

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

CAIO TASSO CABOS RIBEIRO

Desenvolvimento de uma proposta de modernização de processo para o setor de galvanização de uma indústria metalúrgica com base no guia PMBOK®

LORENA

2020

CAIO TASSO CABOS RIBEIRO

Desenvolvimento de uma proposta de modernização de processo para o setor de galvanização de uma indústria metalúrgica com base no guia PMBOK®

Versão Original

Monografia apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo como requisito legal para obtenção do título de Engenheiro Bioquímico.

Orientador: Dr. Valdeir Arantes

LORENA

2020

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A VERSÃO FINAL DO TRABALHO DE
CONCLUSÃO DE CURSO DO ALUNO CAIO TASSO CABOS RIBEIRO,
ORIENTADO PELO PROF. Dr. VALDEIR ARANTES.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Valdeir Arantes', is positioned above a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ribeiro, Caio Tasso Cabos

Desenvolvimento de uma proposta de modernização de processo para o setor de galvanização de uma indústria metalúrgica com base no guia PMBOK® / Caio Tasso Cabos Ribeiro; orientador Valdeir Arantes. - Lorena, 2020.

80 p.

Monografia apresentada como requisito parcial para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia Bioquímica - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2020

1. Gerenciamento de projetos. 2. Análise de viabilidade. 3. Dimensionamento. I. Título. II. Arantes, Valdeir, orient.

Este trabalho é inteiramente dedicado à
minha família, Jefferson, Conceição e Taís. Sem
vocês, nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

À vida, com todos os seus ensinamentos.

Aos meus pais, Jefferson e Conceição, e minha irmã, Taís, pelo amor e suporte incondicional e por sempre estarem presentes. Vocês são meu exemplo e maior orgulho, e a razão de eu chegar até aqui.

A Vinícius, meu companheiro de faculdade e de vida, por ter sido a minha pessoa desde o primeiro momento. Crescer ao seu lado tem sido incrível.

Ao prof. Dr. Valdeir Arantes, por ter me orientado ao longo do desenvolvimento deste trabalho com excelentes conselhos e por toda a dedicação aos alunos de Engenharia Bioquímica. Você fez a diferença.

A Bianca, Evaldo, Tamara, Vinicius, Achilles, Marcela e Aline, por terem sido minha família ao longo dos anos de graduação. À Natália, Victor e Samuel, pelos anos de amizade crescente e todos os momentos compartilhados. Sempre guardarei os momentos vividos com todo o carinho.

Aos professores e outros profissionais da Escola de Engenharia de Lorena por toda a dedicação e cuidado no ensino. Em particular, ao Prof. Dr. Fernando Segato, por me ensinar o que é ser verdadeiramente apaixonado por sua profissão. Vocês me moldaram como pessoa e profissional.

A Carol, Viviane, Paulo e todos os outros companheiros de trabalho, por todos os ensinamentos e experiências. Vocês foram fundamentais no desenvolvimento deste trabalho e na minha formação como profissional.

Finalmente, a todas as pessoas que estiveram presentes no meu caminho. Ninguém entra em nossas vidas por acaso, e sou grato a cada um.

“Só se é curioso na proporção de que se é instruído.”

Jean Jacques Rousseau

RESUMO

RIBEIRO, Caio Tasso Cabos. **Desenvolvimento de uma proposta de modernização de processo para o setor de galvanização de uma indústria metalúrgica com base no guia PMBOK®**. 2020. 80 p. Monografia de Conclusão de Curso — Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, 2020.

Numa indústria metalúrgica responsável pela fabricação de dobradiças de aço para armários, foi identificada uma oportunidade de modernização de processo no setor de galvanização. Todos os componentes da dobradiça são galvanizados com zinco, com exceção das articulações, que, por serem as peças responsáveis por sustentar a carga de trabalho, precisam ser banhadas com níquel, uma vez que o processo de zincagem favorece a fragilização das peças por hidrogênio. Em adição, quando comparados os custos de produção para os dois processos, observou-se que o processo de niquelação tem um custo aproximadamente duas vezes mais elevado que o processo de zincagem. Finalmente, dados disponíveis na literatura indicam que a realização de um tratamento térmico com as peças em temperaturas entre 190 e 220 °C por um período de 4 a 8 horas parece ser capaz de mitigar os efeitos do hidrogênio adsorvido no metal. Considerando todas essas informações, foi elaborada uma proposta de projeto para a implementação de um processo de tratamento térmico no setor de galvanização, permitindo que as articulações sejam galvanizadas com zinco sem afetar sua qualidade e reduzindo, assim, o custo total de processamento. Para tanto, as boas práticas para o gerenciamento de projetos sugeridas pelo guia PMBOK® foram aplicadas e um estudo de caso foi inicialmente desenvolvido para a compreensão da situação atual do setor. Os requisitos associados ao projeto bem como seu escopo foram definidos, e fundamentos de transferência de calor foram aplicados para a modelagem e dimensionamento dos equipamentos necessários. A partir daí, foi construído um modelo para o cálculo dos indicadores econômicos do projeto, o que permitiu a avaliação da viabilidade da proposta, que apresentou um valor presente líquido de R\$ 170.925,21 e uma taxa interna de retorno de 41,09% ao mês, quando avaliada sobre um período de 12 meses. Isso tudo somado a um tempo de *payback* descontado de 4 meses indica claramente que o projeto é viável e lucrativo, sendo fortemente sugerida sua implementação.

Palavras-chave: gerenciamento de projetos; análise de viabilidade; dimensionamento

ABSTRACT

RIBEIRO, Caio Tasso Cabos. **Development of a process modernization proposal for the galvanization sector of a metallurgical industry based on the PMBOK® guide.** 2020. 80 p. Undergraduate thesis — School of Engineering of Lorena, University of São Paulo, 2020.

An opportunity for a process modernization was identified in the galvanization sector of a metallurgical industry that manufactures steel hinges for lockers. All the hinge's components are coated with zinc, except for its joint, which is coated with nickel. This is due to the facts that the joints are responsible for sustaining the hinge's workload and the zinc coating process has the potential to embrittle the pieces with hydrogen. Also, when the production cost for both processes was compared, it was noticed that the nickel process had a price almost twice as big. Scientific data suggests that a heat treatment of the pieces at a temperature between 200 and 220 °C and a timespan ranging from 4 to 8 hours is efficient at mitigating the adsorbed hydrogen effects and therefore, a project proposal was developed for implementing a heat treatment step in the galvanization process, which should allow the zinc coating of the joints without affecting its quality. In order to achieve this, the best practices for project management suggested by the PMBOK® guide were followed and a case study was initially performed to understand the current situation in the factory. The project's requirements as well as its scope were defined, and heat transfer concepts were used for modeling and dimensioning the required equipment. At this point, a model for calculating the economic indicators for the proposal was built, and it showed a net present value of R\$ 170.925,21 and an internal rate of return of 41,09 % per month when evaluated over a 12 months period. All of this added to a discounted payback time of only 4 months clearly shows that the project is viable and profitable. Therefore, its implementation is strongly recommended.

Keywords: project management; economic feasibility study; dimensioning.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Vista explodida da dobradiça, explicitando seus componentes. | 14 |
| Figura 2 - Relação entre os processos de gerenciamento de um projeto | 30 |
| Figura 3 - Interações entre os processos de gerenciamento de um projeto durante seu ciclo de vida | 31 |
| Figura 4 - Evolução mensal do custo de produção das linhas de galvanização..... | 48 |
| Figura 5 - Evolução do preço de mercado de níquel e zinco | 48 |
| Figura 6 - Produtividade mensal das linhas de galvanização..... | 49 |
| Figura 7 - Itens processados por mês na LGAL4..... | 50 |
| Figura 8 - Dias trabalhados por mês em cada uma linha do setor | 50 |
| Figura 9 - Fluxogramas dos processos atual e desejado | 52 |
| Figura 10 - Detalhamento da Estrutura Analítica do Projeto (EAP)..... | 56 |
| Figura 11 – Previsão do aumento gradual de articulações galvanizadas pelo novo processo | 62 |
| Figura 12 - Previsão dos fluxos de caixa líquidos do projeto | 65 |
| Figura 13 - Variação do Valor Presente Líquido (VPL) com a taxa de desconto..... | 66 |
| Figura 14 - Valor Presente Líquido Cumulativo para cada período | 67 |
| Figura 15 - Análise da sensibilidade do VPL do projeto aos principais parâmetros operacionais | 67 |
| Figura 16 - Variação do custo de operação do forno com o tempo de aquecimento das peças..... | 68 |
| Figura 17 - Análise da sensibilidade do VPL a parâmetros externos à fábrica | 69 |
| Figura 18 - Matriz SWOT evidenciando as forças e fraquezas da empresa | 70 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Correlações empíricas para o número de Nusselt em geometrias específicas | 25 |
| Tabela 2 - Características produtivas das linhas do setor de galvanização..... | 52 |
| Tabela 3 - Requisitos coletados para o desenvolvimento do escopo do projeto..... | 54 |
| Tabela 4 - Parâmetros físicos utilizados no desenvolvimento das equações | 59 |
| Tabela 5 - Contribuição das diferentes parcelas de potência à potência total requerida | 59 |
| Tabela 6 - Estimativas de custo dos principais investimentos do projeto..... | 61 |
| Tabela 7 - Estimativas dos custos mensais de manutenção e qualidade..... | 61 |
| Tabela 8 - Parâmetros do cenário base para a realização das análises..... | 64 |
| Tabela 9 - Possíveis riscos associados às atividades planejadas e ações propostas..... | 72 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 16 |
| 2.1 | O processo de galvanização | 16 |
| 2.1.1 | Formação de hidrogênio nos processos de galvanização | 17 |
| 2.2 | Fragilização por hidrogênio | 18 |
| 2.2.1 | Remoção de hidrogênio adsorvido..... | 19 |
| 2.3 | Mecanismos de transferência de calor | 20 |
| 2.3.1 | Condução..... | 20 |
| 2.3.2 | Convecção | 21 |
| 2.3.3 | Radiação | 25 |
| 2.4 | Estudo de caso..... | 27 |
| 2.5 | Gerenciamento de projetos..... | 28 |
| 2.5.1 | Grupos de processos e áreas de conhecimento..... | 29 |
| 2.6 | Avaliação econômica | 33 |
| 2.6.1 | Fluxo de Caixa | 34 |
| 2.6.2 | Indicadores Financeiros..... | 36 |
| 3 | OBJETIVOS..... | 40 |
| 3.1 | Objetivo geral..... | 40 |
| 3.2 | Objetivos específicos | 40 |
| 4 | METODOLOGIA..... | 41 |
| 4.1 | Elaboração da proposta de projeto | 41 |
| 4.2 | Cenário atual e cenário desejado..... | 41 |
| 4.3 | Escopo..... | 42 |
| 4.4 | Dimensionamento do tratamento térmico | 42 |
| 4.5 | Estimativa e análise dos custos | 45 |
| 4.6 | Análise de riscos | 46 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 47 |
| 5.1 | Cenário atual | 47 |
| 5.2 | <i>Design</i> do novo processo | 51 |
| 5.3 | Elaboração do escopo..... | 54 |
| 5.4 | Dimensionamento do tratamento térmico | 57 |
| 5.5 | Análise de custos..... | 60 |
| 5.5.1 | Investimentos | 60 |
| 5.5.2 | Custos de manutenção e qualidade..... | 61 |
| 5.5.3 | Custos operacionais..... | 61 |
| 5.6 | Indicadores econômicos | 63 |
| 5.7 | Análise de riscos | 70 |
| 6 | CONCLUSÃO..... | 73 |
| 7 | RECOMENDAÇÕES FUTURAS | 75 |
| 7.1 | Seleção do modelo de forno..... | 75 |
| 7.2 | Otimização do processo | 75 |
| 7.3 | Controle da qualidade | 76 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 77 |

1 INTRODUÇÃO

No cenário econômico, a competitividade de uma empresa sempre foi fator essencial na sua permanência e crescimento no mercado. Uma empresa competitiva tem rápida capacidade de adaptação ao mercado e alta flexibilidade, além de ser capaz de inovar e continuamente melhorar seus processos, tornando-os mais econômicos e enxutos. Para uma indústria, isso significa principalmente um aumento no aproveitamento da matéria prima e uma redução nos custos operacionais, levando a maior lucratividade. Saber identificar oportunidades é, portanto, fator crucial quando se deseja aumentar a competitividade, mas ainda mais importante é a habilidade de transformar essa oportunidade em um benefício real à organização (CALDEIRA, 2004).

As tarefas que são desempenhadas tendo em vista o aproveitamento de oportunidades identificadas, como desenvolvimento de novos processos e produtos e implementação de melhorias, por exemplo, podem ser vistas como projetos por serem realizadas uma única vez, durante um período definido e com um resultado claro a ser atingido (BOMFIN; NUNES; HASTENREITER, 2012). Como cada oportunidade é única, é de interesse das empresas aproveitá-las ao máximo. O guia PMBOK® apresenta uma série de boas práticas na execução de projetos que aumentam as chances de sucesso, mostrando-se como uma ferramenta imprescindível para empresas que desejam se manter competitivas no mercado. As atividades descritas pelo guia podem ser aplicadas em todas as etapas de um projeto, da concepção até implementação total (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, 2014).

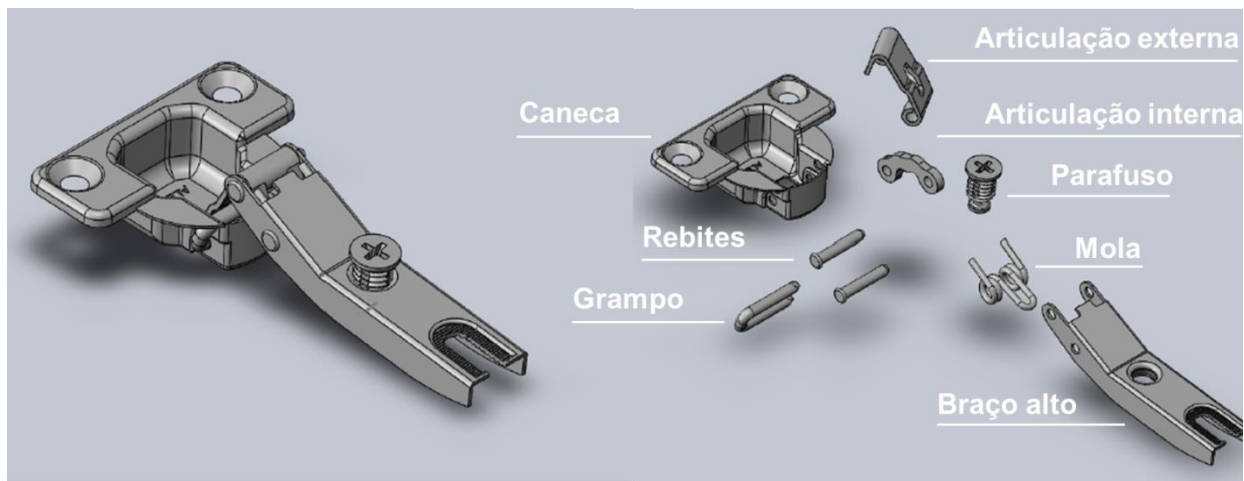
De acordo com um relatório de inteligência elaborado pelo SEBRAE, a produção de móveis cresceu 18,47% entre os anos de 2012 e 2017, sendo que o valor da produção nacional no ano de 2015 atingiu 15,5 bilhões de dólares e o Brasil atingiu o patamar de quinto maior produtor mundial no ano de 2018 (SEBRAE, 2018; SGANZERLA, 2018). Esse crescimento se reflete em todo o subsistema da indústria moveleira, que inclui indústrias de madeira, metalúrgica, têxtil e química, dentre outras. Nesse cenário, é imprescindível que as empresas saibam identificar novos mercados e otimizar sua produção para que se tornem competitivas e ampliem sua participação no mercado (SEBRAE, 2017).

Em uma empresa nacional do ramo metalúrgico, especializada em ferragens para o setor moveleiro, foi identificada uma oportunidade de negócio no setor de galvanização. A empresa produz dobradiças de aço do tipo caneca para armários. No ano de 2015, armários e guarda-roupas somaram juntos 28,7% de toda a produção de móveis nacional, deixando claro o tamanho do mercado existente

para dobradiças (FIRJAN, 2015). Para a produção destes itens, chapas de aço são cortadas e estampadas nos formatos de cada componente individual das dobradiças, que são galvanizados para aumentar sua resistência à corrosão e melhorar seu aspecto estético antes de serem montados na dobradiça final. A Figura 1 mostra um esquema simplificado da dobradiça com todos os seus componentes em destaque.

Quando a produção destas dobradiças foi iniciada há mais de uma década, todos os componentes eram recobertos com níquel, que além de proteger as peças contra a corrosão, conferia um excelente acabamento estético.

Figura 1 - Vista explodida da dobradiça, explicitando seus componentes.



Fonte: arquivo próprio

Pouco tempo depois, devido aos preços elevados deste metal, houve uma decisão estratégica e passou-se a utilizar o zinco como metal de proteção. Contudo, as articulações das dobradiças continuaram a ser banhadas com níquel, pois são responsáveis por suportar as forças de tração e compressão durante o uso da dobradiça e acabam sendo fragilizadas quando submetidas ao processo de zincagem, que favorece a inserção de hidrogênio atômico no material, causando a chamada fragilização por hidrogênio.

Ainda hoje, o custo de produção pelo processo de niquelação por quilo de peça é aproximadamente duas vezes maior que o custo do processo de zincagem. É possível, no entanto, remover o hidrogênio adsorvido em uma peça, evitando sua fragilização, pelo seu aquecimento a temperaturas próximas de 200 °C por períodos que podem variar de 4 a 8h, dependendo da geometria da peça. Esse aquecimento causa a difusão do hidrogênio para fora da estrutura cristalina do metal (WINSCONSIN OVEN, 2018).

Assim, identificou-se uma oportunidade de negócio que consiste em passar a banhar as articulações da dobradiça com zinco, reduzindo consideravelmente o custo de processamento dessas peças, com a adição de uma etapa de tratamento térmico para remoção do hidrogênio adsorvido. O desenvolvimento da proposta de projeto para essa otimização foi feito seguindo as melhores práticas sugeridas pelo guia PMBOK®. Um estudo de caso foi desenvolvido com o objetivo de compreender melhor a situação atual do setor de galvanização e levantar informações relevantes para o desenvolvimento da proposta de projeto. Equações de transferência de calor foram aplicadas no desenvolvimento de um modelo para dimensionar os equipamentos de tratamento térmico, enquanto indicadores econômicos da performance do projeto foram calculados com base em estimativas a respeito de custos e ganhos futuros. Uma análise de riscos também foi realizada sobre todas as etapas do projeto, com o intuito de criar planos de ação preventivos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O processo de galvanização

A galvanização é um tipo de tratamento de superfície onde um metal é depositado sobre um substrato, através da redução de íons em sua superfície pela passagem de corrente elétrica, sendo por esse motivo também denominada eletrodeposição (SILLOS; CASTRO, 2012). É um processo amplamente aplicado nas indústrias automobilísticas, espacial, eletrônica e de joias e brinquedos, pois permite a utilização de materiais de baixo custo, como o aço, ao conferir-lhes diferentes propriedades dependendo do tipo de material utilizado na cobertura (SHARRETS PLATING, 2017a). Metais tipicamente usados como revestimento são zinco, níquel, ouro, prata, cobre, estanho, cádmio e cromo, além de ligas de diferentes composições (GENTIL, 1996).

De um modo geral, coberturas metálicas são aplicadas como acabamento estético ou com o intuito de proteger a peça da corrosão, pois atuam como uma barreira física entre o metal base e o oxigênio do ar e, dependendo de seus potenciais de redução, formam um par galvânico de proteção catódica com ele. Em alguns casos, propriedades superficiais específicas podem ser obtidas (SHARRETS PLATING, 2017b).

