orientador, Antonio Cezar Bornia, 2020.

114 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia de Produção Mecânica, Florianópolis,
2020.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Mecânica. 2. Análise de viabilidade econômica. 3. Soldagem. 4. Cilindro secador Yankee. 5. Seleção de tecnologia. I. Bornia, Antonio Cezar . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Produção Mecânica. III. Título.

Rafael da Cunha Campos

SELEÇÃO DE TECNOLOGIA PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM DE GRANDES CILINDROS SECADORES COM BASE EM CRITÉRIOS ECONÔMICOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro, área Mecânica, habilitação em Produção e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 07 de agosto de 2020.



Documento assinado digitalmente
Guilherme Ernani Vieira
Data: 17/08/2020 23:02:21-0300
CPF: 888.311.759-04

Prof. Guilherme Ernani Vieira, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
Antonio Cezar Bornia
Data: 18/08/2020 10:38:30-0300
CPF: 516.904.209-44

Prof. Antonio Cezar Bornia, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Artur Santa Catarina
Data: 17/08/2020 20:09:33-0300
CPF: 025.231.289-93

Prof. Artur Santa Catarina, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Rogério Feroldi Miorando
Data: 18/08/2020 10:50:45-0300
CPF: 598.652.290-72

Prof. Rogério Feroldi Miorando, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais e a minha namorada, por todo o apoio e paciência. Dedico também ao meu irmão João Paulo (*in memoriam*), uma grande referência em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Universidade Federal de Santa Catarina e aos professores, por todo o conhecimento adquirido nestes anos. Durante este período, pude me desenvolver não só como engenheiro, mas também como cidadão.

Ao professor Antonio Cezar Bornia, por ter aceito me orientar e pela sua disponibilidade em todos os momentos que precisei durante o desenvolvimento deste TCC.

Agradeço à equipe do Laboratório de Mecânica de Precisão, em especial ao Claudio Silveira e o professor Milton Pereira. A permanência neste ambiente gerou a motivação deste trabalho e possibilitou as melhores oportunidades durante a graduação, um grande complemento no meu aprendizado.

Aos amigos que adquiri durante a passagem pela universidade, sem eles, este período teria sido muito mais custoso.

À minha namorada Manuella, por todo o amor, carinho e apoio durante a graduação, você sempre mostrou que eu era capaz.

A todos os meus tios, tias e primos, pelos bons momentos familiares que proporcionaram maior conforto durante os momentos mais difíceis. Em especial, gostaria de agradecer aos tios Valda, Julio, Valquiria e Márcio, pelo suporte que me deram nesta etapa.

Por fim, agradeço aos meus pais João e Valneide, por terem priorizado a minha educação e também pela dedicação e apoio que me ofereceram, não somente na graduação, mas durante toda a minha vida.

“Ideias, e somente ideias, podem iluminar a escuridão.”

(Ludwig Von Mises)

RESUMO

A indústria de papel é caracterizada pela produção contínua e exige grandes estruturas produtivas que trabalham praticamente sem parada de máquina. Assim, o fornecimento de peças de reposição deve ser rápido para assegurar o seu funcionamento. Garantir a entrega dos componentes com o menor lead time é fator-chave para sobrevivência de uma empresa do setor de bens de capital que atende a indústria de papel, desde que a sua produção tenha retorno econômico positivo. Este trabalho consiste em um estudo de caso que visa selecionar a tecnologia mais vantajosa para a soldagem de grandes cilindros secadores de papel através de uma visão econômica. Para atingir este objetivo, identificaram-se as técnicas de soldagem alternativas como arco submerso convencional, arco submerso com múltiplos arames, arco submerso *narrow gap* e laser-MIG, levantaram-se os fatores que afetam os fluxos de caixa e procedeu-se à análise de investimento. Como resultado, foram obtidas as estimativas de investimento inicial, os custos de soldagem, os custos dos outros processos de fabricação e a margem de contribuição do produto. Após realizar a análise de investimento utilizando o valor presente líquido, a tecnologia de soldagem por arco submerso com chanfro *narrow gap* foi escolhida como a melhor alternativa para implementação. Esta opção também se mostrou como a melhor alternativa, mesmo quando submetida à análise de sensibilidade. Os resultados obtidos neste estudo contribuirão para a escolha da nova tecnologia de soldagem que a empresa irá adotar no seu processo produtivo.

Palavras-chave: Soldagem Laser. Soldagem MIG. Soldagem por arco submerso. Análise de viabilidade econômica. Soldagem de cilindros. Custos de soldagem

ABSTRACT

Paper industry is characterized by continuous production, it requires a large production structure that work with almost no machine breakdown. Therefore, the supply of spare parts must be quick to ensure its operation, ensuring the delivery of components with the shortest lead time is a key factor for the survival of a company in the capital goods sector that supplies the paper industry, as long as its production has a positive economic return. This research consists in a case study that aims to select the most cost-effective technology for welding large paper drying cylinders. To achieve the objective, alternative welding techniques as submerged arc welding, multi wire submerged arc welding, narrow gap submerged arc welding and laser-MIG welding were identified, the factors that affect cash flows were raised and investment analysis was carried out. As a result, initial investment estimates, welding costs, costs of other manufacturing processes and the product contribution margin were obtained. After carrying out the investment analysis through the net present value, the submerged arc narrow gap welding technique was chosen as the best alternative for implementation. This option also showed the best return in the sensitivity analysis performed. Results obtained in this study will contribute to choose the new welding technology that the company will adopt in its production process.

Keywords: Laser welding. Gas metal arc welding. Submerged arc welding. Economic viability analysis. Cylinder welding. Welding costs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Máquina Fourdrinier para produção de papel.....	34
Figura 2 – Etapas de uma máquina Fourdrinier para fabricação de papel Tissue	35
Figura 3 - Etapa de formação do papel em uma máquina	36
Figura 4 - Etapa de prensagem do papel.....	37
Figura 5 - Etapa de secagem de uma máquina de papel comum	38
Figura 6 - Etapa de secagem em uma máquina de papel Tissue.....	39
Figura 7 - Seção de acabamento e finalização.....	40
Figura 8 - Processo de secagem no cilindro Yankee.....	41
Figura 9 - Componentes do cilindro secador Yankee	42
Figura 10 - Cilindro Yankee soldado e região de soldagem.....	43
Figura 11 - Esquemática da soldagem a arco submerso.....	46
Figura 12 - Equipamentos para soldagem a arco submerso	47
Figura 13 - Soldagem de cilindros com arco submerso utilizando posicionadores ...	47
Figura 14 - Processo de soldagem laser no modo keyhole.....	51
Figura 15 - Componentes ópticos e sistema de monitoramento do laser Nd:YAG ...	53
Figura 16 - Sistema de correção de trajetória seam-tracking	54
Figura 17 - Equipamento padrão para soldagem MIG/MAG	55
Figura 18 - Processo de soldagem híbrida LASER-Arco.....	58
Figura 19 - Etapas metodológicas do trabalho.....	71
Figura 20 - Etapas do processo produtivo	74
Figura 21 - Torno vertical de grande porte e detalhe da usinagem interna da camisa	76
Figura 22 - Cilindro Yankee para expedição	77
Figura 23 - Chanfro para soldagem por arco submerso	78
Figura 24 - Equipamento para soldagem SAW convencional.....	80
Figura 25 – Manipulador e tocha para SAW com múltiplos arames	82
Figura 26 - Detalhamento e teste de junta <i>narrow gap</i> para arco submerso	83
Figura 27 - Cabeçote para soldagem SAW <i>narrow gap</i>	85
Figura 28 - Chanfro para soldagem Laser-MIG.....	86
Figura 29 - Cabeçote YW52 com sistema de monitoramento de juntas	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área da seção transversal para diferentes tipos de chanfro.....	60
Tabela 2 - Massa específica de algumas ligas metálicas.....	60
Tabela 3 - Valores típicos de eficiência de deposição para diferentes processos.....	60
Tabela 4 - Planilha de fluxo de caixa.....	66
Tabela 5 - Investimento inicial para SAW convencional.....	89
Tabela 6 - Investimento inicial para SAW com múltiplos arames.....	89
Tabela 7 - Investimento inicial para SAW com <i>narrow gap</i>	89
Tabela 8 - Investimento inicial para soldagem Laser-MIG.....	90
Tabela 9 - Custos dos componentes do cilindro Yankee.....	90
Tabela 10 - Custo variável dos processos de fabricação.....	91
Tabela 11 - Custo unitário dos consumíveis de soldagem.....	92
Tabela 12 - Custo dos consumíveis para produção de uma unidade do cilindro Yankee de acordo com a tecnologia de soldagem.....	92
Tabela 13 - Tarifa de energia elétrica.....	93
Tabela 14 - Custo de energia elétrica por unidade.....	93
Tabela 15 - Custo de manutenção por unidade produzida.....	93
Tabela 16 - Somatório dos custos variáveis de soldagem.....	94
Tabela 17 - Custo anual de depreciação.....	94
Tabela 18 - Variação do custo de mão de obra direta para as diferentes alternativas.....	94
Tabela 19 - Cálculo da margem de contribuição unitária.....	95
Tabela 20 - Variação do lucro anual para cada tecnologia.....	95
Tabela 21 - Fluxo de caixa SAW convencional.....	97
Tabela 22 - Fluxo de caixa SAW com múltiplos arames.....	98
Tabela 23 - Fluxo de caixa SAW <i>narrow gap</i>	99
Tabela 24 - Fluxo de caixa Laser-MIG.....	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Aplicação de processos de soldagem em aço carbono quanto à espessura do material.....	44
Quadro 2 - Características e aplicações dos processos de soldagem	45
Quadro 3 - Consumíveis para SAW convencional	79
Quadro 4 - Parâmetros e tempos do processo SAW convencional.....	79
Quadro 5 - Equipamentos para SAW convencional.....	80
Quadro 6 - Parâmetros e tempos do processo SAW com múltiplos arames	81
Quadro 7 - Equipamentos para SAW com múltiplos arames	82
Quadro 8 - Consumíveis para SAW <i>narrow gap</i>	83
Quadro 9 - Parâmetros e tempos do processo SAW <i>narrow gap</i>	84
Quadro 10 - Equipamentos para SAW <i>narrow gap</i>	84
Quadro 11 - Consumíveis para Laser-MIG	86
Quadro 12 - Parâmetros e tempos do processo Laser-MIG.....	87
Quadro 13 - Equipamentos para Laser-MIG	87

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Absortividade de diferentes materiais em relação ao comprimento de onda laser	52
Gráfico 2 - Valor presente líquido das alternativas.....	101
Gráfico 3 - Análise de sensibilidade do custo dos equipamentos	102
Gráfico 4 - Análise de sensibilidade da TMA	103
Gráfico 5 - Análise de sensibilidade da capacidade de vendas.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MIG - *Metal Inert*

MAG - *Metal Active*

TIG - *Tungsten Inert Gas*

TMA – taxa mínima de atratividade

SAW - *submerged arc welding*

VPL – Valor presente líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	28
1.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	28
1.2	OBJETIVOS.....	30
1.2.1	Objetivo Geral	30
1.2.2	Objetivos Específicos	30
1.3.	JUSTIFICATIVA	30
1.4.	ESTRUTURA.....	32
1.5.	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	32
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	34
2.1	AS MÁQUINAS DE PAPEL E AS ETAPAS DE PRODUÇÃO DO PAPEL.....	34
2.1.1	Formação	35
2.1.2	Prensagem	36
2.1.3	Secagem	37
2.1.4	Finalização	39
2.2	O CILINDRO YANKEE E A FABRICAÇÃO DO PAPEL TISSUE	40
2.3	A SOLDAGEM NA FABRICAÇÃO DO CILINDRO YANKEE	42
2.3.1	Soldagem por arco submerso e suas variáveis	46
2.3.2	Soldagem híbrida Laser-MIG	50
2.3.2.1	<i>Soldagem a laser</i>	50
2.3.2.2	<i>Soldagem MIG/MAG</i>	54
2.3.2.3	<i>Soldagem Laser-MIG.....</i>	56
2.4	A CONTABILIZAÇÃO DOS CUSTOS DA SOLDAGEM	58
2.4.1	Custo dos consumíveis	59
2.4.2	Custo de energia elétrica	62
2.4.3	Custo de manutenção.....	63
2.4.4	Custo de mão de obra	63

2.4.5	Custo de depreciação do equipamento.....	64
2.4.6	Custo total de soldagem.....	64
2.5	ANÁLISE DE INVESTIMENTO	65
2.5.1	Fluxo de caixa	65
2.5.2	Taxa mínima de atratividade (TMA).....	67
2.5.3	Valor presente líquido (VPL)	67
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	69
3.1	ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO	69
3.2	ETAPAS DA PESQUISA.....	70
4	ESTUDO DE CASO	73
4.1	A EMPRESA.....	73
4.1.1	Processo Produtivo	73
4.2	SELEÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE INVESTIMENTO	78
4.3	INVESTIMENTOS, CUSTOS E RECEITAS	88
4.3.1	Investimento inicial.....	88
4.3.2	Custo de componentes e matéria-prima.....	90
4.3.3	Custos variáveis dos processos de fabricação	91
4.3.4	Custos da soldagem.....	91
4.3.5	Margem de contribuição unitária e variação do lucro pela variação da produção	95
4.4	ANÁLISE DE RETORNO	96
4.4.1	Determinação da taxa mínima de atratividade (TMA)	96
4.4.2	Fluxo de caixa	96
4.4.3	Valor presente líquido (VPL)	101
4.4.4	Análise de sensibilidade	101
4.5	ANÁLISE E ESCOLHA DA ALTERNATIVA MAIS VANTAJOSA	104
4.6	FEEDBACK DA EMPRESA.....	105
5	CONCLUSÃO.....	106

REFERÊNCIAS.....	108
-------------------------	------------

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O setor de papel e celulose é bastante representativo na economia brasileira, assim como é também no cenário mundial. Isto ocorre devido à grande receita gerada, aos elevados investimentos e ao impacto que esse setor tem sobre os outros diversos setores econômicos (GEDF-CD/FIEP, 2016). Ainda de acordo com GEDF-CD/FIEP (2016), em 2015 a produção de papel mundial foi de 401 milhões de toneladas. Entre os anos de 2005 a 2015 ocorreu aumento na produção mundial de aproximadamente 10%, representando um crescimento médio anual de 1%. No panorama mundial, o Brasil encontra-se em sétimo lugar como produtor de papel, antecedido apenas por China, Estados Unidos, Japão, Alemanha, Coreia do Sul, Índia e Indonésia (APPLUS QUALITEC, 2018). A produção de papel no Brasil é voltada majoritariamente para o suprimento do mercado interno. Em relação à produção total, sua exportação representa um volume equivalente a cerca de 18%, sendo que a maior parte é comercializada com América Latina e Europa (MARQUES, 2015).

A indústria de produção de papel é identificada pelo modelo de produção em grande escala, em massa, ou contínua, o que exige grandes estruturas produtivas. Máquinas para produção de papel cada vez mais rápidas e com maior capacidade são necessárias para atender a demanda deste setor (PIRES; MARIANO, 2007). Além disso, as empresas produtoras devem realizar a manutenção de seus equipamentos rapidamente, com a troca de peças agilizada, evitando paradas de máquinas o máximo possível. Ou seja, os fornecedores deste setor industrial precisam realizar as entregas o mais rápido possível e, entre os principais componentes, encontram-se os cilindros secadores Yankee.

Estes cilindros são grandes vasos de pressão que atuam na etapa de secagem do papel. Operam em alta temperatura com vapor saturado circulando na parte interna, o que faz com que a pressão chegue até 1 MPa e a superfície alcance os 120°C (MACDONALD et al., 1970). De acordo com Philipp e D'almeida (1988), no processo de secagem, a folha de papel passa pelos cilindros em alta temperatura que, além de remover a água, têm de transportar o papel sem nenhum dano, controlando o grau de encolhimento e enrugamento da folha. Por isso, deve haver um bom controle na temperatura do cilindro, nas tensões de superfície, na pressão do vapor, velocidade da máquina e também na distância entre os cilindros.

Nota-se que estes secadores devem passar por um processo de fabricação bastante controlado, com inspeção de qualidade confiável. Na fabricação de cilindros Yankee, a soldagem das tampas laterais e da camisa tem grande importância, visto que é a etapa mais longa e também é a que define a geometria e a resistência final do produto. Por isso, a soldagem representa uma fatia significativa no processo de produção deste artigo e determina o tempo de ciclo de produção destes equipamentos para a indústria de papel. Logo, é necessário a escolha de uma tecnologia adequada para a fabricação destes dispositivos. Existem várias possibilidades de implementação, destacando-se os processos de soldagem por arco elétrico e laser.

O processo de soldagem através de arco elétrico abrange diversos tipos de tecnologias conhecidas; as mais comuns e simples surgiram no início do século XIX, sendo que grandes evoluções surgiram no decorrer do século XX. Técnicas de soldagem como *Metal Inert* (MIG), *Active Gas* (MAG), *Tungsten Inert Gas* (TIG) e eletrodo revestido já foram extensamente estudadas e são amplamente utilizadas na indústria metalmeccânica devido ao baixo valor de aquisição e operação, enquanto técnicas mais inovadoras como soldagem por arco submerso, soldagem por laser e suas variantes híbridas possuem maior grau de complexidade de instalação, utilização e maior investimento inicial (OLSEN, 2009).

Slack et al. (1999) dizem que, quanto menor o custo para produzir um produto, maior é a margem de lucro de uma empresa. Em empresas que concorrem diretamente em preço, um custo menor significa uma redução no preço aos seus consumidores, o que, aliado a um processo produtivo confiável, atrai maior fatia de mercado, maximizando os lucros. Empresas industriais bem-sucedidas procuram adotar os melhores processos para fabricação de seus produtos, visando a redução de custos e aumento de produtividade (CONTADOR, 1994). Na etapa de soldagem, o objetivo não é diferente, mas, para isso é necessário analisar cada uma das tecnologias aplicáveis em um processo, entender o que exige e o que pode oferecer cada uma das alternativas. Conhecer os custos envolvidos e ganhos de produtividade inerentes de cada novo processo é de suma importância na tomada de decisão de implementação de uma nova tecnologia produtiva em uma empresa.

Este trabalho é um estudo de caso; a empresa abordada é classificada como industrial de médio porte, fornece máquinas para a indústria de papel, possui alta demanda em soldas e pretende implementar um novo processo de soldagem para o seu produto cilindro secador Yankee, onde atualmente apresenta um gargalo no setor produtivo. Algumas das tecnologias estudadas usualmente são empregadas em empresas de grande porte. Porém, o mercado tem

apresentado novas soluções com menores custos envolvidos. Assim, torna-se importante a realização de uma análise de viabilidade econômica destes processos. Esta foi a questão que motivou a elaboração desse trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Selecionar a alternativa mais vantajosa para soldagem de grandes cilindros secadores sob uma visão econômica em uma empresa industrial de médio porte.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar as tecnologias alternativas para a soldagem de grandes cilindros metálicos;
- b) Levantar quais os fatores que afetam os fluxos de caixa associados a cada alternativa;
- c) Aplicar técnica de análise de investimentos para identificar a melhor alternativa.

1.3. JUSTIFICATIVA

O Brasil apresenta características interessantes para a produção de madeira, papel e celulose, visto que o clima, o nível de insolação, o solo e a biotecnologia desenvolvida no país são vantajosos para o setor. Segundo dados da GEDF-CD/FIEP (2016) a indústria de papel e celulose teve uma produção bruta de R\$68,5 bilhões em 2014, com 4432 empresas empregando mais de 170 mil pessoas no país, um setor muito representativo e importante no cenário nacional.

Para atender esta produção no Brasil, o setor de bens de capital também é bem desenvolvido, porém o perfil do mercado de máquinas de papel é dominado por algumas empresas multinacionais europeias que concorrem entre si quando se trata de máquinas de grande porte, alta tecnologia e velocidade. No país, 85% dos papéis para impressão e escrita e também 80% da celulose são feitos com máquinas da empresa Voith Paper, grande multinacional com sede na Alemanha. Mas, diferente do cenário internacional, que é composto basicamente pelas multinacionais europeias, no Brasil, existe um maior número de empresas

nacionais de médio porte disputando o mercado, competindo diretamente na venda de componentes e peças de reserva, como os cilindros secadores (VOTTO, 2012).

Na fabricação de papel, a etapa de secagem por evaporação é crítica na composição dos custos, pois é a etapa mais cara do processo. Baixa performance deste estágio acarreta em maior consumo energético, dificuldade de secagem do papel e até mesmo perda de produtividade por instabilidade devido à perda de velocidade da máquina. Esta etapa é composta por cilindros secadores e telas secadoras, sendo este o estágio de maior consumo energético devido à necessidade de aquecimento dos equipamentos para evaporação da água do papel (VOTTO, 2012).

No mercado de fornecimento dos cilindros, além do preço dos equipamentos, o lead time de entrega é o grande fator ganhador de pedidos, visto que as empresas fornecedoras oferecem soluções similares com tecnologias semelhantes. Então, o nível de serviço ao cliente com lead time reduzido e pontualidade de entrega são fatores fundamentais (VOTTO, 2012).

No processo de fabricação de um rolo secador soldado, a soldagem apresenta a etapa mais extensa, ou seja, o gargalo da produção deste produto. Por isso, a escolha de um processo de soldagem adequado é fundamental. A etapa de seleção de uma tecnologia de fabricação deve levar em conta vários fatores, dentre elas, seus aspectos econômicos. Por um longo tempo da história, o preço cobrado por um produto ou serviço foi determinado por uma fórmula simples: $preço = custo + lucro$. O custo total era repassado ao preço final, sem grandes preocupações com a sua evolução. Com a globalização da economia, produtores tiveram que rever suas posições quanto a formulação dos preços. O preço tornou-se, então, determinado pelo mercado, ou seja: $lucro = preço - custo$ (BORNIA, 2010). O conhecimento da fonte dos custos passou a ser imprescindível para as empresas em cada etapa da produção, assim como na soldagem, que deve ter seu custo acompanhado de perto para o controle econômico de uma empresa (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Wainer, Brandi e Mello (1992) informam que a análise dos custos de soldagem engloba um universo que se estende da escolha do processo até mesmo o treinamento do soldador, passando por etapas como seleção dos equipamentos, definição da junta e até simulação da fabricação. O custo total de um processo de soldagem aborda o custo de mão de obra, custo de consumíveis, custo de energia elétrica, custo de manutenção, custo de depreciação e custo de outros materiais de consumo.

Marques, Modenesi e Bracarense (2009) ainda afirmam que uma análise do custo de soldagem é importante e pode ser solicitada para estimativa de custos de fabricação, ou então

para a avaliação de uma operação já existente, verificando a lucratividade ou comparando o lucro real com o orçado. O cálculo incorreto dos custos de soldagem pode levar uma empresa a perdas econômicas com a venda de produtos ou serviços, cobrando valores abaixo dos custos reais, ou então forçando preços acima do estipulado pelo mercado, inviabilizando a venda do produto.

Assim, o entendimento e identificação de todos os fatores de custo associados ao processo de soldagem, bem como uma análise de viabilidade econômica da aplicação de uma nova técnica é fundamental para uma empresa de médio porte fornecedora de cilindros secadores para a indústria de papel.

1.4. ESTRUTURA

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos. O primeiro trata da apresentação do tema, seu contexto, justificativa e objetivos.

O segundo capítulo é constituído pela fundamentação teórica, onde são abordados os conceitos necessários para a compreensão do tema. Nesta etapa é apresentado o processo de fabricação do papel, a função do cilindro secador, a função da soldagem na fabricação destes cilindros e também são discutidas as tecnologias de soldagem com base na literatura. Por fim, as técnicas para análise de investimentos são abordadas.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia de pesquisa utilizada no trabalho, com a identificação e descrição dos procedimentos para o desenvolvimento do estudo, abordando o processo de coleta de dados, informações e análises.

O quarto capítulo contém o desenvolvimento do trabalho com a descrição do caso, aplicação dos métodos e apresentação dos resultados e tabulação dos dados das alternativas levantadas.

O quinto e último capítulo entrega a conclusão do estudo e, por fim, são apresentadas as referências e apêndices.

1.5. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

O estudo possui algumas limitações para que o caráter científico seja mantido em questão.

