



Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial

Otimização do processo de automatização da decapagem química numa indústria de trefilaria

Relatório de Estágio apresentado para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

Autor

Luís Filipe Braga de Oliveira

Orientador

Doutora Cândida Maria dos Santos Pereira Malça

Professora do Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Supervisor

Eng.º. Vladimiro Protásio Dias Ferreira

Fapricela – Indústria de Trefilaria, SA

Coimbra, abril, 2017

“A maioria das artes exige longo estudo e aplicação, porém, a simpatia, apenas exige vontade.”

Chesterfield , Philip

Agradecimentos

Aos meus pais, Irene e José, e ao meu irmão, Rui, que sempre me apoiaram e motivaram ao longo de todas as etapas da minha vida. Sem eles, não teria conseguido. Agradeço toda a disponibilidade prestada e todo o apoio e conhecimento transmitido por parte da Doutora Cândida Malça desde o início do meu percurso académico. Agradeço também às pessoas que fazem parte do meu dia-a-dia, Daniela e Rafael, sempre cheios de boa disposição e paciência. Finalmente, agradeço à Fapricela S.A., com especial referência ao Eng. Vladimiro Ferreira, e a todas as pessoas que colaboraram para a obtenção deste resultado final.

Resumo

A empresa parceira deste projeto é a Fapricela – Indústria de Trefilaria, SA que iniciou a sua atividade industrial no ano de 1977 dedicando-se unicamente ao fabrico de pregos. Porém, no decorrer dos anos, em virtude da sua progressiva valorização, a Fapricela, SA integrou na sua atividade produtiva uma vasta gama de novos produtos, e.g. redes, arames, redes electrossoldadas, arame e cordão de aço para pré e pós-esforço de baixa relaxação e arames para molas.

O tema aqui apresentado está inserido num projeto que, em termos globais, visa, pela automatização de um processo de decapagem química, o aumento da capacidade produtiva numa indústria de trefilaria. Numa vertente prática pretende-se desenvolver e modelar o problema de forma a simular, através de um software de gestão de escalonamento de tarefas, a otimização do processo de decapagem química de rolos de arame de aço. A preparação das variáveis e parâmetros de controlo são, numa fase final, reorganizadas por etapas definidas e processadas a partir da modelação através das redes de Petri. Os resultados da simulação do escalonamento de tarefas permitiram concluir que as tarefas alocadas a cada uma das pontes rolantes atingem o resultado ótimo e a cadência de rolos na etapa final aproxima-se da capacidade máxima da instalação. Adicionalmente, o software permite simular o tempo de permanência em cada tina e as condições que permitem às pontes rolantes realizar as tarefas que lhes foram alocadas. A análise da comparação entre os valores teóricos que indicam a capacidade máxima da instalação e os resultados obtidos na simulação permitem identificar se a estrutura de tarefas proposta é ou não a estrutura ótima.

A simulação através do software, do modelo proposto, indica que o escalonamento de tarefas de cada ponte rolante é a estrutura ótima, isto é, é o modelo em que se verifica semelhança entre os resultados preditos e os resultados práticos.

Palavras-chave: Automatização de pontes rolantes, Redes de Petri, Decapagem química, Trefilagem, Extração de ar.

Abstract

The partner company of this project is Fapricela - Indústria de Trefilaria, SA, which began its industrial activity in 1977, dedicating itself only to the nails manufacturing. However, in the course of the years, Fapricela, SA has incorporated a wide range of new products, e.g. grids, wires, welded wire mesh, wire and steel cord for pre and post low relaxation and spring wire.

The subject presented here is part of a project that, in global terms, aims to increase the production capacity of a wire drawing industry by automation of the chemical pickling process. In practice, the aim is to develop and modeling the problem in order to simulate the optimization of the chemical stripping process of steel wire rolls through a task scheduling management software. The preparation of the control variables and parameters are, in the final phase, reorganized by defined stages and processed from the Petri networks modeling. The results of the task scheduling simulation allowed to conclude that the tasks assigned to each of the roller bridges achieve the optimum result and the roll rate in the final step is close to the maximum capacity of the installation. Additionally, the software allows for the simulation of the dwell time in each tub and the conditions that allow the roller bridges to carry out the tasks assigned to them. The comparison analysis between theoretical values, which indicate the maximum capacity of the installation, and the results obtained in the simulation allowing to identify if the proposed task structure is or not the optimal structure.

The software simulation of the proposed model indicates that the task scheduling of each roller bridge is the optimum structure, which means that it is the model where the similarity between the predicted results and the practical results is verified.

Keywords: Roller bridge automation, Petri networks, Chemical stripping, Wire drawing, Air extraction

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Índice	ix
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Contexto.....	3
1.3 Objetivo	6
2 A Fapricela S.A.	11
2.1 Tratamento da Superfície: decapagem.....	15
2.1.1 Método de Trabalho.....	17
3 Implementação do Projeto.....	19
3.1 Automatização do processo e aumento de capacidade	19
4 Planeamento e Controlo de Projetos	22
4.1 Construção de redes de precedência	22
4.2 Redes de Petri	23
5 Gestão de variáveis de controlo	26
5.1 Descrição do processo de decapagem e tratamento de superfície	26
5.2. Problemática: O transporte de ganchos vazios	34
5.3 Sequência das tarefas	36
6 Simulação computacional e distribuição de tarefas	41
6.1 Introdução ao software YASPER	41
6.2 Caracterização da rede.....	45
7 Sistema de extração de ar contaminado	49
7.1 Proposta de melhoria do sistema de extração de ar	49
7.1.1 Instalação de registos de regulação de caudal	51
8 Conclusões e trabalhos futuros.....	53
8.1 Conclusões	53
8.2 Utilidade das redes de Petri na indústria.....	58
8.3 Trabalhos futuros	58
9 Referências Bibliográficas	60

Índice de Figuras

Figura 1 – Metodologia de transporte de rolos de arame.	3
Figura 2 – Ponte rolante biviga (Demag, 2016).	4
Figura 3 - Metodologia de transporte durante o processo (Edraw Max 7.9).....	4
Figura 4 – Variáveis de controlo de processo e qualidade.	5
Figura 5 – Operação manual do processo (Fapricela, S.A.).....	7
Figura 6 – Manobras de transporte das estruturas de apoio (Fapricela, S.A.).....	8
Figura 7 – Acoplamento ponte e gancho de suporte (Fapricela, S.A.).....	9
Figura 8 - Etapas de processo	11
Figura 9 – Parque de matéria-prima (Fapricela, S.A.).....	12
Figura 10 – Rolo de arame laminado.....	13
Figura 11 – Processo de imersão do rolo de arame.	13
Figura 12 – Bloco de redução de secção de arame.	14
Figura 13 – Caracterização de uma fieira.	14
Figura 14 – Produtos derivados do arame decapado e trefilado.....	15
Figura 15 – Modo de identificação do rolo de arame (Fapricela, S.A.).....	17
Figura 16 – Instalações Fapricela, S.A. (Google Maps).....	19
Figura 17 – Layout da secção da decapagem (Edraw Max 7.9).....	20
Figura 18 – Layout da instalação pré-ampliação (Edraw Max 7.9).	20
Figura 19 – Aumento de capacidade da instalação (Edraw Max 7.9).	21
Figura 20 – Exemplo de rede de precedência (Dia Program)	23
Figura 21 – Representação gráfica de uma rede de Petri (GRIF Petri Net V12)	24
Figura 22 – Distinção tipo de aço (Edraw Max 7.9).	27
Figura 23 – Percurso para aço médio carbono e alto carbono (Edraw Max 7.9).	28
Figura 24 – Início de processo de decapagem (Dia Program).....	28
Figura 25 – Diagrama em rede do processo de decapagem química (Dia Program).	29
Figura 26 – Tempo de imersão por tarefa do processo de decapagem química (Dia Program).	31
Figura 27 – Sequência de tarefas na decapagem química.	31
Figura 28 – Diagrama em rede do tratamento de superfície (Dia Program).	32
Figura 29 – Sequência de tarefas no tratamento de superfície	32
Figura 30 – Detalhe do acoplamento do gancho na ponte rolante (Fapricela, S.A.).....	33
Figura 31 – Detalhe do acoplamento do gancho na ponte rolante (Fapricela, S.A.).....	33
Figura 32 – Transporte de ganchos livres (Edraw Max 7.9).	35
Figura 33 - Estrutura de saída dos rolos de arame (Fapricela, S.A.).....	35
Figura 34 - Diagrama em rede da linha de produção de arame decapado (Dia Program).....	37
Figura 35 - Realização das tarefas 1 e 4 (Dia Program).....	38
Figura 36 - Realização das tarefas 4 e 5 (Dia Program).....	39
Figura 37 - Realização das tarefas 6, 5 e 4 (Dia Program).....	39
Figura 38 – Realização das tarefas 3, 2 e 1 (Dia Program).	40
Figura 39 - Sequência de tratamento da superfície do arame (Dia Program).....	40
Figura 40 – Layout software YASPER (YASPER SOFTWARE).....	41
Figura 41 - Escalonamento de tarefas em rede Petri (YASPER SOFTWARE).....	43
Figura 42 - Caraterização da rede (YASPER SOFTWARE).	44
Figura 43 - Exemplo de restrições ao disparo das transições (YASPER SOFTWARE).	45
Figura 44 – Emissores de tokens (YASPER SOFTWARE).	46

Figura 45 – Coletor de tokens (YASPER SOFTWARE).....	46
Figura 46 – Ponto de decisão de tarefas (YASPER SOFTWARE).....	47
Figura 47 – Ponto de decisão de tarefas (YASPER SOFTWARE).....	47
Figura 48 – Ponto de decisão de tarefas (YASPER SOFTWARE).....	48
Figura 49 – Ponto de decisão de tarefas (YASPER SOFTWARE).....	48
Figura 50 - Sistema de extração de ar contaminado (Fapricela, S.A.).....	50
Figura 51 - Estudo de extração de ar contaminado (Fapricela, S.A.).....	51
Figura 52 – Registos de controlo de caudal.....	51
Figura 53 - Menu simulação automática (YASPER SOFTWARE).....	54
Figura 54 - Esquema de relatório da simulação (YASPER SOFTWARE).....	56
Figura 55 – “ Bugg ” do ciclo de simulação automática (YASPER SOFTWARE).....	57

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Designação das tinas de banhos	27
Tabela 2 - Tempos de imersão	30
Tabela 3 - Capacidade máxima da instalação	53
Tabela 4 - Tempos de imersão no tratamento de superfície	54
Tabela 5 - Comparação n° de rolos efetivos e simulados	57