Industrialmente, o processo de galvanização consiste em três etapas principais: pré-tratamento, eletrodeposição e pós-tratamento. O pré-tratamento tem por objetivo eliminar sujidades da superfície da peça a ser recoberta, por meio de operações de desengraxe e decapagem (SANTOS; YAMANAKA; PACHECO, 2005). Importante ressaltar que nestes dois processos as peças entram em contato com hidrogênio no meio reacional: no caso do desengraxe, quando este é feito eletroliticamente, gás hidrogênio é formado como resultado da eletrólise da água, enquanto a decapagem expõe as peças a prótons provenientes do ácido (HILLIER; ROBINSON, 2004). A eletrodeposição é a etapa de aplicação do revestimento metálico propriamente dito. As peças são submersas em uma solução contendo o eletrólito que será depositado, além de outros aditivos cuja função é melhorar a qualidade da camada, e submetidas a uma corrente elétrica, passando a atuar como cátodo, fazendo com que o eletrólito oxidado em solução utilize os elétrons fornecidos para reduzir-se e deposite-se sobre a superfície da peça (SILLOS; CASTRO, 2012). Por fim, após serem recobertas, as peças são expostas a agentes passivadores

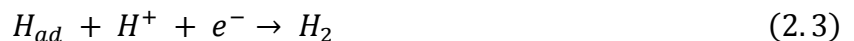
e selantes, responsáveis por aumentar a resistência à corrosão e melhorar o aspecto estético, e secas, sendo estas as operações de pós-tratamento (SUN GLO PLATING COMPANY, 2018).

2.1.1 Formação de hidrogênio nos processos de galvanização

Como já mencionado, durante o processo de galvanização de peças de aço, as mesmas são expostas ao hidrogênio em mais de uma etapa: durante a decapagem, o hidrogênio é proveniente do ácido usado para remoção de óxidos; no desengraxe eletrolítico, hidrogênio é formado intencionalmente na superfície da peça através da hidrólise da água para que atue na limpeza dos poros do material. O mesmo mecanismo causa a formação de hidrogênio na etapa de eletrodeposição, pois parte da corrente aplicada para reduzir os íons metálicos de interesse acaba sendo desviada para as reações de hidrólise.

Assim, define-se a eficiência da corrente como sendo a parcela da corrente fornecida no processo de eletrodeposição que efetivamente é utilizada na redução de íons que se depositam sobre a peça a ser revestida, uma vez que, inevitavelmente, parte dessa corrente causará a formação de gás hidrogênio sobre o cátodo da reação (HILLIER; ROBINSON, 2004)

As reações envolvidas na produção de gás hidrogênio sobre a superfície catódica são denominadas reações de evolução do hidrogênio (HER, do inglês *Hydrogen Evolution Reaction*), e parecem seguir as Equações 2.1, 2.2 e 2.3:



Os prótons produzidos pela hidrólise das moléculas de água combinam-se com um elétron e formam hidrogênio atômico, uma espécie altamente reativa que forma uma ligação fraca com os átomos de ferro e ficam adsorvidos sobre a superfície da peça. Ali, podem tanto combinarem-se com outro átomo adsorvido para formar uma molécula de gás hidrogênio quanto difundirem-se para dentro do metal, causando a fragilização do mesmo (RECIO et al., 2011).

É a eficiência da corrente, portanto, que irá determinar a extensão das reações de formação de hidrogênio atômico, e, conseqüentemente, sua concentração no interior do metal, dado que pelas leis da difusão, quanto maior o gradiente de concentração, maior será a força motora do processo (JANSEN;

TOMACHUK, 2008a). A eficiência da corrente depende de diversos fatores, dentre os quais os mais importantes são o metal que está sendo depositado e a presença de outros compostos no meio reacional. De acordo com o manual técnico da Atotech, empresa especializada em galvanização, a eficiência de corrente para o processo de zincagem da forma como é feito hoje na empresa varia de 50 a 95%, enquanto a eficiência para o processo de niquelação está entre 95 e 98%. Conclui-se, portanto, que o processo de niquelação tem uma tendência muito menor de produzir hidrogênio no meio reacional (ATOTECH, 2008a, 2008b).

2.2 Fragilização por hidrogênio

Denomina-se fragilização por hidrogênio a redução nas propriedades mecânicas de um metal ou liga metálica, comumente o aço, causada pela presença de hidrogênio dentro de sua estrutura cristalina (DWIVEDI; VISHWAKARMA, 2018). Assim, o material fica mais suscetível à fratura, tanto pela ação de estresses residuais internos ao material quanto de forças externas (KHARE et al., 2018), e tem sua resistência à tração e limite de fadiga diminuídos.

Contudo, as moléculas do gás hidrogênio são grandes demais para se difundirem através do metal, de modo que somente átomos de hidrogênio isolados, na forma de hidrogênio atômico (H), são capazes de causar danos ao material.

Uma vez que estas são espécies químicas altamente reativas, somente serão introduzidas no metal se forem produzidas *in situ*. Etapas comuns no processamento de metais, como cementação, decapagem, galvanização e solda, onde ocorre a produção desses átomos, acabam por fragilizar o material e até mesmo inviabilizar seu uso caso não se tome cuidado com o teor de hidrogênio. Além disso, o ambiente ao qual o metal será exposto muitas vezes também conterá hidrogênio atômico, oriundo de reações de corrosão e proteção catódica (KHARE et al., 2018).

Os mecanismos pelos quais os átomos de hidrogênio tornam o aço mais frágil ainda não foram completamente esclarecidos (DWIVEDI; VISHWAKARMA, 2018), mas sabe-se que estes átomos difundem-se pela estrutura cristalina do metal até as fronteiras dos grãos cristalinos, onde recombina-se em gás hidrogênio e formam bolhas que exercem pressão interna na estrutura e originam as denominadas fraturas intergranulares (INDUSTRIAL METALLURGISTS, 2018). Tais efeitos são mais severos à temperatura ambiente, uma vez que o hidrogênio se difunde para fora da estrutura metálica sob temperaturas mais elevadas. Além disso, aços de alta resistência são mais suscetíveis à fragilização por

hidrogênio, pois sua estrutura cristalina apresenta deslocamentos que agem como prisões para o gás H₂ (SHIRAIWA et al., 2020).

2.2.1 Remoção de hidrogênio adsorvido

Idealmente, os processos de decapagem, desengraxe e eletrodeposição devem ser projetados de modo a evitar a produção de hidrogênio atômico no meio reacional. Isso pode ser feito através da adição de inibidores ou diminuição do tempo que a peça fica exposta às condições onde hidrogênio é formado. Entretanto, nem sempre isso é possível devido às exigências do processo produtivo e de qualidade (SHARRETS PLATING, 2017c).

Estudos indicam que o hidrogênio irá difundir-se para fora do material sob temperatura ambiente em um período de aproximadamente dois meses. Como esse tempo se torna proibitivo sob a ótica da produção industrial, tem-se como alternativa o aquecimento a temperaturas relativamente baixas por períodos mais prolongados (MEHNER et al., 2019).

De modo geral, o aquecimento das peças a temperaturas entre 190 e 220 °C por períodos de 4 a 8 horas tem-se mostrado satisfatório nas indústrias de galvanização para diminuição da fragilização por hidrogênio. Uma investigação mais detalhada deve ser feita para determinação das condições ótimas desse parâmetro para cada processo, uma vez que fatores como espessura da peça, quantidade de hidrogênio adsorvido e tipo de aço utilizado tem grande influência sob os efeitos do hidrogênio (INDUSTRIAL METALLURGISTS, 2018)

Logo após penetrar nas peças de aço, a concentração de hidrogênio é mais elevada na superfície do material. Devido à esse gradiente de concentração e de acordo com as leis da difusão, esse hidrogênio irá difundir-se para dentro do material até atingir uma concentração de equilíbrio ao longo de toda a peça, dado tempo suficiente para que esse processo ocorra. Assim, quanto mais imediato for o tratamento térmico após a eletrodeposição, menores serão os efeitos do hidrogênio no material (JANSEN; TOMACHUK, 2008a).

2.3 Mecanismos de transferência de calor

De acordo com INCROPERA et al. (2008), calor é o nome dado à energia em trânsito entre dois corpos mantidos à diferentes temperaturas. A temperatura de um corpo, por sua vez, é a medida escalar do grau de agitação de seus átomos e moléculas. De acordo com os princípios da termodinâmica, quando ocorre um gradiente de temperatura entre dois corpos distintos, calor fluirá no sentido do corpo de menor temperatura, de modo que se pode afirmar que esse gradiente atua como a força motriz do processo. Em engenharia, muitas vezes deseja-se saber a taxa com que o calor flui de um corpo ao outro, ou quão rapidamente o sistema tende ao equilíbrio. Entretanto, a análise termodinâmica desses processos de troca de energia na forma de calor fornece informações somente sobre a quantidade de calor trocada, de modo que se denomina transferência de calor a ciência que estuda a taxa de variação da temperatura, ou fluxo térmico, de um corpo dentro de um sistema onde inicialmente não há equilíbrio térmico. Esse fluxo é medido em W/m^2 .

Existem três modos pelos quais o calor pode fluir de um corpo a outro. Se o gradiente de temperatura ocorre em um meio sólido, a transferência de energia será por condução, ao passo que ocorrerá convecção quando o gradiente for entre uma superfície e um fluido em movimento. Por fim, como todos os corpos com temperatura termodinâmica não nula emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas, ocorrerá a transferência de energia na forma de radiação térmica quando houver um meio não participante entre superfícies a diferentes temperaturas (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

2.3.1 Condução

A condução é a forma de transferência de calor que está intimamente associada à vibração de átomos e moléculas. As partículas que estão a uma temperatura mais alta e, portanto, num nível energético mais elevado, vibram e chocam-se continuamente com as partículas vizinhas, menos energéticas. Esse choque causa a transferência de parte da energia das moléculas mais energéticas para as menos energéticas. Assim, a condução ocorre no sentido da maior temperatura para a menor. Devido à necessidade desse contato entre as partículas do material, a condução é mais acentuada em sólidos, ocorrendo em menor grau em líquidos e sendo praticamente inexistente em gases (INCROPERA et al., 2008).

Para um sólido cujas faces opostas sejam mantidas sob duas temperaturas diferentes, em condições de regime estacionário, o fluxo de calor na direção do gradiente de temperatura será dado pela Equação 2.4 (ÇENGEL; GHAJAR, 2012):

$$\dot{Q}_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (2.4)$$

Onde:

\dot{Q}_{cond} é o fluxo de calor (W)

k é a condutividade térmica do material (W/m·K)

A é a área transversal ao fluxo de calor (m²)

T_1 e T_2 são as temperaturas das faces dos sólidos (K)

L é a espessura do sólido (m)

O sinal negativo indica que a transferência se dá na direção de temperatura decrescente. O parâmetro k é específico para cada material e indica a permeabilidade desse material à passagem do calor (INCROPERA et al., 2008).

2.3.2 Convecção

Denomina-se convecção o modo de transferência de calor que ocorre quando um fluido entra em contato com uma superfície mantida a uma temperatura diferente. O mecanismo engloba dois processos distintos: a energia é transferida tanto pela difusão aleatória das moléculas dentro do próprio fluido quando pelo movimento global do fluido. Assim, a convecção ocorre pela ação conjunta da condução de calor entre as partículas do fluido e de seu escoamento macroscópico. Esse escoamento aumenta a taxa de transferência de calor ao colocar porções mais quentes do fluido em contato com porções mais frias. A convecção, portanto, não ocorre em sólidos, uma vez que não há movimento suficiente entre as partículas (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Existem duas classificações para a transferência de calor por convecção de acordo com o tipo de escoamento do fluido: quando ele for causado somente por forças de empuxo oriundas da diferença de densidade entre massas mais quentes e massas mais frias do fluido, será chamado *convecção natural*.

Em contrapartida, quando houver algum meio externo causando esse escoamento, como um ventilador ou ventos atmosféricos, o processo é denominado *convecção forçada* (INCROPERA et al., 2008).

Além do tipo de escoamento, estudos empíricos mostram que a convecção também depende de uma série de propriedades termodinâmicas do fluido, bem como da geometria e rugosidade da superfície sólida, sendo o mais complexo dos três mecanismos de transferência de calor. Apesar disso, a taxa global de transferência de calor é regida pela Equação 2.5, conhecida como lei de resfriamento de Newton:

$$\dot{Q}_{conv} = A \cdot h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.5)$$

Onde:

\dot{Q}_{conv} é a taxa de transferência de calor por convecção (W)

A é a área de transferência de calor (m²)

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m²·K)

T_s é a temperatura da superfície de troca de calor (K)

T_∞ é a temperatura do fluido suficientemente longe da superfície (K)

O coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser diretamente calculado quando se conhece a distribuição de temperatura no interior do fluido. Como na maioria das aplicações essa distribuição não é definida, o mesmo pode ser determinado através de correlações empíricas (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

O número de Nusselt é o parâmetro adimensional dado pela Equação 2.6 que relaciona a taxa de transferência de calor por condução e convecção no fluido, e, portanto, indica quantas vezes essa taxa foi aumentada pela presença do fator convectivo (INCROPERA et al., 2008).

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad (2.6)$$

Sendo:

Nu número de Nusselt (adimensional)

h coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m²·K)

L_c o comprimento característico da geometria (m)

k é a condutividade térmica do fluido (W/m·K)

Outro parâmetro adimensional importante no estudo das trocas de calor por convecção é o número de Prandtl, dado pela Equação 2.7, que relaciona a difusividade molecular de quantidade de movimento com a difusividade térmica. Para gases, o número de Prandtl é aproximadamente 1, o que significa que tanto a quantidade de movimento quanto o calor difundem-se pelo fluido em taxas semelhantes (INCROPERA et al., 2008).

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \quad (2.7)$$

Onde:

Pr é o número de Prandtl (adimensional)

μ é a viscosidade dinâmica do fluido (kg/m·s)

c_p é a capacidade térmica do fluido (J/kg·K)

k é a condutividade térmica do fluido (W/m·K)

2.3.2.1 Convecção natural

Enquanto na convecção forçada o movimento do fluido é imposto externamente, na convecção natural ele se dá por conta das forças de empuxo que atuam no interior do fluido. O empuxo é resultado da presença de uma força gravitacional em um gradiente de massa específica num fluido. Esse gradiente de massa específica geralmente é causado por um gradiente de temperatura, em uma relação inversamente proporcional (INCROPERA et al., 2008).

Quando um objeto aquecido é submerso em um fluido em temperatura menor, ocorrerá o aquecimento da camada desse fluido mais próxima a superfície do objeto. Com o aquecimento, a massa específica dessa camada de fluido diminui, e as forças de empuxo arrastam essa massa para cima. O espaço vazio deixado por essa massa é substituído pelo fluido mais frio da vizinhança, que novamente se aquece e é arrastado para longe da superfície, formando uma corrente de convecção. Quando a temperatura do fluido é maior que a do objeto, o processo inverso ocorre, com a energia térmica passando do fluido para o objeto (MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 2004).

Em estudos de convecção é necessário saber o coeficiente de expansão térmica de um fluido, definido como a variação na densidade do fluido com a temperatura a pressão constante, de acordo com

a Equação 2.8. Para gases ideias, onde a relação $PV = nRT$ é válida, esse coeficiente é calculado pela Equação 2.8 (INCROPERA et al., 2008).

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (2.8)$$

Sendo:

β o coeficiente de expansão térmica do gás na temperatura T (1/K)

T a temperatura do gás (K)

Continuando, da mesma maneira que o número de Reynolds caracteriza o regime de escoamento interno forçado de um fluido ao relacionar as forças inerciais com as forças viscosas, existe um número adimensional capaz de caracterizar o regime de escoamento na convecção natural, conhecido como número de Grashof. Este parâmetro é obtido pela Equação 2.9, que relaciona as forças de empuxo e as forças viscosas que atuam sobre o fluido. Se $Gr < 10^9$, o regime é considerado laminar. Caso $Gr \geq 10^9$, o escoamento é turbulento (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\nu^2} \quad (2.9)$$

Sendo:

g a aceleração da gravidade (m/s^2)

β o coeficiente de expansão térmica do fluido (1/K)

T_s a temperatura da superfície onde ocorre a troca térmica (K)

T_∞ a temperatura do fluido suficientemente longe da superfície (K)

L_c o comprimento característico da geometria (m)

ν a viscosidade cinemática do fluido (m^2/s)

O último parâmetro adimensional relevante ao processo de convecção natural é o número de Rayleigh, obtido pela multiplicação dos números de Prandtl e Grashof, como mostra a Equação 2.10. Assim, o número de Rayleigh pode ser visto como a razão entre forças de flutuação e o produto das difusividades térmicas e quantidade de movimento do fluido (INCROPERA et al., 2008).

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (2.10)$$

Onde:

Ra é o número de Rayleigh (adimensional)

Gr é o número de Grashof (adimensional)

Pr é o número de Prandtl (adimensional)

Finalmente, correlações empíricas foram obtidas para o cálculo do número de Nusselt na convecção natural. Tais correlações dependem da geometria da superfície submersa no fluido e do regime de escoamento, determinado pelo número de Rayleigh. A Tabela 1 apresenta as correlações para os casos de uma placa vertical e uma placa horizontal, além do comprimento característico de cada uma (INCROPERA et al., 2008).

Tabela 1 - Correlações empíricas para o número de Nusselt em geometrias específicas

| Geometria | Comprimento característico L_c | Faixa de Ra | Correlação para Nu |
|--|-------------------------------------|-----------------------|--|
| Placa vertical | L | Toda a faixa | $Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra^{\frac{1}{16}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2$ |
| Placa horizontal (superfície superior aquecida) | A_s/P | $10^4 < Ra < 10^7$ | $Nu = 0,54 Ra^{\frac{1}{4}}$ |
| | | $10^7 < Ra < 10^{11}$ | $Nu = 0,15 Ra^{\frac{1}{3}}$ |

Fonte: (INCROPERA et al., 2008)

2.3.3 Radiação

O terceiro e último modo pelo qual a transferência de calor ocorre é a radiação. Qualquer corpo emite radiação quando se encontra em uma temperatura termodinâmica diferente de zero, independentemente de seu estado físico, devido a mudanças nas configurações eletrônicas de seus átomos

e moléculas. Diferentemente da transferência de calor por condução e convecção, que precisam de um meio material para acontecerem, a transferência por radiação pode acontecer no vácuo, onde inclusive é mais eficiente. É relevante a informação de que a matéria é capaz de emitir e absorver radiação térmica simultaneamente, de modo que um corpo absorverá radiação mesmo se estiver a uma temperatura superior que seu entorno (DESPATCH, 2016).

A faixa de comprimentos de onda do espectro eletromagnético denominada como radiação térmica encontra-se entre 0,1 e 100 μm , abrangendo a totalidade dos espectros visível e infravermelho, e parte do ultravioleta. Os corpos à temperatura ambiente emitem radiação na faixa do infravermelho (0,76 a 100 μm), invisível, portanto, aos olhos humanos. A partir de temperaturas de 800 K a radiação emitida começa a incluir o espectro visível (0,4 a 0,76 μm), porém essa temperatura irá depender fortemente do material. A radiação ultravioleta (0,01 a 0,4 μm) representa a extremidade inferior do espectro da radiação térmica (INCROPERA et al., 2008).