Os processos de soldagem abordados foram limitados a algumas soluções bem conhecidas e utilizadas na indústria. No entanto, a soldagem possui muitas vertentes com diversos fornecedores de equipamentos e numerosas tecnologias patenteadas, podendo existir outras opções no mercado que não foram identificadas.

A abordagem considerou apenas os custos variáveis para a criação de cenários comparativos entre as diferentes tecnologias. A contabilização de todos os custos fixos diretos e indiretos para a elaboração de um cenário geral não foi possível, pois a empresa em estudo produz milhares de artigos diferentes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AS MÁQUINAS DE PAPEL E AS ETAPAS DE PRODUÇÃO DO PAPEL

Durante a maior parte da história humana, o papel foi fabricado manualmente, até que, em 1799, o francês Louis Nicolás Robert criou a primeira máquina de papel. Esta máquina foi construída em madeira com uma tela de tecido suspensa por roletes, onde uma suspensão de fibras era lançada. Com o advento da máquina, surgiu a possibilidade da fabricação de uma folha de papel com comprimento infinito. Porém, o projeto não foi levado adiante por Robert devido a problemas técnicos e financeiros, forçando o inventor a vender sua patente para os irmãos Fourdrinier, também franceses (PHILIPP; D'ALMEIDA, 1988).

Após a aquisição da patente e aperfeiçoamento da máquina, os irmãos Fourdrinier a introduziram na Inglaterra no ano de 1803. Foi a pioneira no processo de fabricação de papel contínuo, tendo ficado conhecida pelo sobrenome dos irmãos. Estas máquinas foram aperfeiçoadas durante a primeira e segunda metade do século XIX. No século XXI, as máquinas Fourdrinier ainda contêm basicamente os mesmos estágios do modelo proposto por Robert, com alterações apenas nos elementos que compõem os equipamentos (CAMPOS, 2007).

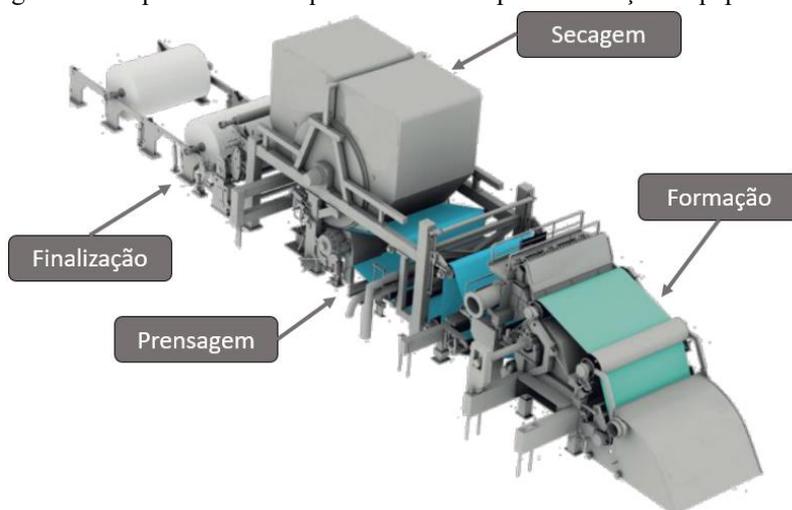
Figura 1 - Máquina Fourdrinier para produção de papel



Fonte: Votto (2012).

A função básica de uma máquina para fabricação de papel é a de remover a água contida na polpa de celulose, passando de um teor seco de 0,5% até o estado da consistência final com aproximadamente de 90% de teor seco (VOTTO, 2012). Para cumprir esta função e garantir a qualidade do produto final, estas máquinas em geral possuem as mesmas etapas de processamento, são elas: formação, prensagem, secagem e finalização.

Figura 2 – Etapas de uma máquina Fourdrinier para fabricação de papel Tissue



Fonte: Adaptado de Campos (2007)

A seguir, são descritas de forma breve todas as etapas da produção do papel em uma máquina Fourdrinier.

2.1.1 Formação

A primeira seção, chamada de formação, é composta pela caixa de entrada, tela formadora, feltro e rolos.

De acordo com Pepe (2000) e Holik (2010), a etapa de formação da folha consiste na deposição das fibras da suspensão fibrosa fornecida pela caixa de entrada sobre a tela formadora, onde acontece o desaguamento. A caixa de entrada é responsável por depositar sobre esta tela a suspensão fibrosa, em um fluxo uniforme e velocidade constante. A uniformidade do papel depende da correta dispersão das fibras.

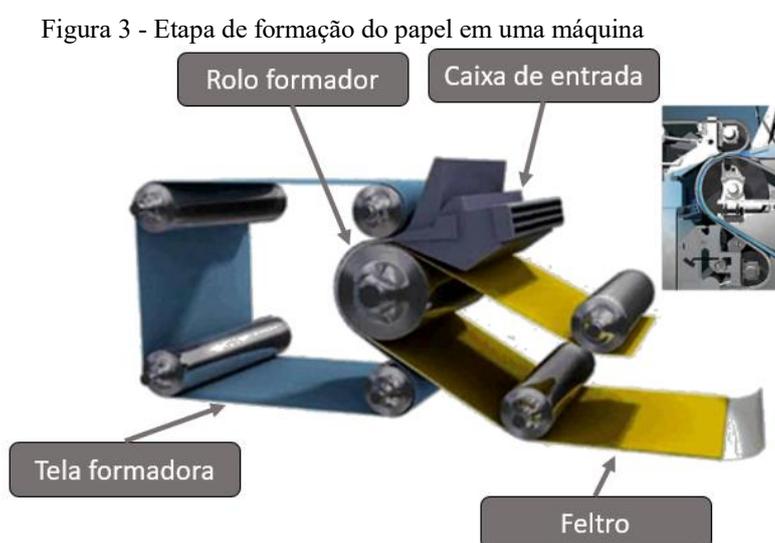
Votto (2012) cita que os principais objetivos da caixa de entrada são: distribuição uniforme das fibras ao longo da largura da máquina, eliminação de corrente cruzadas e variações da consistência, nivelamento das variações de velocidade e aplicação de um fluxo uniforme de massa sobre a tela.

A caixa de entrada deve distribuir o fluxo da suspensão fibrosa em toda a largura da máquina e produzir um jato com boa uniformidade na seção da tela com velocidade igual à da máquina. A seção transversal do fluxo que vem dos tanques deve permitir a formação de uma lâmina com uma abertura de menos de 10 mm ao longo da largura da máquina, que pode ter até

10 metros. Os desvios aceitáveis de distribuição da massa não devem ultrapassar a faixa de 1% (VOTTO, 2012)

A tela e o feltro são apoiados em um rolo de grande diâmetro, chamado rolo formador. Na etapa de separação da tela e feltro, o papel naturalmente acompanha o feltro. Para manter a estabilidade do rolo de sucção e no acondicionamento do feltro, é utilizado vácuo, que também ajuda na retirada de excesso de água. Após a formação inicial, o papel segue sobre o feltro em direção à seção de prensagem (CAMPOS, 2007).

A tela formadora transita em um circuito fechado dentro da seção de formação, passa pelos elementos desaguadores e, após a transferência da folha de papel que segue para a seção de prensagem com o feltro, retorna ao início do processo na caixa de entrada (VOTTO, 2012).



Fonte: Adaptado de Campos (2007)

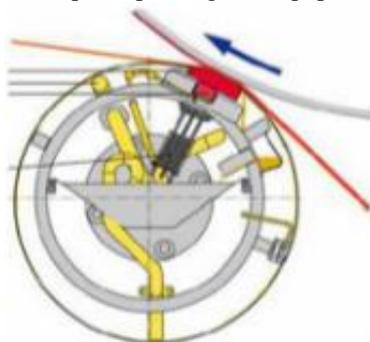
2.1.2 Prensagem

O objetivo da etapa de prensagem é remover a maior quantidade de água possível do papel através de compressão mecânica e ação do vácuo (BARROS, 2006).

Esta etapa promove melhor contato entre as fibras, aumentando a resistência do papel. A etapa de prensagem é importante na determinação dos custos, pois define o teor de seco na entrada de secagem, onde ocorre o maior consumo energético. Na etapa de prensagem, o papel que é transportado pelo feltro é comprimido entre 2 cilindros. Parte da água é eliminada do papel para o feltro, posteriormente do feltro para fora. Assim como na etapa de formação, o feltro que circula entre os rolos compressores também faz um circuito fechado, sempre guiado

por rolos guias (VOTTO, 2012). Após o papel passar pelos cilindros compressores, ele é encaminhado para a etapa de secagem.

Figura 4 - Etapa de prensagem do papel



Fonte: Campos (2007)

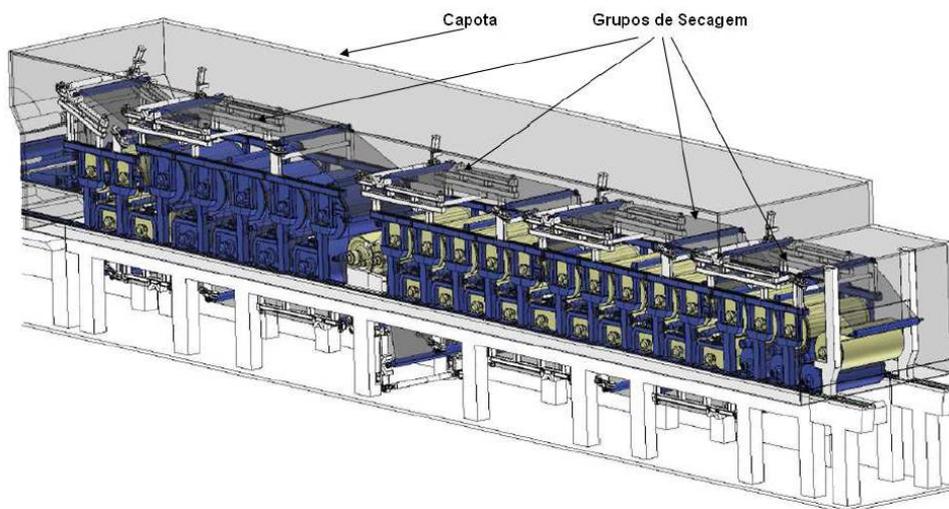
2.1.3 Secagem

Após a etapa de remoção de água na prensagem, ainda é necessário retirar uma quantidade da umidade remanescente. Devido às forças de capilaridade dentro dos poros das fibras e dos cristalitos da celulose, uma parcela de água não sai na etapa de prensagem, sendo removida somente pela aplicação de calor (CAMPOS, 2007).

O processo de secagem requer uma boa quantidade de energia térmica, fornecida principalmente na forma de vapor através dos cilindros secadores, que devem apresentar uma superfície grande para transferência de calor. Esta etapa é a que demanda maior consumo energético.

Votto (2012) explica que, na configuração das máquinas mais comuns, este setor apresenta uma série de cilindros secadores de menor diâmetro, entre 1,0 a 2,5 m, que operam em sequência, formando grandes grupos secadores que normalmente ocupam a maior parte da máquina. Estes cilindros são aquecidos internamente por vapor d'água e, através da condução térmica, trocam calor com o papel, causando a evaporação da água na folha. Um sistema de ventilação faz a troca do ar úmido por ar seco no ambiente.

Figura 5 - Etapa de secagem de uma máquina de papel comum

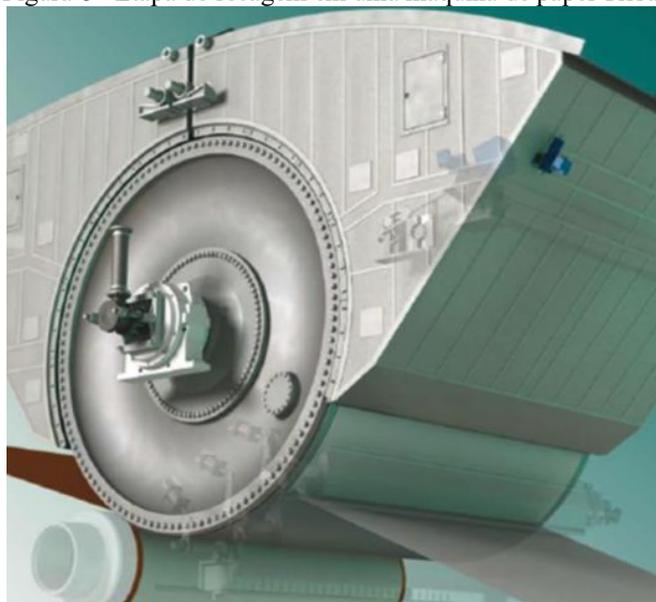


Fonte: Votto (2012)

A etapa de secagem na máquina de papel Tissue difere ligeiramente em relação às máquinas de papel comum. Neste caso, a seção de secagem é formada por apenas um cilindro Yankee e uma capota de insuflamento. O cilindro Yankee funciona de forma semelhante aos cilindros secadores comuns, pois é aquecido por vapor d'água e troca calor com o papel pela sua superfície externa. A maior diferença se dá no tamanho desta peça, que possui entre 2,5 até 7 metros de diâmetro (CAMPOS, 2007).

A função da capota neste caso é a evaporação da água e a exaustão do vapor liberado do papel na secagem (BARROS, 2006). Os cilindros Yankees devem ser construídos com aços especiais para suportar a temperatura e a pressão aos quais são submetidos (CAMPOS, 2007).

Figura 6 - Etapa de secagem em uma máquina de papel Tissue



Fonte: Campos (2007)

Após a passagem pelos cilindros secadores, a folha de papel seca é destacada da superfície do cilindro por uma lâmina de aço e segue seu percurso até a etapa de finalização.

2.1.4 Finalização

A etapa de finalização depende do modelo de papel que está sendo produzido. Se necessário, o papel poderá receber características de cor, brilho e lisura.

Votto (2012) explica que alguns tipos de papel requerem primeiro uma passagem pela calandra para eliminação da rugosidade da folha, deixando-a com aspecto mais liso e reduzindo a espessura. Após essa etapa, o material é transferido também para a enroladeira.

Na fabricação do papel Tissue, o papel é transferido diretamente para a enroladeira para formação dos rolos jumbo, não necessitando uma etapa de acabamento (BARROS, 2006).

Figura 7 - Seção de acabamento e finalização.



Fonte: Votto (2012)

2.2 O CILINDRO YANKEE E A FABRICAÇÃO DO PAPEL TISSUE

Os cilindros secadores Yankee soldados, abordados neste trabalho, são utilizados nas máquinas para produção de papel Tissue.

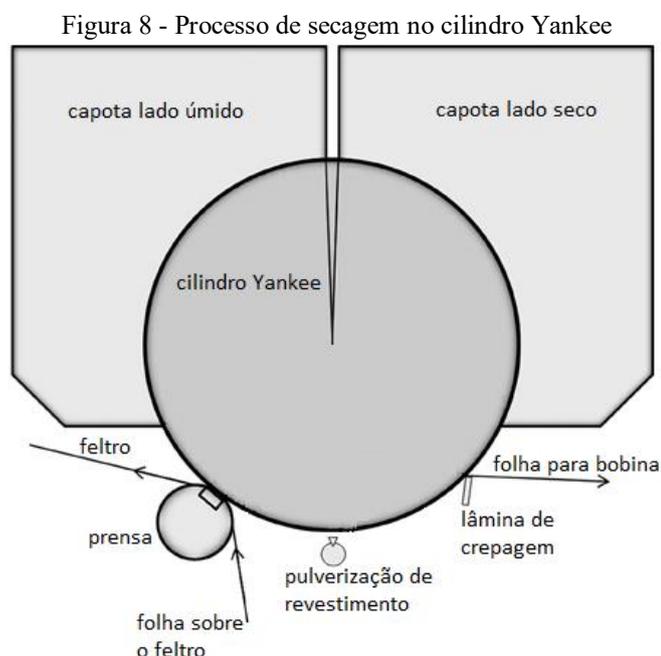
O papel para fins sanitários, conhecido por papel Tissue, recebe esse nome devido às suas propriedades físicas que são similares às de um tecido, como suavidade, espessura, resistência e capacidade de absorção de umidade (SOUZA; BASTOS, 2018). Sua produção corresponde a 6% do volume de papel produzido no mundo todo (CAMPOS, 2007). Estes produtos possuem gramatura que varia entre 11 e 40g/m² e são encontrados na forma de guardanapos, papel higiênico, toalhas ou papel para uso facial. São fabricados em folhas de camada simples, dupla ou tripla (CAMPOS, 2007).

O cilindro Yankee faz parte do processo de secagem do papel Tissue, etapa antecedida pela prensagem. O cilindro é responsável pelo transporte da folha de papel enquanto faz a secagem por um processo térmico até que o papel alcance a resistência ideal. O Yankee é considerado o principal elemento de uma máquina Tissue devido ao seu gasto energético no processo de secagem, no seu papel crítico de transporte e suporte do papel e no apoio ao processo de crepagem junto da lâmina de aço.

Segundo Ottosson, Nilsson e Berghel (2016), no processo de secagem com o cilindro Yankee, a folha é inicialmente carregada por um feltro, o primeiro contato entre a folha e o Yankee ocorre em uma etapa onde é feita a prensagem e a transferência do papel do feltro para o cilindro. Neste estágio, o cilindro atua como um contra rolo quente que facilita a remoção de água. Assim, parte da umidade é retirada mecanicamente antes da drenagem por evaporação.

Após a prensagem, a folha se separa do feltro e adere à carcaça do cilindro, sendo transportada em direção à capota, onde é atingida por gases quentes que aumentam a taxa de evaporação. Em média, 40% da umidade é removida pela capota e 60% pelo cilindro. Após sair da etapa de secagem, a folha é destacada do cilindro por uma lâmina, processo chamado de crepagem (OTTOSSON; NILSSON; BERGHEL, 2016).

O calor proveniente do Yankee também é utilizado para aquecer e desidratar uma solução diluída de produtos químicos de revestimento que é pulverizada na parte inferior da carcaça. Essa solução ajuda a melhorar o processo de separação da folha pela lâmina para formação das bobinas (OTTOSSON; NILSSON; BERGHEL, 2016).



Fonte: Adaptado de Ottosson, Nilsson e Bergchel (2016)

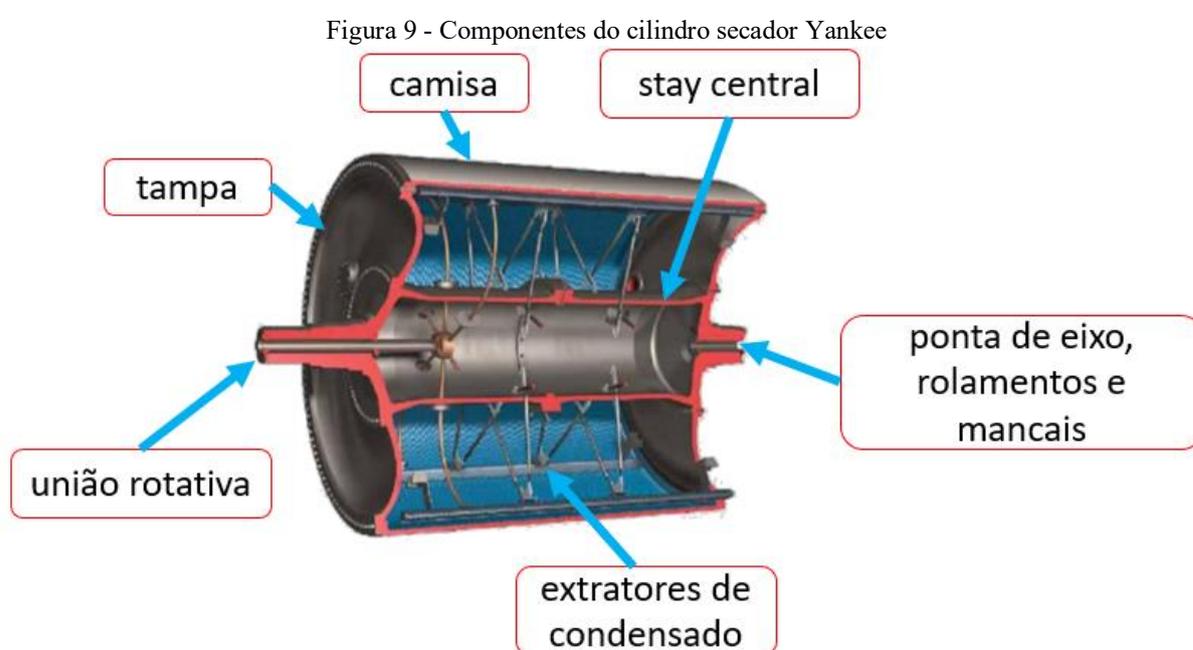
O cilindro Yankee foi fabricado em ferro fundido durante muito tempo. Neste período, evoluções foram realizadas neste material, como a melhoria das propriedades de resistência mecânica e condutividade térmica, além de aprimoramentos de projeto, deixando de ser utilizado o modelo com camisa interna lisa para um modelo com ranhuras, possibilitando melhor transferência de calor (O'BRIAN, 2017).

Mesmo com estas mudanças, o Yankee em ferro fundido ainda é suscetível a explosões devido às propriedades frágeis do material. O processo em que o cilindro é submetido, sob pressão e com carga excessiva, levou à ocorrência de muitos casos de acidente com explosão.

O aço carbono, por outro lado, possui um desempenho melhor quando as tensões internas excedem os limites permitidos (O'BRIAN, 2017).

Nas últimas duas décadas, os secadores Yankee fabricados em aço carbono começaram a ser introduzidos nas máquinas de papel Tissue, principalmente devido aos avanços nas técnicas de manufatura, especialmente a tecnologia de soldagem. O aço oferece vantagens em relação ao ferro fundido em termos de segurança, consumo de energia, flexibilidade, custo de investimento e peso (O'BRIAN, 2017).

Os principais componentes que fazem parte de um secador Yankee podem ser visualizados na figura 9.



Fonte: Adaptado de Campos (2007)

O design de cada um destes componentes permite que o cilindro receba vapor em alta pressão pela lateral, troque calor com o papel através da camisa, faça a coleta do condensado formado na camisa pela perda de calor e, por fim, elimine o fluido pela lateral oposta do cilindro.

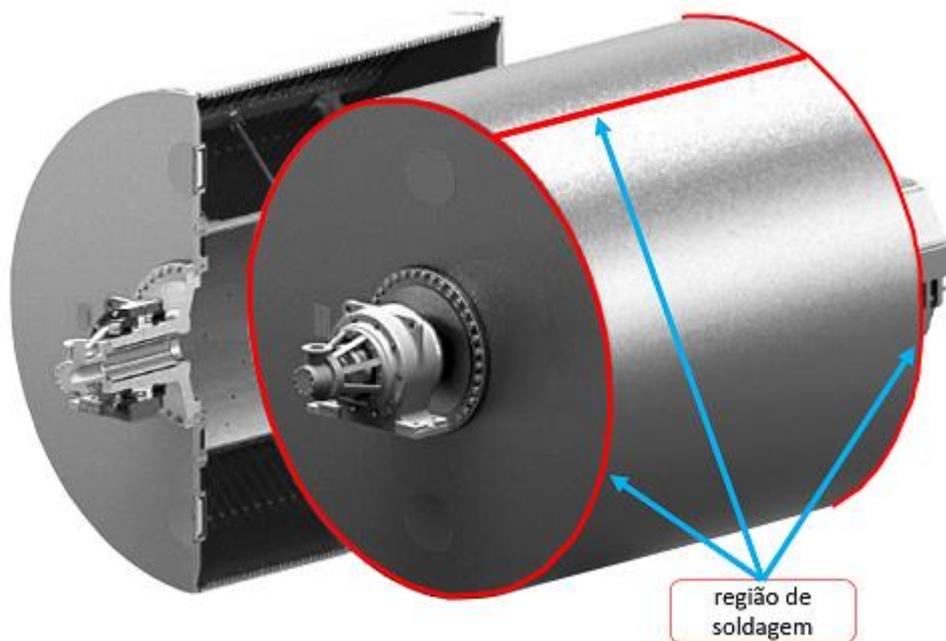
2.3 A SOLDAGEM NA FABRICAÇÃO DO CILINDRO YANKEE

Cilindros Yankee soldados podem possuir até 5,5 metros de diâmetro, são fabricados em aço carbono e suas tampas laterais exigem um processo robusto de união das partes com garantia de qualidade, evitando a ocorrência de ruptura e explosões por falha na junta soldada.