1 Introdução

1.1 Enquadramento do tema

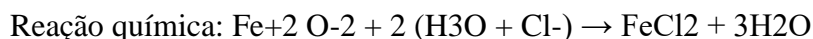
Atualmente, a automatização dos equipamentos de produção, o controlo sistemático de qualidade realizado em modernos laboratórios e a tecnologia empregue na Fapricela, SA refletem um propósito de desenvolvimento e de liderança desta indústria de trefilagem, quer no contexto nacional quer no internacional. É uma empresa certificada, de acordo com a ISO 9001:2000, e tem ao seu dispor um dos mais complexos *networks* de laboratórios internos dedicados a cada segmento de produtos onde é realizada a verificação da composição química e das propriedades mecânicas, não só da matéria-prima como também dos produtos fabricados, e.g. determinação da tensão de rotura e de estricção. A Fapricela, SA é extremamente exigente no processo de controlo da qualidade. Este controlo incide, essencialmente, nas seguintes fases do processo de fabrico:

- Controlo das matérias-primas: toda a matéria-prima é objeto de controlo de receção, certificando-se o cumprimento das especificações respetivas. Independentemente da exigência de certificados de qualidade, este controlo permite detetar qualquer desvio ou deficiência. Quando assim acontece, é feita a suspensão imediata da sua utilização e a devolução ao fornecedor;
- Decapagem e fosfatação;
- Trefilagem: na trefilagem pretende-se aumentar a resistência, por deformação sucessiva, do arame de aço de forma a obter uma resistência próxima da resistência final pretendida. Nesta operação há necessidade de assegurar a qualidade do lubrificante, o estado das feiras e a sua geometria – parâmetros de extrema importância - e eliminar a ocorrência de pontos de soldadura;
- Estabilização final: a estabilização consiste num tratamento termomecânico que permite incrementar: a) a tensão de rotura (R_m), b) a tensão limite convencional de proporcionalidade (R_p) e c) a relação R_p/R_m , bem como diminuir a relaxação e promover o alívio de tensões residuais. Este processo ocorre sob a ação simultânea de um esforço de tração uniaxial, induzido na última trefilagem, e o tratamento térmico.

Em qualquer uma destas fases, o controlo é absolutamente rigoroso.

Durante o processo de laminagem a quente, para a obtenção de fio-máquina na siderurgia, ocorre o arrefecimento do material. O ferro combina-se com o oxigénio presente no

ar, criando assim uma camada de óxido na superfície metálica (magnetite, Fe₃O₄; hematite, Fe₂O₃ e protoxite, FeO):



O processo de decapagem química consiste na imersão do rolo de fio-máquina num banho de ácido clorídrico durante um determinado período de tempo. A corrosão dos equipamentos e da própria infraestrutura desta secção é acentuada. Durante o processo de imersão do rolo de fio-máquina no banho de ácido clorídrico e no processo de lavagem por alta pressão é formada uma nuvem de ácido e água, o que provoca a contaminação do ar que atinge as referidas estruturas e equipamentos. A conservação dos equipamentos e estruturas é tanto mais eficaz quanto maior for a capacidade de extração da quantidade de ar contaminado.

Na área da secção da decapagem atuam dois pórticos (pontes rolantes) para a movimentação do rolo de fio máquina em cada etapa do processo. Cada pórtico é operado por um indivíduo dedicado ao transporte dos rolos de arame. O operador controla cada movimento do pórtico: i) o movimento de translação, que corresponde a uma nova etapa do processo e ii) o movimento de subida e descida, quando o rolo é imerso no respetivo banho. Os acionamentos dos mecanismos de translação são logrados pelos motores elétricos acoplados a freios eletromecânicos. O tempo entre etapas é variável, sendo função do grau de oxidação e da carepa formada na superfície do arame. O objetivo do processo de decapagem química é remover os óxidos de ferro e a oxidação atmosférica da superfície do arame para, posteriormente, ser fosfatado e trefilado.

Para que se torne possível a redução de secção do fio-máquina por um processo de deformação a frio é necessário lubrificar a superfície do arame. A lubrificação é conseguida com a imersão do rolo de fio-máquina num banho de fosfatação. Nesta etapa, forma-se uma camada de cristal de fosfato de zinco na superfície do arame. A fosfatação é um tratamento superficial que assegura, através da aplicação de um revestimento na superfície do fio laminado, o arrastamento do lubrificante na superfície do arame.

Face ao exposto, o principal objetivo do projeto aqui apresentado consiste no procedimento de otimização do programa de automatização do processo de decapagem química, particularmente, no que respeita ao modo de operação de cada um dos pórticos. Pretende-se automatizar a operação dos movimentos e regimes de trabalho dos referidos mecanismos, assegurando a melhoria contínua de qualidade do próprio processo. Outro objetivo do projeto, revestido de igual importância, é a identificação e o dimensionamento de estruturas para a extração do ar contaminado, em virtude da relevante concentração de ácido em suspensão, e sua posterior filtragem nas zonas da secção da decapagem. Finalmente, a metodologia do programa do processo de automatização será implementada, testada e verificada de modo a corrigir, se for caso disso, qualquer irregularidade detetada.

1.2 Contexto

Na Fapricela parte dos custos associados à decapagem e ao tratamento da matéria-prima são relativos ao transporte do produto ao longo do processo. O processo estende-se desde o transporte da matéria-prima até que esta, já designada por fio-máquina, seja colocada em apoios que possibilitem o transporte para o exterior da secção.

Atualmente, o processo distingue-se em 5 etapas principais que agora se descrevem e que se encontram, esquematicamente, representadas na figura 1. Na 1ª etapa, a matéria-prima selecionada e existente no parque de matérias-primas é transportada para o interior da secção. Quando o espaço de armazenamento no interior da secção está completo, o mesmo empilhador transporta e coloca o rolo de matéria-prima numa estrutura de apoio que possibilita o operador da ponte rolante iniciar o processo de transporte do mesmo ao longo da etapa de decapagem e tratamento de superfície. Após a última etapa do processo, a secagem do rolo de fio-máquina, o operador transporta o rolo para uma estrutura de apoio onde através do empilhador o rolo é transportado para a secção de destino.

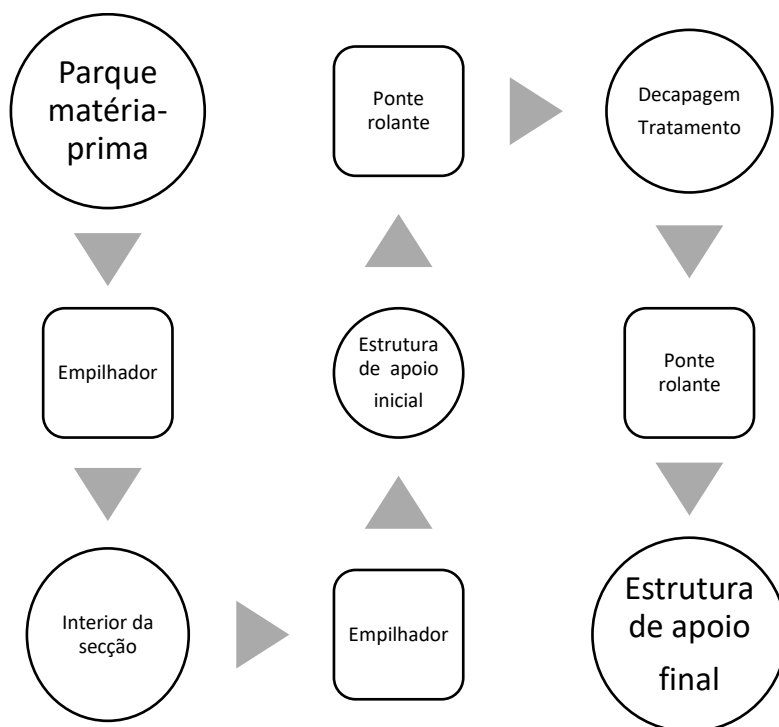


Figura 1 – Metodologia de transporte de rolos de arame.

Dada a complexidade da logística do processo é necessário um planeamento e distribuição de funções otimizadas de modo a promover a rentabilidade máxima dos equipamentos e recursos humanos utilizados no processo e, sobretudo, na utilização das pontes rolantes.

O transporte suspenso de materiais é, nesta secção, vital para o funcionamento do processo. A ponte rolante, como a ilustrada na figura 2, é caracterizada pela versatilidade dos movimentos possíveis: i) o movimento de translação da ponte rolante, ii) o movimento de subida e descida do guincho de apoio das cargas e iii) o movimento de translação da estrutura que apoia o guincho.

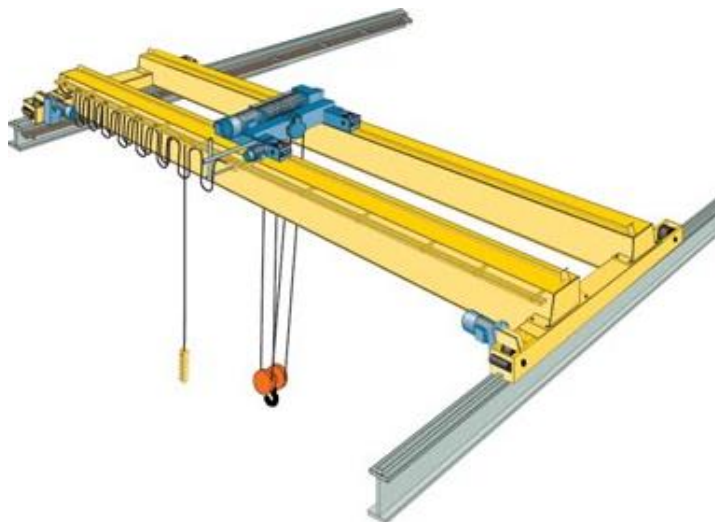


Figura 2 – Ponte rolante biviga (Demag, 2016).

Após a receção da matéria-prima, o operador transporta o rolo de fio-máquina através da ponte rolante ao longo de cada etapa. A secção é provida de duas pontes rolantes com características estruturais idênticas. Deste modo, o processo é dividido em duas grandes etapas, a decapagem do arame e o tratamento da superfície do rolo de fio-máquina. A ponte rolante 1 é responsável por transportar os rolos através do processo de decapagem e a ponte rolante 2 assegura o tratamento de superfície e a secagem do rolo de fio-máquina, conforme representado na figura 3.



Figura 3 - Metodologia de transporte durante o processo (Edraw Max 7.9).

Neste processo, os rolos de arame de aço são imersos numa solução de ácido clorídrico previamente diluído em água, seguido da lavagem por aspersão e imersão e posterior fosfatação, neutralização e secagem. Ao longo do processo a monitorização das variáveis de controlo deverá ser preciso e devidamente orientado. Os colaboradores afetos à secção controlam, de acordo com o esquema da figura 4, a acidez dos banhos de ácido, a permanência dos rolos de arame de aço em cada etapa, a concentração de materiais ferrosos e não ferrosos na lavagem por imersão, a temperatura dos banhos e a dosagem de reagentes nos banhos de fosfatação e neutralização e a temperatura de secagem.