Dada uma temperatura, existirá um limite máximo para a energia térmica que pode ser emitida pela matéria. Um corpo capaz de emitir essa quantidade máxima de radiação é denominado corpo negro, e o valor dessa radiação é determinado pela equação de Stephan-Boltzmann (Equação 2.11). Um corpo negro também absorverá o máximo possível de radiação.

$$\dot{q}_{rad} = \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.11)$$

Onde:

\dot{q}_{rad} é a taxa de transferência de calor por radiação a partir de uma superfície (W/m²)

σ é a constante de Stephan-Boltzmann (W/m²·K⁴)

T_s é a temperatura absoluta da superfície (K)

Na prática, o fluxo térmico emitido por uma superfície real é menor do que o de um corpo negro à mesma temperatura. Define-se assim o conceito de emissividade (ϵ) como sendo a relação entre a radiação emitida por um corpo real e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura. Assim, para uma superfície real, é válida a Equação 2.12 (INCROPERA et al., 2008).

$$\dot{q}_{rad} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.12)$$

De acordo com (ÇENGEL; GHAJAR, 2012), um recinto isotérmico suficientemente grande pode ser aproximado como um corpo negro, cuja taxa de emissão de radiação térmica será definida pela

Equação 2.11. Se um corpo a uma temperatura diferente for colocado dentro deste recinto, terá pouca influência no campo de radiação, uma vez que sua área é consideravelmente menor. Qualquer radiação emitida pela superfície do recinto será continuamente refletida até ser reabsorvida pelo próprio recinto ou pelo corpo. Isso faz com que a única transferência líquida de energia se dê entre o corpo e as superfícies do recinto. Se o corpo está numa temperatura superior à do recinto, é possível demonstrar que a taxa de transferência líquida, que será no sentido do corpo para o recinto, é regida pela Equação 2.13.

$$\dot{Q}_{rad} = A_s \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2.13)$$

Onde:

\dot{Q}_{rad} é a taxa de transferência de calor por radiação do corpo para o recinto (W)

A_s é a área superficial do corpo (m²)

ε é a emissividade do corpo (adimensional)

σ é a constante de Stephan-Boltzmann (W/m²·K⁴)

T_s é a temperatura superficial do corpo (K)

T_∞ é a temperatura do recinto (K)

2.4 Estudo de caso

Dentre as diversas metodologias de pesquisa científica existentes, o estudo de caso é aquela voltada para o entendimento profundo de um fenômeno dentro de seu próprio contexto. Costuma ser a estratégia adotada quando as perguntas que se deseja responder são do tipo “como” e “por quê” e o investigador tem pouco ou nenhum controle sobre o fenômeno (YIN, 2014). Estudos de caso se mostram como uma abordagem sistemática para a observação de fenômenos, coleta e análise de dados e divulgação dos resultados, e podem ser usados tanto para gerar quanto para testar hipóteses (VERNER et al., 2009).

Para que um estudo de caso seja bem executado e forneça as respostas procuradas, é necessário inicialmente delimitar claramente o fenômeno que deve analisar. Os objetos de estudo podem ser um único indivíduo ou um grupo de pessoas, um programa, um processo ou ainda interações entre. Além disso, é importante que os limites do estudo também sejam claramente definidos, a fim de evitar que

questões muito amplas ou com muitos tópicos de estudo sejam investigadas. Parâmetros que devem ser considerados são tempo, local, atividade, definição e contexto (BAXTER; JACK, 2016).

O entendimento do fenômeno em estudo é alcançado, então, pela coleta intensiva de dados a respeito dele, que podem ser obtidos por meio de observação direta, entrevistas com fontes diversas e através de arquivos e documentos. A variedade de dados é importante para que o fenômeno seja observado por diversas lentes, aumentando a compreensão sobre ele (YIN, 2015). Como resultado, o investigador passa a compreender as causas e efeitos do fenômeno observado, além de ter uma maior clareza a respeito do que deve ser futuramente estudado (VERNER et al., 2009).

Finalmente, o fato de um estudo de caso considerar o contexto dentro do qual o fenômeno está inserido, em oposição à métodos como a pesquisa laboratorial que buscam isolar o fenômeno, eleva o grau de entendimento do objeto em estudo ao mesmo tempo em que o torna mais complexo (YIN, 2015).

2.5 Gerenciamento de projetos

Um projeto pode ser definido como:

(...) um empreendimento não repetitivo, caracterizado por uma sequência clara e lógica de eventos, com início, meio e fim, que se destina a atingir um objetivo claro e definido, sendo conduzido por pessoas dentro de parâmetros predefinidos de tempo, custo, recursos envolvidos e qualidade (VARGAS, 2006, p. 5).

Os projetos podem ter duração de dias ou anos e envolver pequenos grupos de pessoas ou companhias inteiras. Devido à sua natureza única, entende-se que os projetos são executados por organizações temporárias, estabelecidas para a execução das atividades propostas. Em contrapartida, espera-se que os resultados de um projeto sejam duradouros. Tais resultados tomam a forma de produtos ou serviços, que podem ser tangíveis ou não.

É comum que empresas se utilizem de projetos como um meio de atingirem seus objetivos. Assim, algumas razões estratégicas que levam à seleção e execução de um projeto são novas demandas de mercado, oportunidades ou necessidades do negócio, considerações sociais ou ambientais, avanços tecnológicos ou requisitos legais (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, 2014).

Um projeto é considerado bem-sucedido quando é realizado exatamente conforme o planejado quando considerados resultados de custo, tempo de execução e qualidade, dentre outros. Dessa maneira,

quanto melhor for o planejamento inicial, maiores serão as chances de um resultado positivo ao fim do empreendimento (VARGAS, 2006).

A natureza única de um projeto invariavelmente leva a situações inesperadas que requerem algum grau de improviso durante sua execução. Apesar disso, e devido à importância que projetos podem assumir frente as estratégias de um negócio, é de grande interesse que sejam executados da melhor maneira. Todos os projetos, independentemente de seu custo e grau de complexidade, apresentam padrões e atividades em comum, o que permitiu o desenvolvimento de práticas de gestão de projetos que aplicam conhecimentos, habilidades e técnicas diversas a fim de atender os objetivos propostos (BOMFIN; NUNES; HASTENREITER, 2012)

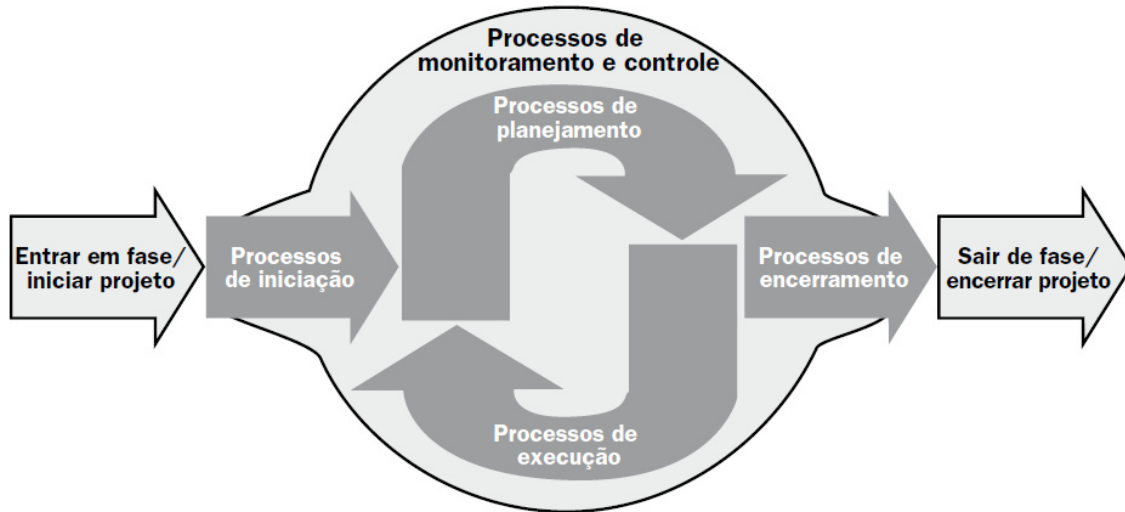
O Project Management Institute (PMI), associação de nível mundial que reúne profissionais cuja área de atuação está ligada ao gerenciamento de projetos, reuniu esse conhecimento amplamente reconhecido no chamado *Project Management Book of Knowledge* (guia PMBOK®), criando um conjunto de boas práticas com o potencial de aumentar as chances de sucesso de um projeto. É importante ressaltar, no entanto, que o termo “boas práticas” não caracteriza uma metodologia que deve ser aplicada de forma padrão, cabendo a cada equipe de projetos determinar o que é apropriado para um projeto específico (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, 2014).

Finalmente, esse conjunto de boas práticas para o gerenciamento de projetos auxilia a focar nas prioridades e implementar melhorias, além de facilitar o controle de prazos e custos. Cabe ao gerente do projeto a integração do trabalho de diferentes pessoas e equipes para a correta execução das tarefas (BOMFIN; NUNES; HASTENREITER, 2012).

2.5.1 Grupos de processos e áreas de conhecimento

O guia PMBOK® relaciona as atividades necessárias à gestão total de um projeto na forma de processos de gerenciamento. Um processo é definido como um conjunto de ações e atividades que geram um resultado pré-determinado. Os processos em um projeto se relacionam de tal forma que os resultados gerados por um processo se tornam a entrada de processos seguintes. Além disso, os processos podem ser sobrepor um ao outro, ou ainda acontecerem de forma concomitante, e sua aplicação pode ser iterativa (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, 2014).

Figura 2 - Relação entre os processos de um projeto, de acordo com o guia PMBOK®



Fonte: (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, 2014)

Os processos de gerenciamento são agrupados em cinco grupos de processos que são geralmente executados em cada projeto, mostrados na Figura 2. São eles:

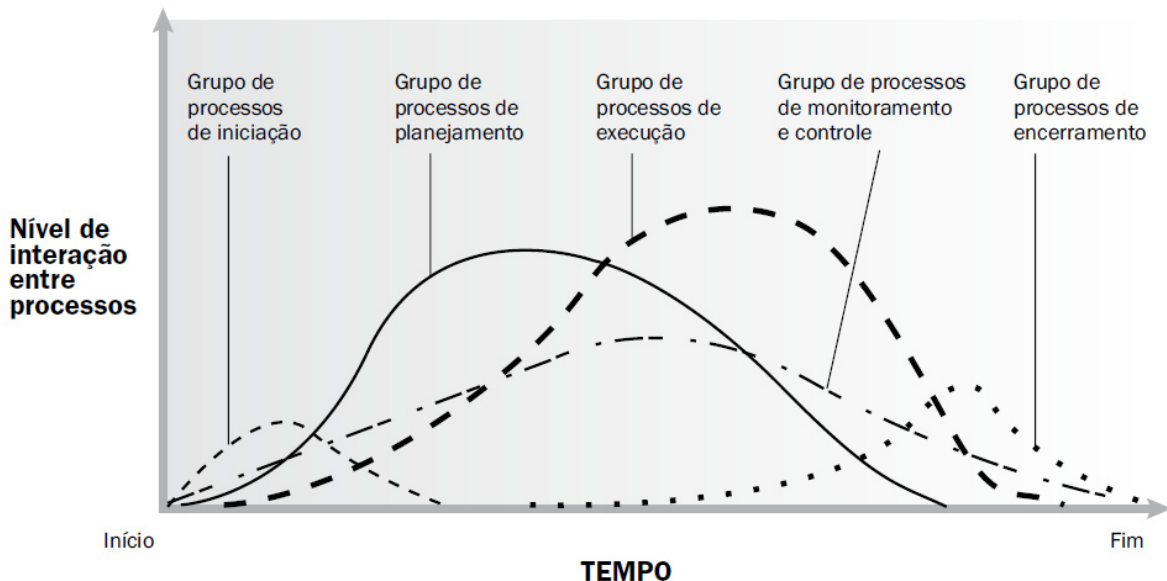
- **Processos de Iniciação:** são os processos executados no início do projeto, que começa quando uma necessidade é identificada e transformada em um problema a ser corrigido. As partes interessadas (*stakeholders*) são definidas e um escopo e orçamento prévio são estabelecidos;
- **Processos de Planejamento:** compreendem os processos de detalhamento das atividades necessárias para a conclusão do projeto, de modo que possam ser executados sem dificuldade. A partir disso, são definidos os planos de escopo, tempo, custos, riscos, qualidade, comunicações, recursos humanos, aquisições e gerenciamento dos *stakeholders*. É comum que os processos de planejamento sejam revisitados ao longo do projeto conforme novos dados são obtidos e atividades são executadas. Esse tipo de planejamento é conhecido como “planejamento por ondas”, e caracteriza-se por planejar de forma mais detalhada o trabalho a ser executado a curto prazo e de forma mais superficial o trabalho futuro, aumentando a qualidade do planejamento ao esperar por informações mais concretas;
- **Processos de Execução:** envolvem os processos de execução de todas as atividades previamente planejadas. Para tanto, pessoas e recursos devem ser coordenados e as

expectativas de todos os *stakeholders* devem ser gerenciadas. É nesse momento que a maior parte do orçamento é efetivamente gasta;

- **Processos de Monitoramento e Controle:** os processos desse grupo ocorrem paralelamente aos demais e consistem em monitorar e controlar todas as atividades que estão sendo executadas, buscando detectar anormalidades o quanto antes. Para tanto, métricas pré-estabelecidas para o projeto são avaliadas para comparar o *status* atual ao *status* planejado, fornecendo um indicador da saúde do projeto;
- **Processos de Encerramento:** compreendem os processos de verificação das atividades planejadas por auditoria interna ou externa para o encerramento formal do projeto. As metas e resultados são avaliados e as falhas discutidas para que sejam evitadas em projetos futuros. Incluem também os processos de encerramento prematuro do projeto, em casos de cancelamento ou impossibilidade na execução total (VARGAS, 2006).

Quando um projeto é dividido em fases (concepção, estudo de viabilidade, protótipo, construção), os grupos de processo são repetidos dentro de cada fase. Além disso, os grupos de processo interagem entre si e podem ser iterados ao longo do projeto, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Interações entre os processos de gerenciamento de um projeto durante seu ciclo de vida



Fonte: (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, 2014)

O guia PMBOK® também classifica os processos de gerenciamento de projeto em 10 áreas de conhecimento que são aplicáveis à maioria dos projetos. Cada área corresponde a um campo de especialização e contém um conjunto de atividades, conceitos e ferramentas específicas. São elas:

- **Gerenciamento da Integração:** inclui todas as atividades e ferramentas necessárias para a integração e coordenação de todas as atividades do projeto. Isso inclui conciliar objetivos conflitantes, alinhar as expectativas dos *stakeholders* e gerenciar dependências mútuas entre áreas de conhecimento;
- **Gerenciamento do Escopo:** são todas as atividades que garantem que o escopo do projeto inclui exatamente o trabalho necessário à conclusão do projeto. Nesse contexto, escopo pode se referir tanto ao escopo do projeto quanto do produto que será desenvolvido;
- **Gerenciamento do Tempo:** é o conjunto de processos necessários para garantir que o projeto seja terminado no momento planejado. Incluem principalmente o planejamento e gerenciamento do cronograma;
- **Gerenciamento dos Custos:** inclui todos os processos de planejamento, estimativa e controle dos custos, para garantir que o projeto será executado dentro do orçamento aprovado. Em projetos menores, a estimativa e o orçamento dos custos podem ser realizados numa etapa única. É importante ressaltar que a capacidade de alterar os custos do projeto é maior nos estágios iniciais, indicando que uma boa definição do escopo é essencial. As atividades de gerenciamento de custos podem também incluir a avaliação da viabilidade do projeto;
- **Gerenciamento da Qualidade:** são atividades necessárias para garantir que o projeto irá satisfazer as propostas iniciais. Visam garantir tanto a qualidade da execução do projeto quanto do produto, assegurando que as exigências e requisitos do *stakeholders* serão atendidos;
- **Gerenciamento dos Recursos Humanos:** considera as atividades de gerenciamento das pessoas envolvidas direta ou indiretamente com o projeto. Assim, são atividades que envolvem o planejamento e gestão da mão-de-obra necessária em cada etapa no decorrer de todo o projeto;
- **Gerenciamento de Comunicações:** engloba todos os processos necessários para que as informações do projeto sejam passadas da maneira correta, no momento oportuno e para

todos os interessados, criando uma ponte entre todos os *stakeholders* através de uma comunicação clara e eficaz;

- **Gerenciamento dos Riscos:** são todos os processos de identificação, análise e planejamento de respostas a riscos. Visam aumentar a probabilidade de eventos positivos e reduzir a de eventos negativos sobre o projeto;
- **Gerenciamento das Aquisições:** é o grupo de atividades necessárias à obtenção de algum produto ou serviço de fontes externas ao projeto;
- **Gerenciamento dos Stakeholders:** consiste nas atividades de identificação de todas as partes interessadas no projeto, buscando o entendimento de suas expectativas e alinhamento com o projeto como um todo, além do engajamento dessas partes nas decisões que ocorrerão ao longo do projeto (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, 2014).

2.6 Avaliação econômica

O guia PMBOK® para gestão de projetos indica o gerenciamento de custos como um dos processos essenciais no desenvolvimento de um projeto. Na fase de planejamento, deve-se realizar uma estimativa dos custos que incorrerão no decorrer do projeto, que incluem investimento em equipamentos, materiais e instalações, mão-de-obra e quaisquer outros serviços que gerem despesas, bem como os ganhos projetados (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, 2014). Com custos e ganhos estimados, é possível realizar uma análise da viabilidade econômica do projeto. Em caso de resposta positiva, deve-se então estimar um orçamento, que incluirá o detalhamento de todos os custos necessários para a finalização e entrega do projeto (VARGAS, 2006).

A análise econômica de um projeto é feita geralmente pela comparação com a opção “fazer nada”, de modo que o projeto precisa ter algum tipo de benefício com relação à situação atual para ser considerado atraente. Nesse caso, são analisadas somente as diferenças entre as opções, significando que gastos e ganhos comuns a ambas não precisam ser considerados (SULLIVAN; WICKS; KOELLING, 2015).

Existe sempre um risco associado a qualquer projeto em desenvolvimento, uma vez que grande parte do planejamento é feita a partir de suposições. À medida que o projeto é executado, o risco associado a ele tende a diminuir, conforme mais e mais decisões são tomadas. Em contrapartida, no início

do projeto a quantia arriscada é baixa, pois poucos investimentos foram efetivados, e aumenta com o passar do tempo. Adicionalmente, quanto mais avançado o projeto se encontrar, mais difícil será realizar algum tipo de alteração no mesmo, pois cada vez mais capital se encontrará comprometido. Isso deixa claro a importância de um bom planejamento financeiro prévio, diminuindo os riscos iniciais e as chances de que uma alteração significativa se faça necessária (VARGAS, 2006).

Apesar de existirem diversos métodos para estimar o custo de um projeto, nenhum deles tem o intuito de produzir dados exatos sobre o futuro. Esses dados devem ser representativos o suficiente para que sejam confiáveis, sendo que a acurácia das estimativas tende a aumentar com o nível de detalhamento do modelo. As informações que serão usadas no seu desenvolvimento podem ter origem nas mais diversas fontes, a saber, registros históricos da própria empresa, profissionais da área, material publicado em livros, artigos e revistas científicas, dentre outros. Os métodos mais comuns são as técnicas do tipo *top-down*, onde valores oriundos de projetos semelhantes são normalizados por algum fator para se adequarem ao projeto que se deseja estimar, e do tipo *bottom-up*, onde modelos matemáticos capazes de descrever o comportamento de partes isoladas do projeto são usados na construção de um modelo mais completo de detalhado. Ambas as técnicas podem ser aplicadas conjuntamente para estimar o custo total de um projeto (SULLIVAN; WICKS; KOELLING, 2015).

2.6.1 Fluxo de Caixa

A construção de diagramas de fluxos de caixa é uma ferramenta imprescindível para a realização de uma análise econômica, pois permite a visualização de todas as entradas e saídas de recurso financeiros que ocorrerão ao longo do período analisado. Existem algumas convenções quando se trata do desenvolvimento de um fluxo de caixa, sendo elas:

- Ponto de vista consistente: o fluxo de caixa deve ser organizado a partir de um único ponto de vista. Tomando-se o ponto de vista da empresa que deseja lucrar com o projeto a ser desenvolvido, por exemplo, todos os benefícios e economias são registrados como entradas de caixa, enquanto os gastos são todos registrados como saídas.
- Linha do tempo horizontal: o tempo é registrado como uma linha horizontal, sendo dividido em intervalos regulares. Esses intervalos podem representar meses, semestres ou anos, dependendo da vida útil do projeto. A indicação do número do período é colocada no fim de cada intervalo de tempo.

- Entradas e saídas: setas verticais são usadas ao fim de cada período para representar as entradas e saídas, sendo que setas para baixo indica, despesas e setas para cima, ganhos (BLANK; TARQUIN, 2012).