Para isso, devem ser analisadas apenas tecnologias que apresentem penetração de solda profunda, que sejam aplicáveis em aço carbono e que respeitem as condições geométricas da peça.

Na figura 10, é apresentada a região onde o cilindro Yankee é soldado.

Figura 10 - Cilindro Yankee soldado e região de soldagem



Fonte: Adaptado de Hergen (2019)

No quadro 1, são apresentadas tecnologias candidatas para soldagem nas condições geométricas das tampas e suas penetrações de solda em aço carbono.

Quadro 1 - Aplicação de processos de soldagem em aço carbono quanto à espessura do material

Material e espessuras	Processos de soldagem						
	Eletrodo revestido	Arco submerso	MIG ou MAG	TIG	Plasma	Feixe de elétrons	Laser
de 0 a 3 mm	X	X	X	X		X	X
de 3 a 6 mm	X	X	X			X	X
de 6 a 19 mm	X	X	X			X	
acima de 19 mm							

Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992)

A partir da análise do quadro 1, é possível verificar que o processo de soldagem por plasma não é adequado para aço carbono, logo não será estudado. De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992) a técnica de feixe de elétrons possui boa penetração, mas é aplicável somente em peças menores, visto que essa tecnologia requer uma câmara de vácuo para a proteção da poça fundida, por isso também não será abordado nesse estudo.

A técnica que utiliza eletrodo revestido, é mais utilizada em processos de manutenção, é realizada manualmente, produz muitas falhas de penetração e inclusões, também depende muito da habilidade do soldador, por isso não é adequada para fabricação dos cilindros secadores.

O processo TIG não é aplicável para o preenchimento completo do chanfro, pois a penetração e a taxa de deposição não são suficientes para a soldagem dos cilindros Yankee, exigindo muitas camadas e tornando o processo muito lento. No entanto, o processo TIG é versátil e aplicável na soldagem da raiz do chanfro, processos como arco submerso com chanfro convencional são utilizados para o preenchimento do chanfro, mas necessitam antes um passe de raiz utilizando TIG.

Durante o ano de 2016, um estudo foi realizado pelo Laboratório de Mecânica de Precisão na Universidade Federal de Santa Catarina, que se aprofundou na aplicabilidade dos processos de soldagem de cilindros secadores utilizando tecnologia laser e suas variáveis. Entre os processos estudados, destacou-se a soldagem híbrida Laser-MIG. A técnica obteve bons resultados e se mostrou viável tecnicamente, com boa qualidade de solda e alta velocidade de

soldagem alcançadas. No entanto, um estudo econômico comparando esta tecnologia com outras também aplicáveis na fabricação de cilindros secadores não foi realizado neste estudo.

Após apresentação das tecnologias e dos argumentos apresentados, definiu-se que as alternativas de soldagem por arco submerso convencional, arco submerso com múltiplos arames, arco submerso com chanfro *narrow gap* e Laser-MIG serão estudadas. Mais características destes processos são exibidas no quadro 2.

Quadro 2 - Características e aplicações dos processos de soldagem

Processo	Vantagens	Desvantagens	Emprego
Arco submerso	Processo automático, alta taxa de deposição.	Somente na posição plana ou horizontal, restrito a soldagem de aços, cuidado no posicionamento da junta.	Solda de topo ou ângulo com mais de 1 metro de comprimento e 5 a 50 mm de espessura.
MIG ou MAG	Elevada penetração, alta taxa de deposição, semiautomático ou totalmente automatizado.	Posição plana, cuidado com o posicionamento da junta.	Usado em aços carbono e de baixa liga, para grandes produções e soldas de boa qualidade.
Soldagem por laser	Fonte de energia altamente concentrada em qualquer atmosfera.	Alto custo do equipamento, não pode ser usado em superfícies polidas	Uso restrito a espessuras menores que 30mm, usinagem de furos, corte, tratamento de modificação superficial de peças.

Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992)

Entre os processos analisados neste estudo, vale destacar que a soldagem por arco submerso, laser e suas variáveis são processos automatizados que requerem necessariamente a utilização de equipamentos de movimentação. O processo MIG/MAG pode ser semiautomático ou também automatizado, neste estudo sua aplicação será abordada de forma híbrida com o processo laser, utilizando o processo híbrido para o enraizamento da junta, com posterior preenchimento da junta somente com MIG.

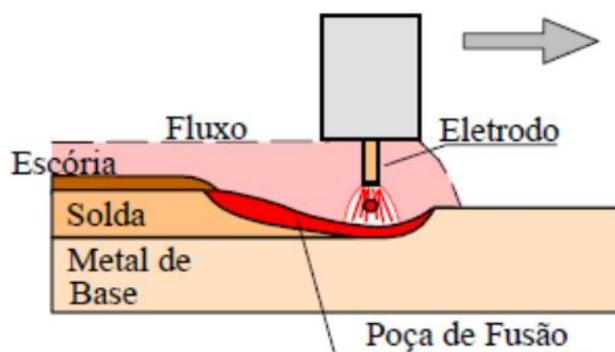
É importante ressaltar a escolha adequada de dispositivos mecânicos, eletromecânicos ou eletrônicos para posicionamento e automação dos processos de soldagem. A seleção dessas máquinas varia conforme a aplicação da solda, o uso de equipamentos apropriados auxilia em vários fatores, como o aumento na taxa de deposição, diminuição da dependência da habilidade do operador, redução do tempo de posicionamento da tocha e aumento na qualidade da solda (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). Apesar de estes mecanismos constituírem uma boa fatia do investimento em equipamentos, eles não são responsáveis diretamente pelo processo de soldagem. Desta forma, também é necessário avaliar o custo/benefício e a viabilidade de aquisição de determinadas ferramentas de apoio.

Nas seções seguintes são explicadas mais detalhadamente cada uma das tecnologias abordadas neste estudo.

2.3.1 Soldagem por arco submerso e suas variáveis

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), a soldagem por arco submerso, conhecida também por *submerged arc welding* (SAW), é um processo onde a coalescência entre os metais é obtida pela fusão destes materiais gerada por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo consumível e a peça a ser soldada. Machado (1996) explica que o arco é obtido sob uma camada de um material granular fusível chamado de fluxo, que é colocado sobre a poça de fusão. A função do fluxo é de formar a escória sobre a poça de fusão e proteger da atmosfera, desoxidar e retirar impurezas do metal fundido. Portanto, o arco e a poça de fusão não são visíveis durante o processo. A adição de metal é realizada pelo próprio eletrodo que tem forma de arame e é alimentado mecanicamente.

Figura 11 - Esquemática da soldagem a arco submerso



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2009)

Esse tipo de soldagem normalmente é realizado de forma totalmente mecanizada. Uma vez que o arco é aberto, o sistema alimenta a poça de fusão com eletrodo e fluxo continuamente, enquanto que a tocha é deslocada lateralmente. Ainda segundo Machado (1996), são empregados arames maciços de 1,6 até 6,5mm de diâmetro. Logo, a densidade de corrente é grande e o processo apresenta uma taxa de deposição muito alta, chegando até 20 kg/h aplicando um único arame. Esse processo também imprime grande penetração no metal de base e praticamente não há perdas de metal por projeção.

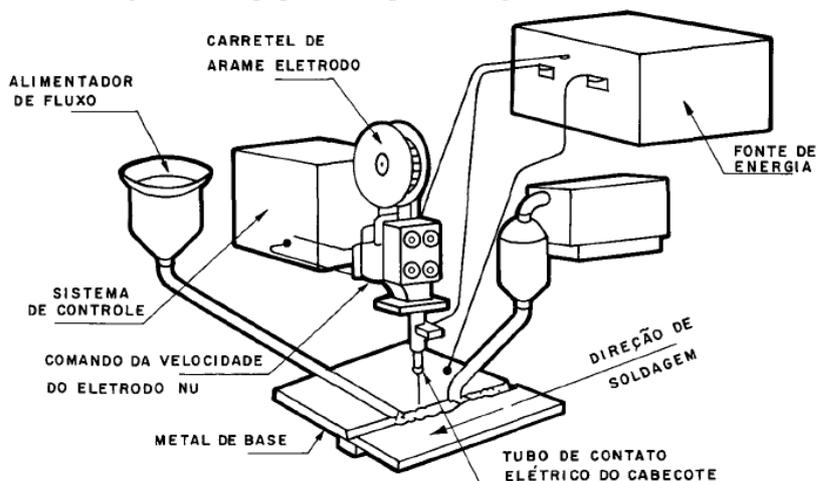
A maior limitação do arco submerso é a impossibilidade de soldar fora da posição plana e horizontal. A ação da força da gravidade, que sustenta a camada de fluxo sobre a poça

de solda, impede a soldagem fora de posição (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). A soldagem circunferencial pode ser realizada usando viradores de modo que a soldagem seja feita sempre na posição plana.

O maquinário básico para a soldagem a arco submerso é constituído pela fonte de energia, tocha de soldagem, alimentador de arame, sistema de controle, dispositivo para alimentação do fluxo e cabos elétricos. Estes equipamentos podem ser montados em um conjunto nomeado de cabeçote de soldagem, usado na soldagem automatizada. A fonte de energia mais utilizada é de tensão constante e pode ser do tipo transformador com corrente alternada ou transformador retificador de corrente contínua, com capacidades entre 400 e 1500 amperes. Fontes de corrente constante apresentam melhores resultados com arame de diâmetro maior do que 4 mm (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

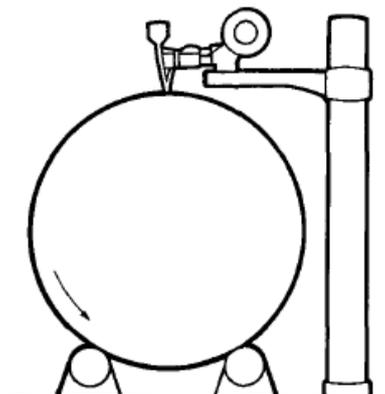
As figuras 12 e 13 apresentam os principais componentes para implementação da soldagem por arco submerso.

Figura 12 - Equipamentos para soldagem a arco submerso



Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992)

Figura 13 - Soldagem de cilindros com arco submerso utilizando posicionadores



Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992)

Os materiais consumíveis são o eletrodo, o fluxo de soldagem e em alguns casos o *backing* cerâmico. Os eletrodos podem ser arames sólidos, tubulares ou em forma de fitas. São fornecidos em bobinas de diferentes quantidades. Os arames sólidos de aço carbono e de baixa liga, são geralmente recobertos com uma camada de cobre que facilita o contato elétrico, reduz o desgaste do tubo de contato e aumenta a resistência a corrosão do arame. Cada bitola de arame pode operar num intervalo de centenas de Amperes e, para uma mesma corrente, um diâmetro menor acarreta em maior penetração e maior taxa de deposição (MACHADO, 1996).

Os fluxos podem ser classificados como aglomerados ou fundidos. Fluxos aglomerados são constituídos de compostos minerais como, óxidos de manganês, silício, alumínio, titânio, zircônio ou cálcio, além de desoxidantes como ferro-silício, ferro-manganês ou ligas semelhantes. Estes minerais são finamente moídos e a eles é adicionado um agente aglomerante. O produto agregado e granular posteriormente é sinterizado em temperaturas entre 600 a 900°C e moído (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Os fluxos fundidos são produzidos pela fusão da mistura de seus componentes em fornos. Após a fusão, a carga do forno é resfriada, solidificando-se, então o produto resultante é moído e peneirado. Este fluxo apresenta boa homogeneidade química e é facilmente reciclado. Por outro lado, desoxidantes e ferro-ligas são difíceis de serem adicionados durante a fabricação sem altas perdas. Assim, a faixa de composições dos fluxos fundidos é limitada devido às altas temperaturas necessárias para fundir os ingredientes (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Quanto às características químicas, os fluxos podem ser classificados como básicos, ácidos ou neutros. As propriedades do metal são afetadas pela basicidade do fluxo. De forma geral, fluxos básicos tendem a reduzir teores de oxigênio, enxofre e fósforo do metal, melhorando suas propriedades mecânicas. Fluxos ácidos tendem a produzir metal com maiores teores de oxigênio, fósforo e enxofre (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Existe também uma classificação quanto à influência na composição química do metal depositado, podendo ser fluxo ativo, neutro ou ligado. Fluxos neutros não alteram os teores de manganês e silício do metal, sendo próprios para soldagem multipasse. Fluxos ativos incorporam manganês e silício no metal de solda; por isso, são recomendados para aplicação com passe único e, caso sejam utilizados em multipasse, a tensão deve ser rigidamente controlada. Os fluxos ligados contêm elementos de liga e desoxidantes, podem ser utilizados

com arames de aço na soldagem de aço carbono para produzir a solda com a composição química desejada (MACHADO, 1996).

As variantes do processo SAW abordadas são:

a) Arco submerso convencional:

Processo melhor detalhado anteriormente. Apenas um arame é alimentado na poça de fusão, a taxa de deposição é a menor entre as variantes do arco submerso e o chanfro utilizado normalmente requer um grande volume de solda (ESAB, 2004). Este é o processo que requer o menor investimento inicial e também o mais comum.

b) Arco submerso com múltiplos arames:

Sistemas com múltiplos arames que combinam dois ou mais arames de soldagem alimentando uma mesma poça de fusão. Os arames podem conduzir corrente elétrica ou serem alimentados a frio, podendo também ser alimentados por uma ou várias fontes (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2004). Sistemas de soldagem com arames múltiplos não só proporcionam uma taxa de deposição maior, como também melhoram a flexibilidade operacional e a eficiência da solda. O melhor controle da taxa de deposição também pode levar a maiores velocidades de soldagem (ESAB, 2004). Esta técnica aumenta consideravelmente a taxa de deposição do material, mas requer equipamentos mais robustos e mais caros do que o sistema convencional.

c) Arco submerso com chanfro *narrow gap*:

A soldagem com chanfro narrow gap, ou chanfro estreito, é uma técnica utilizada no arco submerso, frequentemente utilizada para a soldagem de materiais com espessura com mais de 50 mm. A abertura deste tipo de chanfro varia de 13 mm até 25 mm, o ângulo de abertura também é pequeno, normalmente variando entre 0° até 8° (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2004). Esta técnica do processo SAW reduz consideravelmente o volume de soldagem, mas requer equipamentos especiais para aplicação do arame e do fluxo, além de melhores controles dos parâmetros. São necessários sistemas totalmente automatizados de posicionamento e movimentação, pois o chanfro, que é muito estreito, dificulta bastante a

visibilidade do operador. Por conta destes fatores, o investimento inicial é bem maior para esta configuração.

2.3.2 Soldagem híbrida Laser-MIG

Para compreender o processo de soldagem híbrido Laser-MIG, é necessário entender cada tecnologia de forma individual. Nesta seção são apresentadas as tecnologias Laser e MIG separadamente, posteriormente são explicadas as características da tecnologia híbrida estudada.

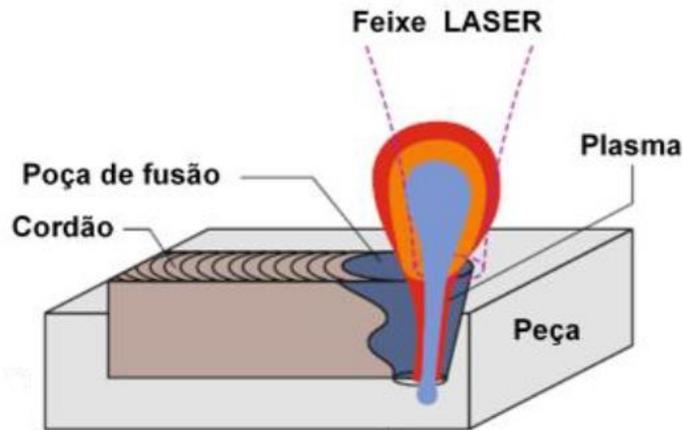
2.3.2.1 Soldagem a laser

A soldagem a laser é caracterizada por ser um processo de fusão da matéria gerada pelo aquecimento devido ao bombardeamento de fótons que formam o feixe laser, sem necessitar de contato físico (DAVIM, 2012). Possui algumas propriedades semelhantes à soldagem por feixe de elétrons, principalmente devido à grande densidade de energia envolvida no processamento, relacionado à pequena dimensão do ponto focal, mas não necessita de uma câmara de vácuo para proteção da poça fundida (KOU, 2003).

Segundo Dahotre e Harimkar (2008), o processo de bombardeamento por feixe laser de alta intensidade é capaz de fundir ou até mesmo vaporizar parcialmente um material metálico no ponto de incidência, causando um furo na peça denominado *keyhole*, penetrando profundamente o material de base, unindo as peças. De acordo com Wolf (2011) a densidade energética eleva a temperatura do substrato a valores extremamente altos, de forma que a temperatura de ebulição do metal seja atingida e parte do material evapora, formando vapor metálico ionizado (plasma).

A figura 14 exhibe soldagem com feixe laser utilizando técnica *keyhole*.

Figura 14 - Processo de soldagem laser no modo keyhole

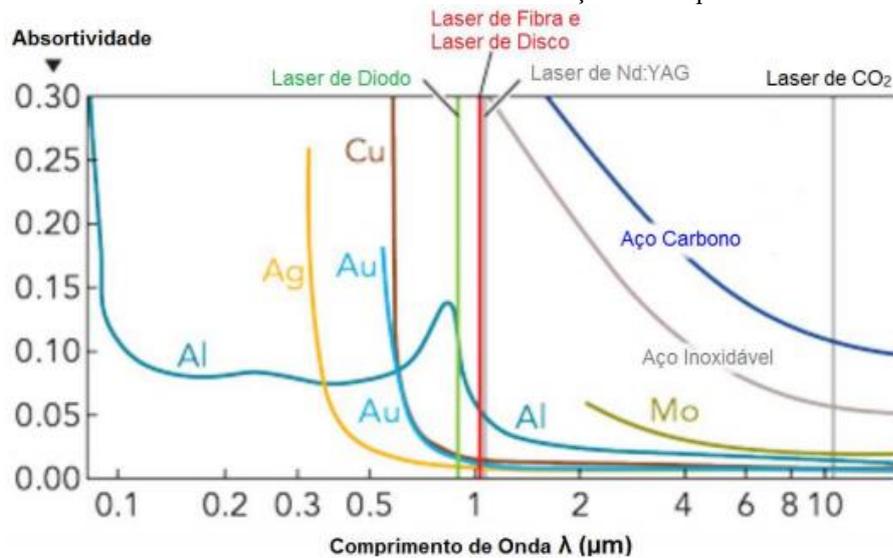


Fonte: Adaptado de Wolf (2011)

De acordo com Machado (1996), a soldagem laser possui excelente rendimento, produz juntas com alto nível de qualidade, apresenta grande densidade de energia e baixo consumo energético. Além disso, as velocidades de soldagem são altíssimas, a zona termicamente afetada é pequena e consegue-se profunda penetração no material de base. No entanto, existem também algumas desvantagens deste processo, como a necessidade de maior investimento em equipamentos, materiais, mão de obra e também se exige um posicionamento do material de base mais preciso em relação a outros processos.

Existem várias categorias de fontes laser utilizadas para inúmeras aplicações, apenas um número pequeno deles é útil para o processamento de materiais. Os dois tipos frequentemente empregados são o laser gasoso de dióxido de carbono e o laser de estado sólido Nd:YAG (READY; FARSON; FEELEY, 2001). A escolha da tecnologia correta é realizada conforme a absorvidade do material em relação ao comprimento de onda emitido pelo laser e a potência que este pode entregar. O gráfico 1 demonstra o índice de absorvidade de diferentes tipos de lasers em diferentes materiais.

Gráfico 1 - Absortividade de diferentes materiais em relação ao comprimento de onda laser



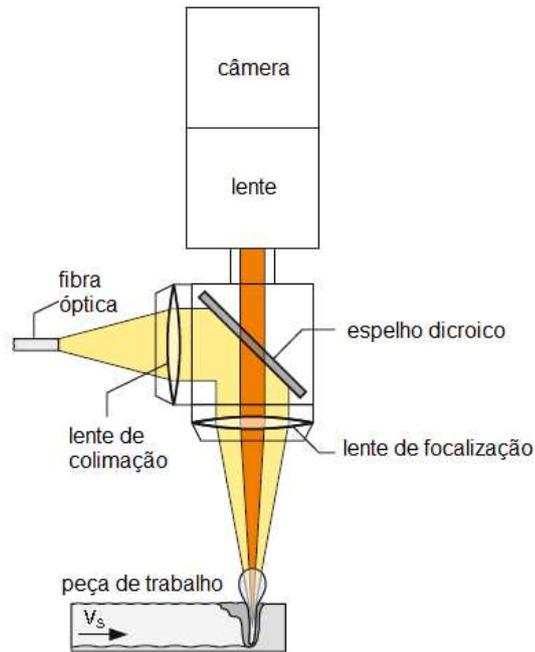
Devido ao menor comprimento de onda do laser Nd:YAG, a radiação é absorvida com muito mais intensidade no aço carbono. Logo, para uma dada espessura da peça, a soldagem com laser Nd:YAG proporciona penetração e velocidade mais altas em comparação ao laser de CO₂ (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008).

Nota-se que a escolha de uma fonte laser de Nd:YAG é mais adequada para a soldagem dos cilindros secadores, pois possui maior absorptividade no material aço carbono, melhorando o rendimento em relação ao laser de CO₂. Além disso, o laser Nd:YAG utiliza fibra ótica, sendo muito mais flexível e versátil para automação (DULEY, 1999).

As variáveis da soldagem a laser são: potência do feixe, distância focal, velocidade de soldagem e refletividade das peças (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Assim como o laser de Nd:YAG, a maioria dos lasers de alta potência para soldagem emitem comprimentos de onda na faixa de 1 μm. São necessários dispositivos ópticos (lentes e espelhos) para um preciso controle do foco e deflexão do feixe laser sobre a poça de fusão, assim como também é fundamental um sistema de monitoramento por câmera. O laser e a câmera podem compartilhar o mesmo caminho de feixe dentro do cabeçote e, portanto, o sistema de monitoramento precisa ser adaptado aos dispositivos ópticos utilizados com o feixe laser (KOWALICK, 2011). Na figura 15, é apresentado o esquemático do conjunto óptico para a focalização do laser e do sistema de monitoramento por câmera.

Figura 15 - Componentes ópticos e sistema de monitoramento do laser Nd:YAG

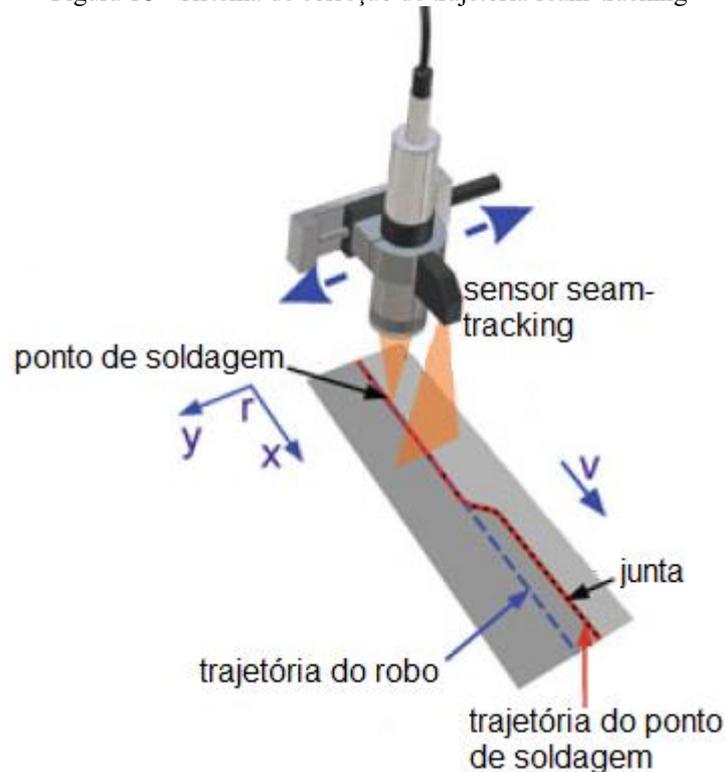


Fonte: Adaptado de Kowalick (2011)

A união de materiais utilizando laser exige um posicionamento extremamente preciso do feixe em relação à junta. Desvios ao longo da junta devem ser identificados para a correção de trajetória, garantindo soldas com melhor qualidade (KOWALICK, 2011). Logo, também é fundamental a implementação de um sistema *seam-tracking* para o monitoramento do trajeto.