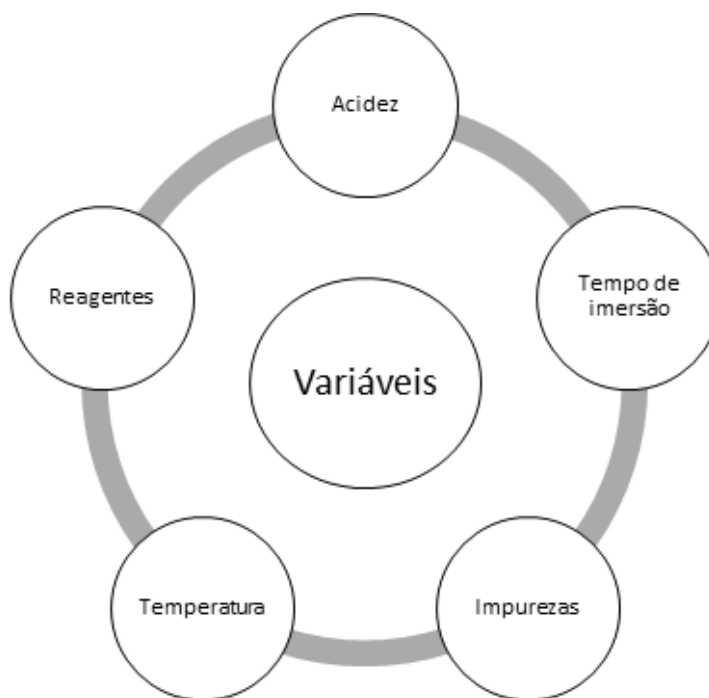


Figura 4 – Variáveis de controlo de processo e qualidade.

A organização da secção dos recursos humanos é composta por dois colaboradores dedicados à operação das pontes rolantes, controlo de tempos de imersão e de temperaturas dos banhos, dois colaboradores que garantem a disponibilidade de matéria-prima a decapar e a saída de rolos de fio-máquina para o processo de conformação seguinte e por um responsável de secção que supervisiona o funcionamento da secção.

1.3 Objetivo

O objetivo principal deste projeto consiste na otimização do processo de transporte da matéria-prima durante o processo de decapagem química e tratamento de superfície. O processo de tratamento de superfícies é uma atividade crucial em todos os sectores da indústria transformadora que utilizam materiais metálicos no seu processo de fabrico. Os tratamentos de superfícies têm especial importância no sector metalúrgico e metalomecânico, representando a atividade principal de determinadas empresas pertencentes a este sector económico. As áreas mais relevantes do processo de tratamento de superfícies são: a pintura, a metalização, a galvanização, a zincagem, a fosfatação, a anodização, entre outras. Além das indústrias metalúrgicas e metalomecânicas, há outros sectores que também recorrem frequentemente e diversificadamente aos tratamentos de superfície como, por exemplo, os sectores de material eléctrico, electrónico e marítimo.

A preparação de superfícies deve ser efetuada sempre que a matéria-prima é submetida a um tratamento posterior, com o propósito de assegurar a eficiência do processo seguinte e tem como objetivos (Bernhoeft, 1961):

- Remover impurezas, matéria orgânica ou óxidos metálicos (provenientes da reacção do metal com água e oxigénio), de modo a promover a adesão entre o revestimento e o material. No caso específico do arame de aço, permitir que a posterior deposição de material constitua uma camada perfeitamente aderente e homogénea;
- Reduzir a rugosidade do material;
- Proteger o material em períodos de espera entre etapas de fabrico distintas.

As camadas de óxidos presentes nas superfícies do arame são eliminadas pelo processo de decapagem, que pode ser efetuada de forma:

- mecânica;
- eletroquímica;
- química.

A escolha do melhor processo de preparação de superfícies e da alternativa mais adequada depende de um conjunto de fatores, tais como:

- Características da espécie a ser removida;
- Nível específico de redução de impurezas;
- Presença de substâncias tóxicas;
- Análise e controlo de banhos;
- Exigências de segurança;
- Custos associados à gestão dos resíduos gerados e alternativas de reciclagem;
- Manutenção.

A avaliação deste conjunto de fatores possibilita a escolha dos agentes de limpeza tendo em conta soluções sustentáveis e alternativas mais seguras (Avitzur 1983).

O controlo do transporte do rolo de fio-máquina, conforme ilustra a figura 5, é efetuado por operação manual de pontes rolantes. O operador da ponte rolante garante que o rolo de fio-máquina percorre todas as etapas do processo de decapagem e tratamento da superfície do arame.



Figura 5 – Operação manual do processo (Fapricela, S.A.).

A garantia de que o período de permanência do rolo de fio-máquina em cada etapa é respeitado é dada pelo operador. Todo o processo de decapagem do arame é, deste modo, influenciado pela habilidade e disposição de cada operador em cada dia de laboração. A operação manual de movimentação e transporte do rolo de fio-máquina, ilustrada na figura 6, condiciona o tempo de processo e *setup*, o índice de qualidade do produto decapado em cada etapa, a eficiência do processo, a determinação da capacidade efetiva da instalação, entre outros.



Figura 6 – Manobras de transporte das estruturas de apoio (Fapricela, S.A.).

No âmbito da melhoria de qualidade de cada etapa do processo produtivo da secção da decapagem e da redução da taxa de ocupação dos recursos humanos, a Fapricela visa implementar dois projetos de melhoria de processo:

- Aumento da capacidade do processo: maior capacidade de decapagem química e limpeza do arame;
- Automatização do transporte do rolo de fio-máquina entre cada etapa: montagem e instalação de dois pórticos rolantes automatizados no transporte do rolo de fio-máquina em cada etapa.

A imagem da figura 7 ilustra o detalhe do acoplamento entre o gancho da ponte rolante e a viga que suporta o rolo de arame. O operador posiciona a ponte rolante na direção do centro da tina e promove o acoplamento entre as duas estruturas.



Figura 7 – Acoplamento ponte e gancho de suporte (Fapricela, S.A.)

A automatização de processos é uma designação abrangente que procura sintetizar a capacidade de definir e otimizar os processos. A automatização do processo de decapagem do arame implica uma análise e representação precisas das atividades realizadas na secção. Esta análise permite clarificar, melhorar e otimizar as atividades, bem como as diversas interações com agentes externos.

As pontes rolantes instaladas são controladas por software que assegura o controlo total das operações de manuseamento do rolo de fio-máquina nas várias etapas do processo. A solução implementada na secção da Decapagem é a instalação de duas pontes rolantes “inteligentes”. Consoante o tipo de operação, o transporte, a duração de ciclos, entre outros, o software permite a programação de variáveis que se adaptem ao processo. A utilização deste tipo de recursos permite melhorar a produtividade e a segurança do processo, principalmente na perspetiva de:

- Controlo de carga: aumento da produtividade e da segurança do pessoal afeto à secção;
- Controlo de posicionamento: posicionamento do rolo de fio-máquina em cada etapa com precisão à décima de milímetro, adaptação do sinótico de funcionamento face às alterações de *layout*.

De forma sucinta, em modo automático a ponte rolante eleva a carga a determinada cota à qual o deslocamento é permitido. Quando a carga atinge a respetiva posição a ponte rolante

baixa a carga colocando-a na respetiva etapa do processo, de seguida movimenta-se na direção da próxima carga a ser transportada.

2 A Fapricela S.A.

A FAPRICELA - Indústria de Trefilaria, S.A., iniciou a sua atividade industrial em 1977, começando por dedicar-se unicamente à fabricação de pregos. Porém, no decorrer dos anos, a sua progressiva valorização permitiu-lhe integrar na sua atividade outros produtos, nomeadamente:

- Arames de aço macio (crus, galvanizados, recozidos, plastificados e farpados);
- Redes (zincadas, plastificadas e ovinas);
- Malha electrossoldada;
- Arame de aço para pré-esforço de baixa relaxação;
- Cordão para pré e pós-esforço de baixa relaxação.

O arame e o cordão de aço para pré-esforço de baixa relaxação obtêm-se através do processo de trefilagem de bobinas de aço de alto carbono (liga de ferro com $\approx 0,8$ % de carbono), designadas por rolos de fio-máquina, conforme ilustrado na figura 8. A trefilagem é um processo de deformação a frio onde ocorre a redução de secção do fio máquina.

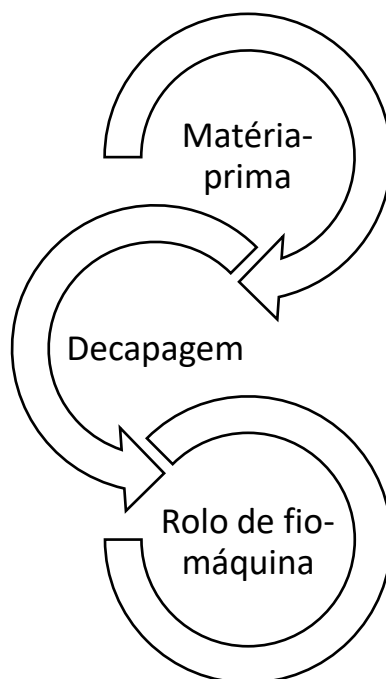


Figura 8 - Etapas de processo

Para que o fio-máquina de alto carbono possa ser deformado a frio tem de ocorrer um prévio tratamento de superfície. Esse tratamento designa-se por decapagem química. O tratamento de superfície por decapagem química ocupa um lugar de elevada importância no processo de fabrico do arame e do cordão de aço.

A matéria-prima, ilustrada na imagem da figura 9, provém das siderurgias, onde o minério é fundido num alto-forno. Após a verificação da homogeneidade do material no alto-

forno, efetua-se o vazamento do material formando lingotes ao ser arrefecido. Os lingotes seguem para um processo de laminagem a quente originando os rolos de fio-máquina.



Figura 9 – Parque de matéria-prima (*Fapricela, S.A.*).

Após o processo de laminagem a quente, ilustrado na figura 10, ocorre um processo de arrefecimento, o ferro combina-se com o oxigénio presente no ar, criando assim uma camada de óxido na superfície metálica (magnetite, Fe_3O_4 ; hematite, Fe_2O_3 e protoxite, FeO), designada por “carepa”.

O objetivo do processo de decapagem química é o de remover todos esses óxidos de ferro e a oxidação atmosférica da superfície do arame para, posteriormente, ser fosfatado e trefilado. O fio-máquina é, então, mergulhado em banhos de ácido clorídrico e o ferro presente na superfície do arame vai agregar-se ao cloro e formar cloreto de ferro, conforme demonstrado na equação (1), ficando a superfície do arame limpa.



Figura 10 – Rolo de arame laminado

Após a imersão do aço na solução ácida, o rolo é lavado com fortes jatos de água e imerso num banho de água, para evitar a possibilidade de ficar fragilizado à corrosão, conforme esquematizado na figura 11.