Os fluxos de caixa também podem ser representados na forma de tabelas, principalmente quando a complexidade das entradas e saídas dificulta sua representação gráfica, seguindo-se as mesmas convenções apresentadas (SULLIVAN; WICKS; KOELLING, 2015)

Os custos de um projeto podem ser divididos em duas categorias: investimentos e custos operacionais. Os investimentos compreendem os gastos com planejamento e administração do projeto, seguro (quando houver) e infraestrutura, como maquinário, locação e construção de espaços, enquanto os custos operacionais englobam gastos com energia, mão de obra, manutenção e quaisquer outros fatores que estejam relacionados diretamente com a produção (controle de qualidade, licenciamento, tratamento de efluentes, etc.). Os ganhos esperados do projeto, por sua vez, devem compreender os lucros gerados pela venda do produto e as economias trazidas pelo novo projeto em relação à situação atual (quando aplicável) (LAUER, 2017).

Deve-se considerar também na análise econômica de um projeto a alteração do valor do capital com o passar do tempo, em decorrência de fatores como inflação da economia e taxas de juros. Isso significa que dois pagamentos de mesmo montante efetuados em dois períodos futuros diferentes não podem ser comparados entre si. Para anular esse efeito, todos os valores descritos no fluxo de caixa devem ser projetados para algum período especificado por correção monetária, através da Equação 2.14 (SULLIVAN; WICKS; KOELLING, 2015).

$$F = P \cdot (1 + i)^N \quad (2.14)$$

Onde:

F é o valor futuro corrigido (R\$)

P é o valor atual (R\$)

i é a taxa de desconto aplicada a cada período sobre o valor total (%)

N é o número de períodos

2.6.2 Indicadores Financeiros

Uma vez que o fluxo de caixa de projetos diversos pode ser bastante variável, não existe uma metodologia global que possa ser aplicada a todos os casos de análise de viabilidade econômica. Consequentemente, diversos métodos diferentes estão disponíveis, cada um gerando um tipo de indicador financeiro. O a escolha do indicador irá depender das informações que se tem disponíveis e principalmente das informações que se deseja obter com a análise, sendo que a utilização conjunta desses indicadores é recomendada (SULLIVAN; WICKS; KOELLING, 2015).

2.6.2.1 Valor Presente Líquidos (VPL)

Neste método, todos os futuros ganhos e custos são descontados para o período zero do projeto (comumente o período onde o primeiro pagamento é realizado) através da Equação 2.14. Esses valores presentes descontados são então somados para que se obtenha um valor líquido, denominado valor presente líquido (VPL), de acordo com a Equação 2.15 (LAUER, 2017).

$$VPL = \sum_{k=0}^N F_k \cdot (1 + i)^{-N} \quad (2.15)$$

Onde:

i é a taxa de desconto

k é o índice de cada período ($0 \leq k \leq N$)

F_k é o valor futuro no fim do período k (R\$)

N é o número de períodos dentro do horizonte da análise

Quando se calcula o VPL de um projeto, a taxa de desconto utilizada é denominada taxa mínima de atratividade (TMA) e pode ser entendida como a taxa de desconto mínima que um investidor se propõe a ganhar com um investimento. Essa taxa é subjetiva, mas geralmente sua escolha se baseia no custo de oportunidade do negócio (quanto mais se pode ganhar com o investimento quando comparado a outras oportunidades), no risco (quanto maior o risco associado, maior será o retorno esperado) e na liquidez do negócio (a facilidade com que um ativo pode ser convertido em capital) (KENTON, 2020a).

A Equação 2.15 permite calcular o VPL de fluxos de caixa pontuais no decorrer no projeto. Entretanto, é comum que ocorram fluxos de caixa recorrentes, denominados anuidades. O cálculo do VPL de anuidades é feito pela Equação 2.16 (SULLIVAN; WICKS; KOELLING, 2015).

$$VPL = A \cdot \frac{(1 + i)^N - 1}{i \cdot (1 + i)^N} \quad (2.16)$$

Alguns projetos possuem uma expectativa de vida longa, e geram, portanto, anuidades ao longo de um período virtualmente infinito. Nesses casos $N \rightarrow \infty$ e a Equação 2.16 se reduz à Equação 2.17 (SULLIVAN; WICKS; KOELLING, 2015).

$$VPL = \frac{A}{i} \quad (2.17)$$

Os critérios de seleção baseados no VPL são como segue:

$VPL > 0$: o projeto é economicamente viável, pois o valor presente das entradas supera o das saídas.

$VPL = 0$: o investimento é indiferente, uma vez que as receitas geradas pelo projeto se igualam aos gastos.

$VPL < 0$: o investimento não é justificado, pois os investimentos não serão compensados (BLANK; TARQUIN, 2012).

2.6.2.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A taxa interna de retorno (TIR) é a taxa de desconto que iguala os retornos esperados de um projeto aos custos, em termos do valor presente. Em outras palavras, é a taxa de desconto que torna o VPL igual a zero em um período especificado (SULLIVAN; WICKS; KOELLING, 2015).

Encontrar a TIR é o mesmo que encontrar a remuneração percentual de um projeto. Para tanto, deve-se criar um modelo dos fluxos de caixa do projeto para cálculo do VPL e definir a taxa de desconto i como variável, buscando o valor que torna o VPL igual à zero no fim do período da análise (LAUER, 2017) Para fluxos de caixa mais simples, é possível resolver as equações algebricamente. Entretanto, modelos mais complexos precisarão de métodos iterativos, que podem ser executados em planilhas eletrônicas ou outras ferramentas de cálculo (BLANK; TARQUIN, 2012).

A avaliação do TIR é feita através de sua comparação com a TMA. O investimento será economicamente atrativo se $TIR \geq TMA$. Isso significa que o retorno percentual esperado do projeto será no mínimo igual à taxa mínima de atratividade da empresa, justificando o investimento (SULLIVAN; WICKS; KOELLING, 2015).

2.6.2.3 Tempo de *Payback*

Outra informação útil na análise econômica de projetos é o tempo de *payback*, que se refere ao tempo necessário para que os investimentos realizados no projeto sejam pagos. A forma mais simples de calcular esse parâmetro consiste em dividir o investimento inicial pela média anual dos fluxos de entrada estimados, sendo denominado tempo de *payback* simples. Entretanto, o tempo de *payback* descontado deve ser calculado caso se deseje levar em conta o valor temporal do capital na análise. Para tanto, deve-se primeiramente descontar as entradas futuras para o valor presente e comparar a soma cumulativa desses valores com o valor total do investimento. O tempo de *payback* será o primeiro período para o qual essa soma cumulativa exceder o investimento inicial, ou seja, o primeiro período onde $VPL \geq 0$. Deste período em diante, o projeto passará a gerar lucro para seus investidores (KENTON, 2019).

O tempo de *payback* é um indicador unicamente da liquidez do projeto, ou quão rápido o investimento pode ser recuperado. Por esse motivo, pode levar a conclusões erradas quando usado isoladamente, sendo recomendado que seja usado em conjunto com outras ferramentas de análise econômica. O critério de decisão sobre o tempo de *payback* envolve decisões estratégicas da empresa, refletindo o quão rápido se deseja recuperar o investimento. Se o tempo de *payback* for menor ou igual ao tempo aceitável de recuperação, o parecer será favorável (SULLIVAN; WICKS; KOELLING, 2015).

2.6.2.4 Análise de Sensibilidade

Análises econômicas são realizadas com base em estimativas dos parâmetros utilizados. Como qualquer previsão sobre o futuro não é exata, por melhor que seja feita, projeções econômicas sempre carregam algum grau de incerteza associado. Uma das formas de reduzir o efeito dessa incerteza é a realização de uma análise de sensibilidade. Esse tipo de análise indica o quanto um indicador econômico varia quanto um dos parâmetros utilizados no modelo (variáveis independentes) varia, permitindo

determinar as variáveis que têm maior influência sobre o modelo e conseqüentemente sobre a viabilidade do projeto (KENTON, 2020b).

Parâmetros frequentemente avaliados são preço unitário de venda, intensidade operacional e demanda. A avaliação de taxas de desconto, como a TMA, não é recomendada por esse método, uma vez que tais parâmetros costumam variar pouco de um projeto para outro. A análise em si é feita geralmente com o auxílio de planilhas eletrônicas: um dos parâmetros é variado ao longo de um intervalo e a resposta do modelo é computada para cada valor do parâmetro. Os resultados são plotados em um gráfico conhecido como *spider plot* (BLANK; TARQUIN, 2012).

Juntamente com a análise de sensibilidade é possível determinar o ponto de equilíbrio econômico de uma variável independente, isto é, o valor desta variável para o qual se torna indiferente aceitar ou rejeitar o projeto (o valor que torna $PVL = 0$ ou $TIR = TMA$). Parâmetros que são comumente avaliados dessa maneira são fluxos de entrada e saída anuais, taxas de desconto, vida útil de equipamentos e utilização de capacidade instalada (SULLIVAN; WICKS; KOELLING, 2015).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Desenvolver uma proposta de projeto para a implementação de uma etapa de tratamento térmico como forma de viabilizar a zincagem de dobradiças no setor de galvanização de uma empresa metalúrgica.

3.2 Objetivos específicos

- Aplicar o padrão PMBOK[®] como guia para o desenvolvimento da proposta;
- Realizar um estudo de caso sobre a situação atual do setor de galvanização e propor um cenário futuro, com projeções a respeito de gastos e ganhos associados ao projeto;
- Realizar o dimensionamento dos equipamentos que serão usados na etapa de tratamento térmico;
- Fornecer parâmetros econômicos a respeito do projeto e informações a respeito dos riscos suficientes para que a proposta possa ser avaliada corretamente

4 METODOLOGIA

4.1 Elaboração da proposta de projeto

No intuito de desenvolver uma proposta de projeto com informações suficientes para que a gerência da fábrica possa avaliar adequadamente, foram executados os seguintes processos do grupo de planejamento descritos pelo guia PMBOK® foram executados:

- Coleta dos requisitos;
- Definição do escopo;
- Elaboração da Estrutura Analítica do Projeto;
- Estimativa dos custos;
- Determinação do orçamento;
- Identificação de riscos.

Por se tratar da fase de concepção do projeto, todos os processos foram executados com base em estimativas, projeções e dados históricos da própria empresa. Sempre que necessário, parâmetros foram estimados em reuniões com o gerente da fábrica, líderes de setores produtivos, engenheiros e outros profissionais, cujas área de atuação fossem pertinentes ao projeto, através de técnicas como *brainstorming* e comparação a projetos similares.

4.2 Cenário atual e cenário desejado

Num primeiro esforço de compreender as características do processo produtivo atual para que uma proposta pudesse ser formulada, foi realizado um estudo de caso dentro do setor de galvanização. O objeto do estudo foram as linhas de galvanização, buscando-se um melhor entendimento de suas características particulares, como capacidade produtiva, processamento máximo e custos de produção. O estudo foi realizado a partir da análise de documentos históricos da fábrica, entrevista com operadores, engenheiros e gerentes, levantamento de dados de produção e observação *in situ* do processo.

Com base nas informações coletadas no estudo de caso, partiu-se então para a elaboração de uma solução tecnicamente viável, capaz de reduzir o custo de processamento das articulações. Estudos

acadêmicos e outras publicações foram usados em associação com tais informações para planejar o *design* do novo processo.

4.3 Escopo

De acordo com o guia PMBOK[®], a definição do escopo é um dos processos iniciais dentro do grupo de planejamento, uma vez que fornecerá os limites do projeto, evidenciando tudo que se pretende executar ou não. Dessa maneira, o escopo é uma base importante para o planejamento do orçamento e das atividades que serão executadas (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, 2014).

Inicialmente foram coletados requisitos relacionados à empresa, ao processo produtivo, à qualidade e às características do produto, por meio de entrevistas e análise do cenário atual. A partir daí foi possível detalhar o escopo do projeto, atividade que foi feita juntamente com a liderança do setor de galvanização e a gerência da fábrica. Por fim, o escopo foi utilizado como base para o desenvolvimento da Estrutura Analítica do Projeto (EAP), elaborada por meio do processo de detalhamento. A EAP apresenta todas as atividades necessárias à correta execução do projeto, elencadas em níveis hierárquicos e separadas em grupos específicos.

4.4 Dimensionamento do tratamento térmico

De acordo com o manual técnico para seleção de equipamentos de tratamento térmico da Despatch, a escolha de um forno deve ser feita considerando exigências do processo, volume interno mínimo, potência necessária para o aquecimento do material a ser tratado e o tempo em que se deseja realizar esse tratamento, além da potência dissipada ao ambiente (DESPATCH, 2016). A potência máxima que o forno deve ser capaz de entregar foi calculada considerando-se a potência para o aquecimento das peças no tempo desejado e a potência continuamente dissipada ao ambiente por transferência de calor por convecção e radiação e pela exaustão de ar, conforme a Equação 4.1.

$$P_{total} = P_{aq} + P_{ex} + P_{conv.} + P_{rad.} \quad (4.1)$$

Onde:

P_{total} é a potência total que o forno precisa ser capaz de fornecer (kW)

P_{aq} é a potência necessária para o aquecimento das peças (kW)

P_{ex} é a potência dissipada com a exaustão de ar (kW)

$P_{conv.}$ é a potência dissipada para o ambiente por convecção (kW)

$P_{rad.}$ é a potência dissipada para o ambiente por radiação (kW)

A potência de aquecimento foi determinada a partir do calor específico do aço, conforme Equação 4.2. Foi considerado um aquecimento homogêneo das peças, sendo que a energia requerida é proporcional à diferença entre a temperatura de tratamento e a temperatura de entrada das peças e à massa de peças a ser aquecida. Esta última está relacionada à demanda diária de processamento e ao número de fornos. Por fim, o tempo desejado de aquecimento termina a potência: quanto menor, maior será a potência exigida.

$$P_{aq} = \frac{D_{diária} \cdot Cp_{aço} \cdot (T_{op} - T_{peças})}{n_{fornos} \cdot t_{aq}} \quad (4.2)$$

Onde:

P_{aq} é a potência necessária para o aquecimento das peças (kW)

$D_{diária}$ é a demanda diária de articulações (kg)

$Cp_{aço}$ é a capacidade térmica do aço (kJ/kg·K)

T_{op} é a temperatura de trabalho do forno (K)

$T_{peças}$ é a temperatura de entrada das peças no forno (K)

t_{aq} é o tempo desejado para o aquecimento das peças (s)

n_{fornos} é o número de fornos em operação

A potência dissipada com a exaustão de ar foi estimada de modo semelhante, através da Equação 4.3. Neste caso, também se considerou um aquecimento homogêneo da massa de ar, que está implícita, juntamente com o tempo de aquecimento, na vazão de ar do forno.

$$P_{ex} = \dot{V}_{ar} \cdot Cp_{ar} \cdot \rho_{ar} \cdot (T_{op} - T_{amb}) \quad (4.3)$$

Onde:

P_{ex} é a potência dissipada com a exaustão de ar (kW)

\dot{V}_{ar} é a vazão de ar de exaustão (m³/s)

Cp_{ar} é a capacidade térmica do ar (kJ/kg·K)

ρ_{ar} é a massa específica do ar (kg/m³)

T_{op} é a temperatura interna do forno (K)

T_{amb} é a temperatura ambiente média (K)

Em seguida, a potência dissipada por convecção foi obtida somando-se as parcelas perdidas pelas paredes laterais do forno e pela parte superior, descrita pela Equação 4.4. Considerou-se que não há vento nem nenhum outro tipo de circulação forçada de ar no recinto onde os fornos serão instalados, de modo que somente ocorre o mecanismo de convecção natural.

$$P_{conv} = (h_{lat} \cdot A_{lat} + h_{sup} \cdot A_{sup}) \cdot (T_s - T_{amb}) \quad (4.4)$$

Sendo:

P_{conv} a potência dissipada para o ambiente por convecção a partir da superfície do forno (kW)

h_{lat} o coeficiente de transferência de calor por convecção pelas laterais do forno (kW/m²·K)

h_{sup} o coeficiente de transferência de calor por convecção pela parte superior do forno (kW/m²·K)

A_{lat} a área total das paredes laterais do forno (m²)

A_{sup} a área da superfície superior do forno (m²)

T_s a temperatura da superfície externa do forno (K)

T_{amb} a temperatura ambiente média (K)

Os coeficientes de transferência de calor por convecção h_{lat} e h_{sup} foram obtidos pelas correlações para o número de Nusselt, de acordo com suas respectivas geometrias, mostradas previamente na Tabela 1.

Por fim, a potência dissipada por radiação foi obtida pela Equação 4.5. Para tanto, o recinto onde os fornos serão instalados foi aproximado como um corpo negro isotérmico, capaz de absorver toda a energia radiante emitida pelos equipamentos.

$$P_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (4.5)$$

Sendo:

P_{rad} a potência dissipada por radiação a partir da superfície do forno (kW)

ε a emissividade superficial do forno (adimensional)

A a área superficial total do forno (m²)

T_s a temperatura superficial do forno (K)

T_{amb} a temperatura ambiente (K)

Quaisquer outros meios de perda de potência foram considerados desprezíveis, e os fornos foram aproximados como tendo superfícies internas e externas perfeitamente isotérmicas. Ainda, considerou-se que eles já estarão pré-aquecidos na temperatura de tratamento antes da entrada das peças, sendo a energia necessária para seu próprio aquecimento também considerada desprezível. Além disso, a pressão atmosférica foi considerada constante e igual a 1 atm.

Finalmente, a energia consumida por um forno durante um ciclo de operação foi estimada pela Equação 4.6. Nela, considera-se que o aquecimento tanto do forno quanto das peças ocorre à potência máxima, enquanto o tratamento das peças ocorre a uma potência mínima, equivalente à potência dissipada por trocas de calor com o ambiente.

$$E_{total} = P_{total} \cdot (t_{pré-aa} + t_{aa}) + P_{diss} \cdot t_{trat} \quad (4.6)$$

Sendo:

P_{total} a potência máxima do forno (kW)

P_{diss} a potência dissipada pelo forno pela exaustão de ar, convecção e radiação (kW)

$t_{pré-aa}$ o tempo de pré-aquecimento do forno (h)

t_{aa} o tempo desejado para o aquecimento das peças (h)

t_{trat} o tempo de tratamento térmico das peças (h)

4.5 Estimativa e análise dos custos

A determinação dos custos do projeto foi realizada em duas etapas: estimativa dos valores e análises econômicas. Dados de produção foram estimados com base na produção realizada no setor de galvanização no período de abril de 2019 a março de 2020, e custos como infraestrutura, treinamentos,

manutenção e qualidade foram obtidos por comparação a outros setores e projetos da fábrica. O custo operacional do processo proposto foi calculado a partir dos valores de potência determinados no dimensionamento dos fornos.

As análises econômicas foram realizadas para fornecer indicadores financeiros para a avaliação do projeto. Uma vez que a decisão que deve ser feita é a de implementar ou não o projeto proposto, ele foi avaliado contra a opção “fazer nada”. Dessa maneira, somente as diferenças marginais entre as duas opções (fazer nada ou implementar o novo projeto) precisaram ser avaliadas, simplificando as análises. Os parâmetros calculados foram Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e tempo de *payback* descontado, todos sobre um período de 12 meses. Esse período foi escolhido com base nos critérios de seleção de projetos da empresa: projetos de melhoria que demandem tempos maiores do que um ano para trazerem retornos positivos não costumam ser considerados. A taxa mínima de atratividade foi considerada igual à taxa SELIC, pois, caso o projeto não seja executado, o valor que seria investido continuará aplicado rendendo sob esta taxa. Além disso, foi realizada uma análise de sensibilidade com as variáveis operacionais, como tempo e temperatura do tratamento térmico, e outras variáveis como custo de galvanização, demanda estimada e investimentos. Todas as análises econômicas foram desenvolvidas em planilhas eletrônicas no software Microsoft Excel® para Office 365.