A figura 16 apresenta o funcionamento do sistema *seam-tracking*.

Figura 16 - Sistema de correção de trajetória seam-tracking



Fonte: Adaptado de Kowalick (2011)

O sensor seam-tracking é fixado ao cabeçote, movendo-se junto do ponto de soldagem. Como este ponto deve corresponder à posição da junta, o sensor faz reajustes continuamente, corrigindo desvios entre a trajetória da junta e do feixe (KOWALICK, 2011).

2.3.2.2 Soldagem MIG/MAG

É a tecnologia mais convencional entre os processos de soldagem abordados neste estudo. A fonte de calor provém do arco elétrico formado entre o eletrodo metálico consumível e a peça de trabalho, a proteção da solda é realizada através de gases de proteção (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992), a soldagem MIG/MAG foi originada no início dos anos 30 no século XX, mas sua aplicabilidade só foi estabelecida após a segunda guerra mundial. Este tipo de soldagem pode ser aplicada de forma semiautomática ou automática, sendo mais comum o emprego da forma semiautomática, onde a alimentação do eletrodo é feita por um sistema mecânico, sendo a função do soldador a de iniciar, interromper e mover a tocha ao longo da região da solda. A soldagem MIG/MAG possui alta taxa de deposição e é versátil quanto ao tipo de material a ser soldado. Além disso,

possui excelentes características para robotização e tem baixo custo de aquisição e operação dos equipamentos quando comparado a outros processos (MACHADO, 1996).

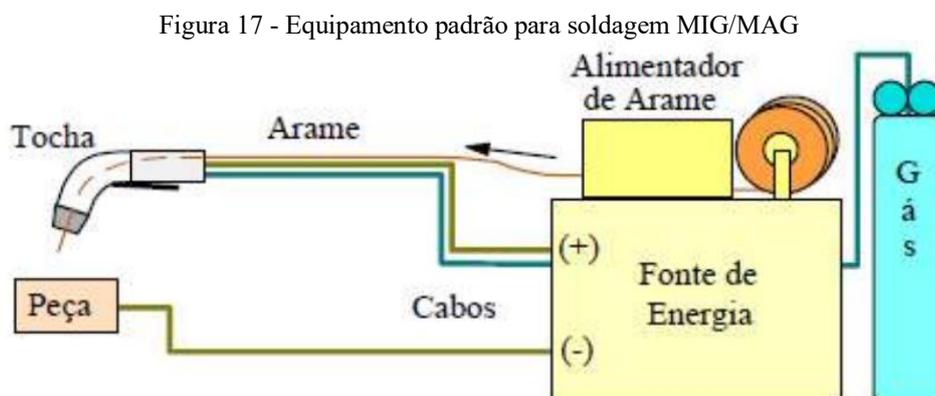
Neste processo, o metal fundido na ponta do eletrodo é transferido para a poça de fusão. O modo em que isso ocorre é importante na soldagem MIG/MAG, pois afeta características do processo como: estabilidade do arco, quantidade de gases absorvida pelo metal fundido, aplicabilidade do processo e nível de respingos gerados. O modo de transferência do metal é ajustado pela configuração da fonte de soldagem. Existem quatro formas básicas de transferência de metal de adição do eletrodo para a peça: curto-circuito, globular, spray e pulsada (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Quando aplicada junto da tecnologia laser, a transferência por spray ou pulverização, é ideal para a soldagem dos cilindros Yankee. Este modo de transferência ocorre quando elevadas densidades de corrente são empregadas com a utilização de gás argônio ou com misturas ricas em argônio para proteção da poça no material de base.

A quantidade de calor aplicada na peça é bastante elevada, sendo esse modo de transferência o mais adequado para a soldagem de chapas grossas (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009), na transferência por spray, o arco é bastante estável, praticamente não há ocorrência de respingos e o cordão obtido é suave e regular.

O equipamento padrão para a soldagem MIG/MAG é composto de uma fonte de energia, alimentador de arame, tocha de soldagem, além de cabos e mangueiras para transporte dos consumíveis. Dispositivos como posicionadores e sistemas de movimentação da tocha podem ser usados para automatização do processo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

O equipamento para soldagem MIG/MAG está representado na figura 17.



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2009)

A soldagem MIG/MAG normalmente é realizada em corrente contínua. O alimentador de arame é ligado à fonte de energia e possui controle de velocidade de alimentação. A regulagem da alimentação combinada com a tensão selecionada na fonte, determinam o valor da corrente de soldagem. A pistola pode ser refrigerada a gás ou a água, dependendo da escolha da capacidade e do fator de trabalho. O reservatório de gás normalmente é um cilindro de aço acoplado a fonte, existe também uma válvula de regulagem de pressão e um medidor de vazão do gás de proteção (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Os consumíveis utilizados na soldagem MIG/MAG são o arame eletrodo e o gás de proteção. Os arames de aço são tradicionalmente cobreados para proteção contra corrosão e melhora do contato elétrico entre este e o bico de contato da tocha. Os arames para soldagem de aços, podem ser do tipo inteiramente metálicos, também chamados sólidos, ou então do tipo tubular, com enchimento interno de fluxo de proteção, similar ao utilizado na soldagem com eletrodos revestidos. A seleção do arame numa dada operação é feita em termos da composição química do metal de base, do gás e das propriedades mecânicas desejadas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Os gases são selecionados de acordo com o modo de transferência metálica, do formato de arco e do cordão desejado. A proteção pode ser feita por gases inertes ou ativos. Gases inertes como argônio e hélio, são os mais utilizados na soldagem MIG/MAG, devendo ser misturados com pequenas quantidades de outros gases ativos como O₂ e CO₂ para a soldagem de aços. Em geral, a transferência por spray é mais utilizada com argônio do que com hélio (MACHADO, 1996).

2.3.2.3 Soldagem Laser-MIG

A soldagem híbrida utilizando laser combinada com outra fonte de arco elétrico surgiu de uma necessidade de melhorar o rendimento dos processos de soldagem. As principais técnicas a arco combinadas com laser são, TIG e MIG/MAG (PETRING, 2011). No processo híbrido, o laser serve como fonte de calor, já o segundo dispositivo de soldagem entrega calor extra e também adiciona material à poça de fusão. A combinação das tecnologias oferece um maior número de parâmetros de configuração, adequando-se melhor às condições do material, do projeto e da manufatura, o que garante maior robustez, eficiência e flexibilidade (PETRING, 2011). De acordo com Olsen (2009), o processo híbrido laser-arco mais utilizado é conhecido

como Laser-MIG. Esta combinação tem sido amplamente utilizada na indústria naval e automobilística para soldagem de chapas espessas. Além das vantagens citadas anteriormente, Petring (2011) também destaca que a soldagem híbrida entrega maiores velocidades e conseqüentemente maior produtividade em relação aos processos não híbridos. É perceptível que esta técnica possui vantagens quando comparada a outros processos separadamente, porém, sua aplicação exige maior conhecimento e especialização da mão de obra, encarecendo o processo. Além disso, duas tecnologias completamente diferentes são unidas, exigindo a aquisição de um maior número de equipamentos como fontes de soldagem e sistemas de movimentação. O custo com manutenção e preparação do processo também é acrescido.

No processo híbrido Laser-MIG, a tocha MIG possibilita a regulagem de gradientes de temperatura, além de fazer a adição de material na região da poça fundida. Aproveita-se o gás do processo MIG/MAG, que é primariamente utilizado para gerar o arco voltaico, para que também forneça uma atmosfera de proteção para a região da poça fundida, tornando desnecessária a alimentação de gás exclusivamente para a região do feixe laser (OLSEN, 2009).

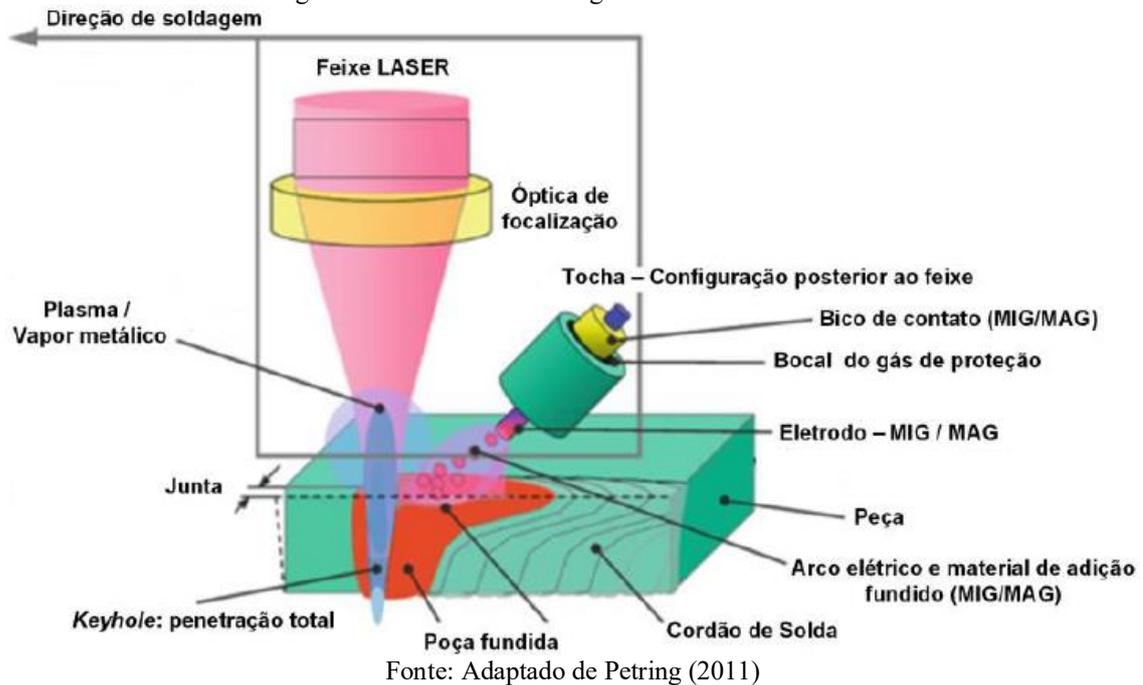
Se tratando de um processo laser, a tecnologia híbrida é necessária para a aplicação da soldagem dos cilindros Yankee, pois esta técnica exige menor qualidade dimensional na preparação das juntas, quando comparada a soldagem por laser autógena. Na soldagem autógena, as juntas são unidas sem adição de material, apenas o metal de base é fundido e soldado, qualquer falha na preparação ou no posicionamento das juntas pode acarretar em defeitos de soldagem, exigindo que o encaixe destas juntas seja perfeito. Por esta razão, o processo não híbrido se torna inviável.

Na soldagem híbrida, a adição de material é realizada pelo processo a arco MIG e compensa as imperfeições da junta. Além disto, a profundidade da soldagem da raiz pode ser maior, possibilitando a penetração completa da raiz em apenas uma passagem (PETRING, 2011). Após a união da raiz, o processo MIG é utilizado para o preenchimento do restante da junta.

Em relação à aquisição de equipamentos, as seções 2.3.2.1 e 2.3.2.2 já discutiram sobre os dispositivos necessários para a soldagem MIG/MAG e para a soldagem laser, respectivamente. O processo híbrido faz a combinação destes equipamentos.

A figura 18 mostra de forma esquemática a configuração dos instrumentos para a soldagem Laser-MIG.

Figura 18 - Processo de soldagem híbrida LASER-Arco



2.4 A CONTABILIZAÇÃO DOS CUSTOS DA SOLDAGEM

O processo de soldagem é uma etapa na fabricação de um produto e possui custos envolvidos. O custo de fabricação é definido como o valor dos insumos utilizados na fabricação. Por exemplo: material, mão de obra, energia elétrica, máquinas e equipamentos (BORNIA, 2010).

Os custos de fabricação podem ser decompostos em: matéria-prima, mão de obra direta e custos indiretos de fabricação. O custo de matéria-prima é relacionado aos materiais integrantes do produto. O custo de mão de obra direta é aquele diretamente relacionado aos trabalhadores envolvidos na produção, representa o salário dos operários. Por fim, os custos indiretos de fabricação são os demais custos de produção, como: materiais de consumo, mão de obra indireta, depreciação, energia elétrica, telefone, água, etc. (BORNIA, 2010).

Em uma análise de viabilidade econômica de um processo, é necessário fazer o levantamento de todos os custos de fabricação associados. Nas seções 2.4.1, 2.4.2, 2.4.3, 2.4.4, 2.4.5 e 2.4.6, são apresentadas equações propostas por Machado (1996) e Marques, Modenesi e Bracarense (2009). Estas equações auxiliam a estimativa dos custos da soldagem, calculando os custos de consumíveis, custos de equipamentos, custos de manutenção, custos de energia elétrica, custos de mão de obra e, por fim, o custo total em um processo de soldagem.

2.4.1 Custo dos consumíveis

O custo dos consumíveis representa o custo do metal de adição, fluxo, gás de proteção e backing cerâmico, se usados.

- **Custo do metal de adição:** A estimativa do custo do metal de adição deve avaliar a massa de material depositado, o preço do metal de adição e a eficiência do processo.

Massa do metal depositado:

$$MSOL = A * L * MESP \quad (1)$$

Onde:

A: Área da seção transversal da junta (m²);

L: Comprimento da solda (m);

MESP: Massa específica do metal de soldagem (kg/m³);

MSOL: Massa do metal depositado (kg).

Custo do metal de adição:

$$CMA = 100 * PCON * MSOL/ECON \quad (2)$$

Onde:

CMA: Custo do metal de adição (R\$);

ECON: Eficiência do consumível (%);

PCON: Preço do arame (R\$/kg).

Nas tabelas 1, 2 e 3, são apresentadas as equações de áreas típicas para os chanfros de soldagem, as massas específicas de ligas metálicas para soldagem e valores de eficiência de deposição para os processos de soldagem.

Tabela 1 - Área da seção transversal para diferentes tipos de chanfro

Tipo de Chanfro	Área da Seção Transversal
V Simples	$(e-h)*\tan(\Theta/2)+d*e$
V Duplo	$0,5*[(e-h)^2*\tan(\Theta/2)]+d*e$
K	$0,5*[(e-h)^2*\tan\Theta]+d*e$
Y	$0,25*[(e-h)^2*\tan\Theta]+d*e$

e = espessura da chapa

h = nariz;

Θ = ângulo da junta;

d = fresta.

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2009)

Tabela 2 - Massa específica de algumas ligas metálicas

Liga	Massa Específica (kg/m ³)
Aço carbono	7800
Aço inoxidável	8000
Ligas de cobre	8600
Ligas de níquel	8600
Ligas de alumínio	2800
Ligas de titânio	4700

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2009)

Tabela 3 - Valores típicos de eficiência de deposição para diferentes processos

Processo	Comprimento	Eficiência do consumível (%)
Eletrodo revestido:	350mm	55-65
	450mm	60-70
Arco submerso		95-99
MIG/MAG		85-97
Arame tubular		80-90

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2009)

- **Custo do fluxo de soldagem:** O fluxo de soldagem é utilizado para a proteção da poça de fusão durante o processo de soldagem por arco submerso. O rendimento do fluxo é um valor adimensional dado pela razão (massa de fluxo consumido) / (massa de metal depositado), valor obtido junto aos fornecedores, para cada tipo de fluxo.

Custo do fluxo:

$$CFLU = PFLU * MSOL * RFLU \quad (3)$$

Onde:

CFLU: Custo do fluxo (R\$);

PFLU: Preço do fluxo (R\$/kg);

RFLU: Rendimento do fluxo (adimensional).

- **Custo do gás de proteção:** Obtido pelo produto da vazão volumétrica do gás pelo tempo de arco e o preço do metro cúbico do gás.

Custo do gás de proteção:

$$CGAS = PGAS * VGAS * MSOL / TDEP \quad (4)$$

Onde:

CGAS: Custo do gás de proteção (R\$);

PGAS: Preço volumétrico do gás de proteção (R\$/m³);

TDEP: Taxa de deposição (kg/h);

VGAS: Vazão do gás de proteção (m³/h).

A taxa de deposição (TDEP) pode ser calculada da seguinte maneira:

$$TDEP = 36 * VAR * AAR * MESP * ECON \quad (5)$$

Onde:

AAR: Área da seção transversal do arame eletrodo (m²);

VAR: Velocidade do arame eletrodo (m/s).

Nesta equação, a constante 36 foi obtida a partir de um fator de 3600 relativo à conversão das unidades de tempo (segundo e hora) dividido por um fator de 100 para a conversão da porcentagem.

- **Custo de *backing* cerâmico:** O *backing* é utilizado para sustentar a poça de fusão durante a soldagem em juntas que possuem abertura de raiz. Seu custo é calculado pelo produto do comprimento da junta pelo custo do metro do material.

Custo de *backing* cerâmico:

$$CBAC = PBAC * L \quad (6)$$

Onde:

CBAC: Custo do *backing* cerâmico (R\$);

PBAC: Preço do *backing* cerâmico (R\$/m).

2.4.2 Custo de energia elétrica

O custo da energia elétrica depende do preço do quilowatt-hora, da potência elétrica da fonte, do tempo de operação e da eficiência elétrica do equipamento. A eficiência elétrica dos equipamentos de soldagem pode ser fornecida pelos fabricantes. Como exemplo, a eficiência de um transformador é de 80%, enquanto a de um gerador é de aproximadamente 65%.

Custo de energia elétrica da soldagem:

$$CENE = 100 * PENE * WARC * TARC / EELE \quad (7)$$

Onde:

CENE: Custo da energia elétrica (R\$);

EELE: Eficiência elétrica do equipamento de soldagem (%);

PENE: Preço da energia elétrica (R\$/kWh);

TARC: Tempo de arco aberto (h);

WARC: Potência elétrica de saída (kW).

Para o cálculo da potência elétrica em equipamentos de soldagem por arco elétrico, a seguinte expressão pode ser usada.

Potência elétrica de soldagem para arco elétrico:

$$WARC = SCOR * STEN * 10^{-3} \quad (8)$$

Onde:

SCOR: Corrente de soldagem (A);

STEN: Tensão de soldagem (V).

A potência elétrica na soldagem a laser não precisa ser calculada, pois já é um parâmetro do processo.

O cálculo do tempo de arco aberto para soldagem com processos de arco elétrico, é dado pela razão entre a massa de material depositado e a taxa de deposição do material. O tempo

de soldagem no processo laser é obtido pela razão entre o comprimento total da solda (incluindo todos os passes) e a velocidade de avanço do cabeçote.

Tempo de arco elétrico aberto:

$$TARC = MSOL/TDEP \quad (9)$$

2.4.3 Custo de manutenção

O custo de manutenção pode ser obtido de duas maneiras, na primeira é contabilizado o número de manutenções necessárias ao ano para realizar a somatória do preço dos serviços. Ou então, propõe-se a equação 10 que calcula o produto do custo de manutenção por hora de operação do equipamento com o tempo de operação do equipamento.

Custo de manutenção do equipamento:

$$CMAN = CMM * TOP \quad (10)$$

Onde:

CMAN: Custo de manutenção do equipamento (R\$);

CMM: Custo de manutenção por hora de operação do equipamento (R\$/h);

TOP: Tempo de operação (h).

2.4.4 Custo de mão de obra

O custo de mão de obra pode ser obtido pelo produto do custo unitário por hora do trabalhador envolvido na soldagem e o tempo total de soldagem. O custo unitário inclui os salários e encargos sociais de cada operador. O tempo de soldagem é a soma dos tempos de operação durante o processo de soldagem, incluindo os tempos de parada para troca de eletrodos e retirada de escória, por exemplo.

Custo de mão de obra:

$$CMO = CUN * TSOL \quad (11)$$

Onde:

CMO: Custo de mão de obra (R\$);

CUN: Custo unitário de mão de obra (R\$/h);

TSOL: Tempo de soldagem (h).

No entanto, para a elaboração de um fluxo de caixa, o custo de mão de obra pode ser considerado um custo fixo, somando o salário mais os encargos dos operadores na empresa.

2.4.5 Custo de depreciação do equipamento

Os equipamentos sofrem desgaste ao longo da vida útil, por isso é necessário determinar o valor de reposição destes, isto é, sua depreciação. De acordo com o Ministério da Economia (2017), máquinas e aparelhos elétricos para soldar (incluindo os a gás aquecido eletricamente), a laser ou outros feixes de luz ou de fótons possuem tempo de vida útil de 10 anos, com taxa de depreciação de 10% ao ano.

Custo de depreciação:

$$CDEP = (IINI - VRES)/VUTI \quad (12)$$

Onde:

CDEP: Custo de depreciação do equipamento (R\$/ano);

IINI: Valor do investimento inicial (R\$);

VRES: Valor residual do equipamento (R\$);

VUTI: Vida útil do equipamento (ano).

2.4.6 Custo total de soldagem

O custo total de soldagem é dado através da soma de todos os custos calculados anteriormente. Vale ressaltar que para a contabilização do custo dos consumíveis, é necessário avaliar quais consumíveis são realmente utilizados em cada processo.

Custo total de soldagem:

$$CTOT = CMA + CFLU + CGAS + CBAC + CENE + CMAN + CMO + CDEP \quad (13)$$

Onde:

CTOT: Custo total de soldagem (R\$).

2.5 ANÁLISE DE INVESTIMENTO

Uma análise de investimento é crucial quando mais de uma solução tecnológica pode ser implementada em um processo produtivo. A análise de investimento permite que se racionalize a utilização de recursos de capital para a solução de um problema. Para isso, é necessário o conhecimento de técnicas de engenharia econômica fundamentadas na ciência da matemática financeira (CASAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 2008).

Em situações onde o critério econômico é importante, podem ser utilizados métodos como o Valor Presente Líquido (VPL), método da Taxa Interna de Retorno (TIR), método do *Payback* Descontado, entre outras. Estas técnicas são adequadas para indicar o retorno de um investimento, dar noção do risco e auxiliar na tomada de uma decisão de escolha de uma tecnologia de processo.

Segundo Casarotto Filho e Kopittke (2008), a utilização desses métodos é justificável quando se atende às seguintes características:

- a) Ser suficientemente importante para justificar o esforço de se utilizar um método estruturado;
- b) A decisão não é óbvia, é necessário organizar o problema;
- c) O aspecto econômico influenciará na decisão.

De acordo com Slack et al. (1999), os gerentes de produção precisam entender as tecnologias com as quais estão lidando; isso significa que eles devem saber quais benefícios elas podem oferecer. Entre os benefícios que a escolha correta de uma tecnologia de processo pode proporcionar, destaca-se o aumento do retorno esperado do processo produtivo. Por isso, é justificável a utilização dos métodos propostos.

2.5.1 Fluxo de caixa

Com base nas projeções de resultados, podem-se projetar fluxos de caixa para um empreendimento. O Modelo do Fluxo de Caixa é considerado como a metodologia mais

abrangente para avaliação de ativos de empresas, é adotado como peça importante do conjunto das demonstrações financeiras e é utilizada por interessados em respostas para as variações de performance das organizações (MONTEIRO, 2003).

O modelo do fluxo de caixa serve para controle financeiro de um empreendimento e é necessário para a aplicação dos métodos de análise econômica. Casarotto Filho (2011) propõe um modelo de planilha de fluxo de caixa para análise de projetos industriais.

Tabela 4 - Planilha de fluxo de caixa

Períodos	0	1	N-1	N
- Investimento					
+ Valor Residual					
= Investimento do equipamento de soldagem					
+ Variação do lucro pela variação da produção					
- Custos variáveis de soldagem					
- Depreciação de equipamento					
+ Redução do custo de mão de obra					
= Lucro tributável					
- Imposto de renda pelo aumento da produção					
+ Depreciação de equipamento					
= Saldo final					

Fonte: Adaptado de Casarotto Filho (2011)

Para a avaliação do aumento do lucro pela implementação de uma nova tecnologia no processo produtivo, pode ser utilizada a tabela 4, uma adaptação da proposta por Casarotto Filho (2011). Nesta tabela, somente os resultados de aumento ou redução da capacidade produtiva da empresa são considerados, por isso, é necessário conhecer a margem de contribuição unitária do produto estudado.