Para que possa haver uma redução de secção do fio de arame do rolo de fio-máquina por um processo de deformação a frio é necessário lubrificar a superfície do arame. Essa lubrificação é conseguida com a imersão do rolo de fio-máquina num banho de fosfatação. Neste banho forma-se uma camada de um cristal de fosfato de zinco na superfície do arame. A fosfatação é um tratamento superficial que assegura, através da aplicação de um revestimento na superfície do fio laminado, uma eficaz lubrificação durante o processo de trefilagem. Para eliminar os vestígios de ácido é efetuado um banho de neutralização. Este banho neutraliza o resto de ácido fosfórico que existe na superfície do rolo, protegendo o produto final da oxidação e/ou corrosão.

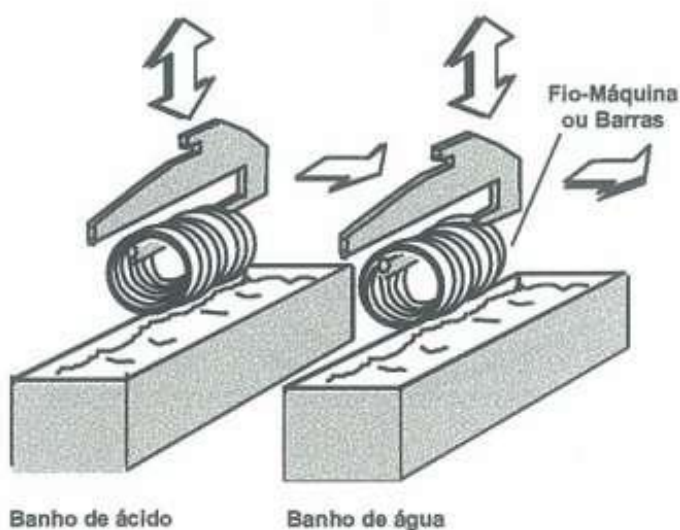


Figura 11 – Processo de imersão do rolo de arame.

Com o tratamento de superfície concluído, o rolo de fio-máquina está pronto a ser trefilado. A trefilagem é efetuada em máquinas de trefilar com várias fieiras consecutivas, como ilustrado na figura 12, que reduzem o diâmetro do fio, aumentando a sua resistência mecânica por sucessivas deformações a frio.

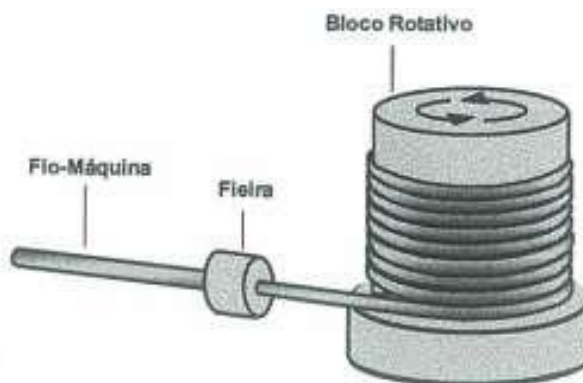


Figura 12 – Bloco de redução de secção de arame.

No processo de trefilagem as fieiras atuam como ferramentas de conformação mecânica que permitem obter os diferentes diâmetros. Uma fieira é, normalmente, constituída por um núcleo em carboneto de tungsténio inserido dentro de uma carcaça de aço ao carbono. Como o núcleo fica submetido a elevadas tensões de tração durante a trefilagem, este é montado dentro de uma caixa de aço carbono para evitar a sua fratura, tal como mostra a figura 13.

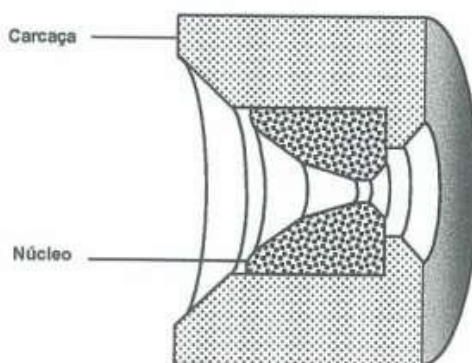


Figura 13 – Caracterização de uma fieira.

Os aspetos mais relevantes a controlar no processo de trefilagem são:

- o nº de passos da trefilagem para atingir o diâmetro pretendido;
- a velocidade de trefilagem;
- o arrefecimento do arame;

- a lubrificação (pó de sabão em conjunto com a capa de fosfato de zinco).

Teoricamente o fio é “estirado” na fiação sem que as superfícies do arame e do núcleo da fiação se toquem. Quando isso acontece ocorre o rebentamento da fiação e a formação de sucata de arame.

Uma das consequências do processo de trefilagem é o aumento das tensões internas do arame. Estas tensões têm de ser eliminadas através de um tratamento de estabilização. O tratamento de estabilização é um processo termomecânico de envelhecimento que consiste em aplicar um esforço de tração simultaneamente com um aquecimento de aproximadamente 400°C. Este tratamento tem como objetivo eliminar as tensões residuais induzidas durante o processo de trefilagem e aumentar a tensão de rutura do arame e/ou cordão reduzindo significativamente os índices de relaxação.

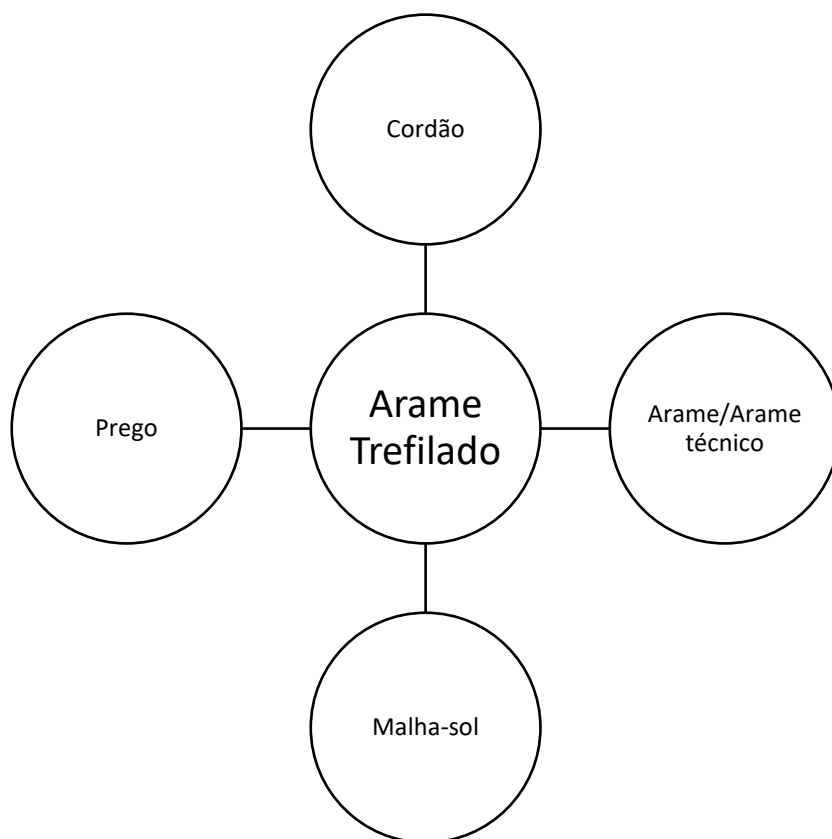


Figura 14 – Produtos derivados do arame decapado e trefilado.

2.1 Tratamento da Superfície: decapagem

A decapagem do aço é a atividade em que mais se utiliza o ácido clorídrico. Trata-se da remoção de óxidos da superfície do aço após a laminagem.

Até 2006, na Fapricela, o aço era decapado utilizando ácido sulfúrico. No entanto, o ácido clorídrico garante uma menor agressão ao metal base, menor tempo de imersão do arame na solução.

A concentração da solução ácida HCl é um dos fatores que influencia e velocidade de decapagem. À medida que aumenta a concentração diminui o tempo em que o arame de aço permanece imerso na solução.

O fio-máquina proveniente da siderurgia é obtido por laminagem a quente. Neste processo, a superfície do fio-máquina encontra-se revestida por uma camada de óxidos de ferro formados a altas temperaturas. A esta camada de óxido de ferro dá-se o nome de carepa. A quantidade e o tipo de carepa variam conforme o processo de laminagem e as características do processo.

Para que o processo de trefilagem seja possível, deve-se remover a carepa formada na laminação e também a oxidação formada durante o período de stock do material. Desde que o fio-máquina é laminado até ao momento em que é trefilado, encontra-se sujeito à exposição atmosférica que origina a oxidação da superfície do arame (Ramachandran, 2016).

O controlo do tratamento de superfície define o modo de realizar a decapagem do fio-máquina destinado à área de pré-esforço da Fapricela, bem como realizar novos banhos de decapagem e de verificar as suas características ao longo do tempo.

A finalidade da decapagem é a eliminação de carepa e óxidos superficiais que se formam no fio-máquina durante o arrefecimento no momento do seu fabrico e por ação dos agentes atmosféricos durante o período de armazenamento.

O processo de decapagem química consiste na imersão do rolo de fio-máquina num banho de ácido clorídrico a 50%, durante um tempo variável em função do grau de oxidação e da capa de carepa que o arame contenha. A superfície tem de ficar limpa e o fio-máquina apresentará um brilho uniforme que evidencia a sua superfície totalmente decapada.



Figura 15 – Modo de identificação do rolo de arame (*Fapricela, S.A.*).

O rolo de fio-máquina considera-se decapado quando, a olho nu, o operador considere que estão satisfeitas as condições referidas anteriormente.

2.1.1 Método de Trabalho

Consideramos que se decapa com duas tinas:

- Dado que os tempos de permanência são distintos registam-se 5 a 45 minutos consoante o grau de oxidação.
- Introduce-se um rolo de fio-máquina na primeira tina de ácido e outro na segunda, em continuação passa-se um terceiro rolo para a tina vazia.
- Uma vez terminada a decapagem na primeira tina do ácido passa-se o rolo para a tina da lavagem por aspersão para completar um ciclo de três rotações.
- O rolo que temos na tina vazia passa para a tina do ácido. Em continuação passa-se o rolo que estava na tina de lavagem por aspersão para a tina de lavagem por imersão.
- O rolo que se encontrava na segunda tina do ácido passa para a tina de lavagem por aspersão e introduz-se um rolo de fio-máquina na tina do ácido número 2.
- A sequência seguinte será passar o rolo depois de bem lavado para a tina de fosfatação, programando-se o cronómetro para 3 minutos de permanência. Decorrido este tempo o rolo passa para a tina de lavagem a quente (70 °C) para eliminar o excesso de fosfato passando para a tina de secagem.

Na decapagem química o tratamento de superfície é de grande importância, já que estes tratamentos iniciais irão contribuir para a boa ductilidade do produto final. São efetuados controlos sucessivos por pessoal tecnicamente especializado. A finalidade do processo de decapagem é a eliminação da carepa, óxidos superficiais, que se forma no fio-máquina na etapa de arrefecimento durante a sua produção e por ação de agentes atmosféricos durante o período de transporte e armazenamento.