4.6 Análise de riscos

A análise de riscos foi feita em conjunto com a liderança do setor e gerência da fábrica, além de engenheiros, profissionais de outros setores como manutenção e qualidade e operadores. Foi realizada uma análise SWOT (Forças – Fraquezas – Oportunidades – Ameaças, do inglês *Strengths – Weaknesses – Opportunities – Threatens*) para que o posicionamento do projeto e da empresa no mercado ficassem claros. Também foi criada uma lista de possíveis riscos específicos à execução do projeto, tomando-se a EAP como base, e ações para atenuar ou mitigar tais riscos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Cenário atual

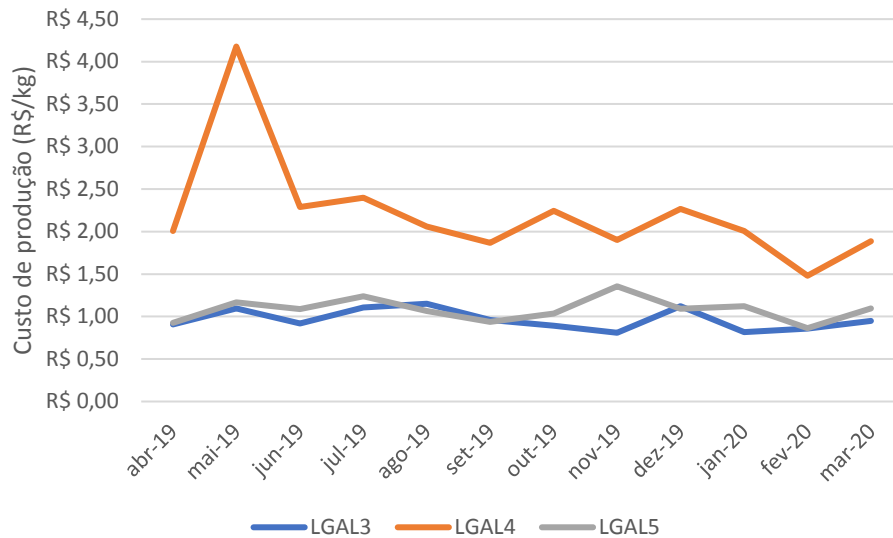
O setor de galvanização é responsável pelo recobrimento de todos os componentes das dobradiças produzidas pela empresa. Para tanto, conta com dois tipos de processos: zincagem alcalina e niquelação.

Existem três linhas de galvanização no setor: duas destinadas ao banho dos componentes de maior tamanho da dobradiça (LGAL3 e LGAL5) e uma para o banho das articulações (LGAL4). As duas primeiras utilizam o processo de zincagem alcalina, enquanto a terceira usa o processo de niquelação, de modo que a dobradiça montada é inteiramente recoberta com zinco, à exceção de sua dobradiça interna, banhada com níquel.

De acordo com os manuais técnicos dos fornecedores, o processo de zincagem alcalina, na forma como é realizado hoje na empresa, tem uma eficiência que pode variar entre 50 e 80 %, enquanto o processo de niquelação tem uma eficiência de 95 a 98 % (ATOTECH, 2008a, 2008b). Isso significa que o processo de zincagem alcalina tem um potencial muito maior para gerar hidrogênio na superfície das peças que estão sendo banhadas e fragilizá-las do que o processo de niquelação. A experiência da empresa na produção de dobradiças mostra que, apesar do maior potencial de fragilização, é possível banhar com zinco todos os componentes da dobradiça, com exceção da articulação interna. Essa peça, de acordo com o engenheiro responsável pelo departamento de engenharia de produto, sustenta a maior parte da carga quando a dobradiça está sendo usada e, por essa razão, precisa ser galvanizada pelo processo de niquelação.

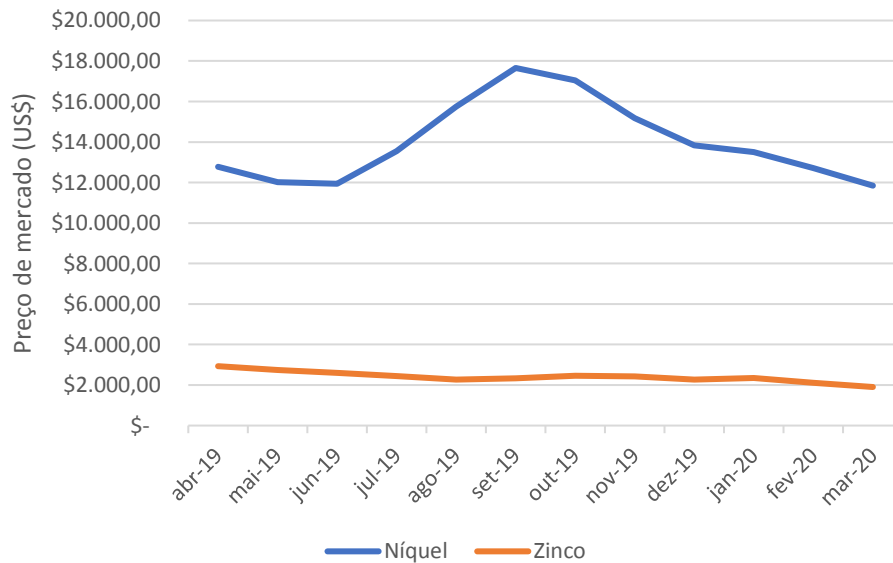
Os custos de produção de cada linha no período de abril-19 a março-20, disponibilizados pela gerência da fábrica, estão apresentados na forma de reais por quilo de peça produzida na Figura 4. É fácil notar que a LGAL4 tem um custo de produção consideravelmente maior do que as outras linhas, com uma média de R\$ 2,22 /kg, contra R\$ 1,02 /kg nas linhas de zincagem. A principal razão é o custo de zinco e níquel, como visto na Figura 5, onde seus preços de mercado no último ano estão apresentados em dólares americanos por tonelada. Nesse período, o preço da tonelada de níquel foi em média 5,9 vezes maior que o preço da tonelada do zinco.

Figura 4 - Evolução mensal do custo de produção das linhas de galvanização entre abril-19 e março-20, apresentado na forma de R\$/kg de peça banhada. O pico observado na LGAL4 em maio-19 ocorreu por conta de reformas de melhoria executadas na linha, não sendo relevante para as análises



Fonte: arquivo próprio

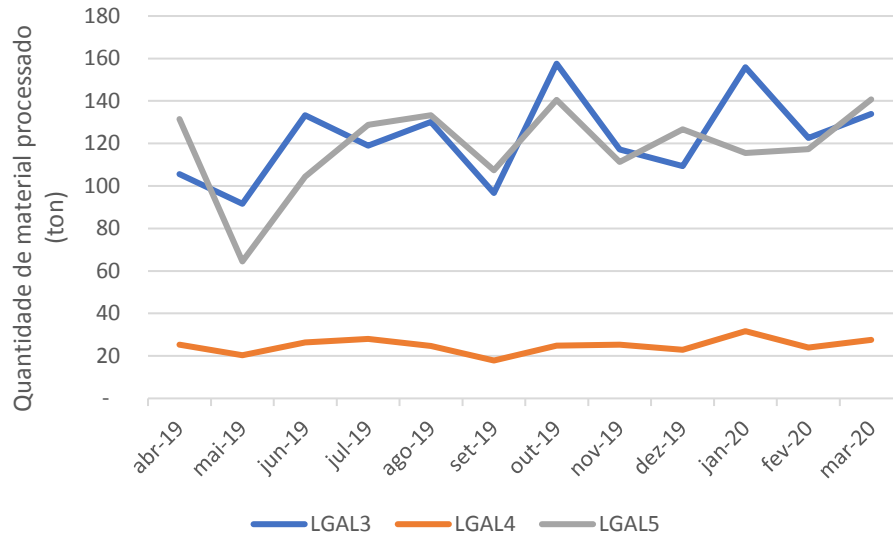
Figura 5 - Evolução do preço de mercado de níquel e zinco, apresentado na forma de US\$/ton.



Fonte: (INDEXMUNDI, 2020)

A produção de cada uma das linhas, em termos de toneladas de peças banhadas, está sumarizada na Figura 6. A produção da LGAL4 representou, em média, 9% da produção total do setor de galvanização, sendo que um olhar mais detalhado dos itens processados por ela mostra que 86% desses itens eram a articulação da dobradiça, em média, como visto na Figura 7. Isso representa um processamento médio de 21.300 kg de articulação por mês. Os 14% restantes compreendem os itens da dobradiça niquelada, produzida como uma linha especial devido ao seu aspecto estético, e que não serão considerados neste trabalho, uma vez que faz parte do planejamento estratégico da empresa extinção dessa linha, dado seu alto custo de produção e baixa adesão no mercado.

Figura 6 - Produtividade mensal das linhas de galvanização no período de abril-19 a março-20, apresentada na forma de toneladas processadas.

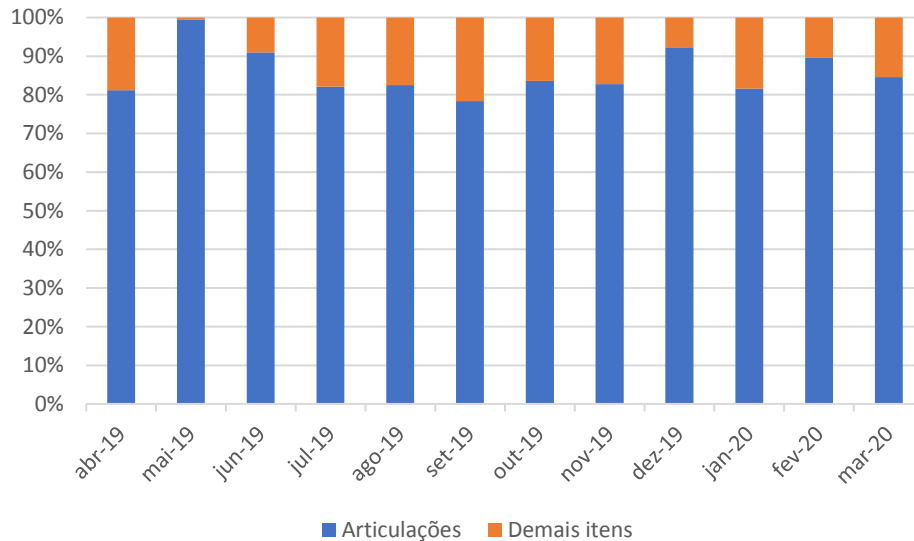


Fonte: arquivo próprio

Finalmente, o número de dias trabalhados por mês em cada linha está resumido na Figura 8. Observa-se que a linha LGAL4 foi a linha que operou menos dias no período, com uma média de 21 dias por mês. Isso é explicado pela pequena quantidade de itens processados nesta linha: quando seus estoques estão supridos no setor de montagem seu processamento é suspenso. Dividindo-se o processamento mensal médio da linha LGAL4 pelo número médio de dias trabalhados, obtém-se um valor de aproximadamente 1.200 kg/dia de articulações trabalhadas. Esse valor será considerado como estimativa da demanda por articulações que deve ser suprida diariamente. As linhas LGAL3 e LGAL5 operaram

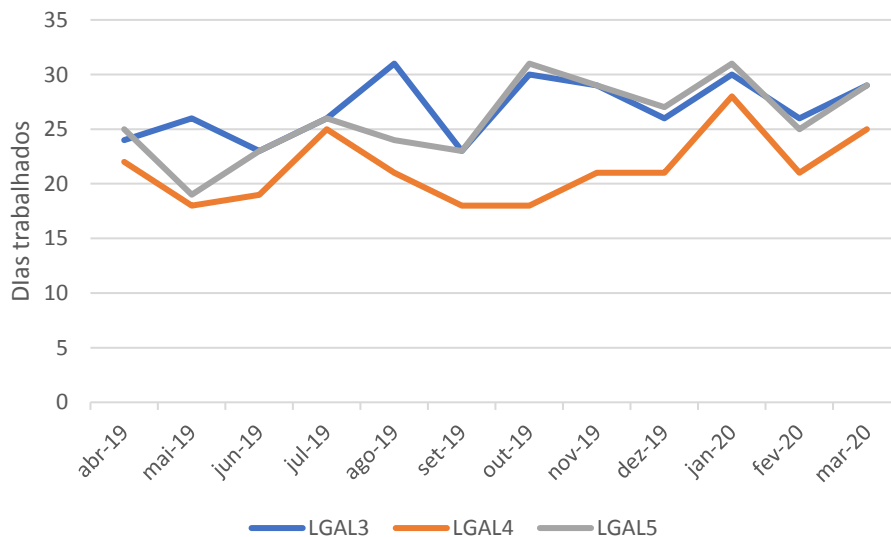
em média 27 e 26 dias por mês, respectivamente, sempre em dois turnos diários de 8h, enquanto a linha LGAL4 operou somente um turno por dia trabalhado.

Figura 7 - Itens processados por mês na LGAL4. As articulações representam a maior parcela processada. Os demais itens são os componentes da dobradiça galvanizados com níquel, para uma linha de maior valor agregado, porém com menor adesão de mercado.



Fonte: arquivo próprio

Figura 8 - Dias trabalhados em cada linha do setor de galvanização. As linhas LGAL3 e LGAL5 sempre operam em dois turnos diários de 8 horas, enquanto a linha LGAL4 opera somente um turno diário.



Fonte: arquivo próprio

Assim, dentre os itens com maior custo de processamento (aqueles que recebem banho de níquel na LGAL4) as articulações constituem grande parte do volume processado e a redução do seu custo de processamento constitui uma excelente oportunidade de ganho para a empresa.

5.2 *Design do novo processo*

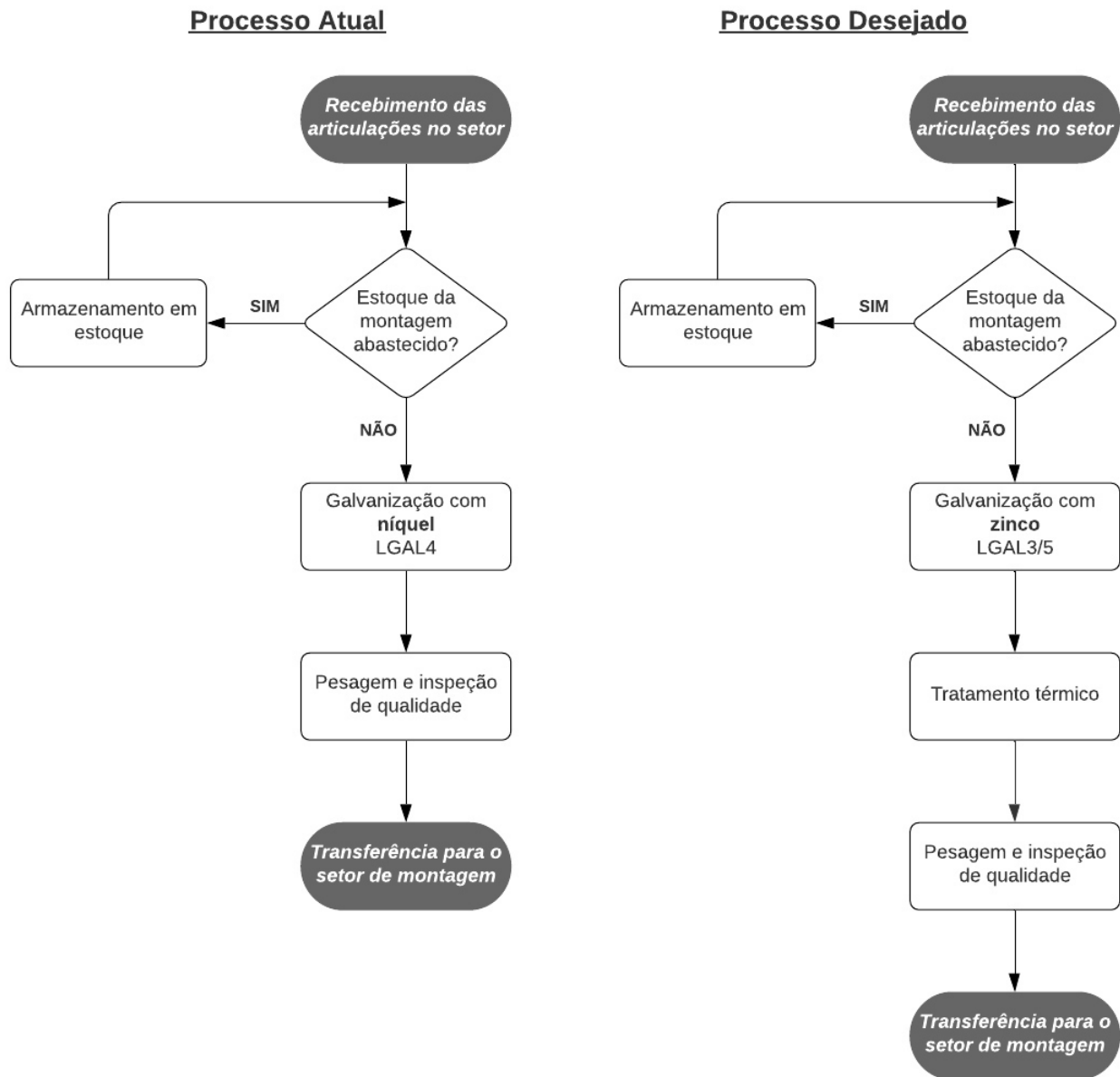
Para aproveitar a oportunidade de economia identificada, propõe-se passar a realizar a galvanização das articulações pelo processo de zincagem alcalina nas linhas já existentes. Isso, no entanto, pode afetar a qualidade das peças, que estarão mais suscetíveis à fragilização por hidrogênio, sendo por isso também sugerida a implementação de uma etapa de tratamento térmico dessas peças em fornos após o processo de galvanização para remoção do hidrogênio adsorvido. Conforme ilustrado na Figura 9, essa modernização de processo consiste apenas na adição de uma nova etapa, que viabilizará a alteração do metal de proteção aplicado na etapa de galvanização.

Cabe ressaltar aqui que existe uma certa sobreposição na literatura dos termos “forno” e “estufa”, sendo que ambos são frequentemente usados para descrever equipamentos de tratamento térmico operando até aproximadamente 500 °C. Neste trabalho, será utilizado somente o termo “forno”.

Para que o fluxo de atividades do processo de galvanização com zinco das articulações seguido de tratamento térmico seja criado, é necessário inicialmente que se façam estimativas da demanda de produção desta peça e dias que serão trabalhados nos próximos meses. A estimativa de demanda de produção para a articulação é de aproximadamente 21.300 kg/mês. Levando em consideração o fato de que a relação peso/volume dessa peça é de 1797 kg/m³, estima-se uma demanda volumétrica de 11,85 m³/mês. Esses valores foram validados pela equipe de planejamento de processos da fábrica como sendo coerentes com as expectativas para o próximo período.

Outros dois parâmetros importantes são o número de dias trabalhados nas linhas produtivas por mês e o tempo de saída de tambor rotativo de cada linha, que estão resumidos na Tabela 2. Deste ponto em diante, as linhas de zincagem LGAL3 e LGAL5 serão apresentadas conjuntamente como LGAL3/5, uma vez que são idênticas do aspecto operacional. Quaisquer parâmetros relacionados a essas linhas serão apresentados como uma média.

Figura 9 - Fluxogramas dos processos atual e desejado, evidenciando a adição da etapa de tratamento térmico que viabiliza a troca do metal de galvanização.



Fonte: arquivo próprio

Tabela 2 - Características produtivas das linhas do setor de galvanização.

| | LGAL3/5 | LGAL4 |
|--|----------------|--------------|
| Dias trabalhados (dias/mês) | 26 | 21 |
| Horas trabalhadas (h/dia) | 8 | 16 |
| Tempo de saída de tambor rotativo (min) | 4,1 | 12,58 |
| Volume do tambor rotativo (m ³) | 0,09 | 0,12 |

Fonte: arquivo próprio

De acordo com (SINGLETON, 1994), no processo de galvanização em tambores rotativos, os tambores devem operar com volume de peças de 40 a 60% de seu volume total. A experiência com as linhas de zincagem na empresa mostra que melhores resultados são atingidos com um volume ocupado de 40% do volume total do tambor rotativo. Para as linhas LGAL3/5, isso significa um volume de peças de aproximadamente 0,048 m³. Considerando que a demanda mensal estimada é de 11,85 m³/mês, conclui-se que serão necessários 247 rotativos no mês para processar todo o volume de material. Como o tempo de saída de cada tambor rotativo das linhas LGAL3/5 é de 4,1 min, o tempo adicional de trabalho requerido é de 16,9 h/mês para que essas linhas absorvam a produção de articulações da linha LGAL4. Isso são aproximadamente dois turnos, ou um dia adicional de trabalho nas linhas LGAL3/5, de modo que a estimativa de dias a serem trabalhados para essas linhas incluindo o processamento das articulações se torna 27 dias/mês.