De acordo com Bornia (2010), a margem de contribuição é definida como o valor de venda de um produto subtraído do somatório dos custos unitários variáveis deste produto. Representa a geração de lucro por produto vendido. Uma empresa que melhora sua capacidade produtiva e aumenta o volume de vendas do seu produto, sem alterar seus custos fixos, obtém lucro desta variação. Este aumento de lucro é igual à margem de contribuição unitária multiplicada pela diferença do número de produtos vendidos. Esta é a análise feita pela tabela 4. Para isso, é necessário conhecer todos os custos variáveis da produção dos cilindros secadores Yankee, além dos custos de soldagem, diferentes para cada tecnologia proposta neste estudo.

2.5.2 Taxa mínima de atratividade (TMA)

Para analisar uma proposta de investimento deve ser considerado o fato de se estar perdendo a oportunidade de auferir retornos pela aplicação do mesmo capital em outros projetos. Uma proposta para ser atrativa deve render, no mínimo, a taxa de juros equivalente à rentabilidade das aplicações correntes e de pouco risco (CASAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 2008).

Os títulos negociados no tesouro Selic são de grande liquidez e teoricamente de risco mínimo, a taxa definida no âmbito desse sistema é aceita como uma taxa livre de risco da economia, servindo de importante referencial para o custo do dinheiro no mercado financeiro, a base das taxas de juros (ASSAF NETO, 2014).

A inflação é a variação contínua nos preços gerais da economia em um dado período de tempo. Cada economia mede a sua inflação através de um índice geral de preços. No Brasil, o Índice de Preços ao Consumidor Ampliado (IPCA), é o mais relevante do ponto de vista de política econômica, sendo este o índice de preços selecionado pelo Conselho Monetário Nacional como referência para o sistema de metas de inflação (ASSAF NETO, 2014).

Como visto, a taxa Selic é adequada para ser utilizada como TMA. No entanto, seu valor divulgado é uma taxa nominal e sua rentabilidade é afetada pela inflação. Desta maneira, a TMA escolhida foi a taxa Selic descontada da inflação indicada pelo índice IPCA, ou seja, a TMA é a taxa real da Selic.

2.5.3 Valor presente líquido (VPL)

O método do VPL calcula o valor presente do somatório dos termos do fluxo de caixa somados ao investimento inicial. A taxa utilizada para descontar este fluxo, ou seja, para trazer os fluxos do futuro para o valor presente, é a TMA (CASAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 2008).

O VPL de um ativo, ou de qualquer projeto de investimento, é equivalente à quantidade de riqueza que ele poderá gerar, expressa em valores monetários e medida na data de sua análise. O VPL, então, é a metodologia proposta para medir o acréscimo, ou incremento, de riqueza propiciada pela implantação de um projeto de investimento (AVILA, 2015).

O cálculo do VPL pode ser realizado pela equação 14, proposta por Avila (2015).

Cálculo do VPL:

$$VPL = F_0 + \sum_{n=1}^k \frac{F_k}{(1+i)^k} \quad (14)$$

Onde:

F₀: Investimento inicial;

F_k: Fluxo de caixa no período k;

k: Período de análise do fluxo de caixa;

i: Taxa de desconto ou TMA.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O objetivo desta seção é o de classificar este trabalho quanto a sua abordagem, procedimentos utilizados e natureza da pesquisa. Além disso, são apresentadas as etapas metodológicas empregadas para o desenvolvimento do trabalho e solução do problema de pesquisa.

Assim, esta seção é dividida em duas partes: a primeira apresenta o enquadramento metodológico quanto à classificação da pesquisa, sua abordagem, natureza, procedimentos, coleta de dados e resultados. Na segunda parte é detalhado o passo a passo para a produção do trabalho.

3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

Para que o enquadramento metodológico seja realizado, são necessárias algumas classificações.

De acordo com Gil (2002), pesquisas descritivas podem ser utilizadas para identificar relações entre variáveis. Uma de suas características está na utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados, tais como questionários e observação sistemática. Algumas pesquisas descritivas vão além da identificação da existência de relações entre variáveis e pretendem determinar a natureza dessa relação. Nesse caso, tem-se uma pesquisa descritiva que se aproxima da explicativa. Assim sendo, este trabalho pode ser definido como uma pesquisa descritiva, visto que procura coletar informações e utilizar métodos de análise de investimentos para identificar a melhor alternativa econômica em uma aplicação específica.

Quanto à abordagem, a pesquisa qualitativa se preocupa com aspectos da realidade que não podem ser quantificados, é centrada na observação e coleta de evidências, baseada no empirismo. Já a pesquisa quantitativa é centrada na objetividade, considera que a realidade pode ser compreendida com auxílio de dados recolhidos com instrumentos padronizados e neutros. Utiliza a linguagem matemática para descrever causas de um fenômeno (FONSECA, 2002). Desta forma, a abordagem desta pesquisa é quantitativa e qualitativa. É quantitativa por utilizar variáveis fornecidas pelos agentes envolvidos e por usar linguagem matemática para elaboração de análises. É qualitativa quanto a definição dos métodos e tecnologias de processo estudadas.

Para analisar os fatos do ponto de vista empírico e confrontar a visão teórica com dados reais, torna-se necessário traçar um modelo conceitual e operativo da pesquisa; esse modelo é

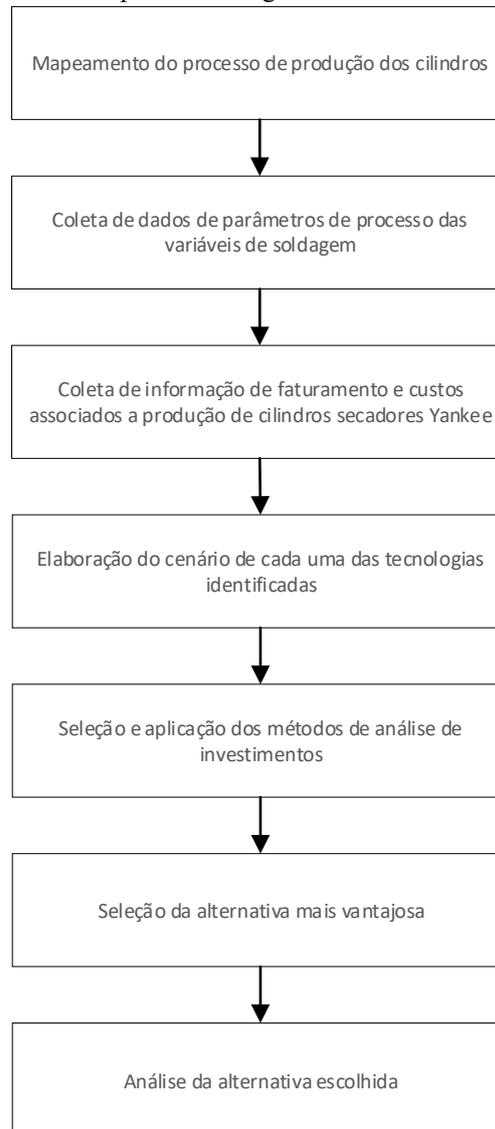
conhecido por delineamento. O delineamento é utilizado para expressar e classificar a pesquisa, com ênfase nos procedimentos técnicos de coleta e análise de dados (GIL, 2002). Este trabalho utiliza, como procedimento técnico, o estudo de caso. Segundo Fonseca (2002), um estudo de caso é caracterizado como um estudo de uma entidade bem definida, investiga uma situação específica que se supõe ser única em muitos aspectos, procurando descobrir o que há de mais essencial e característico. O estudo de caso apresenta uma forte tendência descritiva.

Quanto à coleta de dados, este trabalho faz a utilização de dados primários e também secundários. De acordo com Richardson (2008), dados primários são aqueles obtidos por observações no objeto de estudo. Dados secundários são originários de outros trabalhos ou fontes e encontram-se disponíveis para utilização. Alguns dos dados primários utilizados são: etapas do processo produtivo, tempos e custos de materiais de fabricação. Estes dados foram coletados pelo autor através de entrevistas e questionários com gestores da empresa. As fontes dos dados secundários foram artigos e publicações de organizações. Os dados secundários coletados são: parâmetros de soldagem, consumo de material, custo de energia elétrica, índice de inflação e taxa de juros.

3.2 ETAPAS DA PESQUISA

Esta seção é dedicada a apresentar as etapas utilizadas para a aquisição dos dados e informações essenciais na aplicação dos métodos de análise de investimentos e seleção da alternativa mais vantajosa na soldagem dos cilindros secadores. As etapas podem ser visualizadas na figura 19.

Figura 19 - Etapas metodológicas do trabalho



Fonte: O autor

A primeira etapa consiste no mapeamento do processo de produção dos cilindros através da elaboração de um fluxograma e do levantamento dos tempos de cada etapa de fabricação. Para isso, foram trocadas informações com profissionais da empresa estudada.

Após o mapeamento do processo produtivo, na segunda etapa foram obtidos os dados das variáveis dos custos de soldagem. Também foram definidos os parâmetros de soldagem ideais para cada tecnologia, tais como, velocidade de avanço, taxa de deposição, vazão do gás de proteção, potência de soldagem, volume e profundidade de soldagem, entre outros parâmetros. Estes dados foram obtidos com entrevistas com profissionais da empresa, pessoal especializado na área de soldagem, técnicos de laboratório e também fabricantes de equipamentos.

A terceira etapa foi o levantamento do preço de venda, do faturamento da empresa com os cilindros secadores, assim como os custos variáveis de cada etapa do processo produtivo, incluídos aqueles associados aos processos de soldagem e também das matérias-primas. Desta forma, foi possível calcular a margem de contribuição unitária utilizada no fluxo de caixa proposto. Estes dados foram coletados por meio de entrevistas com os gestores da empresa.

Na quarta etapa, estão reunidos todos os dados que afetam os fluxos de caixa de cada uma das alternativas propostas, criando um cenário para cada tecnologia. Estes cenários foram estruturados com tabelas e planilhas, identificando cada tipo de informação para que sejam aplicadas nos métodos de análise de investimentos. Para a criação dos cenários, a modelagem econômica considerou que a maior parte dos custos fixos não é afetada nas diferentes tecnologias abordadas, com exceção dos custos fixos de depreciação dos equipamentos de soldagem e a variação do custo fixo de mão de obra. Sendo assim, os custos variáveis dos processos de fabricação e matérias-primas foram contabilizados para realizar o cálculo da margem de contribuição inserida no fluxo de caixa, também são descontados os custos variáveis de soldagem. Desta forma, a modelagem econômica calcula a variação no lucro que as tecnologias poderiam proporcionar em cada cenário.

Na quinta etapa, foram levantados os métodos de análise de investimentos. Utilizando os fluxos de caixa elaborados para cada alternativa, foi determinada a TMA e foi aplicada a técnica proposta.

Na sexta etapa, são avaliados os indicadores da técnica abordada, com base nestes indicadores, é selecionada a tecnologia mais vantajosa.

Por fim, são discutidos os resultados e a aplicação da alternativa escolhida.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 A EMPRESA

A empresa estudada produz equipamentos para indústria de papel, gera aproximadamente 200 empregos diretos e fica localizada na cidade de Rio do Sul, principal município da região do Alto Vale do Itajaí, Santa Catarina. O setor metalmeccânico é um grande gerador de empregos na região e também no restante do Vale do Itajaí, sede de muitas empresas exportadoras.

Além do cilindro Yankee, objeto deste estudo, a empresa em questão também fornece soluções completas para indústria de papel, partindo de pequenos itens de reposição até mesmo máquinas de papel completas. O processo produtivo é baseado na produção por encomenda, visto que seus produtos normalmente são complexos, customizáveis, de alto valor agregado e comprados em pequena quantidade. A capacidade produtiva de cilindros Yankee atual é de aproximadamente 10 unidades ao ano, sendo a soldagem a etapa mais longa que limita o tempo de ciclo de produção.

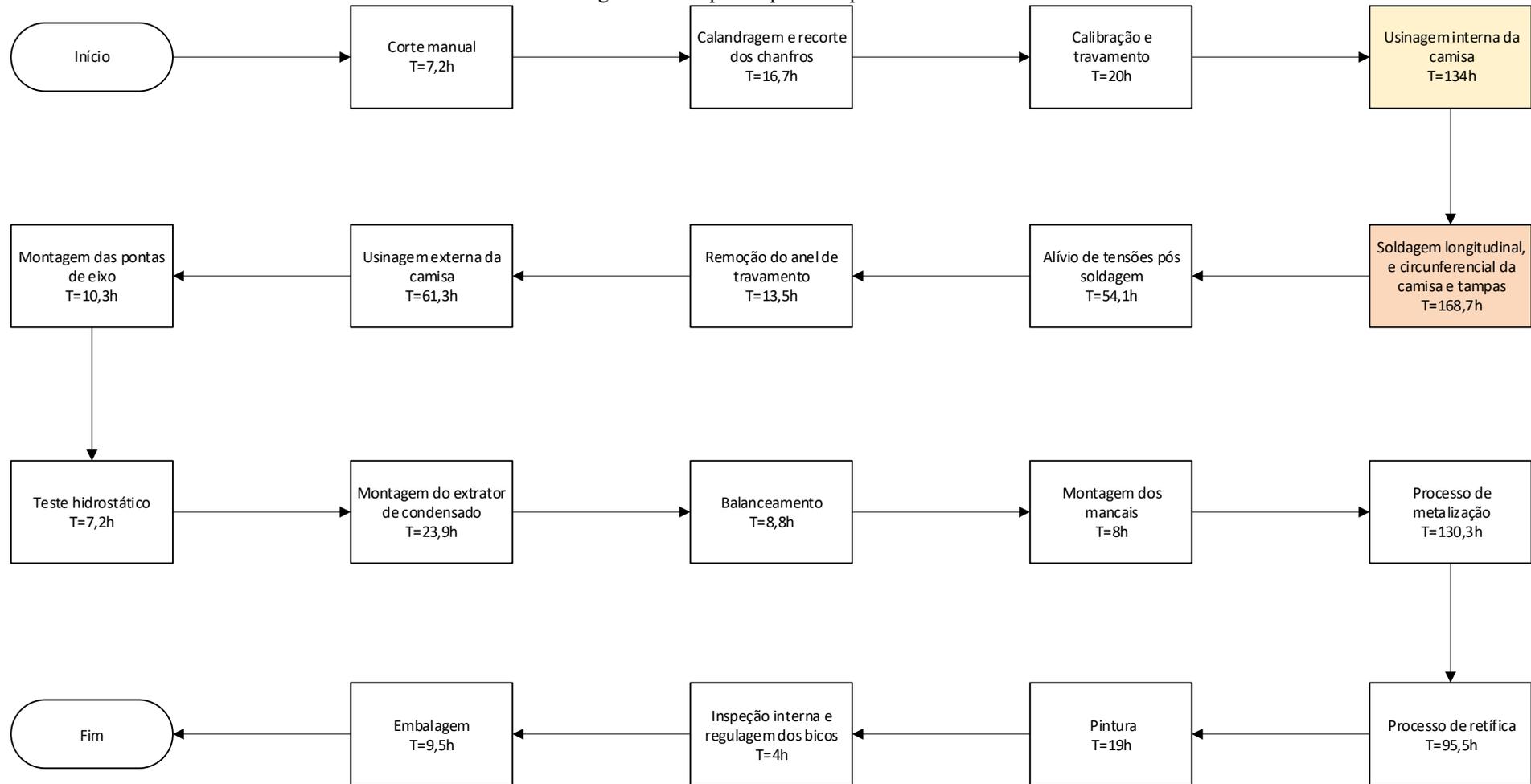
De acordo com os gestores da empresa, há demanda no mercado para justificar o aumento na capacidade de fornecimento de cilindros Yankee, sendo que, por vezes, vendas não são concretizadas devido ao *lead time* de entrega do equipamento. Parte deste *lead time* é gerado por filas de espera devido ao processo de soldagem. Por esta razão, a empresa vê a necessidade de implementar uma nova tecnologia que reduza o tempo de soldagem e aumente os lucros.

4.1.1 Processo Produtivo

O processo produtivo do cilindro Yankee é complexo e realizado em muitos postos de trabalho diferentes. Parte dos componentes possui fabricação terceirizada e são montadas na empresa.

A figura 20 apresenta a linha principal do processo produtivo do Yankee.

Figura 20 - Etapas do processo produtivo



Fonte: O autor

Na figura 20, em cada processo está indicado o tempo médio de operação no posto de trabalho. O processo de soldagem da camisa e das tampas, destacado em vermelho, é o mais longo, com tempo médio de 168,7 horas, ditando o tempo de ciclo da produção. A usinagem interna da camisa, destacada em amarelo, é a segunda etapa mais extensa, com tempo médio de 134 horas.

Com a melhoria no processo de soldagem, a usinagem pode se tornar o novo gargalo. Isso ocorre quando o tempo de soldagem se torna inferior a 134 horas, que é a duração média da usinagem interna. Se esta situação ocorrer, o tempo de ciclo de produção será ditado, então, pela usinagem, pois terá o novo tempo mais longo no processo produtivo. Sendo assim, tecnologias de soldagem extremamente rápidas e caras podem não valer a pena, caso não sejam melhoradas outras etapas na produção.

Detalhando melhor a figura, o processo se inicia com a retirada das chapas do estoque levando o material até o primeiro posto de trabalho, onde é realizado o corte manual com oxicorte. O material recortado é utilizado para formação da camisa e tampas do cilindro.

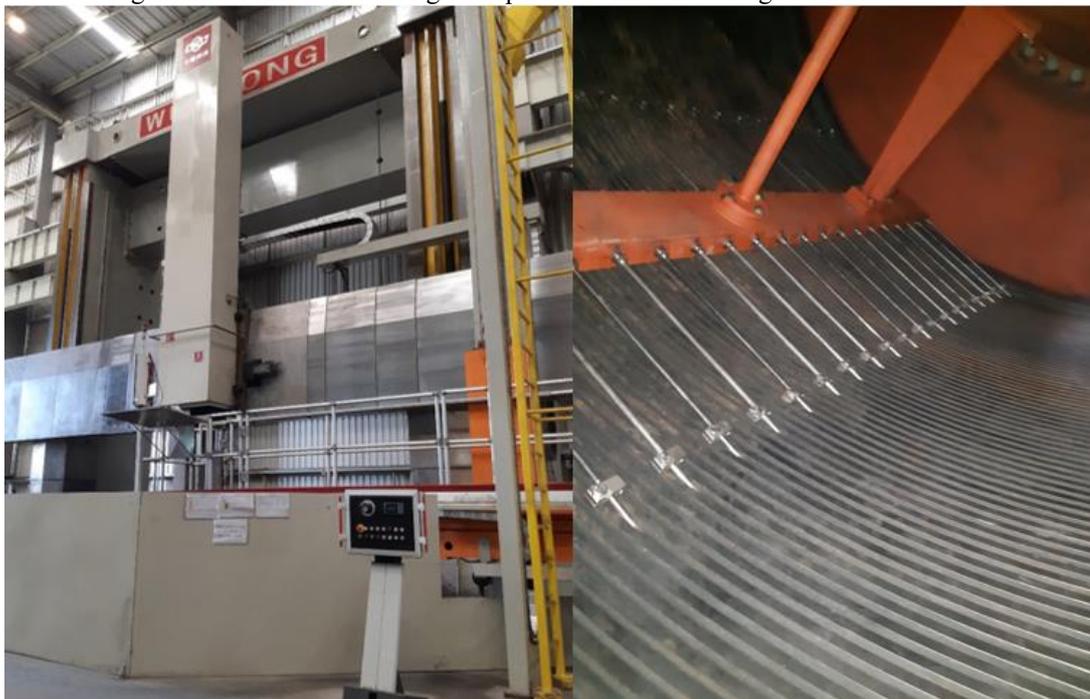
Após o recorte bruto do material, as bordas das chapas são recortadas no formato dos chanfros que serão posteriormente soldados. No mesmo posto de trabalho, o operador utiliza uma ponte rolante para colocar a chapa da camisa na calandra, onde é dobrada em formato cilíndrico.

O material é encaminhado para o próximo posto de trabalho, onde são soldados os anéis de travamento na parte externa da camisa. Estes anéis são utilizados apenas para calibração e movimentação do Yankee durante sua fabricação, sendo removidos em etapa posterior. Na calibração, os anéis são posicionados de forma a garantir o formato cilíndrico da camisa para realização da usinagem interna.

Com a camisa travada na posição correta, o cilindro é encaminhado para o posto de trabalho do torno vertical de grande porte, é feita a usinagem interna da camisa, onde são formadas profundas ranhuras na superfície que melhoram a eficiência da troca de calor com o papel durante a etapa de secagem, processo descrito na seção 2.2.

A figura 21 apresenta o posto do torno vertical de grande porte e o detalhe da usinagem realizada neste posto.

Figura 21 - Torno vertical de grande porte e detalhe da usinagem interna da camisa



Fonte: O autor

No posto seguinte, efetua-se a soldagem longitudinal da camisa e as soldagens circunferenciais das tampas, formando o corpo principal do produto. No meio desta etapa, antes da soldagem da segunda tampa, encaixa-se o stay central do Yankee. A soldagem atualmente é executada com arco submerso convencional.

Por conta do aço utilizado no Yankee, é necessário eliminar as tensões do material após a etapa de soldagem, pois estas tensões podem gerar trincas e falhas frágeis no produto. Por isso, no processo seguinte, o cilindro é inserido em um grande forno com aproximadamente 600°C para alívio das tensões, permanecendo aquecido por cerca de 54 horas.

Após o alívio das tensões, o cilindro é encaminhado para o posto de remoção dos anéis de travamento com discos de corte. Em seguida, é conduzido para o posto ao lado, onde ocorre a usinagem externa da superfície da camisa no torno vertical de menor porte.

Com o cilindro usinado, são montadas as pontas de eixo e é executado o teste hidrostático, processo no qual o cilindro é preenchido de água pressurizada com o objetivo de verificar a ocorrência de vazamentos.

No posto seguinte, os extratores de condensado são montados no cilindro. É necessário que operadores trabalhem no seu interior, posicionando os extratores entre o stay central e a camisa.

Após a montagem dos componentes internos, o Yankee é direcionado para o balanceamento, onde é rotacionado e são realizadas as devidas correções de contrapeso. Este procedimento é seguido pela montagem dos mancais.

Na etapa de metalização, o Yankee é apoiado sobre os mancais e conectado a um rotor. O cilindro permanece girando enquanto sua superfície é revestida com um material em forma de pó com propriedades mecânicas e térmicas desejadas.

O último processo na superfície do cilindro é a retificação, onde ocorre o acerto final do diâmetro e do acabamento. Esta etapa é crucial no tempo de vida útil do produto, pois garante a correta cilindricidade da superfície que trabalhará sob pressão da lâmina de crepagem.

Com o cilindro devidamente retificado, seguem as etapas de pintura das tampas, inspeção e regulagem dos bicos e finalmente, a embalagem.

A figura 22 exibe o cilindro Yankee durante o processo de embalagem para posterior expedição.

Figura 22 - Cilindro Yankee para expedição



Fonte: O autor

4.2 SELEÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE INVESTIMENTO

Para a escolha das alternativas de investimento, foram observadas as características necessárias. Levou-se em conta que a soldagem dos cilindros deve ser de alta qualidade, sem presença de trincas, inclusões ou falhas de penetração. Um levantamento foi obtido diretamente com fornecedores de equipamentos para soldagem.