3 Implementação do Projeto

3.1 Automatização do processo e aumento de capacidade

Nas instalações da Fapricela, S.A. no momento de receção dos rolos de fio-máquina, estes são armazenados no parque de matéria-prima, zona identificada com a letra M na figura 16, onde permanecem até ao momento do início do processo de decapagem química. Finalizada a decapagem química, os rolos de arame já decapados seguem para diversas secções de trefilagem.



Figura 16 – Instalações Fapricela, S.A. (Google Maps)

Atualmente, a secção da decapagem na Fapricela, SA é constituída, conforme esquematizado na figura 17, por:

- 5 tinas de ácido clorídrico;
- 2 tinas de lavagem, onde uma por alta pressão e outra por imersão;
- 1 tina de fosfatagem;
- 1 tina de neutralização;
- 1 estufa de secagem por ar quente.



Figura 17 – Layout da secção da decapagem (Edraw Max 7.9).

O transporte e o controlo do tempo de imersão dos rolos em cada uma das etapas do processo são controlados pelo operador da ponte rolante. A decapagem química do arame, a primeira etapa do processo, é controlada pelo operador alocado na ponte rolante número 1. As tarefas designadas são o transporte do rolo de arame até à etapa de lavagem por imersão. Nesta etapa, o operador da ponte rolante 2 assegura o tratamento de superfície desde a imersão no banho de fosfatação até à secagem e colocação do rolo numa estrutura de suporte que garante o transporte do rolo para a etapa seguinte, a trefilagem. O projeto de renovação da secção da decapagem visa a automatização da movimentação das pontes rolantes e o aumento de capacidade de decapagem química do arame e do tratamento de superfície. A figura 18 esquematiza a primeira iteração do processo de remodelação. Com o propósito de aumentar a capacidade de instalação foi, proporcionalmente, aumentado o número de tinas, i.e., procedeu-se à instalação de: i) três tinas de ácido clorídrico; ii) uma tina de lavagem por aspersão, com o objetivo de ficar como estrutura de reserva e iii) duas tinas para imersão de banho de fosfato, ficando uma das tinas como reserva para renovação de banhos com o objetivo de não interromper o processo para realização de novo banho de fosfato. Deste modo, a organização do layout da instalação fica conforme o ilustrado na figura 19.

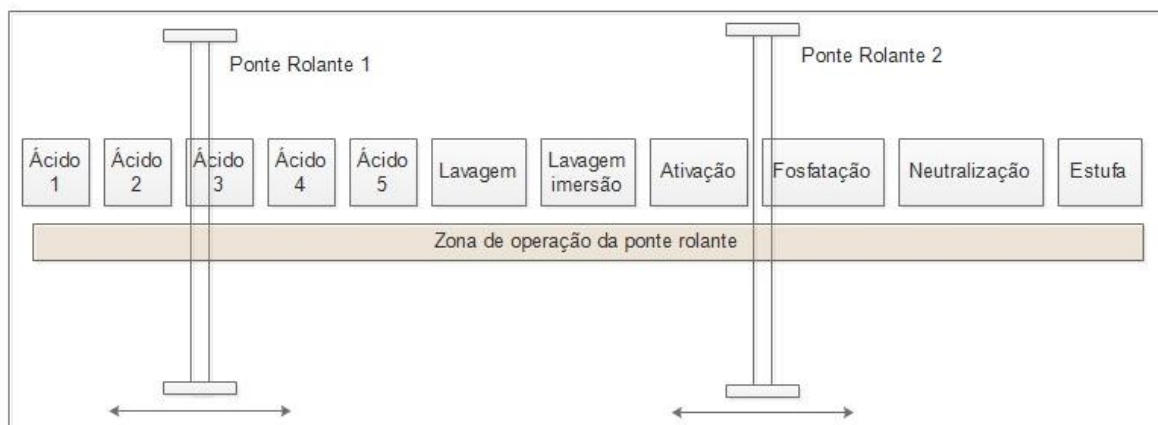


Figura 18 – Layout da instalação pré-ampliação (Edraw Max 7.9).

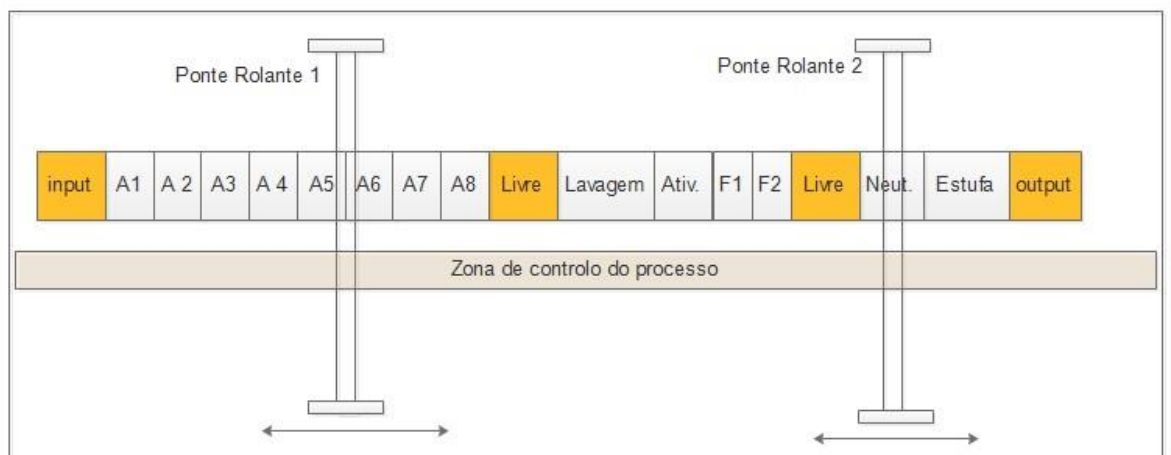


Figura 19 – Aumento de capacidade da instalação (*Edraw Max 7.9*).

4 Planeamento e Controlo de Projetos

Pode definir-se um projeto como um conjunto limitado de atividades ou tarefas inter-relacionadas cuja realização é necessária para atingir um ou mais objetivos organizacionais. A gestão de um projeto é caracterizada por duas etapas, o planeamento e o controlo (Oliveira, 1996).

O planeamento pretende identificar e caracterizar as diferentes componentes de um projeto, nomeadamente os objetivos, atividades e os recursos disponíveis e necessários, entre outros. A partir destes registos é definida e proposta a adoção de um plano de ação que, dentro das restrições, melhor satisfaça os objetivos indicados.

O controlo de atividades deteta e interpreta desvios em relação ao plano de atividades mais recente e, de modo dinâmico, adapta o plano incorporando-lhe as correções entendidas como necessárias face aos desvios detetados.

O planeamento e controlo de projetos orientado para a produção são denominados de gestão de projetos.

4.1 Construção de redes de precedência

Um projeto representa um conjunto de determinadas tarefas. Quando todas as tarefas estiverem terminadas o projeto considera-se concluído. As tarefas de um projeto estão sujeitas a determinadas restrições lógicas e a relações de precedência, o que limita a programação das mesmas apenas a determinadas condições. O modelo de precedência utilizado é o modelo AOA (Activity On Arc) onde os arcos representam as atividades e os nós representam acontecimentos, como ilustra a figura 20 (Hue, 1997). Em virtude da utilização deste tipo de redes para interpretação do processo, enumeram-se, de seguida, os pressupostos para a elaboração da mesma:

- A rede tem apenas uma tarefa de início (apenas um nó de origem);
- A rede tem apenas uma tarefa final (apenas um nó final);
- Uma tarefa não pode ser representada por mais do que um arco na rede;
- Duas tarefas não partilham as mesmas tarefas de início e final.

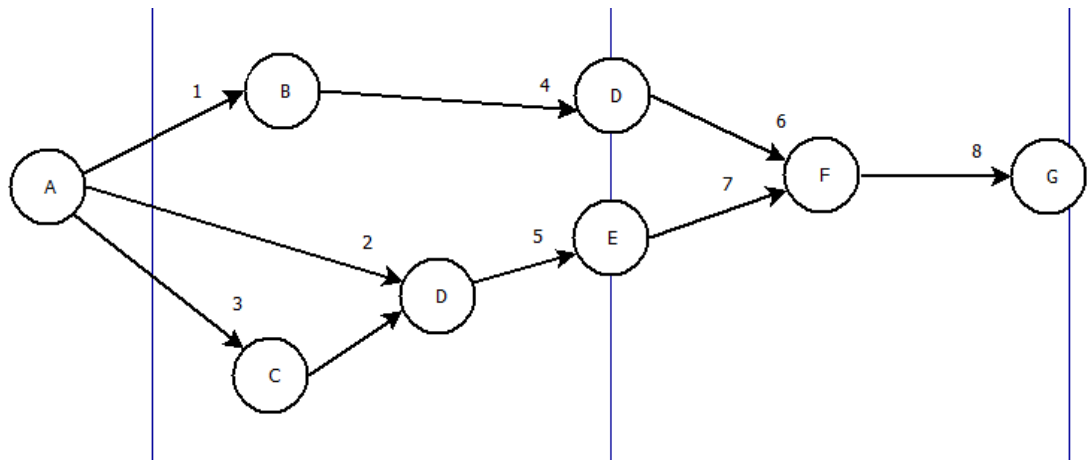


Figura 20 – Exemplo de rede de precedência (*Dia Program*)

Para além das redes na representação de um projeto existem, também, os diagramas de Gantt onde as colunas horizontais representam a ordem e os períodos de execução das tarefas em ordem ao tempo. O planeamento de Gantt é uma aplicação que facilita a organização de um projeto. Este método evidencia, no tempo, as diferentes tarefas e apresenta vantagens indiscutíveis como (2013, Moura):

- A otimização dos prazos de processamento da informação e a utilização de recursos, quer humanos ou máquinas;
- A visualização das tarefas a realizar;
- Permite prevenir e controlar alocações de recursos;
- Tem a capacidade de ajuste dos meios à situação.

O diagrama de Gantt é representado por barras dispostas na horizontal onde o comprimento da mesma corresponde à duração da tarefa. A disposição de cada barra é o resultado da interação entre as tarefas. Este método ajuda a encontrar a melhor maneira de “posicionar” as diferentes tarefas de um projeto sem que ocorra sobreposição de tarefas. A utilização do diagrama de Gantt permite visualizar a evolução do projeto e determinar o tempo de realização de cada uma relativamente às outras tarefas.

Em sistemas industriais que envolvem normalmente a automação ou automatização do transporte de matéria-prima para os diversos tratamentos, um dos desafios é o escalonamento de tarefas sem que ocorram conflitos. Quando os recursos utilizados para o transporte de matéria-prima são solicitados ao mesmo tempo por mais de um agente, a gestão e controlo desses recursos torna-se complexa (Stephens, 2012).