A literatura indica que, uma vez finalizado o processo de galvanização, as peças devem ser submetidas o mais rápido possível ao tratamento térmico, uma vez que a difusão de hidrogênio na microestrutura da peça aumenta com o decorrer do tempo (JANSEN; TOMACHUK, 2008a). Além disso, o tratamento térmico das peças só poderá ser iniciado quando todas as articulações tiverem sido galvanizadas, pois as peças deverão entrar ao mesmo tempo no forno para que a frequência de abertura da porta seja mínima. Para que o processo seja otimizado, sugere-se que a produção diária seja compartilhada entre as linhas LGAL3 e LGAL5, reduzindo o tempo de galvanização pela metade. Também se deve considerar que, quanto menor o volume diário a ser processado, menores poderão ser os fornos utilizados e, portanto, menores os investimentos. A média de produção mensal dividida pelo

máximo de dias trabalhados fornece uma estimativa de processamento de 790 kg/dia de articulações, a serem divididos entre as duas linhas de zincagem e consumindo 0,3 h de operação de cada uma.

5.3 Elaboração do escopo

Após entrevistas com o gerente de operações da fábrica, com a liderança do setor de galvanização, com os responsáveis pela qualidade e com operadores, foram levantados diversos requisitos relativos à essa proposta de projeto, relacionados na Tabela 3. Eles foram agrupados em “requisitos da empresa”, “requisitos do produto” e “requisitos do processo”. As classificações “obrigatório” e “desejável” foram aplicadas no intuito de determinar a prioridade de cada requisito.

- Obrigatório: requisitos essenciais ao desenvolvimento do projeto, sem os quais a operação é impedida por falta de equipamento ou inadequação da empresa à normas regulatórias;
- Desejável: requisitos que não comprometem o funcionamento básico do projeto, porém agregam valor ao mesmo ou outros tipos de benefícios.

Tabela 3 - Requisitos coletados para o desenvolvimento do escopo do projeto. Os requisitos estão divididos entre requisitos de empresa, processo e produto, e classificados como obrigatórios ou desejáveis, dependendo do seu grau de importância.

| Tipo | Requisito | Classificação |
|-------------|---|----------------------|
| Empresa | - O projeto precisa ter um retorno financeiro positivo | Obrigatório |
| | - O projeto deve gerar uma redução de custos | Obrigatório |
| | - O novo processo deve estar de acordo com as normas regulamentadoras | Obrigatório |
| | - Os operadores devem ser treinados para atuar no novo processo | Obrigatório |
| | - O projeto precisa ser pago em no máximo 1 ano | Desejável |
| | - O projeto deve ter algum outro benefício além do econômico | Desejável |
| | - O projeto não pode exigir a contratação de mão-de-obra adicional | Desejável |

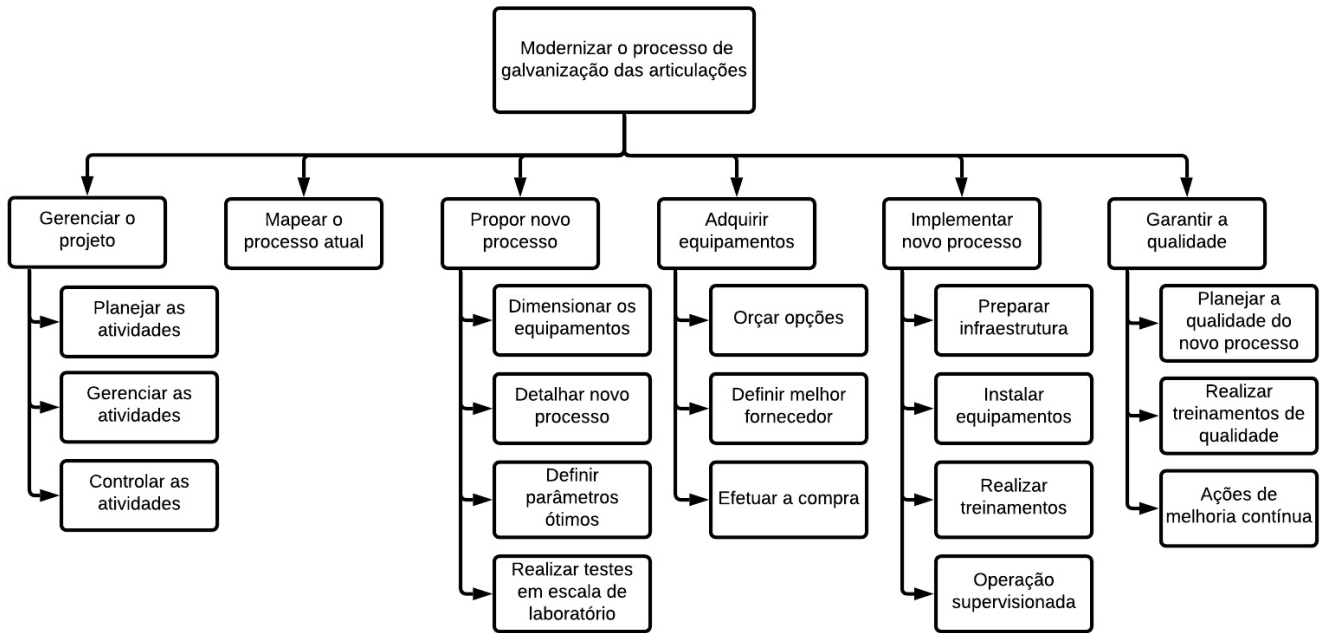
| Tipo | Requisito | Classificação |
|-------------|---|----------------------|
| Processo | - A demanda de produção deve ser atendida | Obrigatório |
| | - As articulações devem ser capazes de suportar as forças às quais serão submetidas no processo de montagem | Obrigatório |
| | - Durante a implementação do novo processo não deve haver pausa no suprimento do setor de montagem | Desejável |
| Produto | - A qualidade do produto (dobradiça montada) não pode ser afetada | Obrigatório |
| | - As articulações devem ser capazes de sustentar a carga aplicada quando instaladas e em operação | Obrigatório |

Fonte: arquivo próprio

A partir dos requisitos coletados fica definido que o escopo do projeto é viabilizar o processo de galvanização das articulações das dobradiças pelo processo de zincagem alcalina através da implementação de uma etapa de tratamento térmico, cujo objetivo é atenuar os efeitos adversos da fragilização por hidrogênio. Isso deve ser feito de forma economicamente atraente e com rápido retorno do investimento. Além disso, espera-se utilizar o poder de trabalho preexistente na fábrica e executar a implementação do novo processo sem que o fornecimento de peças banhadas para o setor de montagem seja afetado. Por fim, é imprescindível que a qualidade do produto seja mantida.

Com o escopo claramente definido, foi possível detalhar a Estrutura Analítica do Projeto (EAP) através da decomposição da atividade principal do projeto em atividades menores que precisam ser executadas para que a atividade principal seja cumprida. A atividade principal é a substituição do processo de galvanização das articulações, e as atividades foram detalhadas até o terceiro nível, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Detalhamento da Estrutura Analítica do Projeto (EAP). A atividade principal foi subdividida em etapas. Em cada etapa, foram listadas as principais atividades necessárias para sua conclusão.



Fonte: arquivo próprio

As atividades de gerenciamento do processo envolvem o planejamento do próprio projeto, bem como a articulação de todos os colaboradores e gerenciamento das atividades que estão sendo executadas. Para que o cenário futuro seja planejado, é necessário que se conheça o cenário atual, por meio de seu mapeamento, que foi realizado para a definição do escopo do projeto. A partir daí, foi proposto o novo projeto pelo dimensionamento prévio dos equipamentos necessários e detalhes de processo. A proposta do novo processo estará completa após a definição dos parâmetros ótimos de processamento e realização de testes a nível de bancada. Essa proposta do novo projeto deve ser continuamente revista à medida que mais informação é obtida.

Uma vez desenhado e planejado o novo processo, parte-se para a etapa de aquisição dos equipamentos. Com os detalhes obtidos na etapa de dimensionamento, realiza-se um orçamento com fornecedores. Uma vez que a empresa já possui um setor de ferramentaria equipado com fornos para tratamento térmico de aço, os fornecedores destes equipamentos serão priorizados. Com os equipamentos adquiridos, inicia-se a fase de implementação do novo processo, que deve ser feita de forma gradual para não afetar o fornecimento do setor de peças galvanizadas, conforme requisitos da empresa. A estrutura necessária para alocação dos equipamentos adquiridos deve ser construída e os equipamentos instalados.

Os operadores devem receber treinamento formal para manusear os equipamentos novos e atuar no novo processo. A operação deve começar de forma gradual e supervisionada pelos líderes e engenheiros do setor, para que possíveis problemas sejam rapidamente detectados e resolvidos. Por fim, a qualidade do novo processo e das articulações banhadas deve ser garantida. Para tanto, toda a equipe deve receber um treinamento sobre tratamento térmico e fragilização por hidrogênio, e o processo deve ser planejado em termos de sua qualidade. Por fim, o processo também deve ser alvo de ações de melhoria contínua ao longo de toda sua vida útil e de forma mais intensa nos primeiros meses de operação.

5.4 Dimensionamento do tratamento térmico

O dimensionamento dos fornos que serão usados para o tratamento térmico das articulações banhadas com zinco foi feito por dois principais motivos: determinar as características do equipamento que será comprado e estimar os custos operacionais do processo proposto.

De acordo com o manual técnico de processamento térmico da Despatch, empresa norte americana especializada em fornos e estufas industriais, a seleção de um forno para tratamento térmico deve levar em conta os seguintes pontos (DESPATCH, 2016):

- Modo de carregamento
- Operação contínua ou batelada
- Espaço interno
- Potência requerida

Uma vez que na empresa já são utilizados *pallets* para a movimentação interna de material, pretende-se realizar o carregamento dos fornos da mesma maneira. Assim, o equipamento selecionado deve permitir o carregamento por carrinho de transporte. Além disso, uma vez que a literatura recomenda um tempo mínimo de tratamento térmico de quatro horas para remoção do hidrogênio adsorvido, é fácil perceber que a operação contínua iria requerer velocidades extremamente baixas de esteira ou comprimentos proibitivamente longos. Desse modo, fica escolhida a operação em batelada.

Conforme determinado previamente, devem ser processados diariamente 800 kg de articulações nas linhas de zincagem, ou 0,44 m³/dia. Uma vez que o tempo previsto para o tratamento térmico (mínimo de 6h) é consideravelmente maior do que o tempo de galvanização das peças, conclui-se que invariavelmente todas as peças serão acumuladas dentro dos fornos, que deverão então ter um espaço interno mínimo de 0,44 m³. Caso seja determinado que a compra de mais de um forno é mais vantajosa,

esse deve ser o volume somado do espaço interno de todos os fornos. Se apenas um forno estiver operando, deverá ser capaz de comportar toda a demanda diária de produção em uma única batelada para evitar que as peças fiquem esperando por um longo período antes do tratamento térmico.

O tempo de aquecimento deve ser cuidadosamente pensado: se for muito pequeno, exigirá uma potência muito elevada, e talvez as peças não sejam capazes de absorver calor na velocidade necessária. Em contrapartida, tempos muito grandes irão requerer menos potência, mas podem afetar a qualidade do produto. Explicitando-se o tempo de aquecimento na Equação 4.6 pela substituição das Equações 4.1 e 4.2, obtém-se a Equação 5.1.

$$E_{total} = P_{diss} \cdot (t_{pré-aa} + t_{aa} + t_{trat}) + \frac{D_{diária} \cdot Cp_{aço} \cdot (T_{op} - T_{peças})}{n_{fornos}} \cdot \left(\frac{t_{pré-aa} + t_{aa}}{t_{aa}} \right) \quad (5.1)$$

É fácil notar que essa equação é linear para todos os termos, exceto para o tempo de aquecimento das peças, indicando a existência de um ponto ótimo onde o consumo de energia é mínimo. Para determiná-lo, primeiramente aplicou-se a derivada à Equação 5.1 em relação ao t_{aa} , conforme visto na Equação 5.2.

$$\frac{d(E_{total})}{dx} = P_{diss} - \frac{D_{diária} \cdot Cp_{aço} \cdot (T_{op} - T_{peças})}{n_{fornos}} \cdot \left(\frac{t_{pré-aa}}{t_{aa}^2} \right) \quad (5.2)$$

Como o ponto ótimo ocorre onde a derivada da função é nula, obteve-se a Equação 5.3 para calcular $t_{aa\text{ótimo}}$ igualando-se a Equação 5.2 a zero.

$$t_{aa\text{ótimo}} = \sqrt{\frac{D_{diária} \cdot Cp_{aço} \cdot (T_{op} - T_{peças}) \cdot t_{pré-aa}}{n_{fornos} \cdot P_{diss}}} \quad (5.3)$$

As equações apresentadas foram usadas para construir um modelo para estimar a potência operacional máxima dos fornos. Neste modelo, são parâmetros de entrada o número de fornos que se pretende adquirir, as temperaturas interna e externa de operação, a temperatura de entrada das peças e a temperatura ambiente, além das dimensões externas do forno e o tempo desejado para o aquecimento das peças. Esse modelo também será aplicado na estimativa dos custos de operação do forno em diferentes cenários.

A Tabela 4 mostra todos os valores dos parâmetros físicos utilizados no desenvolvimento do modelo. Uma pesquisa prévia de mercado mostrou que a grande maioria dos modelos de fornos industriais disponíveis tem acabamento em aço e, portanto, usou-se a emissividade desse material nos cálculos.

Tabela 4 - Parâmetros físicos utilizados no desenvolvimento das equações para dimensionamento dos equipamentos e estimativa dos custos.

| Constante | Denominação | Valor | Unidade |
|---------------------|--|--------------|----------------------------------|
| $Cp_{aço}$ | Capacidade térmica do aço | 0,502 | kJ/kg·K |
| Cp_{ar} | Capacidade térmica do ar | 1,007 | kJ/kg·K |
| ρ_{ar} | Massa específica do ar | 1,127 | kg/m ³ |
| k_{ar} | Condutividade térmica do ar | 0,02662 | W/m·K |
| μ_{ar} | Viscosidade dinâmica do ar | 1,92E-05 | kg/m·s |
| α_{ar} | Difusividade térmica do ar | 2,35E-05 | m ² /s ² |
| ν_{ar} | Viscosidade cinemática do ar | 1,70E-05 | m ² /s |
| β_{ar} | Coefficiente de expansão volumétrica do ar | 0,00321 | 1/K |
| σ | Constante de Stefan-Boltzmann | 5,674E-08 | W/m ² ·K ⁴ |
| $\varepsilon_{aço}$ | Emissividade superficial do aço inoxidável | 0,07 | - |
| g | Aceleração da gravidade | 9,81 | m/s ² |

Fonte: (ÇENGEL; GHAJAR, 2012; INCROPERA et al., 2008)

A título de exemplificação, o modelo foi aplicado na determinação da potência mínima do equipamento para ser utilizado no seguinte cenário: processamento de 800 kg diários de peças em dois fornos recobertos com aço inoxidável, com dimensões externas de 1 m, que irão operar a 220 °C. A temperatura externa superficial máxima será de 60 °C e as peças entrarão a 20 °C, temperatura ambiente. A vazão de ar foi estimada por comparação a equipamentos semelhantes utilizados no setor de ferramentaria, com valor de 0,1 m³/min.

Nessas condições, o tempo ótimo de aquecimento é de 2,7 h, e cada forno deverá ser capaz de entregar uma potência mínima de 4,89 kW, conforme mostrado na Tabela 5.

Caso não sejam encontrados modelos de equipamentos comercialmente disponíveis capazes de atender esse requisito de potência, a análise deve ser refeita considerando um número maior de forno, de modo a diminuir a massa de peças processada por cada equipamento e, portanto, a potência de aquecimento.

Tabela 5 - Contribuição das diferentes parcelas de potência a potência total requerida para que o forno seja capaz de operar nas condições propostas. A potência de aquecimento representa a maior parcela, e por isso deve ser melhor investigada e otimizada durante a implementação do projeto.

| Potência | Valor |
|-------------|----------|
| P_{aq} | 4,123 kW |
| P_{ar} | 0,411 kW |
| P_{rad} | 0,098 kW |
| P_{conv} | 0,253 kW |
| P_{total} | 4,885 kW |

Fonte: arquivo próprio

5.5 Análise de custos

A análise de custos foi realizada com dois objetivos principais: avaliar a viabilidade econômica da proposta e fornecer um orçamento prévio. A avaliação da viabilidade foi feita pela comparação de duas opções: implementar novo processo ou não fazer nada. Por isso, somente diferenças de valores marginais entre os dois cenários foram incluídos nas análises, e valores comuns não foram considerados.

Os custos foram divididos em investimentos, custos operacionais, custos de manutenção e custos de qualidade, sendo que os três últimos são estimativas dos valores que incorrerão durante o projeto e operação do novo processo.

5.5.1 Investimentos

Foram considerados investimentos do projeto todos os gastos que serão pagos pontualmente para a aquisição de equipamentos, construção de infraestrutura e realização de treinamentos.

A infraestrutura necessária ao novo processo inclui os serviços de alvenaria, elétrica e eletrônica para a instalação dos fornos. A equipe terceirizada que presta esse tipo de serviço à empresa forneceu um orçamento prévio. O gasto com treinamentos foi estimado através de valores históricos de treinamentos realizados na fábrica durante a implementação de outros processos. Os valores foram ajustados para se adequarem ao número de pessoas que serão treinadas. Uma pesquisa prévia de mercado mostrou que um orçamento de R\$ 7.500,00 para cada forno é uma estimativa adequada. A Tabela 6 resume as estimativas de todos os investimentos.

Tabela 6 - Estimativas de custo dos principais investimentos do projeto.

| Entregas do Projeto | Estimativa de Custo (R\$) |
|---|----------------------------------|
| Aquisição de equipamentos (custo por equipamento) | 7.500,00 |
| Infraestrutura | 2.000,00 |
| Treinamentos ¹ | 500,00 |
| Total | 10.000,00 |

¹ treinamento para grupos de até 5 pessoas

Fonte: arquivo próprio

5.5.2 Custos de manutenção e qualidade

A estimativa do custo de manutenção foi feita por comparação com o valor pago mensalmente no setor de ferramentaria. Neste setor, operações de tratamento térmico como têmpera e revenimento são frequentemente realizadas em fornos similares aos que se pretende usar no processo proposto. O custo previsto da qualidade, por sua vez, foi determinado em reunião com profissionais estratégicos da fábrica, baseado em dados históricos e análises do processo proposto. Os custos de manutenção e qualidade estimados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Estimativas dos custos mensais de manutenção e qualidade associados ao projeto e ao novo processo.

| Fator | Estimativa de Custo (R\$/mês) |
|--------------|--------------------------------------|
| Manutenção | 67,00 |
| Qualidade | 100,00 |
| Total | 167,00 |

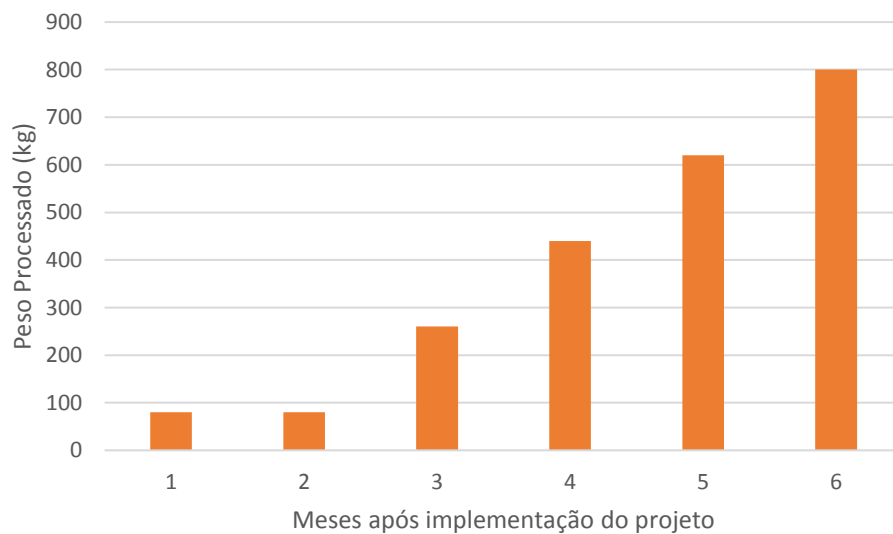
Fonte: arquivo próprio

5.5.3 Custos operacionais

Os custos operacionais relacionados ao novo processo são o consumo de energia pelos fornos e o gasto com as horas extras de linhas que serão necessárias para processar a demanda de articulações, incluindo a mão de obra.