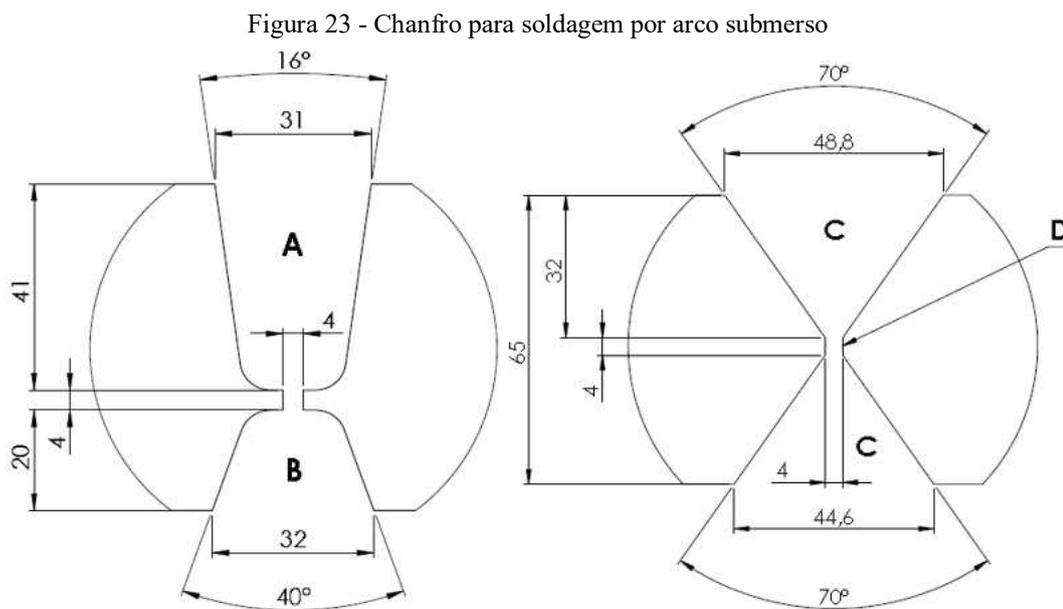
Nesta seção, são apresentados os equipamentos e as propriedades de cada alternativa estudada.

a) Soldagem por arco submerso convencional:

É a tecnologia utilizada atualmente e que está entre as opções de escolha, pois a empresa precisa renovar seu maquinário que está próximo ao fim da vida útil.

Esta opção utiliza apenas um arame com classificação EM12K de 2,4mm de diâmetro. Sua taxa de deposição é a menor entre as opções com arco submerso. Neste processo, é utilizada também a solda TIG para a união da raiz, sendo necessário a aquisição de uma fonte para este tipo de soldagem.

Os chanfros utilizados no SAW convencional são apresentados na figura 23.



Fonte: O autor

No lado esquerdo da figura 23, é apresentado o chanfro utilizado para soldagem circunferencial das tampas do Yankee. Neste chanfro, a parte “A” é preenchida por arco

submerso, enquanto a parte “B” é soldada com TIG. O lado direito da figura retrata o chanfro para emenda longitudinal da camisa, sendo a parte “C” preenchida com arco submerso e a parte central “D” soldada com TIG.

Com esta configuração, é necessário executar goivagem para a inspeção da raiz da solda, processo que remove pequenos poros da soldagem TIG, mas que aumenta consideravelmente o tempo de inspeção.

O quadro 3 apresenta os consumíveis utilizados no processo.

Quadro 3 - Consumíveis para SAW convencional

Tipo de Consumível	Modelo
Fluxo para arco submerso	Lincolnweld 860, classificação F7A2-EM12K
Arame para arco submerso	EM12K, 2,4mm
Arame para solda TIG	ER70S-3, 3,2mm
Gás de proteção TIG	Argônio 100%

Fonte: O autor

No quadro 4, encontram-se os parâmetros de processo e as características técnicas.

Quadro 4 - Parâmetros e tempos do processo SAW convencional

Parâmetros	SAW	TIG
Tensão (V)	34	14
Corrente (A)	370	190
Velocidade de alimentação do arame (mm/s)	35,4	4,4
Vazão do gás de proteção (l/min)	-	10,0
Potência elétrica de soldagem (kW)	12,6	2,7
Eficiência da fonte (%)	80	80
Eficiência do consumível (%)	97	95
Massa de soldagem (kg)	220,5	87,9
Taxa de deposição (kg/h)	4,4	0,95
Tempo de arco aberto (h)	50,5	92,5
Tempo de inspeção, setup e parada de máquina (h)	25,7	
Tempo total de soldagem (h)	168,7	

Fonte: O autor

Notas: Massa de soldagem e tempos relativos à produção de um cilindro secador Yankee.

Com esta tecnologia, o tempo de soldagem de uma unidade tem média de 168,7 horas. Este tempo gera uma capacidade de fabricação de 10 unidades por ano, a mesma capacidade da empresa atualmente. Reinvestir neste equipamento não irá alterar a produtividade da empresa.

O quadro 5 apresenta os equipamentos necessários para aplicação do processo SAW convencional.

Quadro 5 - Equipamentos para SAW convencional

Item	Quantidade
Coluna CAB 460 7x4	1
Virador CD/CI, 90 toneladas	1
Controlador NA-5	1
Cabeçote alimentador Max SA 22	1
Fonte Idealarc DC-1000	1
Fonte Aspect 375 AC/DC TIG Welder	1

Fonte: O autor

A figura 24 demonstra parte do equipamento para SAW convencional atualmente utilizado na empresa.

Figura 24 - Equipamento para soldagem SAW convencional



Fonte: O autor

b) Soldagem por arco submerso com múltiplos arames:

O design do chanfro para a soldagem com arco submerso utilizando múltiplos arames não sofre alterações, os chanfros da figura 23 também são empregados nesta técnica. A quantidade de material de adição é a mesma, mas a soldagem será executada com uma taxa de deposição maior.

Neste processo, dois arames são alimentados a quente por uma fonte elétrica, enquanto um terceiro arame isolado eletricamente é alimentado a frio sobre a poça de fusão, aumentando a taxa de deposição. Nesta configuração, é comum encontrar taxas de até 20 kg/h, mas taxas muito elevadas geram deformações indesejáveis no material de base, tornando-as inviáveis para

aplicação nos cilindros secadores. Testes realizados a pedido da empresa chegaram ao limite de 8 kg/h com deformação dentro dos limites aceitáveis. Ainda assim, esta configuração é preferível em relação ao método com alimentação de três arames a quente, processo que gera ainda mais deformações no material.

Além dos chanfros, os consumíveis de processo utilizados no SAW com múltiplos arames também são os mesmos do SAW convencional, estes já foram detalhados no quadro 3. A soldagem TIG também é aplicada para a união da raiz, e a única diferença no procedimento entre os dois processos é a inclusão de dois arames que possuem a mesma classificação do primeiro.

O quadro 6 apresenta os parâmetros do processo.

Quadro 6 - Parâmetros e tempos do processo SAW com múltiplos arames

Parâmetros	SAW	TIG
Tensão (V)	37	14
Corrente (A)	900	190
Velocidade de alimentação do arame (mm/s)	64,9	4,4
Vazão do gás de proteção (l/min)	-	10,0
Potência elétrica de soldagem (kW)	33,3	2,7
Eficiência da fonte (%)	80	80
Eficiência do consumível (%)	97	95
Massa de soldagem (kg)	220,5	87,9
Taxa de deposição (kg/h)	8,0	0,95
Tempo de arco aberto (h)	27,6	92,5
Tempo de inspeção, setup e parada de máquina (h)	25,3	
Tempo total de soldagem (h)	145,3	

Fonte: O autor

Notas: Massa de soldagem e tempos relativos à produção de um cilindro secador Yankee.

Esta tecnologia apresenta tempo de soldagem com média de 145,3 horas, tempo que eleva a capacidade de fabricação para 12 unidades ao ano, aumentando a produção em 2 unidades anuais.

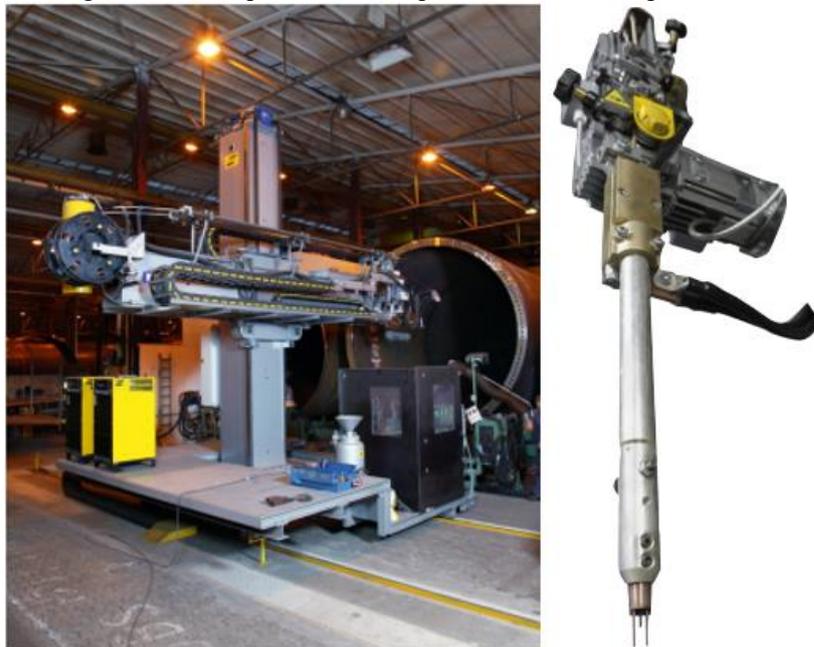
O quadro 7 apresenta os equipamentos necessários para aplicação do processo SAW com múltiplos arames e a figura 25 mostra o manipulador e a tocha utilizados nesta configuração.

Quadro 7 - Equipamentos para SAW com múltiplos arames

Item	Quantidade
Coluna CAB 460 7x4	1
Virador CD/CI-90	1
Cabeçote A6S com sistema alimentador triplo, seguidor de juntas e controlador	1
Fonte Aristo 1000 AC/DC	1
Câmera e monitor	1
Recuperador de fluxo com filtro	1
Lincoln Aspect 375 AC/DC TIG Welder	1

Fonte: O autor

Figura 25 – Manipulador e tocha para SAW com múltiplos arames



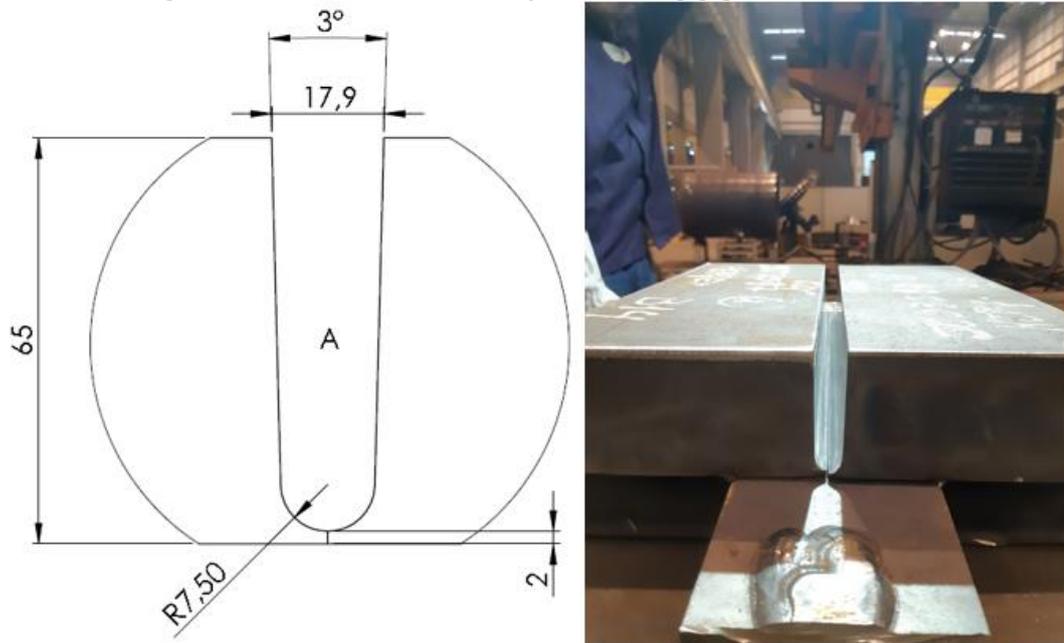
Fonte: Esab (2020)

c) Soldagem com arco submerso *narrow gap*:

A técnica *narrow gap* se diferencia das duas anteriores por reduzir bastante o volume de solda, além disso, a raiz pode ser preenchida diretamente com arco submerso, já que a solda é realizada por apenas um dos lados do chanfro. O tempo de inspeção é reduzido pela eliminação da goivagem, o processo TIG para união da raiz também se torna desnecessário.

A figura 26 exibe o detalhamento da junta e a imagem do chanfro utilizado em um teste conduzido em chapa plana para garantir a viabilidade técnica. Esta junta é aplicada na soldagem das tampas e na emenda longitudinal da camisa.

Figura 26 - Detalhamento e teste de junta *narrow gap* para arco submerso



Fonte: O autor

Para que a raiz seja preenchida nesta configuração, é necessário adicionar um *backing* cerâmico na parte posterior da junta. Como o arco submerso gera uma grande diluição do material e o comprimento da raiz é de apenas 2 milímetros de espessura, o backing cerâmico será responsável pela sustentação da poça fundida durante a soldagem do primeiro passe. A aplicação deste material gera acréscimo no custo variável no processo, mas permite a eliminação da solda TIG e da goivagem. Por esta razão, o mesmo trabalho poderá ser executado com três operadores a menos, gerando economia no custo com mão de obra direta.

O processo SAW *narrow gap* utiliza apenas um arame de alimentação, sua taxa de deposição é semelhante ao processo SAW convencional.

O quadro 8 apresenta os consumíveis deste processo.

Quadro 8 - Consumíveis para SAW *narrow gap*

Tipo de Consumível	Modelo
Fluxo arco submerso	Lincolnweld 860, classificação F7A2-EM12K
Arame para arco submerso	EM12K 2,4mm
Backing Cerâmico	JN-404 com canal 8 mm

Fonte: O autor

O quadro 9 exhibe os parâmetros utilizados na técnica SAW *narrow gap*.

Quadro 9 - Parâmetros e tempos do processo SAW *narrow gap*

Parâmetros	SAW
Tensão (V)	28
Corrente (A)	400
Velocidade de alimentação do arame (mm/s)	49,9
Potência elétrica de soldagem (kW)	11,2
Eficiência da fonte (%)	80
Eficiência do consumível (%)	97
Massa de soldagem (kg)	201,8
Taxa de deposição (kg/h)	6,2
Tempo de arco aberto (h)	32,8
Tempo de inspeção, setup e parada de máquina (h)	7,4
Tempo total de soldagem (h)	40,2

Fonte: O autor

O tempo de soldagem utilizando esta tecnologia tem média de 40,2 horas, valor consideravelmente menor do que o tempo da usinagem interna da camisa. Desta forma, a usinagem se torna o novo gargalo do processo produtivo, ditando o novo tempo de ciclo da produção em 134 horas. Com o processo SAW *narrow gap*, a capacidade instalada da empresa não será maior do que 13 unidades ao ano, gerando acréscimo de 3 unidades em relação ao processo atual.

O quadro 10 apresenta os equipamentos para aplicação do processo SAW *narrow gap* e a figura 27 exhibe o cabeçote utilizado neste processo.

Quadro 10 - Equipamentos para SAW *narrow gap*

Item	Quantidade
Coluna CAB 460 7x4	1
Virador CD/CI-90	1
Cabeçote <i>Narrow Gap</i> HNG <i>Single</i> com seguidor de juntas e controlador	1
Fonte Aristo 1000 AC/DC	1
Câmera e monitor	1
Recuperador de fluxo e filtro	1

Fonte: O autor

Figura 27 - Cabeçote para soldagem SAW *narrow gap*

Fonte: Kaiyuan (2020)

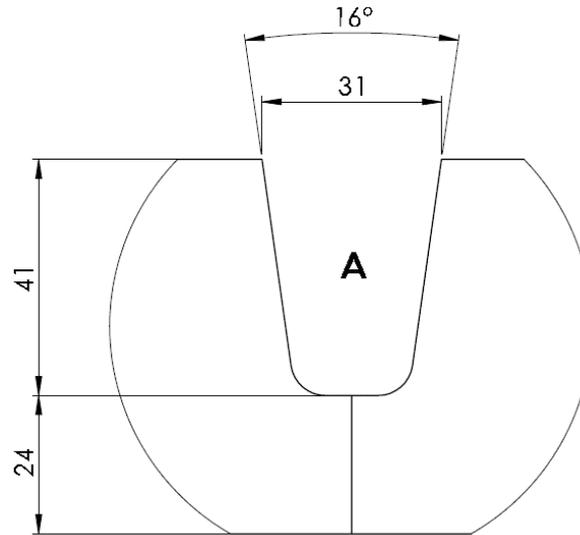
A técnica *narrow gap* utiliza equipamentos como manipulador de solda e virador de cilindros semelhantes ao arco submerso com múltiplos arames, no entanto, seu cabeçote apresenta tecnologias mais modernas de movimentação e correção de trajetória, tornando o custo de aquisição deste equipamento mais elevado. Como a tocha trabalha no interior do chanfro estreito, sua movimentação é completamente automatizada, o cabeçote conta com sensores que trabalham com deslocamento linear e até mesmo com inclinação lateral de saída do arame. Isso garante o posicionamento exato e evita qualquer contato da tocha com a parede do chanfro soldado.

d) Soldagem Laser-MIG:

Assim como a técnica *narrow gap*, a soldagem Laser-MIG permite que a união dos materiais seja realizada por apenas um dos lados da junta, eliminando a necessidade do processo TIG. Neste caso, o volume de soldagem também é menor do que o processo SAW convencional, esta redução ocorre por conta da grande espessura do nariz da junta. O nariz é soldado rapidamente com Laser-MIG com velocidade de aproximadamente 600 mm/min, o restante da junta é preenchido pelo processo MIG.

A figura 28 apresenta a junta proposta para o processo Laser-MIG. Esta junta é utilizada tanto para união das tampas quanto para a emenda longitudinal da camisa.

Figura 28 - Chanfro para soldagem Laser-MIG



Fonte: O autor

A alta concentração de energia proporcionada pelo laser, aliada a estabilidade do arco MIG, permite a penetração profunda no material. Desta maneira, o nariz de 24 milímetros de espessura é completamente unido em um único passe. Após a etapa de soldagem do nariz, a região “A” da figura 28 é preenchida somente pelo processo MIG. A eliminação da solda TIG e da goivagem permite que o mesmo trabalho de soldagem seja realizado com três operadores a menos, reduzindo o custo fixo da empresa.

O quadro 11 apresenta os consumíveis do processo Laser-MIG.

Quadro 11 - Consumíveis para Laser-MIG

Tipo de Consumível	Modelo
Arame MIG	ER70S-6, 1,2mm
Gás de proteção	Ar+CO ₂ +O ₂

Fonte: O autor

O quadro 12 aponta os parâmetros do processo Laser-MIG.

Quadro 12 - Parâmetros e tempos do processo Laser-MIG

Parâmetros	Laser + MIG	MIG
Tensão (V)	25	25
Corrente (A)	300	300
Velocidade de alimentação do arame (mm/s)	227	227
Vazão do gás de proteção (l/min)	4,0	4,0
Potência elétrica de soldagem (kW)	17,5	7,5
Eficiência da fonte (%)	90	80
Eficiência do consumível (%)	90	90
Massa de soldagem (kg)	4,7	206
Taxa de deposição (kg/h)	6,5	6,50
Tempo de arco aberto (h)	0,7	31,7
Tempo de inspeção, setup e parada de máquina (h)	7,4	
Tempo total de soldagem (h)	39,9	

Fonte: O autor

A tecnologia Laser-MIG apresenta tempo de soldagem com média de 39,9 horas. Assim como o que ocorre na soldagem SAW *narrow gap*, o valor é menor do que o tempo da usinagem interna da camisa. Por conta disso, a usinagem se torna o novo gargalo do processo produtivo, ditando o novo tempo de ciclo da produção.

Com o processo Laser-MIG, a capacidade instalada da empresa é limitada em 13 unidades anuais, gerando acréscimo de 3 unidades ao ano em relação ao processo atual.

No quadro 13, são detalhados os equipamentos para aplicação do processo Laser-MIG.

Quadro 13 - Equipamentos para Laser-MIG

Item	Quantidade
Coluna CAB 460 7x4	1
Virador CD/CI-90	1
Cabeçote Laser-MIG YW52 com seguidor de juntas	1
Fonte Laser fibra YLS-10000	1
Sistema de câmera e monitor	1
Power Wave S500 Pulsed MIG	1

Fonte: O autor

A figura 29 apresenta o cabeçote utilizado para soldagem a laser onde também é acoplada a tocha MIG para aplicação do processo híbrido.

Figura 29 - Cabeçote YW52 com sistema de monitoramento de juntas



Fonte: Precitec (2020)

4.3 INVESTIMENTOS, CUSTOS E RECEITAS

Para realizar a análise de investimento e selecionar a melhor das alternativas, é necessário obter os custos relevantes relativos a cada opção abordada e estima-se, também, a receita gerada em cada cenário.

4.3.1 Investimento inicial

A estimativa dos investimentos iniciais foi obtida com fornecedores de equipamentos de soldagem. No ano de 2016, visando uma possível melhoria nos processos, a empresa já havia solicitado orçamento de novos dispositivos relacionados a tecnologia SAW. Os mesmos fornecedores foram contatados novamente para atualização dos preços.

No caso do processo com soldagem laser, o Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina possui equipamentos semelhantes e concedeu detalhes de alguns custos de aquisição, também foram repassados os contatos dos seus fornecedores para obtenção de preços atualizados.

a) Soldagem por arco submerso convencional:

Tabela 5 - Investimento inicial para SAW convencional

Item	Preço	
Coluna CAB 460 7x4	R\$	379.371,13
Virador CD/CI-90	R\$	303.658,78
Controlador NA-5	R\$	26.796,17
Cabeçote alimentador Max SA 22	R\$	26.763,82
Fonte Idealarc DC-1000	R\$	60.324,60
Fonte Aspect 375 AC/DC TIG Welder	R\$	33.222,00
Instalação	R\$	119.000,00
Treinamento	R\$	50.400,00
Total	R\$	999.536,50

Fonte: O autor

b) Soldagem por arco submerso com múltiplos arames:

Tabela 6 - Investimento inicial para SAW com múltiplos arames

Item	Preço	
Coluna CAB 460 7x4	R\$	379.371,13
Virador CD/CI-90	R\$	303.658,78
Cabeçote A6S com sistema alimentador triplo, seguidor de juntas e controlador	R\$	953.037,66
Fonte Aristo 1000 AC/DC	R\$	189.685,57
Câmera e monitor	R\$	64.849,76
Recuperador de fluxo e filtro	R\$	94.842,81
Lincoln Aspect 375 AC/DC TIG Welder	R\$	33.222,00
Instalação	R\$	119.000,00
Treinamento	R\$	50.400,00
Total	R\$	2.188.067,70

Fonte: O autor

c) Soldagem com arco submerso *narrow gap*:Tabela 7 - Investimento inicial para SAW com *narrow gap*

Item	Preço	
Coluna CAB 460 7x4	R\$	379.371,13
Virador CD/CI-90	R\$	303.658,78
Cabeçote <i>Narrow Gap</i> HNG <i>single</i> com seguidor de juntas e controlador	R\$	1.251.128,00
Fonte Aristo 1000 AC/DC	R\$	189.685,57
Câmera e monitor	R\$	64.849,76
Recuperador de fluxo e filtro	R\$	94.842,81
Instalação	R\$	119.000,00
Treinamento	R\$	50.400,00
Total	R\$	2.452.936,05

Fonte: O autor

d) Soldagem Laser-MIG:

Tabela 8 - Investimento inicial para soldagem Laser-MIG

Item	Preço	
Coluna CAB 460 7x4	R\$	379.371,13
Virador CD/CI-90	R\$	303.658,78
Cabeçote Laser-MIG YW52 com seguidor de juntas	R\$	238.922,00
Fonte Laser fibra YLS-10000	R\$	1.882.692,00
Sistema de câmera e monitor	R\$	97.274,63
Power Wave S500 Pulsed MIG	R\$	63.420,00
Instalação	R\$	151.130,00
Treinamento	R\$	84.168,00
Total	R\$	3.200.636,55

Fonte: O autor

4.3.2 Custo de componentes e matéria-prima

Para calcular a margem de contribuição a ser aplicada no método de análise de investimento, é necessário conhecer o custo da matéria-prima e dos componentes empregados no cilindro.

Entre os principais itens adicionados ao Yankee, encontram-se as chapas de aço carbono para fabricação das tampas e da camisa, os eixos, stay central, mancais com rolamentos e junta rotativa, tampas de mancal e extratores de condensado.

Estes componentes são comprados semimanufaturados, a finalização é executada em outro setor da empresa e por fim são montados no cilindro. O custo de cada um destes itens foi fornecido pela empresa.

A tabela 9 detalha as quantidades e o custo de cada componente para a fabricação de uma unidade do cilindro Yankee.