4.2 Redes de Petri

Uma técnica que tem sido sugerida para contribuir na obtenção de um escalonamento admissível dos recursos é modelar o sistema através das redes Petri que, através das suas características, permitem acompanhar a evolução do mesmo. Uma vez que se possui a modelação do sistema, é, particularmente, interessante obter o escalonamento de tarefas

otimizado das alocações dos recursos. O primeiro obstáculo é modelar os sistemas tendo em conta as especificações e restrições de cada um. Tal, resultará num modelo alvo de otimização. Modelar os sistemas requer um total conhecimento das restrições existentes, dado que ignorar determinada restrição poderá impedir a otimização das tarefas (Girault, 2002).

Uma das ferramentas indicadas para modelar sistemas de elevado grau de flexibilidade e complexidade são, como já referido, as redes Petri. As redes de Petri são ferramentas matemáticas e gráficas que permitem a obtenção de modelos visuais, compactos e dinâmicos dos sistemas. A grande vantagem das redes Petri é que permitem modelar, analisar, controlar e monitorizar o sistema. A representação gráfica de uma rede de Petri, como a ilustrada na figura 21, é formada por dois componentes: i) o componente de transição ou componente ativo e ii) o componente passivo também denominado de destino ou lugar.

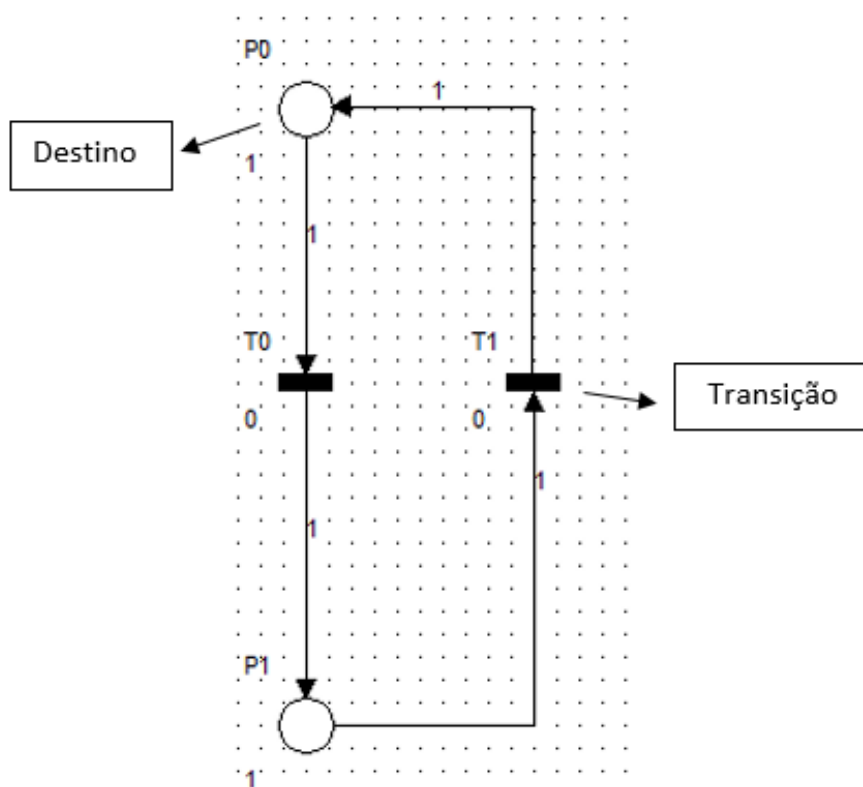


Figura 21 – Representação gráfica de uma rede de Petri (GRIF Petri Net V12)

Numa rede de Petri os lugares são ligados às transições e estas aos lugares através de arcos. Os lugares representam, na prática, o estado da rede e as transições indicam a mudança de estado. Os recursos que transitam entre os lugares são representados por pontos pretos no interior dos lugares denominados de *tokens*. Os arcos ligados a cada transição indicam sobre que lugares atuam. Um arco com origem num lugar e com fim numa transição indica que esta transição vai mover um ou mais *tokens* do lugar de origem. Do mesmo modo, um arco com origem numa transição e com fim num lugar significa que esta transição vai acrescentar um ou mais *tokens* para o lugar de destino. É denominado de disparo de transição o momento em que uma determinada transição dá a ordem - o disparo - para transitar um *token* de um lugar de origem para o lugar seguinte (Zhou, 1999).

Dado o âmbito do processo tipo não determinístico do projeto em causa foram desenvolvidas redes de Petri temporizadas. Este tipo de redes possibilita a representação do comportamento dinâmico de sistemas que possuam tarefas concorrentes entre si, assíncronas e não determinísticas, através da adição do parâmetro de tempo no modelo. O tempo também pode ser utilizado de modo probabilístico, isto é, o disparo de transições está associado a distribuições de probabilidades. Estes tipos de redes são denominadas de redes de Petri estocásticas, pois o seu comportamento pode ser descrito por processos estocásticos (Aalst, 2011). A associação do tempo ao modelo pode ser implementada de diversas formas:

- O tempo associado aos lugares: neste caso os *tokens* (após o disparo das transições) só estarão disponíveis para disparar uma nova transição após um determinado período de tempo que está associado ao lugar;
- O tempo associado aos *tokens*: nesta situação, o tempo indica quando o *token* estará disponível para disparar uma transição;
- O tempo associado às transições: neste caso, o objetivo é o estudo de redes de Petri temporizadas determinísticas com tempos associadas às transições.

5 Gestão de variáveis de controlo

5.1 Descrição do processo de decapagem e tratamento de superfície

A remoção da carepa ou de outras impurezas utilizando soluções de ácido clorídrico ou ácido sulfúrico é, como já referido anteriormente, denominada decapagem química. A temperatura da solução, o tipo de ácido e a sua concentração são fatores intrínsecos no tempo de decapagem. Considerando que os métodos de remoção manuais e mecânicos são processos morosos, a decapagem ácida constitui uma alternativa mais eficiente.

Durante o processo de ataque à carepa com o ácido sulfúrico é formado o sulfato ferroso que permanece dissolvido na solução ácida. Esta solução perde o seu desígnio decapante quando atinge um teor de sulfato ferroso dissolvido entre os 85 e os 95%, altura em que se deve proceder à sua reciclagem ou tratamento para possível reutilização do sulfato ferroso na indústria farmacêutica, de fertilizantes, de tintas, etc.

Os processos químicos de decapagem empregam sempre reagentes químicos com composições específicas para cada tipo ou família de produto que se deseja processar. O objetivo da decapagem é produzir superfícies puras, requisito essencial para preparar as superfícies para a fosfatação, isto é, para a aplicação posterior de revestimento. A decapagem pode ser classificada como um processo de pré-tratamento superficial, pois a sua finalidade é realizar a limpeza da superfície, deixando-a isenta de óxidos e sujidades.

Em relação ao tempo de decapagem, este depende basicamente de duas variáveis: i) das características específicas do aço a decapar, como a natureza do aço, composição, estrutura e espessura da camada de óxidos e ii) das características da solução de banho ácido como concentração, temperatura e tipo de ácido. O tempo de imersão também deve ser controlado para conter o ataque à superfície.

Os resíduos de decapagem favorecem a corrosão, portanto uma lavagem final cuidadosa é indispensável, seguida de uma neutralização alcalina fraca.

Tanto em aços, como nos demais metais ferrosos ou não, existe a preocupação de se ter além da retirada total da carepa, mínima perda de metal-base, bem como a necessidade de se evitar o consumo excessivo do ácido. Uma forma de minimizar as perdas metálicas por dissolução do metal-base e, por consequência, o consumo excessivo de ácido, é a utilização de inibidores de corrosão.

Dependendo do tipo de aço a ser decapado e tratado superficialmente, o tempo de imersão em cada tina varia. Na Fapricela são decapados quimicamente dois tipos de aço:

- Médio carbono – o médio carbono apresenta de 0,30 a 0,60% de teor em carbono;
- Alto carbono – concentração superior a 0,6% de carbono.

Para a simplificação de esquemas e modelos, adotou-se a simbologia relativa à identificação das tinas e a consequente tarefa constante da tabela 1:

Tabela 1 – Designação das tinas de banhos.

Designação	Símbolo	Tarefa
Tina de ácido 1	A1	1
Tina de ácido 2	A2	2
Tina de ácido 3	A3	3
Tina de ácido 4	A4	4
Tina de ácido 5	A5	5
Tina de ácido 6	A6	6
Tina de ácido 7	A7	7
Tina de ácido 8	A8	8
Tina de lavagem	La	9
Tina de ativação	Act	10
Tina de fosfato 1	F1	11
Tina de fosfato 2	F2	12
Tina de lavagem	Li	13
Tina de neutralização	Neut	14
Tina de secagem	Est	15

As tinas de ácido 1, ácido 2 e ácido 3 são responsáveis pela decapagem dos rolos de arame de aço de médio carbono e as restantes, da tina de ácido 4 à tina de ácido 8, serão decapados os rolos de arame de aço de alto carbono, conforme esquematicamente representado na figura 22.

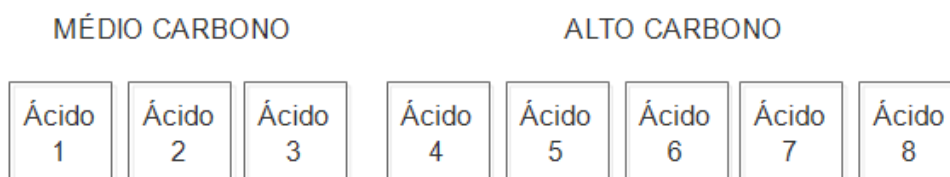


Figura 22 – Distinção tipo de aço (*Edraw Max 7.9*).

No tratamento da superfície a distinção é feita nas tinas de fosfatação, isto é, onde para o médio teor em carbono o rolo é imerso na tina de fosfatação 2 e para o alto teor carbono na tina de fosfatação 3, como ilustra a figura 23.

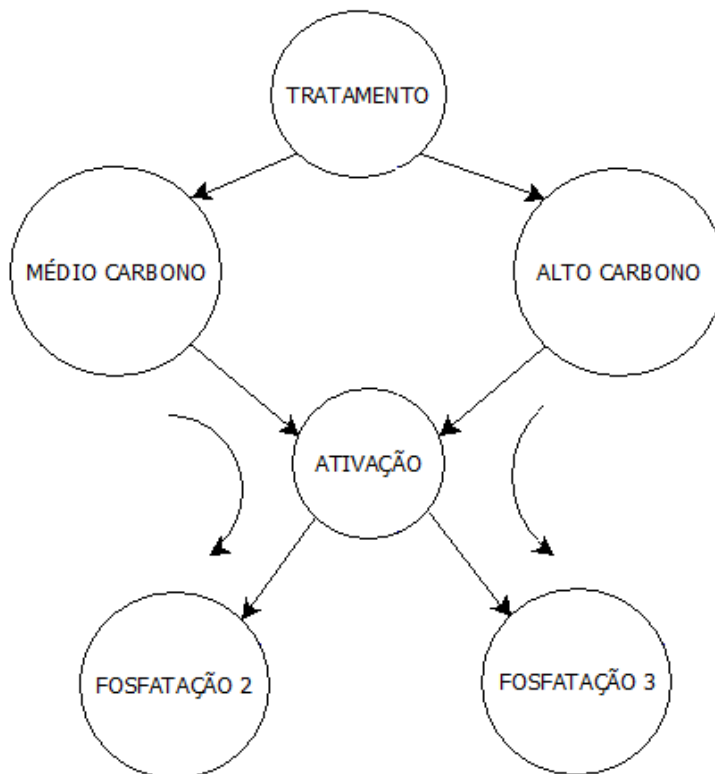


Figura 23 – Percurso para aço médio carbono e alto carbono (Edraw Max 7.9).