Em conformidade com as ações tomadas para garantir a qualidade do projeto, do processo implementado e do produto, o processamento de articulações nas linhas de zincagem começará de maneira gradual. Assim, haverá tempo para adaptação ao novo processo e, em caso de algum tipo de problema, ele não afetará tão gravemente o fornecimento de peças para o setor de montagem. Foi determinado com a liderança do setor de galvanização e com a gerência da fábrica que 10% da demanda mensal de articulações será banhada com zinco nos dois primeiros meses, configurando uma operação em escala piloto. A escala de operação será então aumentada gradualmente até que toda a demanda passa a ser processada nas linhas de zincagem, o que se pretende fazer em 6 meses após o início da operação nova. Para efeitos de estimativa do projeto, será considerado um aumento linear, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Previsão do aumento gradual de articulações galvanizadas pelo novo processo. Isso será feito para que possíveis problemas e dificuldades não afetem severamente o fornecimento de peças para o setor de montagem e sejam mais facilmente resolvidos durante a implementação do novo processo.



Fonte: arquivo próprio

A estimativa do gasto de energia dos fornos foi feita com base na estimativa de consumo de energia de um forno por ciclo de operação, conforme Equação 5.4, e no custo médio pago pela fábrica no último ano, de R\$ 0,52/kWh.

$$C_{forno} = C_{energia} \cdot E_{total} \quad (5.4)$$

Sendo:

C_{forno} o custo de energia de um ciclo de operação de um forno (R\$)

$C_{energia}$ o valor pago pela empresa na energia elétrica (R\$/kWh)

E_{total} o consumo total de energia por forno em um ciclo de trabalho (kWh)

O custo das horas extras foi estimado com a partir do salário base dos operadores. Sempre que uma das linhas está em operação, é necessária a presença de um galvanizador, um auxiliar de produção, um técnico de laboratório e do líder do setor, totalizando um valor pago de R\$ 60,00/hora. Como determinado previamente, serão necessárias 18,2 h/mês extras de trabalho das linhas de zincagem para que as articulações sejam processadas. Uma vez que essas linhas já operam em todos os dias úteis do mês, é possível afirmar que essas horas extras serão realizadas durante os finais de semana e, portanto, de acordo com a legislação vigente, deve ser pago um acréscimo de 100%, totalizando R\$ 120,00/h.

5.6 Indicadores econômicos

Todos os custos previamente descritos foram utilizados no desenvolvimento da análise econômica do projeto. O retorno esperado do projeto foi determinado como sendo a economia gerada pelo processamento das articulações com zinco ao invés de níquel, conforme mostrado na Equação 5.5.

$$R = D \cdot (C_{Ni} - C_{Zn}) \quad (5.5)$$

Sendo:

R o retorno financeiro do projeto (R\$/mês)

D a produção mensal de articulações (kg/mês)

C_{Ni} o custo de produção da linha de niquelação (R\$/kg)

C_{Zn} o custo de produção das linhas de zincagem (R\$/kg)

O modelo usado para a análise econômica do projeto foi construído considerando a produção estimada, os custos operacionais, de manutenção e qualidade e os retornos em cada mês, bem como os investimentos pagos no início. A partir daí, foram determinados o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Tempo de *Payback*. As análises foram feitas sobre o cenário base descrito na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros do cenário base para a realização das análises.

| Parâmetro do Cenário | Valor |
|--|----------------------------|
| Produção | |
| Demanda diária | 790 Kg |
| Dias trabalhados | 27 dia/mês |
| Custos gerais | |
| Custo forno | R\$ 7500 R\$/equipamento |
| Custo de infraestrutura | R\$ 2.000,00 R\$ |
| Custo de treinamento | R\$ 500,00 R\$/treinamento |
| Custo de manutenção | R\$ 67,00 R\$/mês |
| Custo de qualidade | R\$ 100,00 R\$/mês |
| Custo de hora extra | R\$ 117,05 R\$/hora |
| Custo energia elétrica | R\$ 0,52 R\$/kWh |
| Custo de produção - linhas de zincagem | R\$ 1,02 R\$/kg |
| Custo de produção - linha de niquelação | R\$ 2,22 R\$/kg |
| Parâmetros operacionais | |
| Temperatura do tratamento térmico | 220 °C |
| Temperatura superficial externa dos fornos | 60 °C |
| Temperatura ambiente | 20 °C |
| Tempo de aquecimento do forno | 0,5 h |
| Tempo de aquecimento das peças | 2,7 h |
| Tempo de tratamento das peças | 6 h |
| Características do forno | |
| Altura | 1 m |
| Largura | 1 m |
| Comprimento | 1 m |
| Superfície externa | aço inox |
| Parâmetros da Análise | |
| Taxa Mínima de Atratividades (TMA) | 0,34 % ao mês |
| Período de análise | 12 meses |

Fonte: arquivo próprio

Neste cenário, o fluxo líquido de caixa para os primeiros 12 meses é como apresentado na Figura 12. O aumento crescente nesse fluxo líquido mensal reflete a condição determinada de aumento gradual da produção. Apesar dessa estratégia reduzir os ganhos, ela traz mais segurança ao projeto e permite maior garantia da qualidade do novo processo.

Figura 12 - Previsão dos fluxos de caixa líquidos para os primeiros 12 meses após o início da execução do projeto. O aumento gradual do retorno é reflexo do aumento gradual de produção de articulações pelo novo processo. O projeto tem um grande valor negativo no período inicial, causado pelos investimentos que serão realizados. Logo no primeiro mês o fluxo líquido se torna positivo e passa a crescer, até se estabilizar em aproximadamente R\$ 23.000,00, seis meses depois.

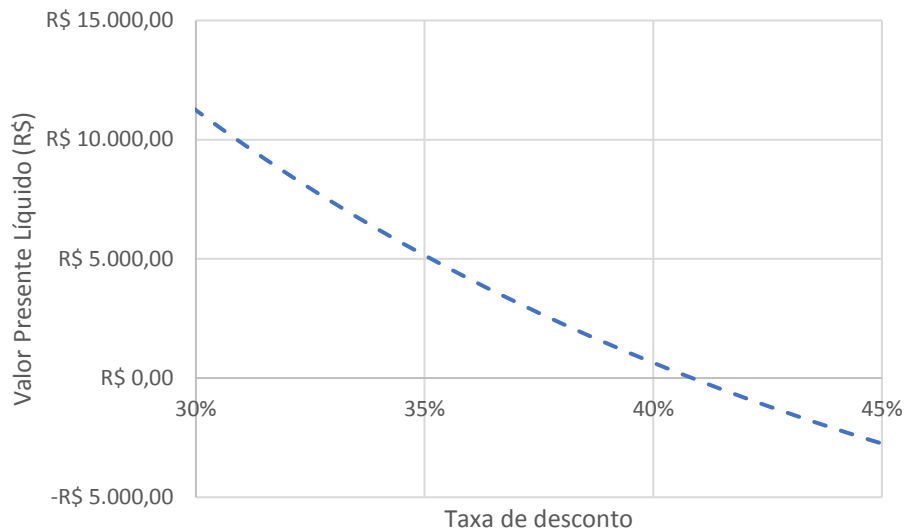


Fonte: arquivo próprio

Nessas condições, o projeto apresenta um VPL de R\$ 170.925,21 ao final do 12º período. Cabe ressaltar aqui que esse não é o valor real de retorno, mas sim uma projeção dos valores futuros em termos presentes. Caso se deseje realizar a avaliação do projeto à longo prazo, deve-se considerar também na análise a depreciação dos equipamentos em operação. Os altos valores do VPL são um indicativo de que o projeto tem grande potencial econômico.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) foi determinada pela variação da taxa de desconto do projeto e tabulação do VPL no final do período associado. A TIR é, portanto, a taxa para a qual $VPL = 0$. Esse procedimento está graficamente ilustrado na imagem 13, onde a TIR foi determinada como sendo de 41,09% ao mês.

Figura 13 - Variação do Valor Presente Líquido (VPL) com a taxa de desconto usada na avaliação do projeto. A Taxa Interna de Retorno (TIR), para a qual o VPL é nulo é de 41,09% ao mês.



Fonte: arquivo próprio

Uma vez que o valor da TIR é consideravelmente mais alto que a taxa de desconto base (0,3% ao mês), tem-se mais uma indicação da atratividade econômica do projeto. Ainda falta calcular, entretanto, o tempo de *payback* descontado, pois caso o projeto demore muito para começar a dar lucro, mesmo com os altos valores de VPL e TIR, não será implementado, de acordo com os requisitos da empresa. O tempo de *payback* descontado foi considerado o primeiro período para o qual o VPL é maior do que zero. Conforme pode ser visto na Figura 14, isso ocorre no mês 4, com um VPL de R\$ 88,74, indicando que além do projeto ser altamente rentável, ele começa a trazer retornos positivos em um tempo relativamente curto.

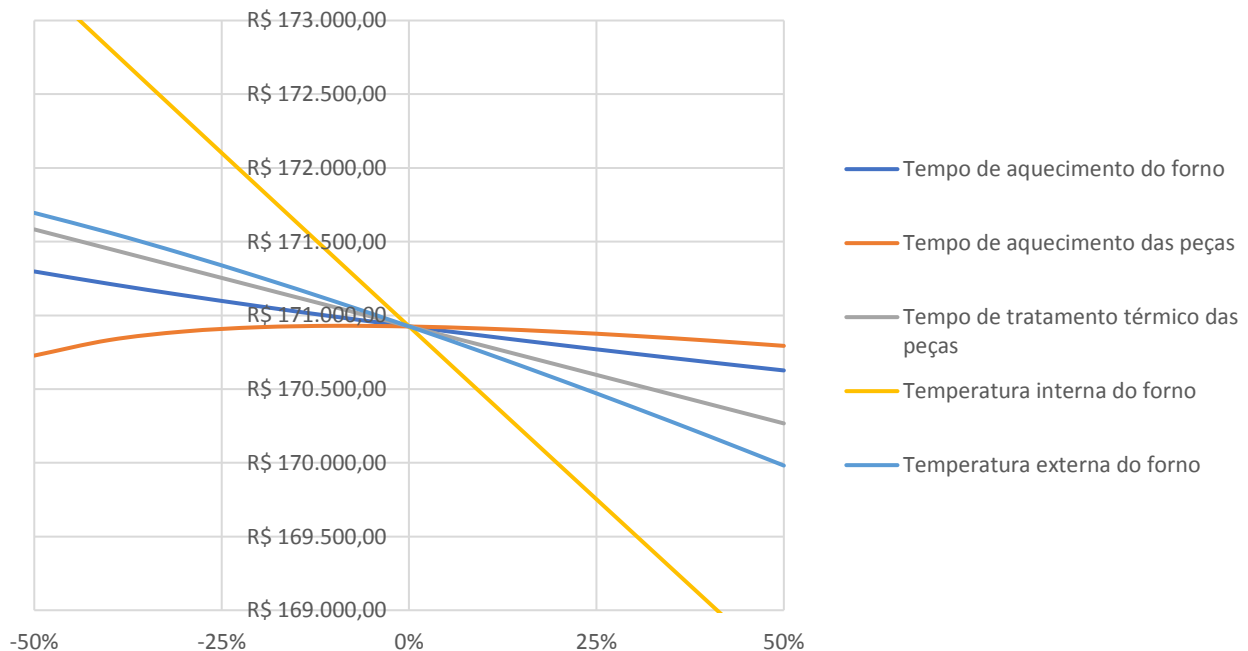
As análises realizadas até aqui foram todas baseadas em um cenário onde diversos parâmetros do modelo foram projetados ou estimados. Uma vez que essas estimativas invariavelmente carregam consigo algum grau de inexatidão, foi feita uma análise de sensibilidade sobre os principais parâmetros do modelo sobre o VPL do projeto. Isso permite verificar quão facilmente o VPL varia em função de seus parâmetros. Na Figura 15, realizou-se a análise de sensibilidade dos principais parâmetros operacionais do forno, a saber: tempos de aquecimento do forno e de aquecimento e tratamento das peças, além das temperaturas interna e externa do forno.

Figura 14 - Valor Presente Líquido Cumulativo para cada período após o início do projeto. O VPL cumulativo se tornou maior que zero após o quarto período, sendo esse, portanto, o tempo de *payback* descontado do projeto.



Fonte: arquivo próprio

Figura 15 - Análise da sensibilidade do VPL do projeto aos principais parâmetros operacionais: tempo de aquecimento do forno, tempo de aquecimento das peças, tempo de tratamento das peças, temperatura interna e temperatura externa do forno. O VPL é mais sensível à temperatura interna do forno, e menos sensível ao tempo de aquecimento do forno. Além disso, o VPL apresenta um ponto de máximo para o tempo de aquecimento das peças, resultado da existência de um ponto de consumo mínimo de energia.

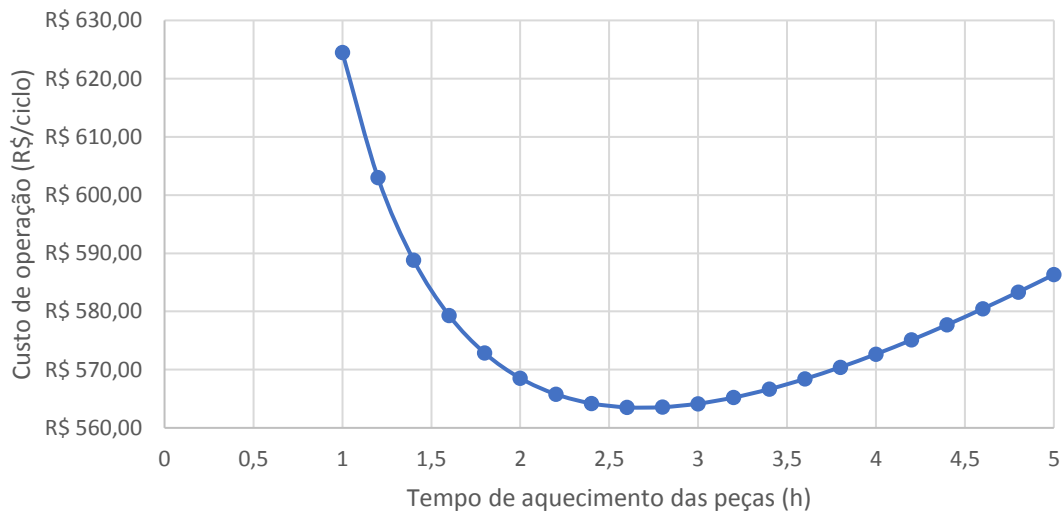


Fonte: arquivo próprio

Nota-se que a relação das temperaturas operacionais e dos tempos de aquecimento do forno e tratamento das peças é inversamente proporcional ao retorno do projeto: quanto maiores forem esses valores, menor será o VPL. Isso se explica pelo consumo de energia maior requerido para que se opere em temperaturas mais elevadas e por tempos mais prolongados. Esses parâmetros, portanto, deverão ser otimizados e minimizados ao máximo para aumentar os ganhos do projeto.

O tempo de aquecimento, por sua vez, apresentou um comportamento curvo com um ponto de máximo para o VPL do projeto. Isso está em concordância com o fato de que existe um ponto mínimo de consumo de energia em função do tempo de aquecimento, determinado previamente. Este ponto de consumo mínimo está associado ao ponto de máximo para o VPL. A Figura 16 ilustra a dependência do custo de operação mensal de um forno com o tempo de aquecimento das peças.

Figura 16 - Variação do custo de operação mensal do forno com o tempo de aquecimento das peças. O ponto de mínimo, causado pela existência de um ponto de consumo de energia mínimo, ocorre em $t = 2,6h$.



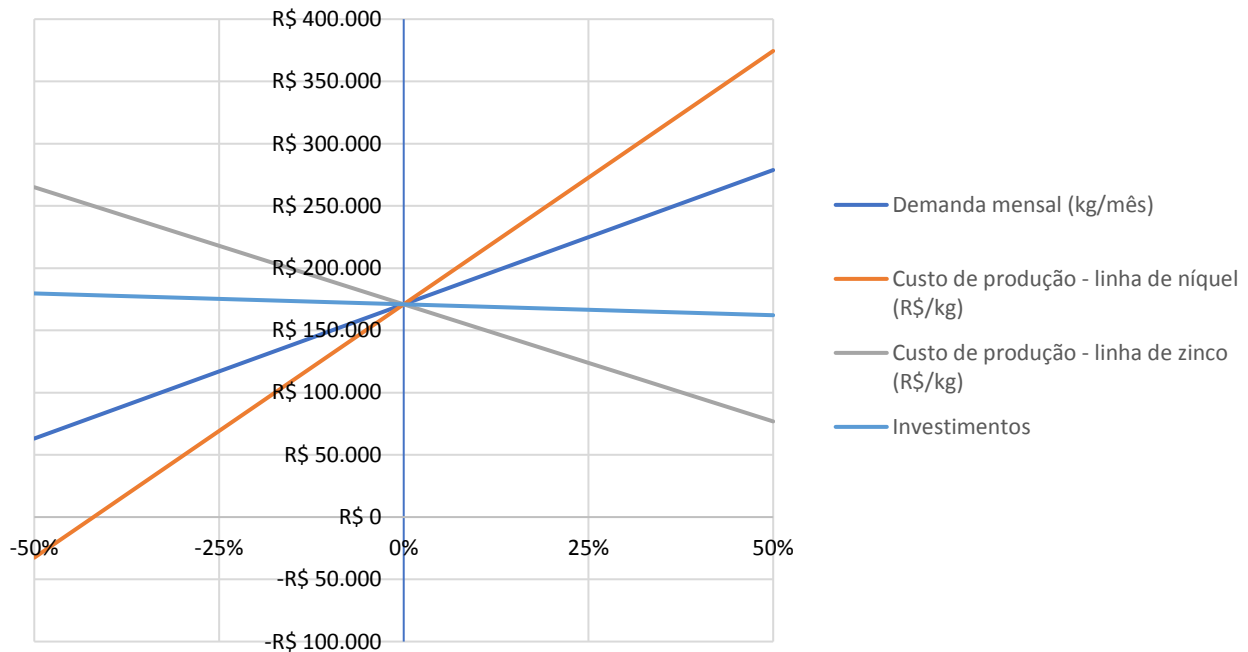
Fonte: arquivo próprio

A análise da Figura 16 indica que, contra intuitivamente, a redução do tempo de aquecimento causa um aumento mais acentuado no custo de operação. Apesar disso, existe uma certa zona de conforto em torno do ponto de mínimo, indo de 2 a 4h, aproximadamente, onde ocorre pouca variação do custo. Isso cria uma folga operacional, ajudando inclusive a contornar possíveis problemas relacionados à capacidade das peças de absorver calor na taxa necessária.

Também foi realizada uma análise de sensibilidade com a demanda média de produção estimada, o custo de produção nas linhas de zincagem e o valor dos investimentos iniciais, onde foram considerados

os gastos com aquisição dos fornos, construção de infraestrutura e custo dos treinamentos. Os resultados estão na Figura 17.

Figura 17 - Análise da sensibilidade do VPL a parâmetros externo à fábrica: demanda mensal de produção, custo de produção nas linhas de níquel e zinco e custo de investimentos. Os investimentos tem pouca influência sobre o VPL, ao passo que o custo de produção da linha de níquel tem a maior influência. Isso ocorre pelo fato de todo o retorno monetário do projeto ser oriundo da economia entre o processo de zincagem e niquelação.