Tabela 9 - Custos dos componentes do cilindro Yankee

Item	Custo unitário		Quantidade	Custo total	
Chapa de aço da camisa	R\$	107.891,35	1	R\$	107.891,35
Chapa de aço da tampa	R\$	67.849,15	2	R\$	135.698,30
Stay central	R\$	51.944,80	1	R\$	51.944,80
Anel externo do Stay central	R\$	5.669,90	2	R\$	11.339,80
Ponta de eixo	R\$	41.435,00	2	R\$	82.870,00
Mancal com rolamento e união rotativa	R\$	49.391,00	2	R\$	98.782,00
Tampas de mancal	R\$	3.362,93	4	R\$	13.451,70
Extrator de condensado	R\$	61.753,56	1	R\$	61.753,56
Custo total dos componentes				R\$	563.731,51

Fonte: O autor

4.3.3 Custos variáveis dos processos de fabricação

Outros custos a serem levantados para determinar a margem de contribuição, são os custos variáveis dos diversos processos de fabricação em que o cilindro Yankee é submetido. Estes processos já foram apresentados na figura 20. Os custos de soldagem não serão abordados nesta seção, pois estes sofrerão variações em cada cenário estudado.

Os custos variáveis dos outros processos de fabricação foram fornecidos pela empresa. Os valores obtidos são uma média do custo/hora de cada equipamento com base no consumo de energia elétrica, desgaste de máquina, manutenção e consumíveis. Como o tempo médio de cada processo também é conhecido, é possível obter uma estimativa do custo variável.

A tabela 10 demonstra o custo variável das etapas de fabricação para a produção de uma unidade do cilindro Yankee.

Tabela 10 - Custo variável dos processos de fabricação

Processo	Custo/hora	Tempo médio do processo (h)	Custo do processo
Corte manual	R\$ 70,00	7,2	R\$ 504,00
Calandragem e recorte dos chanfros	R\$ 60,00	16,7	R\$ 1.002,00
Calibração e travamento	R\$ 80,00	20	R\$ 1.600,00
Usinagem interna	R\$ 129,55	134	R\$ 17.360,00
Alívio de tensões pós soldagem (Forno)	R\$ 185,00	54,1	R\$ 10.008,50
Remoção dos anéis de travamento	R\$ 60,00	13,5	R\$ 810,00
Usinagem externa	R\$ 124,00	61,3	R\$ 7.601,20
Montagem das pontas de eixo	R\$ 60,00	10,3	R\$ 618,00
Teste hidrostático	R\$ 60,00	7,2	R\$ 432,00
Montagem do extrator de condensado	R\$ 60,25	23,9	R\$ 1.440,00
Balanceamento	R\$ 126,82	8,8	R\$ 1.116,00
Montagem dos mancais	R\$ 60,00	8	R\$ 480,00
Processo de metalização	R\$ 190,25	130,3	R\$ 24.790,00
Processo de retificação	R\$ 94,20	95,5	R\$ 8.996,10
Pintura	R\$ 256,00	19	R\$ 4.864,00
Inspeção interna e regulagem dos bicos	R\$ 80,00	4	R\$ 320,00
Embalagem	R\$ 90,00	9,5	R\$ 855,00
Custo total dos processos de fabricação			R\$ 82.796,80

Fonte: O autor

4.3.4 Custos da soldagem

Os custos de soldagem foram tratados de outra forma, pois são diferentes em cada processo estudado. Para facilitar o cálculo, estes custos não foram incluídos na margem de contribuição unitária, sendo utilizados posteriormente na elaboração do fluxo de caixa de cada alternativa.

O custo dos consumíveis de soldagem, como, material de adição, fluxo de soldagem, backing cerâmico e gases de proteção, foram obtidos diretamente com o departamento de compras da empresa em estudo e estão expostos na tabela 11.

Tabela 11 - Custo unitário dos consumíveis de soldagem

Item	Preço	Unidade
Arame SAW EM12K, 2,4mm	7,66	R\$/kg
Fluxo SAW Lincolnweld 860, classificação F7A2-EM12K	5,58	R\$/kg
Backing cerâmico JN-404 com canal 8mm	11,21	R\$/m
Arame TIG ER70S-3, 3,2mm	11,64	R\$/kg
Gás Argônio 100%	19,36	R\$/m ³
Arame MIG ER70S-6, 1,2mm	5,78	R\$/kg
Gás Ar+CO ₂ +O ₂	19,30	R\$/m ³

Fonte: O autor

Multiplicando o custo unitário de cada consumível pela quantidade utilizada na produção de uma unidade do cilindro Yankee, são obtidos os custos totais dos consumíveis para cada tecnologia, exibidos na tabela 12.

Tabela 12 - Custo dos consumíveis para produção de uma unidade do cilindro Yankee de acordo com a tecnologia de soldagem

Item	SAW convencional	SAW múltiplos arames	SAW narrow gap	Laser-MIG
Arame SAW EM12K, 2,4mm	R\$ 1.740,95	R\$ 1.740,95	R\$ 1.593,24	R\$ -
Fluxo SAW Lincolnweld 860, classificação F7A2-EM12K	R\$ 1.722,23	R\$ 1.722,23	R\$ 1.576,10	R\$ -
Backing cerâmico JN-404 com canal 8mm	R\$ -	R\$ -	R\$ 289,44	R\$ -
Arame TIG ER70S-3, 3,2mm	R\$ 1.076,58	R\$ 1.076,58	R\$ -	R\$ -
Gás Argônio 100%	R\$ 1.074,36	R\$ 1.074,36	R\$ -	R\$ -
Arame MIG ER70S-6, 1,2mm	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 1.353,95
Gás Ar+CO ₂ +O ₂	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 150,24
Total do processo	R\$ 5.614,12	R\$ 5.614,12	R\$ 3.458,78	R\$ 1.504,19

Fonte: O autor

A soldagem também gera custo com energia elétrica, manutenção e depreciação dos equipamentos.

Para estimar o custo com energia elétrica, foi levantado o consumo de cada tecnologia para a produção de uma unidade do cilindro Yankee. A tarifa em R\$/kWh foi obtida com a empresa Celesc, fornecedora de energia elétrica. O perfil consumidor está classificado no subgrupo A3. Também foram contabilizados os impostos incidentes sobre a tarifa base para calcular a tarifa efetiva que é apresentada na tabela 13.

Tabela 13 - Tarifa de energia elétrica

Descrição	Valor
Tarifa base (R\$/kWh)	0,45
PIS (%)	1,34
COFINS (%)	6,19
ICMS (%)	25
Tarifa efetiva (R\$/kWh)	0,67

Fonte: Celesc (2020)

A tabela 14 apresenta o custo de energia elétrica para a produção de uma unidade do Yankee em cada processo estudado.

Tabela 14 - Custo de energia elétrica por unidade

Processo	Consumo (kWh)	Custo de energia elétrica
SAW convencional	1101,7	R\$ 741,97
SAW múltiplos arames	1454,6	R\$ 979,61
SAW <i>narrow gap</i>	459,3	R\$ 309,30
Laser-MIG	312,0	R\$ 210,14

Fonte: O autor

O custo com manutenção foi obtido por fornecedores de equipamentos que concederam o preço de kits de peças de reposição. Dividindo o preço destes kits pela taxa de utilização anual, foi possível estimar o custo de manutenção por hora de uso do equipamento, conforme proposto pela equação 10.

A tabela 15 apresenta o custo de manutenção dos equipamentos de soldagem para a produção de uma unidade do cilindro Yankee.

Tabela 15 - Custo de manutenção por unidade produzida

Processo	Custo de manutenção por hora de operação (R\$/h)	Custo de manutenção por unidade produzida
SAW convencional	45,00	R\$ 6.434,81
SAW múltiplos arames	50,00	R\$ 6.002,35
SAW <i>narrow gap</i>	50,00	R\$ 1.640,28
Laser-MIG	120,00	R\$ 3.892,11

Fonte: O autor

Os três processos que utilizam arco submerso possuem custo de manutenção por hora de operação semelhantes, isso ocorre pois possuem os mesmos fornecedores e trabalham com componentes similares. O processo Laser-MIG apresenta um custo por hora maior por conta do seu conjunto ótico, que é frágil e possui alto valor agregado.

Com os custos de soldagem descritos anteriormente, foi possível calcular o somatório dos custos variáveis de soldagem para a produção de uma unidade do Yankee, assim como também foi calculado o somatório anual. Estes valores estão expostos na tabela 16.

Tabela 16 - Somatório dos custos variáveis de soldagem

Processo	Produção anual	Custo de soldagem por cilindro		Custo anual de soldagem	
SAW convencional	10	R\$	12.790,90	R\$	127.908,99
SAW múltiplos arames	12	R\$	12.596,08	R\$	151.152,96
SAW <i>narrow gap</i>	13	R\$	5.408,36	R\$	70.308,67
Laser-MIG	13	R\$	5.606,44	R\$	72.883,73

Fonte: O autor

Também é necessário estimar a depreciação dos equipamentos. O valor da depreciação incide sobre o preço de aquisição dos equipamentos de soldagem. Os custos com instalação e treinamento descritos no investimento inicial não afetam a depreciação, pois estes são serviços prestados pela empresa fornecedora. O valor residual dos equipamentos foi considerado como 10% do valor inicial. A tabela 17 apresenta o custo de depreciação de cada alternativa.

Tabela 17 - Custo anual de depreciação

Processo	Valor dos equipamentos		Valor residual	Custo anual de depreciação	
SAW convencional	R\$	830.136,50	R\$ 83.013,65	R\$	74.712,29
SAW múltiplos arames	R\$	2.018.667,70	R\$ 201.866,77	R\$	181.680,09
SAW <i>narrow gap</i>	R\$	2.283.536,05	R\$ 228.353,60	R\$	205.518,24
Laser-MIG	R\$	2.965.338,55	R\$ 296.533,85	R\$	266.880,47

Fonte: O autor

A depreciação foi incluída no fluxo de caixa de cada alternativa para o cálculo do imposto de renda.

O custo fixo com a mão de obra direta também impacta na decisão. A escolha de algumas alternativas irá alterar este custo por eliminar alguns processos utilizados atualmente. Por exemplo, o processo SAW *narrow gap* e o processo Laser-MIG dispensam a união da raiz utilizando TIG, reduzindo a necessidade de 3 operários no processo de soldagem. Já os processos SAW convencional e SAW com múltiplos arames, não alteram a necessidade de mão de obra direta para fabricação do cilindro Yankee. O salário de cada operário, juntamente com os encargos trabalhistas envolvidos nesta função, é de R\$3450,35 por mês.

A tabela 18 apresenta a redução anual no custo de mão de obra direta para cada alternativa em relação ao processo utilizado atualmente.

Tabela 18 - Variação do custo de mão de obra direta para as diferentes alternativas

Processo	Redução no número de operários	Economia anual com mão de obra direta	
SAW convencional	0	R\$	-
SAW múltiplos arames	0	R\$	-
SAW <i>narrow gap</i>	3	R\$	124.212,60
Laser-MIG	3	R\$	124.212,60

Fonte: O autor

4.3.5 Margem de contribuição unitária e variação do lucro pela variação da produção

Para calcular o valor da margem de contribuição unitária dos cilindros Yankee, entrou-se em contato com um representante comercial da empresa para obtenção do preço de venda dos cilindros. Deste valor, foram descontados os custos variáveis de matéria-prima, detalhados na tabela 9, e os custos dos processos de fabricação apresentados na tabela 10. Os processos de soldagem apresentam custos diferentes para cada tecnologia abordada, por isso não foram contabilizados no cálculo da margem de contribuição unitária. A margem de contribuição unitária é calculada na tabela 19.

Tabela 19 - Cálculo da margem de contribuição unitária

Descrição	Valor	
(+) Preço de venda	R\$	1.950.000,00
(-) Custo de matéria-prima	R\$	563.731,51
(-) Custo dos processos de fabricação	R\$	82.796,80
(=) Margem de contribuição unitária	R\$	1.303.471,69

Fonte: O autor

Com o valor da margem de contribuição unitária obtido, calculou-se a variação do lucro anual por conta da variação da quantidade produzida com cada processo. Estes valores, expostos na tabela 20, representam o quanto a empresa teria de acréscimo no seu lucro apenas por variar a quantidade de produtos vendidos, sem alterar os custos fixos. Sobre estes valores também são descontados os impostos gerados pela variação do lucro.

Tabela 20 - Variação do lucro anual para cada tecnologia

Processo	Aumento na produção (unidades)	Aumento do lucro pelo aumento na produção	
SAW convencional	0	R\$	-
SAW múltiplos arames	2	R\$	2.606.943,38
SAW <i>narrow gap</i>	3	R\$	3.910.415,07
Laser-MIG	3	R\$	3.910.415,07

Fonte: O autor

Como descrito anteriormente, a tecnologia SAW convencional é o processo utilizado atualmente, por conta disso, o reinvestimento nesta opção não irá gerar variação na quantidade produzida, tampouco aumento do lucro.

4.4 ANÁLISE DE RETORNO

4.4.1 Determinação da taxa mínima de atratividade (TMA)

A taxa mínima de atratividade deste estudo foi determinada pela média do histórico da taxa Selic dos últimos dez anos. Este período de tempo foi escolhido por ser o mesmo da análise do fluxo de caixa. Para determinar a taxa real, a média da taxa Selic foi descontada pela média do IPCA também dos últimos dez anos. O IPCA mede a inflação no período.

O valor da TMA obtida foi de 3,69% ao ano.

4.4.2 Fluxo de caixa

A partir dos dados da margem de contribuição e dos custos de soldagem, foram elaborados os fluxos de caixa de cada alternativa de investimento em equipamento de soldagem. O horizonte de análise escolhido foi de 10 anos, o mesmo tempo de vida útil dos equipamentos. A partir dos resultados obtidos, foi realizada a análise econômica.

Na tabela seguinte, a opção de reinvestimento no equipamento SAW convencional apresenta apenas valores negativos. Isso não significa que o reinvestimento não terá retorno positivo, pois, na análise, foram considerados apenas os custos e receitas relevantes, que se prestam a comparar as alternativas. Este método foi utilizado para comparação com as outras tecnologias abordadas que ampliam a capacidade produtiva.

Tabela 21 - Fluxo de caixa SAW convencional

Períodos	0		1		2		3		4		5	
- Investimento	R\$	999.536,50	R\$	-								
+ Valor Residual	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
= Investimento do equipamento de soldagem	-R\$	999.536,50	R\$	-								
+ Variação do lucro pela variação da produção	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
- Custos variáveis de soldagem	R\$	-	R\$	127.908,99								
- Depreciação de equipamento	R\$	-	R\$	74.712,29								
+ Redução do custo de mão de obra	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
= Lucro tributável	R\$	-	-R\$	202.621,28								
- Imposto de renda pelo aumento da produção	R\$	-	-R\$	30.393,19								
+ Depreciação de equipamento	R\$	-	R\$	74.712,29								
= Saldo final	-R\$	999.536,50	-R\$	97.515,80								
Períodos	6		7		8		9		10			
- Investimento	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-		
+ Valor Residual	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	83.013,65		
= Investimento do equipamento de soldagem	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	83.013,65		
+ Variação do lucro pela variação da produção	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-		
- Custos variáveis de soldagem	R\$	127.908,99	R\$	127.908,99	R\$	127.908,99	R\$	127.908,99	R\$	127.908,99		
- Depreciação de equipamento	R\$	74.712,29	R\$	74.712,29	R\$	74.712,29	R\$	74.712,29	R\$	74.712,29		
+ Redução do custo de mão de obra	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-		
= Lucro tributável	-R\$	202.621,28	-R\$	202.621,28	-R\$	202.621,28	-R\$	202.621,28	-R\$	119.607,63		
- Imposto de renda pelo aumento da produção	-R\$	30.393,19	-R\$	30.393,19	-R\$	30.393,19	-R\$	30.393,19	-R\$	17.941,14		
+ Depreciação de equipamento	R\$	74.712,29	R\$	74.712,29	R\$	74.712,29	R\$	74.712,29	R\$	74.712,29		
= Saldo final	-R\$	97.515,80	-R\$	97.515,80	-R\$	97.515,80	-R\$	97.515,80	-R\$	26.954,20		

Fonte: O autor

Tabela 22 - Fluxo de caixa SAW com múltiplos arames

Períodos	0		1		2		3		4		5	
- Investimento	R\$	2.188.067,70	R\$	-								
+ Valor Residual	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
= Investimento do equipamento de soldagem	-R\$	2.188.067,70	R\$	-								
+ Variação do lucro pela variação da produção	R\$	-	R\$	2.606.943,38								
- Custos variáveis de soldagem	R\$	-	R\$	151.152,96								
- Depreciação de equipamento	R\$	-	R\$	181.680,09								
+ Redução do custo de mão de obra	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
= Lucro tributável	R\$	-	R\$	2.274.110,33								
- Imposto de renda pelo aumento da produção	R\$	-	R\$	749.197,51								
+ Depreciação de equipamento	R\$	-	R\$	181.680,09								
= Saldo final	-R\$	2.188.067,70	R\$	1.706.592,91								
Períodos	6		7		8		9		10			
- Investimento	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-		
+ Valor Residual	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	201.866,77		
= Investimento do equipamento de soldagem	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	201.866,77		
+ Variação do lucro pela variação da produção	R\$	2.606.943,38	R\$	2.606.943,38	R\$	2.606.943,38	R\$	2.606.943,38	R\$	2.606.943,38		
- Custos variáveis de soldagem	R\$	151.152,96	R\$	151.152,96	R\$	151.152,96	R\$	151.152,96	R\$	151.152,96		
- Depreciação de equipamento	R\$	181.680,09	R\$	181.680,09	R\$	181.680,09	R\$	181.680,09	R\$	181.680,09		
+ Redução do custo de mão de obra	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-		
= Lucro tributável	R\$	2.274.110,33	R\$	2.274.110,33	R\$	2.274.110,33	R\$	2.274.110,33	R\$	2.475.977,10		
- Imposto de renda pelo aumento da produção	R\$	749.197,51	R\$	749.197,51	R\$	749.197,51	R\$	749.197,51	R\$	817.832,21		
+ Depreciação de equipamento	R\$	181.680,09	R\$	181.680,09	R\$	181.680,09	R\$	181.680,09	R\$	181.680,09		
= Saldo final	R\$	1.706.592,91	R\$	1.706.592,91	R\$	1.706.592,91	R\$	1.706.592,91	R\$	1.839.824,98		

Fonte: O autor

Tabela 23 - Fluxo de caixa SAW *narrow gap*

Períodos	0	1	2	3	4	5
- Investimento	R\$ 2.452.936,05	R\$ -				
+ Valor Residual	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
= Investimento do equipamento de soldagem	-R\$ 2.452.936,05	R\$ -				
+ Variação do lucro pela variação da produção	R\$ -	R\$ 3.910.415,07				
- Custos variáveis de soldagem	R\$ -	R\$ 70.308,67				
- Depreciação de equipamento	R\$ -	R\$ 205.518,24				
+ Redução do custo de mão de obra	R\$ -	R\$ 124.212,60				
= Lucro tributável	R\$ -	R\$ 3.758.800,76				
- Imposto de renda pelo aumento da produção	R\$ -	R\$ 1.253.992,26				
+ Depreciação de equipamento	R\$ -	R\$ 205.518,24				
= Saldo final	-R\$ 2.452.936,05	R\$ 2.710.326,75				
Períodos	6	7	8	9	10	
- Investimento	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	-
+ Valor Residual	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 228.353,60	
= Investimento do equipamento de soldagem	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 228.353,60	
+ Variação do lucro pela variação da produção	R\$ 3.910.415,07	R\$ 3.910.415,07	R\$ 3.910.415,07	R\$ 3.910.415,07	R\$ 3.910.415,07	
- Custos variáveis de soldagem	R\$ 70.308,67	R\$ 70.308,67	R\$ 70.308,67	R\$ 70.308,67	R\$ 70.308,67	
- Depreciação de equipamento	R\$ 205.518,24	R\$ 205.518,24	R\$ 205.518,24	R\$ 205.518,24	R\$ 205.518,24	
+ Redução do custo de mão de obra	R\$ 124.212,60	R\$ 124.212,60	R\$ 124.212,60	R\$ 124.212,60	R\$ 124.212,60	
= Lucro tributável	R\$ 3.758.800,76	R\$ 3.758.800,76	R\$ 3.758.800,76	R\$ 3.758.800,76	R\$ 3.987.154,36	
- Imposto de renda pelo aumento da produção	R\$ 1.253.992,26	R\$ 1.253.992,26	R\$ 1.253.992,26	R\$ 1.253.992,26	R\$ 1.331.632,48	
+ Depreciação de equipamento	R\$ 205.518,24	R\$ 205.518,24	R\$ 205.518,24	R\$ 205.518,24	R\$ 205.518,24	
= Saldo final	R\$ 2.710.326,75	R\$ 2.710.326,75	R\$ 2.710.326,75	R\$ 2.710.326,75	R\$ 2.861.040,12	

Fonte: O autor

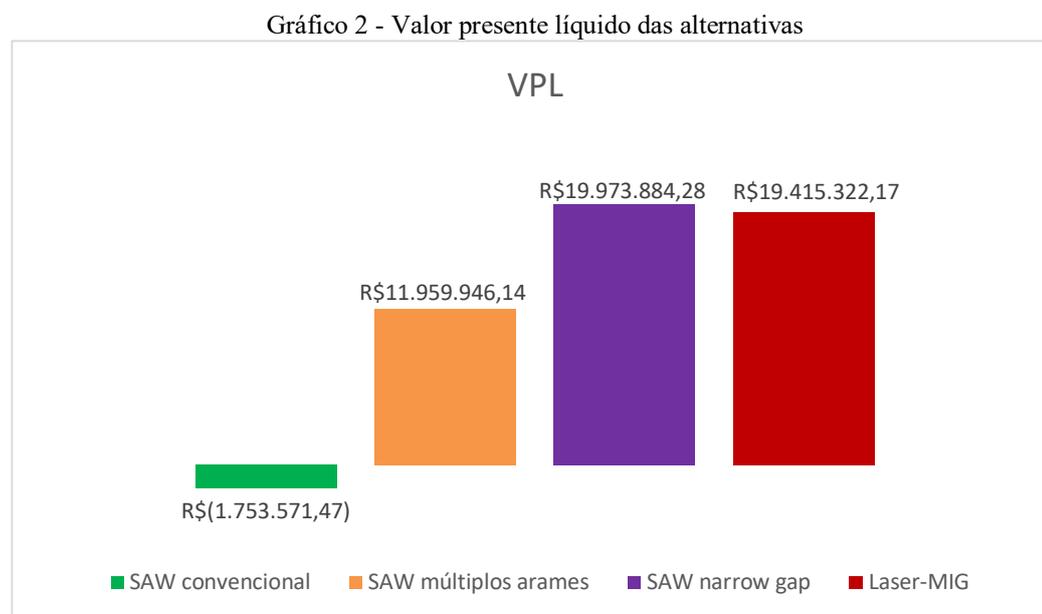
Tabela 24 - Fluxo de caixa Laser-MIG

Períodos	0	1	2	3	4	5
- Investimento	R\$ 3.200.636,55	R\$ -				
+ Valor Residual	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
= Investimento do equipamento de soldagem	-R\$ 3.200.636,55	R\$ -				
+ Variação do lucro pela variação da produção	R\$ -	R\$ 3.910.415,07				
- Custos variáveis de soldagem	R\$ -	R\$ 72.883,73				
- Depreciação de equipamento	R\$ -	R\$ 266.880,47				
+ Redução do custo de mão de obra	R\$ -	R\$ 124.212,60				
= Lucro tributável	R\$ -	R\$ 3.694.863,47				
- Imposto de renda pelo aumento da produção	R\$ -	R\$ 1.232.253,58				
+ Depreciação de equipamento	R\$ -	R\$ 266.880,47				
= Saldo final	-R\$ 3.200.636,55	R\$ 2.729.490,36				
Períodos	6	7	8	9	10	
- Investimento	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	
+ Valor Residual	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 296.533,85	
= Investimento do equipamento de soldagem	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 296.533,85	
+ Variação do lucro pela variação da produção	R\$ 3.910.415,07	R\$ 3.910.415,07	R\$ 3.910.415,07	R\$ 3.910.415,07	R\$ 3.910.415,07	
- Custos variáveis de soldagem	R\$ 72.883,73	R\$ 72.883,73	R\$ 72.883,73	R\$ 72.883,73	R\$ 72.883,73	
- Depreciação de equipamento	R\$ 266.880,47	R\$ 266.880,47	R\$ 266.880,47	R\$ 266.880,47	R\$ 266.880,47	
+ Redução do custo de mão de obra	R\$ 124.212,60	R\$ 124.212,60	R\$ 124.212,60	R\$ 124.212,60	R\$ 124.212,60	
= Lucro tributável	R\$ 3.694.863,47	R\$ 3.694.863,47	R\$ 3.694.863,47	R\$ 3.694.863,47	R\$ 3.991.397,33	
- Imposto de renda pelo aumento da produção	R\$ 1.232.253,58	R\$ 1.232.253,58	R\$ 1.232.253,58	R\$ 1.232.253,58	R\$ 1.333.075,09	
+ Depreciação de equipamento	R\$ 266.880,47	R\$ 266.880,47	R\$ 266.880,47	R\$ 266.880,47	R\$ 266.880,47	
= Saldo final	R\$ 2.729.490,36	R\$ 2.729.490,36	R\$ 2.729.490,36	R\$ 2.729.490,36	R\$ 2.925.202,70	

Fonte: O autor

4.4.3 Valor presente líquido (VPL)

A partir da elaboração dos fluxos de caixa e da determinação da TMA, foi possível calcular o valor presente líquido para cada alternativa.