O processo inicia-se pela imersão de um rolo de arame de aço na tina de ácido 1 e na tina de ácido 4 tal como ilustra a figura 24.

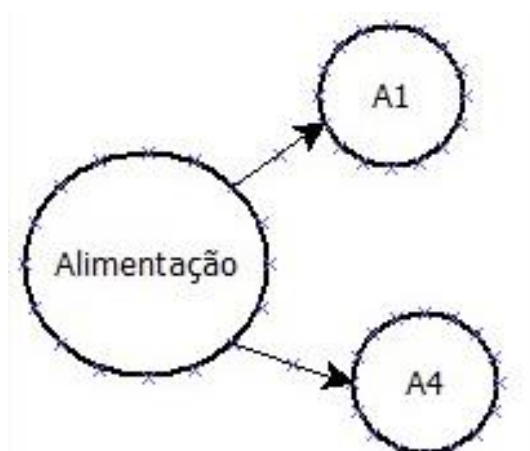


Figura 24 – Início de processo de decapagem (Dia Program).

Decorrido o tempo de imersão estabelecido para cada tina, a ponte rolante transporta o rolo para o estágio seguinte.

O processo de decapagem para os rolos de médio carbono avança no processo e percorrem as tinas de ácido 1, ácido 2 e ácido 3. Por outro lado, o arame de aço de alto carbono tem a sua primeira alocação na tina de ácido 4, decorrido o respetivo tempo de imersão o rolo é transportado para a tina de ácido 5. Devido aos tempos de imersão para o aço de elevado carbono ser superior aos tempos de imersão do aço de médio teor em carbono, as concentrações e tempos de imersão são controladas de maneira a que as tinas de ácido 6, ácido 7 e ácido 8 constituam uma etapa única. Deste modo, conforme a disponibilidade das tinas, a ponte transporta o rolo para a tina mais próxima e disponível, conforme ilustra a representação dos arcos a tracejado na figura 25.

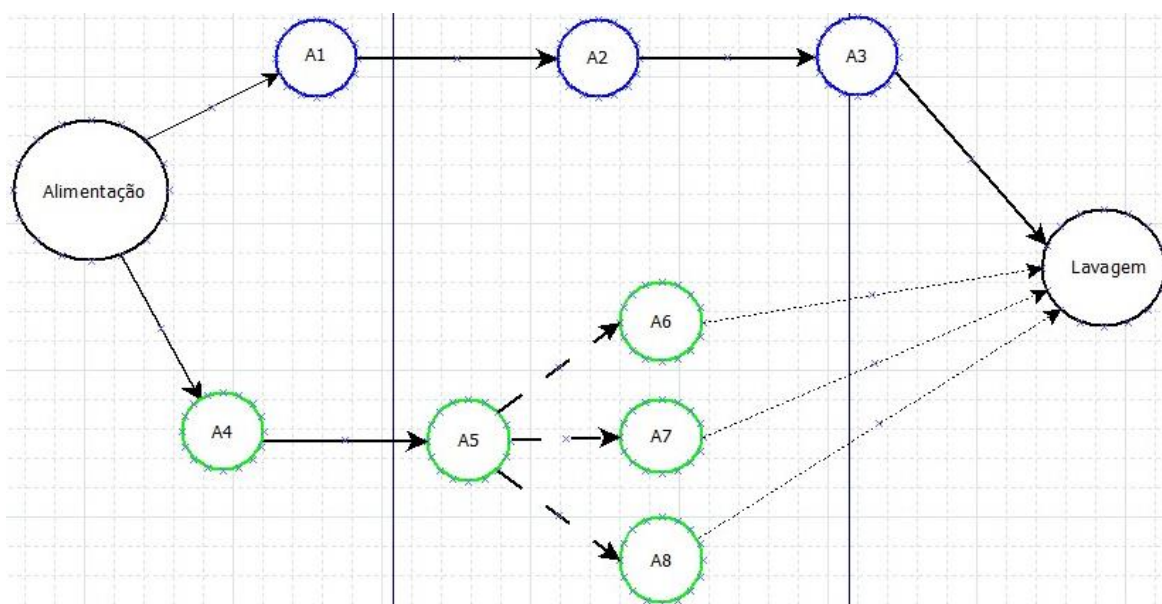


Figura 25 – Diagrama em rede do processo de decapagem química (*Dia Program*).

Os tempos de imersão, em cada tina, do processo de decapagem para o médio e alto teores em carbono são estabelecidos consoante a concentração dos banhos em cada tina. Consoante o procedimento estabelecido para a realização de cada banho é obtida a distribuição de tempos de imersão constante da tabela 2.

Tabela 2 - Tempos de imersão.

Tina	Tempo imersão (minutos)
A1	17
A2	19
A3	24
A4	5
A5	7
A6	27
A7	27
A8	27
LA	0,83
Act	0,33
F1	2,5
F2	2,5
F3	2,5
Li	0,02
Neut	1
Est	2,5

O diagrama de rede da figura 26 tem definidas as tarefas a realizar pela ponte rolante. O índice representado em cada ramo indica a ordem das tarefas consoante os tempos de imersão definidos.

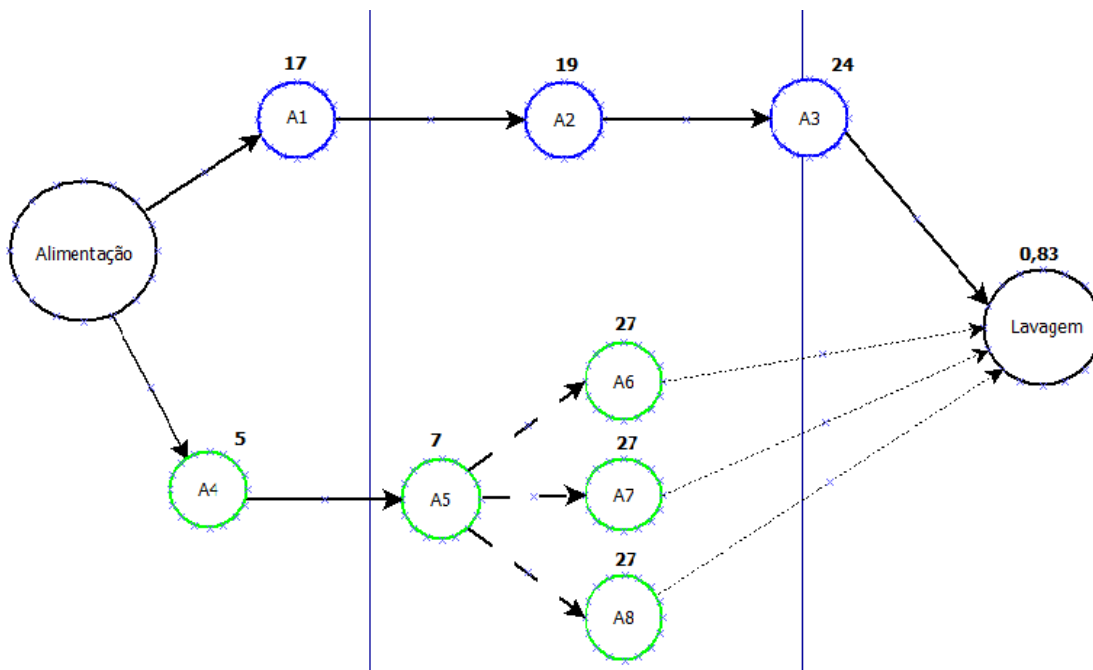


Figura 26 – Tempo de imersão por tarefa do processo de decapagem química (Dia Program).

Para determinar se existem sobreposições de tarefas entre o médio carbono e o alto teor em carbono e, a partir daí, determinar o trajeto ótimo das pontes rolantes, é necessário representar as tarefas através do diagrama de Gantt representado na figura 27.

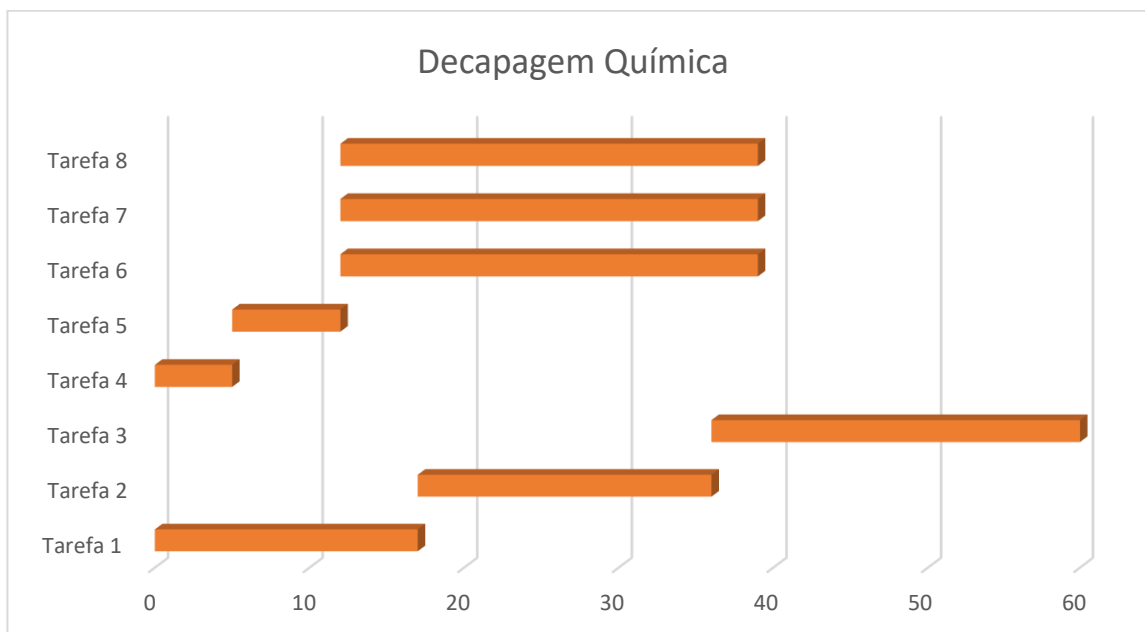


Figura 27 – Sequência de tarefas na decapagem química.

Do mesmo modo, para o processo de tratamento e preparação da superfície do arame de aço, as tarefas são planificadas em diagrama de rede. Na figura 28 encontra-se representado o circuito das tarefas com o índice de representação do tempo de imersão.