Fonte: arquivo próprio

Observa-se que os custos de produção das linhas de zincagem e niquelação são os parâmetros com maior influência sobre o VPL, mesmo que a proposta do projeto seja a desativação da linha de niquelação. Isso se deve ao fato de que o ganho monetário do projeto ser o valor economizado pelo processamento com zinco ao invés de níquel. A estimativa usada do custo de produção da linha de niquelação é baseada na opção “não fazer nada” da análise econômica, onde a linha de niquelação continuaria operando normalmente. É necessário, portanto, que as estimativas dos custos de produção de todas as linhas sejam revisadas, dada a sua importância na viabilidade do projeto. O VPL também varia consideravelmente com a estimativa da demanda de produção, que deve ser outro parâmetro revisado e calibrado.

Outro fato que se nota é a amplitude da variação do VPL nesta última análise quando comparada com a análise dos parâmetros do processo: enquanto a variação da temperatura externa do forno no

intervalo mostrado causou uma variação no VPL de R\$ 1.250,00, o custo de processamento da linha de niquelação, ao variar no mesmo intervalo, fez o VPL variar em R\$ 425.000,00. Isso indica que condições externas à fábrica, como demanda, preço de equipamentos e valor de mercado dos metais têm maior influência sobre a lucratividade do projeto do que os parâmetros de operação. O maior potencial de ganho adicional do projeto, no entanto, se encontra justamente na otimização da operação. Quanto mais enxuto e otimizado estiver o processo, maiores serão os ganhos na forma de economia.

5.7 Análise de riscos

Uma vez determinado que os fatores externos à fábrica tinham grande influência sobre o retorno financeiro do projeto, foi realizada uma análise SWOT (*Strength – Weaknesses – Opportunities – Threatens*) com o objetivo de analisar o posicionamento da empresa com relação ao cenário externo e determinar possíveis impactos sobre o projeto. A análise está na Figura 18.

Figura 18 - Matriz SWOT evidenciando as forças e fraquezas da empresa (aspectos internos) e as oportunidades e ameaças do mercado (ambiente externo).

| FORÇAS | FRAQUEZAS |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Experiência no processo de galvanização por zinco alcalino - Existência de outros processos de tratamento térmico no setor de ferramentaria - Boa relação com fornecedores de insumos químicos - Redução de contaminantes no efluente <ul style="list-style-type: none"> - Redução de matéria-prima | <ul style="list-style-type: none"> - Falta de profissional com experiência em remoção de hidrogênio - Quadro de funcionários mínimo - Sistemas de informação internos mal utilizados e em processo de readequação |
| OPORTUNIDADES | AMEAÇAS |
| <ul style="list-style-type: none"> - Demanda de mercado por produtos diferenciados - Demanda por serviços gerais de galvanização <ul style="list-style-type: none"> - Liberação da linha de níquel | <ul style="list-style-type: none"> - Oscilações nos preços de mercado de níquel e zinco <ul style="list-style-type: none"> - Baixa demanda - Problemas na implementação do processo <ul style="list-style-type: none"> - Dificuldades no controle da qualidade |

A experiência acumulada da empresa no processo de galvanização e fabricação de dobradiças é a maior força encontrada. Isso porque, com esse tipo de experiência, é esperado que os possíveis problemas e dificuldades na implementação do processo serão solucionados com maior facilidade. Além disso, a existência de processos de tratamento térmico semelhantes ao proposto no projeto em outros setores permitirá o compartilhamento de informações e *insights*. A empresa, no entanto, não possui nenhuma experiência no processo de remoção de hidrogênio, de modo que a busca por um consultor ou profissional especializado pode se fazer necessária. A determinação dessa necessidade deve ser feita o quanto antes, pois o custo envolvido com esta contratação adicional deverá ser incluído nas análises do projeto.

A boa relação da empresa com seus fornecedores de insumos químicos pode ser uma porta para a negociação de valores mais reduzidos e estáveis, aumentando o poder de predição do modelo de análise e o ganho econômico do projeto. Além disso, a suspensão da operação da linha de niquelação irá reduzir a gama de insumos químicos utilizados no setor de galvanização e a contaminação do efluente. Com a linha livre, será possível expandir a capacidade de produção pelo processo de zincagem alcalina, estudar a implementação de novos processos para produtos diferenciados com maior valor agregado ou ainda passar a realizar um serviço de galvanização para clientes externos.

Por fim, as dificuldades internas da empresa precisam ser consideradas, pois afetarão diretamente a execução do projeto. Devido ao cenário econômico recente, a fábrica está operando com o quadro mínimo de funcionários. Isso significa que haverá pouca mão-de-obra disponível para a realização das atividades do projeto. Além disso, existe um problema interno crônico relacionado ao fluxo de informações de produção, razão pela qual todo o sistema de informação do setor produtivo está sendo reformulado. Assim, esses dois fatores devem ser levados em consideração na decisão de quando iniciar o projeto.

Além da análise SWOT, também foi realizada uma análise mais detalhada dos riscos associados ao projeto e às suas atividades, descritas na EAP. Esse levantamento foi feito por meio de *brainstorm* com a liderança do setor, a gerência da fábrica e operadores e engenheiros em geral e está apresentado na Tabela 9. Possíveis ações para mitigar ou reduzir os riscos também estão listadas. Essas ações e os próprios riscos do projeto devem ser continuamente revisados para que sejam sempre o mais eficiente e abrangentes possível, dadas as mudanças contínuas no cenário do projeto ao longo de sua execução.

Tabela 9 - Possíveis riscos associados às atividades planejadas para o projeto e ações propostas com o intuito de eliminar ou mitigar cada risco

| Risco | Ação Proposta |
|---|--|
| Mal gerenciamento das atividades do projeto | Implementação de reuniões de acompanhamento periódicas a partir do início do projeto |
| Dados de processo incertos ou mal coletados | Validação dos dados com outros setores e departamentos da fábrica |
| Dimensionamento errado dos equipamentos | Revisão do modelo e inclusão de mais parâmetros para aumentar sua acurácia |
| Ineficiência do processo proposto | Realização de testes prévios em escala reduzida |
| Baixa precisão das estimativas | Revisão e validação frequentes das estimativas usadas no projeto |
| Escolha do modelo errado de forno | <i>Benchmarking</i> com outras empresas que realizam o mesmo processo |
| Operadores sem conhecimento do processo | Treinamento e operação supervisionada nos primeiros meses de operação |
| Dificuldade em estabilizar novo processo | Possível contratação de consultoria/mão de obra especializada, além de operação em escala piloto |
| Dificuldade em controlar qualidade do produto | Planejar a qualidade junto com o novo processo |
| Impacto no suprimento de peças para o setor de montagem | Criação de estoque antes do início do projeto |

Fonte: arquivo próprio

6 CONCLUSÃO

Existe no setor de galvanização da empresa estudada uma excelente oportunidade de modernização de processo. Se bem aproveitada, não somente irá gerar uma economia considerável, mas também ajudará a reduzir a contaminação dos efluentes gerados pelo processo. Ainda, disponibilizará uma linha de galvanização, que poderá ser usada numa possível ampliação da capacidade produtiva do setor, na criação de novas vertentes de negócio ou mesmo ser vendida.

Detalhando, a proposta de modernização desenvolvida teve um valor presente líquido avaliado de R\$ 170.925,21 e uma taxa interna de retorno de 41,09% ao mês quando avaliada sobre um período de 12 meses a uma taxa de desconto de 0,34%. Além disso, o projeto mostrou potencial de se pagar muito rapidamente, com um tempo de *payback* descontado de 4 meses. Todos estes resultados indicam o potencial econômico associado a proposta.

Nesse contexto, a aplicação das boas práticas sugeridas pelo guia PMBOK[®] se mostrou de grande auxílio no desenvolvimento da proposta. A sequência de atividades sugeridas garantiu que todas as informações fossem apresentadas em uma sequência clara e lógica e estivessem disponíveis no momento certo. Além disso, as ferramentas e metodologias sugeridas pelo guia para a execução das atividades se mostraram eficazes e produziram resultados relevantes. É fortemente recomendado, portanto, que as próximas etapas do projeto, que envolvem seu detalhamento, planejamento e execução, também sejam realizadas com base no guia PMBOK[®].

Além disso, foi feita a modelagem de um forno industrial através da aplicação de conceitos de transferência de calor. As equações desenvolvidas possibilitaram a determinação da potência requerida com base na quantidade de material a ser tratado termicamente, na temperatura de tratamento e nos tempos de aquecimento e tratamento do material. Também foi possível determinar um tempo ótimo de aquecimento das peças, para o qual o consumo de energia pelos fornos é mínimo, e estimar o custo operacional dos equipamentos dados os parâmetros de tempo de temperatura. Por fim, o modelo construído sobre essas equações para o cálculo dos indicadores econômicos se mostrou de grande auxílio na avaliação e comparação de diferentes possíveis cenários, sendo imprescindível à tomada das decisões estratégicas do projeto.

As análises de sensibilidade realizadas sobre o modelo indicaram seus parâmetros mais importantes, que devem receber maior atenção e ser otimizados primeiro, dada sua influência sobre o

retorno financeiro do projeto. Por fim, a execução da análise SWOT permitiu o entendimento do posicionamento da fábrica perante o mercado externo do ponto de vista do projeto, e a elaboração de uma tabela de riscos ressaltou quais são as maiores ameaças à sua execução. Em conjunto, essas três análises indicaram os pontos cruciais para que o projeto seja bem implementado e foram usadas para prever cenários e situações potencialmente prejudiciais, devendo ser continuamente revisadas e ampliadas.

7 RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Com base nas análises realizadas, o prosseguimento do projeto e implementação do novo processo é fortemente recomendado, bem como a utilização do padrão PMBOK® em todas as etapas seguintes. Para tanto, deve-se retornar aos processos de planejamento do guia para executar as atividades ainda pendentes e detalhar e revisar as atividades realizadas. Com o planejamento completo e aprovado, deve ser iniciada a execução do projeto, durante a qual o planejamento deve ser continuamente revisado até que se atinja o objetivo do projeto de implementar o novo processo de zincagem das articulações.

7.1 Seleção do modelo de forno

O modelo construído pode ser utilizado para a seleção do forno mais adequado ao processo. Para tanto, realiza-se a simulação considerando a produção máxima esperada, que fornecerá a potência máxima requerida do forno. Parte-se então para o orçamento de opções disponíveis no mercado, buscando aquelas capazes de atender essa potência. As características desses equipamentos são então inseridas no modelo e a análise dos indicadores econômicos realizada para cada um, permitindo a determinação da melhor opção.

Uma possível situação na seleção dos fornos é a de não haver equipamentos comercialmente disponíveis capazes de atender a potência calculada. Nesse caso, o modelo pode ser usado para determinar o volume máximo de peças que um equipamento é capaz de atender, dada sua potência. A partir daí, determina-se a quantidade de fornos necessária e as análises econômicas são realizadas como já mencionado.

7.2 Otimização do processo

De acordo com a literatura, o tratamento térmico para remoção de hidrogênio adsorvido deve acontecer entre 190 e 220 °C, por um período que pode variar de 4 a 8 horas. O tempo e a temperatura do tratamento variam de acordo com a geometria da peça que está sendo tratada e devem, portanto, serem otimizados para cada processo (JANSEN; TOMACHUK, 2008b). A otimização desses parâmetros é no

sentindo de encontrar a combinação do menor tempo e temperatura para a qual ocorre remoção suficiente de hidrogênio para garantir a boa operação da dobradiça.

Para tanto, sugere-se a realização de um experimento fatorial completo de duas variáveis e três níveis. O tempo deverá ser avaliado entre 4 e 8h, e a temperatura, entre 190 e 220 °C, ambos com um ponto médio. Um corpo de prova deverá ser galvanizado na linha de zincagem e tratado termicamente em cada uma das combinações de tempo e temperatura acima, e então submetido a um ensaio de resistência a tração. A metodologia da superfície de resposta poderá ser aplicada então para determinar o ponto de máximo da resistência à tração. No caso de mais de uma combinação satisfazer essa condição, deverá ser selecionada aquela que resultar em um menor custo operacional do forno, calculado a partir do modelo desenvolvido.

Uma vez que a empresa não possui os equipamentos necessários para a realização de ensaios de tração, os mesmos deverão ser realizados em algum laboratório terceirizado. Os custos desses ensaios deverão ser adicionados no modelo de análise econômica.

7.3 Controle da qualidade

Uma vez que o processo esteja otimizado e implementado, é necessário que a qualidade de seus produtos seja continuamente monitorada. Como já mencionado, a empresa não possui o equipamento necessário para realização de ensaios de tração. Como a aquisição desse tipo de equipamento costuma ter um custo elevado, sugere-se que a qualidade seja monitorada da forma como já é feita na empresa: amostras de articulações prontas são instaladas em portas padronizadas e submetidas a ensaios de repetibilidade, e devem durar um mínimo de 40.000 ciclos de abertura, conforme a norma ISO 7170. Assim, independentemente do valor numérico da resistência à tração das articulações, elas devem ser resistentes o suficiente para durar o número mínimo de ciclo no teste de durabilidade.

Além disso, o processo deve ser continuamente otimizado, no contexto da melhoria contínua. Sugere-se a execução de ciclos de implementação de melhorias, como o PDCA (*Plan – Do – Check – Act*) ou o DMAIC (*Define – Measure – Analyse – Improve – Control*), que auxiliarão na identificação de problemas e oportunidades de melhorias.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATOTECH. **Protolux 3000**. Taboão da Serra: Boletim Técnico: Atotech do Brasil, 2008a.
- ATOTECH. **Trolume PXN/B**. Taboão da Serra: Boletim Técnico - Atotech do Brasil, 2008b.
- BLANK, L.; TARQUIN, A. **Engineering Economy**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- BAXTER, P.; JACK, S. **Qualitative Case Study Methodology: Study Design and Implementation for Novice Researchers**The Qualitative Report. Ontario: [s.n.].
- BOMFIN, D. F.; NUNES, P. C. DE Á.; HASTENREITER, F. Gerenciamento de Projetos Segundo o Guia PMBOK: Desafios para os Gestores. **Revista de Gestão e Projetos**, v. 3, n. 3, p. 58–87, set. 2012.
- CALDEIRA, A. Business competitiveness indicators for strategy formulation. **Revista Gerenciais**, v. 3, p. 87–99, out. 2004.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa: Uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: McGraw Hill, 2012.
- DESPATCH. **Thermal Processing Technology**. Minneapolis: Engineer’s Guide: Illinois Tool Works, 2016.
- DWIVEDI, S. K.; VISHWAKARMA, M. Hydrogen embrittlement in different materials: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 46, p. 21603–21616, 15 nov. 2018.
- FIRJAN. **Diagnóstico da Indústria Moveleira**. Rio de Janeiro: 2015.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 1996.
- HILLIER, E. M. K.; ROBINSON, M. J. Hydrogen embrittlement of high strength steel electroplated with zinc-cobalt alloys. **Corrosion Science**, v. 46, n. 3, p. 715–727, 2004.
- INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008.
- INDEXMUNDI. **Níquel / Zinco Price Ratio**. Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de->

mercado/?mercadoria=n%c3%adquel&meses=12&mercadoria=zinco&indicador=price-ratio>. Acesso em: 16 jun. 2020.

INDUSTRIAL METALLURGISTS. **Hydrogen Embrittlement of Steel**. Disponível em: <<https://www.imetllc.com/training-article/hydrogen-embrittlement-steel/>>. Acesso em: 1 mar. 2020.

JANSEN, R.; TOMACHUK, C. R. **Fragilização por Hidrogênio / Parte 1**. Disponível em: <<http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=205>>. Acesso em: 4 mar. 2020a.

JANSEN, R.; TOMACHUK, C. R. **Fragilização por Hidrogênio / Parte final**. Disponível em: <<http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=193>>. Acesso em: 6 mar. 2020b.

KENTON, W. **Discounted Payback Period Definition**. Disponível em: <<https://www.investopedia.com/terms/d/discounted-payback-period.asp>>. Acesso em: 19 maio. 2020.

KENTON, W. **Hurdle Rate**. Disponível em: <<https://www.investopedia.com/terms/h/hurdlerate.asp>>. Acesso em: 19 maio. 2020a.

KENTON, W. **Sensitivity Analysis Definition**. Disponível em: <<https://www.investopedia.com/terms/s/sensitivityanalysis.asp>>. Acesso em: 19 maio. 2020b.

KHARE, A. et al. Experimental Investigation of Hydrogen Embrittlement during Coating Process and Effect on Mechanical Properties of High Strength Steel used for Fasteners. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, p. 18707–18715, 2018.

LAUER, M. **Methodology guideline on techno economic assessment (TEA)**. [s.l.] European Commission, 2017.

MEHNER, T. et al. Hydrogen embrittlement of a quenching and partitioning steel during corrosion and zinc electroplating. **Materials Science and Engineering A**, v. 744, p. 247–254, 28 jan. 2019.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. **Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (Guia PMBOK)**. 5. ed. Pennsylvania: Project Management Institute, Inc., 2014.

RECIO, F. J. et al. Hydrogen embrittlement risk of high strength galvanized steel in contact with alkaline media. **Corrosion Science**, v. 53, n. 9, p. 2853–2860, set. 2011.

SANTOS, M. S. DOS; YAMANAKA, H. T.; PACHECO, C. E. M. **Bijuterias**. São Paulo: CETESB, 2005.

SEBRAE. **Relatório de Inteligência - Móveis e Decoração**. Santa Catarina: 2017.

SEBRAE. **Relatório de Inteligência - Casa e Construção**. Santa Catarina: 2018.

SGANZERLA, E. **Empresas podem consultar informações do Sistema de Inteligência Setorial - Madeira Total**. Disponível em: <<http://www.madeiratotal.com.br/empresas-podem-consultar-informacoes-do-sistema-de-inteligencia-setorial/>>. Acesso em: 10 jul. 2020.

SHARRETS PLATING. **History of Electroplating**. Disponível em: <<https://www.sharrettsplating.com/blog/history-of-electroplating/>>. Acesso em: 2 mar. 2020a.

SHARRETS PLATING. **The Zinc Plating Process**. Disponível em: <<https://www.sharrettsplating.com/blog/the-zinc-plating-process/>>. Acesso em: 2 mar. 2020b.

SHARRETS PLATING. **Hydrogen Embrittlement and Electroplating**. Disponível em: <<https://www.sharrettsplating.com/blog/hydrogen-embrittlement-electroplating-what-you-need-to-know/>>. Acesso em: 6 mar. 2020c.

SHIRAIWA, T. et al. Evaluation of hydrogen-induced cracking in high-strength steel welded joints by acoustic emission technique. **Materials & Design**, v. 190, p. 108573, maio 2020.

SILLOS, R. M. DE; CASTRO, E. P. DE. **Tratamento de Superfícies**. 4. ed. São Bernardo do Campo: Manual Técnico: SurTec do Brasil, 2012.

SINGLETON, R. **PLATING PROCEDURES: BARREL PLATING**. Cleveland: [s.n.].

SULLIVAN, W. G.; WICKS, E. M.; KOELLING, C. P. **Engineering Economy**. 16. ed. Virginia: Pearson, 2015.

SUN GLO PLATING COMPANY. **A Step-By-Step Guide to the Zinc Electroplating Process**. Disponível em: <<https://www.sun-glo.com/2018/05/23/step-step-guide-zinc-electroplating-process/>>. Acesso em: 2 mar. 2020.

VARGAS, R. V. **Gerenciamento De Projetos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2006.

VERNER, J. M. et al. Guidelines for industrially-based multiple case studies in software engineering. **Proceedings of the 2009 3rd International Conference on Research Challenges in Information Science, RCIS 2009**, p. 313–324, 2009.

WINSCONSIN OVEN. **Hydrogen Embrittlement Relief and Treatment**. Disponível em: <<https://www.wisoven.com/blog/hydrogen-embrittlement-relief-and-treatment>>. Acesso em: 6 mar. 2020.

YIN, R. K. **Case Study Research - Design and Methods**. 5. ed. London: SAGE Publications, 2014.

YIN, R. K. Case Studies. **International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences: Second Edition**, v. 3, p. 194–201, 2015.