Fonte: O autor

Renovar o equipamento de soldagem com SAW convencional é a escolha menos atrativa, mas, neste caso, seu valor negativo não significa que a opção é inviável, mas evidencia que esta gera um resultado menos interessante quando comparada com outras opções.

A tecnologia SAW com múltiplos arames tem um retorno um pouco melhor, mas não reduz o tempo de soldagem a ponto de eliminar o gargalo, apresentando um resultado intermediário.

As tecnologias SAW *narrow gap* e Laser-MIG proporcionam tempos de soldagem semelhantes. Por serem técnicas mais eficientes, transferem o gargalo do processo para a usinagem interna da camisa. Os valores obtidos das duas alternativas são parecidos, com certa vantagem para o SAW *narrow gap* por exigir um investimento inicial menor.

4.4.4 Análise de sensibilidade

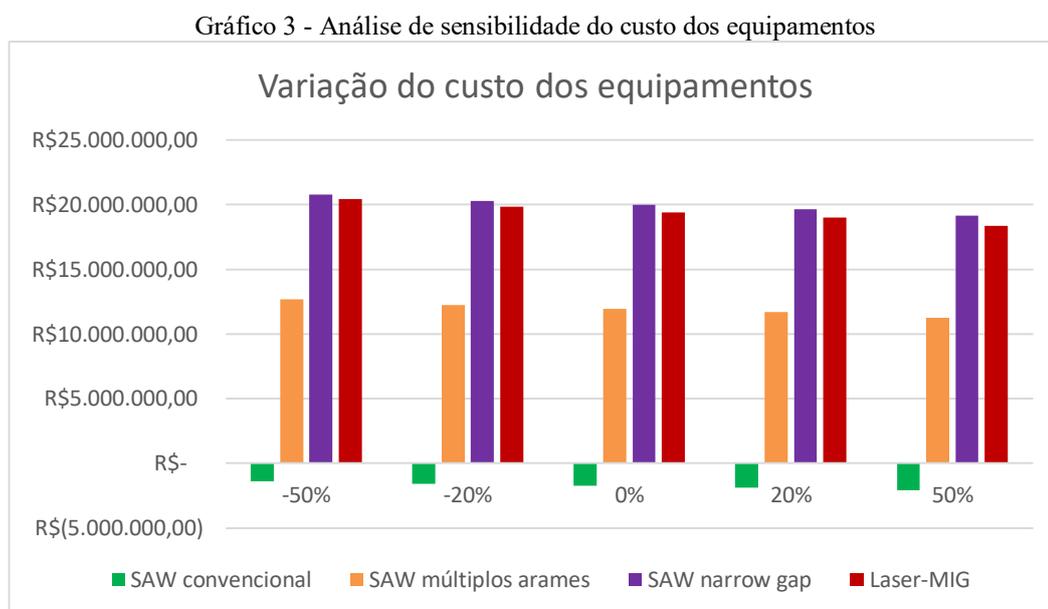
De acordo com Casarotto Filho e Kopittke (2008), na análise de sensibilidade, estuda-se o efeito que a variação de um dado de entrada pode ocasionar nos resultados. Quando a pequena variação de um parâmetro afeta fortemente a rentabilidade de um negócio, significa

que este negócio é sensível a este parâmetro, podendo ser interessante avaliar os impactos no negócio.

Como visto na seção 4.3.4 e 4.4.2, os custos variáveis da soldagem não afetam o fluxo de caixa de forma significativa, não justificando uma análise de sensibilidade.

O investimento inicial representa um impacto considerável no retorno das opções. Além disso, boa parte dos componentes são importados; isso significa que o custo de aquisição dos equipamentos está atrelado diretamente ao dólar, moeda que tem ganhado valor frente ao real nos últimos anos. Por estes motivos, é justificável uma análise de sensibilidade do investimento inicial.

O gráfico 3 apresenta o valor presente líquido de cada opção com a variação percentual do custo de aquisição dos equipamentos de soldagem.

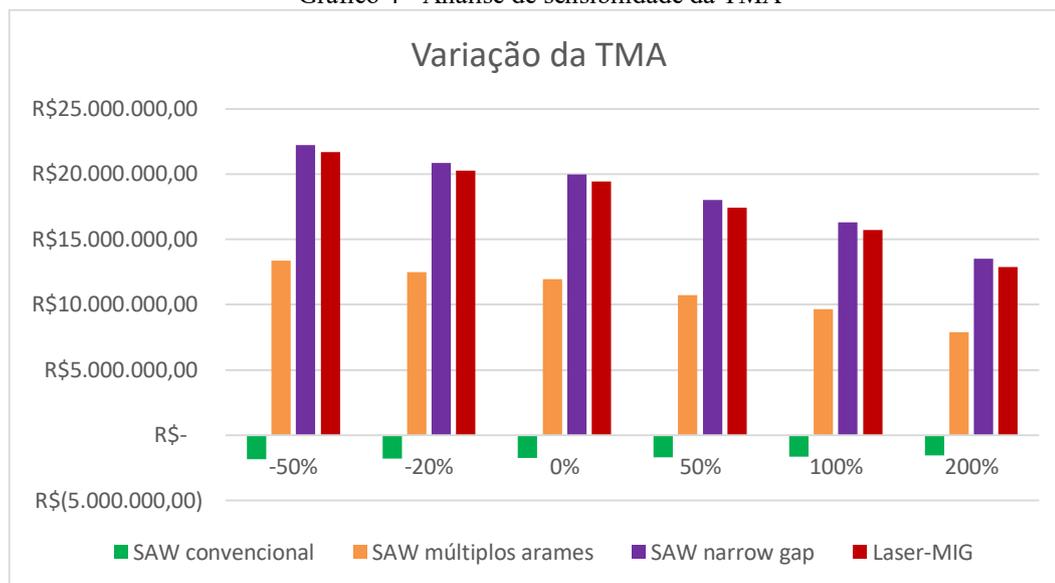


Fonte: O autor

Mesmo com uma oscilação positiva ou negativa no custo de aquisição dos equipamentos, a alternativa SAW *narrow gap* continua sendo a que apresenta o maior VPL.

Outro parâmetro que pode ser abordado é a TMA. A taxa Selic está sempre sujeita a sofrer variações e este dado afeta o retorno dos fluxos futuros, impactando o VPL.

Gráfico 4 - Análise de sensibilidade da TMA

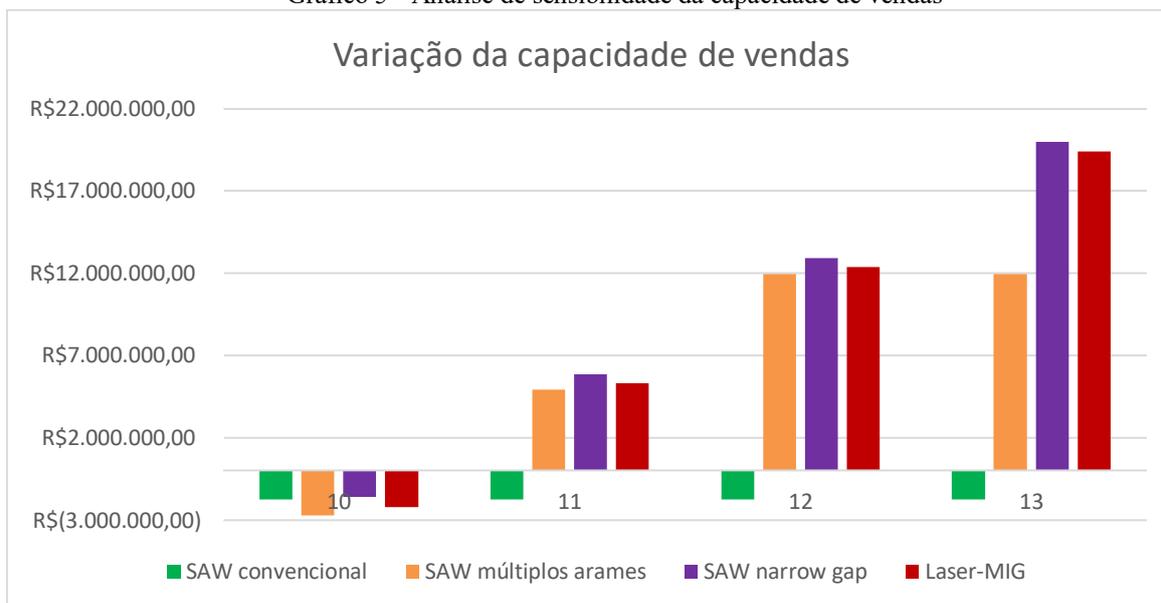


Como a TMA já apresenta um valor pequeno, 3,69% ao ano, optou-se por fazer uma análise principalmente do seu crescimento. O incremento de até 200%, eleva esta taxa para 11,08%. A oscilação da TMA afeta significativamente o VPL das alternativas, mas como esta variação é praticamente constante em todas as opções, a tecnologia SAW *narrow gap* se mantém com o melhor resultado no VPL.

Mesmo aumentando a capacidade produtiva com a melhoria nos processos de soldagem, pode ocorrer de as vendas não acompanharem esta capacidade. Por conta disso, é fundamental também fazer uma análise de sensibilidade considerando a variação da capacidade de vendas da empresa.

O gráfico 5 apresenta o valor presente para cada alternativa desta análise.

Gráfico 5 - Análise de sensibilidade da capacidade de vendas



Fonte: O autor

Esta análise considerou a variação da capacidade de vendas entre 10 até 13 unidades ao ano, que seria a capacidade máxima obtida com os novos equipamentos. Mesmo reduzindo a capacidade de vendas, o processo SAW *narrow gap*, obteve os melhores resultados de VPL em todos as situações.

4.5 ANÁLISE E ESCOLHA DA ALTERNATIVA MAIS VANTAJOSA

Dentre as quatro tecnologias avaliadas no estudo, reinvestir no equipamento de soldagem por arco submerso convencional é a escolha menos atrativa. Em qualquer cenário abordado, esta alternativa apresentou o menor VPL.

A SAW com múltiplos arames atingiu valores mais satisfatórios, mas como não aproveita todo o potencial de ganho de produtividade, obteve resultado intermediário.

As tecnologias SAW *narrow gap* e Laser-MIG apresentaram retornos muito semelhantes no ponto de vista econômico, mas, tecnicamente, são bem diferentes. A primeira baseia-se no processo que utiliza arco submerso, enquanto a segunda é uma técnica híbrida ainda pouco conhecida e disseminada na indústria nacional. Levando em conta apenas os dados quantitativos abordados, a SAW *narrow gap* tem uma pequena vantagem, mas é preciso também considerar a dificuldade da implementação da tecnologia Laser-MIG, visto que a empresa nunca utilizou o laser nos seus processos de soldagem, enquanto o arco submerso já é

aplicado e é bem dominado pelos seus operários. A técnica *narrow gap* exigiria somente mudanças factíveis nos seus procedimentos, sendo uma opção mais segura para implementação.

Outra questão a ser apontada, é que as duas tecnologias com maior VPL exploram o ganho de produtividade no seu limite. No entanto, a etapa de usinagem interna da camisa ainda apresenta tempo de fabricação longo, limitando a capacidade produtiva e impedindo retornos superiores. Havendo demanda, melhorias que reduzam o tempo desta usinagem podem trazer ganhos ainda maiores.

Sendo assim, a escolha mais segura seria investir no equipamento de soldagem SAW *narrow gap* e, futuramente, proceder a melhorias no processo de usinagem interna da camisa.

4.6 FEEDBACK DA EMPRESA

O processo de soldagem, por tornar a produção lenta, tem dificultado a expansão da empresa no mercado internacional. Por isso, há tempos se tem procurado melhorar o procedimento na fabricação dos cilindros Yankee.

Desde 2016, testes de soldagem com arco submerso têm sido encomendados para avaliação técnica da otimização do processo.

Um estudo econômico aliado a um estudo de aplicação técnica de forma mais detalhada não havia sido realizado até então. Além de poder observar a economia no custo dos consumíveis, é interessante verificar principalmente a redução no tempo de soldagem por variar apenas a geometria dos chanfros e alguns procedimentos. A capacidade pode ser elevada em até 30% quando comparada ao processo atual. De acordo com o gerente de produção da empresa, os resultados obtidos corroboram com o que já era esperado, o processo SAW *narrow gap* era tido como o mais promissor e os primeiros testes de soldagem para determinação dos parâmetros ideais com esta técnica já estão sendo realizados. Quando estes testes estiverem concluídos e os equipamentos atuais chegarem no final da vida útil, esta tecnologia certamente será implementada.

5 CONCLUSÃO

Este estudo foi elaborado junto de um estágio curricular com a finalidade técnica para realizar melhorias nos procedimentos de soldagem da empresa em questão, incluindo a implementação de um novo equipamento para solda dos cilindros secadores Yankee. Após avaliar diferentes alternativas disponíveis no mercado, os gestores não tinham certeza de qual seria a melhor opção para investir.

O trabalho procurou compreender quais são os principais fatores que afetam os tempos da soldagem e o impacto econômico que a redução destes tempos poderia gerar. A ideia inicial dos gestores era a de implementar uma tecnologia que possibilitasse a maior taxa de deposição possível de material nos chanfros, mas, após avaliação das atividades realizadas pelos operários durante o processo, observou-se que boa parte do tempo gasto ocorre na união da raiz, na preparação e na inspeção das juntas, não na soldagem em si. Desta forma, buscou-se por alternativas que reduzam ou eliminem estas atividades. Além do processo atual, foram identificadas outras três opções tecnicamente viáveis.

Para elaboração dos fluxos de caixa, os custos dos processos e dos consumíveis foram obtidos juntos da empresa. Os preços dos equipamentos foram adquiridos com fornecedores e profissionais da área. No levantamento do consumo de material diretamente envolvido com a soldagem, foram utilizadas equações de livros e publicações acadêmicas. A coleta dos dados *in loco* visou a maior proximidade com o que ocorre de fato.

A obtenção de todos os custos fixos indiretos não foi possível de ser realizada, pois a empresa produz milhares de artigos diferentes, estes custos não são distribuídos unicamente na produção dos cilindros Yankee. Por este motivo, a construção de um cenário geral seria inviável de ser produzida durante a elaboração desta monografia, mas o cálculo da margem de contribuição possibilitou a criação de cenários comparativos entre as opções.

Além de elucidar questões envolvendo o processo produtivo dos cilindros secadores Yankee, o estudo também forneceu entendimento sobre as etapas de produção do papel Tissue.

Conclui-se que o objetivo geral e os específicos foram atingidos. Com este estudo de caso, foi possível sanar a dúvida sobre qual opção seria a mais rentável. Os resultados da análise apontam o arco submerso com a técnica *narrow gap* sendo a melhor opção. Como contribuição, o trabalho poderá ser utilizado como base para o levantamento de custos diretos envolvendo processos de soldagem, além de mostrar a relevância da utilização de uma avaliação econômica aliada a uma análise técnica de um investimento.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se elaboração de cenários completos, contabilizando todos os custos fixos e variáveis associados a fabricação dos cilindros. Nestes cenários, seria possível aplicar outras técnicas de análise de investimento, tais como a taxa interna de retorno e o *payback* descontado, estes indicadores podem fornecer informações importantes para a tomada de decisão. Outra possibilidade seria a realização de uma análise multicritério para auxiliar na tomada de decisão final.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**: 9. ed. Miami: Aws, 2004.
- APPLUS QUALITEC (Rio de Janeiro). **ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SEGMENTOS INDUSTRIAIS SELECIONADOS: SEGMENTO CELULOSE E PAPEL**. 2018. Disponível em:
<http://www.mme.gov.br/documents/10584/105176754/PRODUTO+4_Vpublicacao.pdf/f48424df-30ef-464e-ac90-e30d97f41936>. Acesso em: 19 nov. 2019.
- ASSAF NETO, Alexandre. **Mercado financeiro**. São Paulo: Atlas, 2014.
- AVILA, Antonio Victorino. **Matemática Financeira e Engenharia Econômica**. Florianópolis: [s.n.], 2015.
- BARROS, Lucas Bitar Moraes. **SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA REDUÇÃO DE CUSTOS EM UMA MÁQUINA DE PAPEL**. 2006. 58 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- BORNIA, Antonio Cezar. **Análise gerencial de custos: aplicação em empresas modernas**. 3ª edição. São Paulo: Atlas, 2010.
- CAMPOS, Edison da Silva. Curso de fabricação de papel: com ênfase em papel “Tissue”. Mogi das Cruzes, SP: ABTCP, 2007. 124 p.
- CASAROTTO FILHO, Nelson. **Elaboração de Projetos Empresariais: Análise Estratégica, Estudo de Viabilidade e Plano de Negócio**. São Paulo: Atlas, 2011.
- CASAROTTO FILHO, Nelson; KOPITTKE, Bruno Hartmut. **Análise de Investimentos**. São Paulo: Atlas, 2008.
- CELESC. **Tarifas e taxas de energia**. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia#tarifas-vigentes>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- CONTADOR, José Celso. Produtividade Fabril I: Método para rápido aumento da produtividade fabril. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 1, n. 3, p.217-238, dez. 1994.
- DAHOTRE, Narendra B.; HARIMKAR, Sandip. **Laser Fabrication and Machining of Materials**. [s.l.]: Springer-verlag, 2008.
- DAVIM, J. P. **Lasers in Manufacturing**. Hoboken: Wiley, 2012.
- DULEY, W. W. **Laser welding**. New York: Wiley, 1999.
- ESAB. **Apostila de Arco Submerso**. Contagem: [s.n.], 2004.

ESAB. **SAW - ICE TECHNOLOGY**. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/automation/process-solutions/saw/saw-ice.cfm>. Acesso em: 29 abr. 2020.

FONSECA, João José Saraiva da. **Metodologia da Pesquisa Científica**. Fortaleza: Uece, 2002.

GEDF-CD/FIEP (Paraná). **Panorama setorial: indústria de celulose, papel, embalagens e artefatos de papel**. Curitiba: Federação das Indústrias do Estado do Paraná e Sindicato das Indústrias de Papel, Celulose e Pasta de Madeira Para Papel, Papelão e de Artefatos de Papel e Papelão do Estado do Paraná, 2016.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

HERGEN. **Cilindros Yankee**. Disponível em: <<http://www.hergen.com.br/produtos/papeis-tissue/cilindros-yankee/>>. Acesso em: 26 nov. 2019.

HOLIK, H. **Mais Rápidas, Mais Largas, Melhores – Progresso em Máquinas de Papel nos Últimos 100 anos**. Revista O Papel, Artigo Técnico, vol. 71, n. 8, p. 66-93, Set/2010.

KAIYUAN. **Narrow gap SAW weld head series**. Disponível em: <http://en.spec-welding.com/product/zhaijianximaihuhanjiejitouxilie.htm>. Acesso em: 29 abr. 2020.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. Wisconsin: Wiley Interscience, 2003.

KOWALICK, Kerstin. System Technology. In: POPRAWÉ, Reinhart. **Tailored Light 2: Laser Application Technology**. Aachen: Springer-verlag, 2011. p. 427-451.

MACDONALD, R. G. et al. **Paper Making and Paperboard Making**. New York: Mcgraw-hill, 1970.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: [s.n.], 1996.

MARQUES, Marta Inez Medeiros. CONSIDERAÇÕES SOBRE A EXPANSÃO DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE NO BRASIL A PARTIR DO CASO DA SUZANO PAPEL E CELULOSE. **Geographia**, Niterói, v. 17, n. 35, p.120-147, set. 2015.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora Ufmg, 2009.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA (Brasil). Receita Federal do Brasil. Instrução normativa 1700. **Consolidação da legislação do IRPJ e da CSLL**, [S. l.], 2017. Disponível em: <<http://normas.receita.fazenda.gov.br/sijut2consulta/link.action?idAto=81268>>. Acesso em: 30 nov. 2019.

MONTEIRO, Andréa Alves Silveira. Fluxos de Caixa e Capital de Giro: Uma adaptação do Modelo de Fleuriet. **Pensar Contábil**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 20, p.27-33, maio 2003.

O'BRIAN, Hugh. **Steel Yankee dryer: Advantages, development and rapid acceptance.** 2017. Disponível em: <<https://www.tissuestory.com/2017/09/11/steel-yankee-dryer-advantages-development-and-rapid-acceptance/>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

OLIVEIRA, J.p.; MIRANDA, R.m.; FERNANDES, F.m. Braz. Welding and Joining of NiTi Shape Memory Alloys: A Review. **Progress In Materials Science**, [s.l.], v. 88, p.412-466, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.04.008>.

OLSEN, Flemming Ove. **Hybrid laser-arc welding.** Boca Raton: Crc Press, 2009.

OTTOSSON, A.; NILSSON, L.; BERGHEL, J. A mathematical model of heat and mass transfer in Yankee drying of tissue. **Drying Technology**, [s.l.], v. 35, n. 3, p.323-334, 29 abr. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2016.1170697>.

PEPE, L. **Introdução à Fabricação do Papel.** Curso ABTCP. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. Mar/2000.

PETRING, Dirk. Hybrid Welding. In: POPRAWÉ, Reinhart. **Tailored Light 2: Laser Application Technology.** Aachen: Springer-verlag, 2011. p. 278-284.

PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M. L. **Tecnologia de Fabricação do Papel.** São Paulo: Escola Senai "Theobaldo de Nigris", 1988.

PIRES, A. C.; MARIANO, N. A. LIGA DE FERRO FUNDIDO CINZENTO NÃO CONVENCIONAL PARA A FABRICAÇÃO DE CILINDROS SECADORES PARA A INDÚSTRIA DE PAPEL. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, Itatiba, v. 26, n. 1, p.7-9, fev. 2007.

PRECITEC. **Welding head YW52 - with ScanTracker.** Disponível em: <https://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processing-heads/yw52/welding-head-yw52-with-scantracker/>. Acesso em: 29 abr. 2020.

READY, John F.; FARSON, D.f.; FEELEY, T. **LIA Handbook of Laser Materials Processing.** Orlando: Springer-verlag, 2001.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas.** 3. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

SAMANEZ, Carlos Patrício. **Engenharia econômica.** São Paulo: Pearson, 2009.

SLACK, Nigel et al. **Administração da Produção.** São Paulo: Atlas, 1999.

SOUZA, Sebastião Décio Coimbra de; BASTOS, Samilla Lima. Análise de mercado e nível de concentração da indústria de papel tissue no Brasil. **Revista Produção Online**, [s.l.], v. 18, n. 1, p.165-188, 15 mar. 2018. Associação Brasileira de Engenharia de Produção - ABEPRO. <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v18i1.2745>.

VOTTO, R. G. **Produção enxuta e teoria das restrições: Proposta de um método para implantação conjunta na indústria de bens de capital sob encomenda.** 2012. 271 f. Dissertação

(Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio D.; MELLO, Fábio D. H. de. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

WOLF, Nobert. Deep Penetration Welding. In: POPRAWÉ, Reinhart. **Tailored Light 2: Laser Application Technology**. Aachen: Springer-verlag, 2011. p. 271-278.