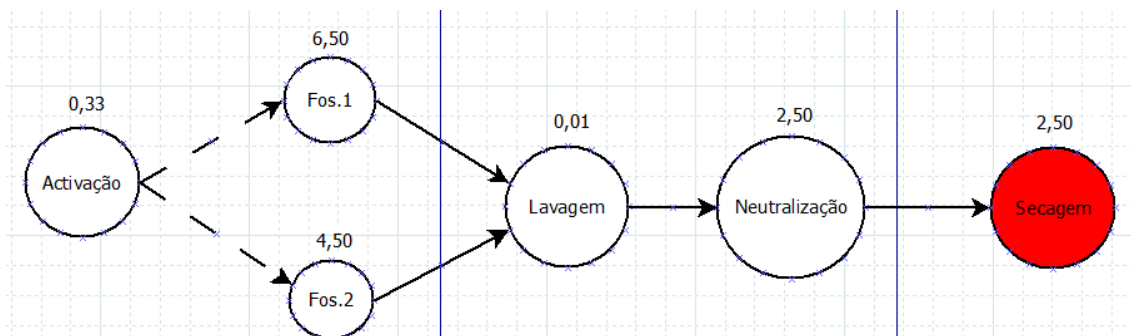


Figura 28 – Diagrama em rede do tratamento de superfície (Dia Program).

A sequência de tarefas, como se pode verificar no diagrama de Gantt da figura 29, não possui sobreposições. Na etapa de tratamento de superfície, a tarefa de fosfatação depende da característica do arame, médio ou alto carbono. No entanto, o tempo de imersão é igual em cada uma das tarefas. As tarefas seguintes desencadeiam-se em fila de espera.

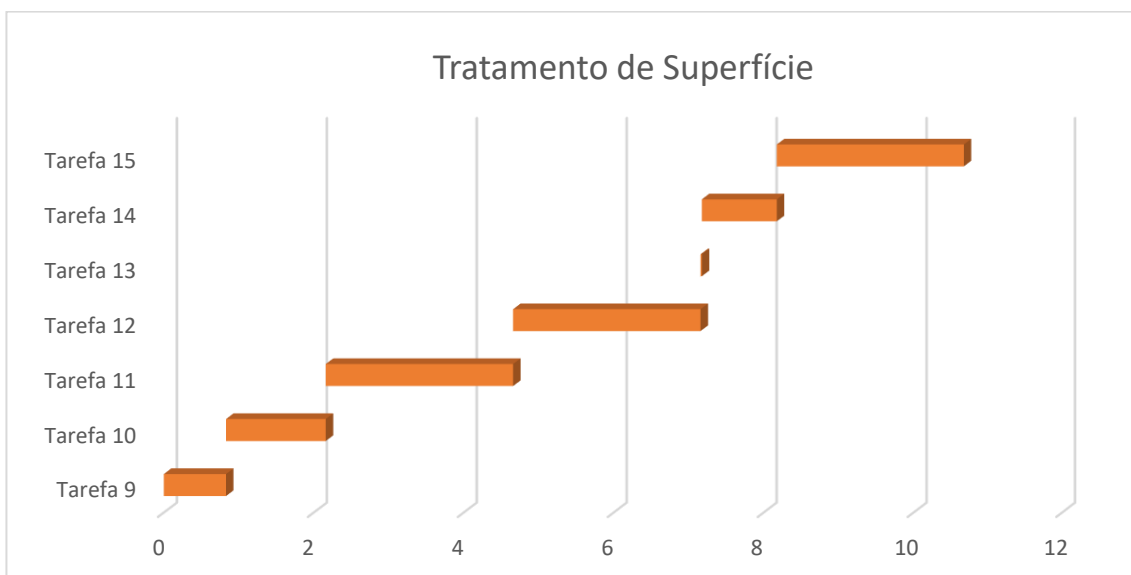


Figura 29 – Sequência de tarefas no tratamento de superfície

A movimentação dos rolos entre cada tarefa, bem como a própria permanência em cada uma, é garantida através de uma estrutura denominada de gancho que possibilita o transporte do rolo, conforme ilustra a figura 30. A geometria do gancho encontra-se dimensionada para ser compatível com a estrutura da ponte rolante tornando possível a elevação do gancho. Na figura 31 encontra-se representado o acoplamento do gancho de suporte do rolo na ponte rolante e o modo como o gancho permanece em repouso na tina onde cumpre uma determinada tarefa em função da numeração da tina onde se encontra.



Figura 30 – Detalhe do acoplamento do gancho na ponte rolante (*Fapricela, S.A.*).



Figura 31 – Detalhe do acoplamento do gancho na ponte rolante (*Fapricela, S.A.*).

O principal constrangimento existente neste método de transporte de ganchos está relacionado com: i) a quantidade de ganchos necessários a introduzir no sistema; ii) a quantidade de ganchos em espera e iii) a forma como os ganchos, quando sem rolos, são transportados para a zona de alimentação de rolos no início do processo de decapagem.

O transporte de ganchos vazios pode ser realizado por 3 formas distintas: i) ser transportados de modo manual, transporte por empilhador desde que o gancho vazio seja colocado numa posição estratégica que permita o acesso do meio de transporte; ii) o transporte pode ser efetuado de forma automática através de uma estrutura autónoma e à parte semelhante aos pórticos atuais, iii) ou pela utilização alternada das pontes rolantes para colocação do gancho vazio na zona de alimentação dos rolos.

5.2. Problemática: O transporte de ganchos vazios

O transporte manual de ganchos vazios, um de cada vez ou em conjunto, implica a colocação dos ganchos numa zona externa ao *layout* das pontes rolantes. O transporte dos ganchos para esta zona terá de ser efetuado de forma sincronizada com o processo principal pois os pórticos existentes não permitem a translação da estrutura do guincho de elevação. Para tal, seria necessário a existência de uma estrutura externa que transportasse o gancho para uma zona livre. Todavia, a utilização de uma estrutura externa implica o cumprimento de determinados requisitos fundamentalmente os que abaixo se indicam:

- nenhuma estrutura ou mecanismo externo pode intersectar a zona de trabalho das pontes rolantes;
- na zona de alimentação dos rolos - no início e na zona final do processo -, a movimentação de empilhadores é prioritária sobre qualquer outra atividade.

A utilização das pontes rolantes para o transporte de ganchos não implica o dimensionamento, o fabrico/montagem e sincronização de estruturas auxiliares e, por conseguinte, um aumento significativo do custo total do projeto e da extensão da data de conclusão do mesmo.

Através dos tempos de disponibilidade de cada ponte rolante pode verificar-se que possuem disponibilidade para o transporte dos ganchos, mas não de forma contínua. Assim, torna-se necessário a existência de uma estrutura de apoio de ganchos num determinado local para que se torne possível interromper o transporte dos ganchos e retomar as tarefas do processo de decapagem e tratamento da superfície do arame. Por outro lado, alterar a posição das tinas implicaria modificar a sua estrutura de apoio (de modo a existir espaço para a colocação de dita estrutura de apoio ao gancho) e efetuar o seu nivelamento que é um processo moroso e complexo. Assim, e com o propósito de facilitar este procedimento, propõe-se a utilização das tinas livres existentes para colocar os ganchos vazios e, deste modo, evitar a interrupção do processo principal.

A existência de duas tinas livres, uma na etapa de decapagem química e a segunda na etapa de tratamento de superfície, servem para garantir que o processo de decapagem e o processo de tratamento da superfície do arame não fiquem condicionados por avaria no grupo de lavagem dos rolos ou por outra qualquer avaria numa das outras tinas na etapa de tratamento de superfície. Propõe-se, assim, que o transporte de ganchos vazios seja executado como representado na figura 32.

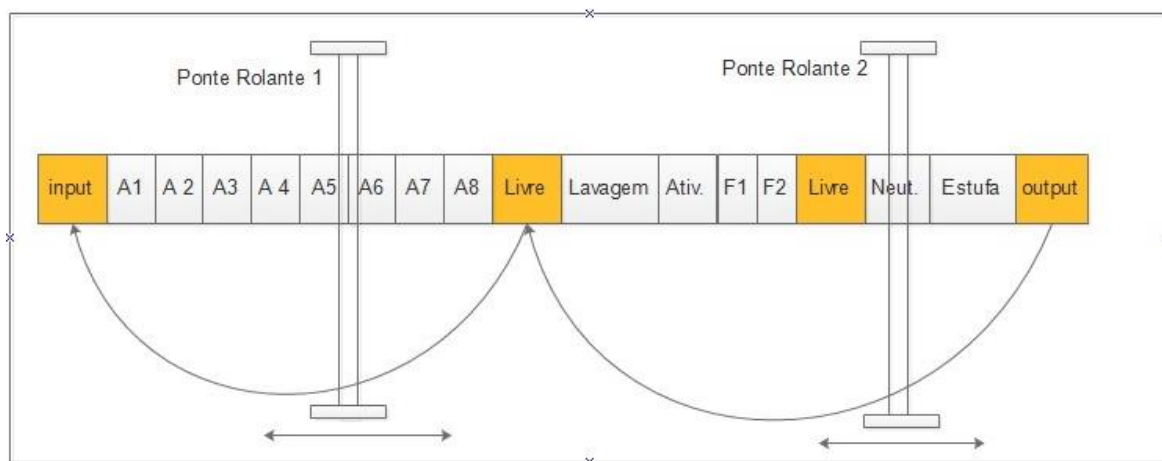


Figura 32 – Transporte de ganchos livres (*Edraw Max 7.9*).

Numa determinada etapa a definir, a ponte rolante 2 torna-se responsável pelo transporte do gancho vazio desde a zona de saída dos rolos, como ilustrado na figura 33, até à tina livre que antecede a lavagem do rolo de arame.



Figura 33 - Estrutura de saída dos rolos de arame (*Fapricela, S.A.*).

5.3 Sequência das tarefas

Para determinar qual a sequência de tarefas que cada ponte rolante deve executar, de modo que o modelo se aproxime do modelo ótimo, é tido em conta o tempo de imersão do rolo em cada tina e a sequência de cada tarefa a partir da análise dos diagramas de Gantt das figuras 27 e 29.

Na figura 34 encontra-se representado o diagrama em rede do processo de decapagem química e de tratamento da superfície do arame e será a partir desta rede que se define o escalonamento de tarefas para cada ponte rolante. Além dos requisitos intrínsecos ao processo de decapagem e tratamento da superfície do arame, existem determinadas condições, de caráter de segurança no trabalho e funcional, que impedem o funcionamento das pontes rolantes, a realçar:

- a distância de segurança mínima de trabalho obriga a que as pontes distem no mínimo uma tina de intervalo entre ambas;
- e quando uma ponte rolante, por qualquer motivo alheio ao funcionamento normal, permanecer em STOP, a outra ponte rolante deve executar as tarefas predeterminadas até que qualquer condição de funcionamento provoque a sua paragem.

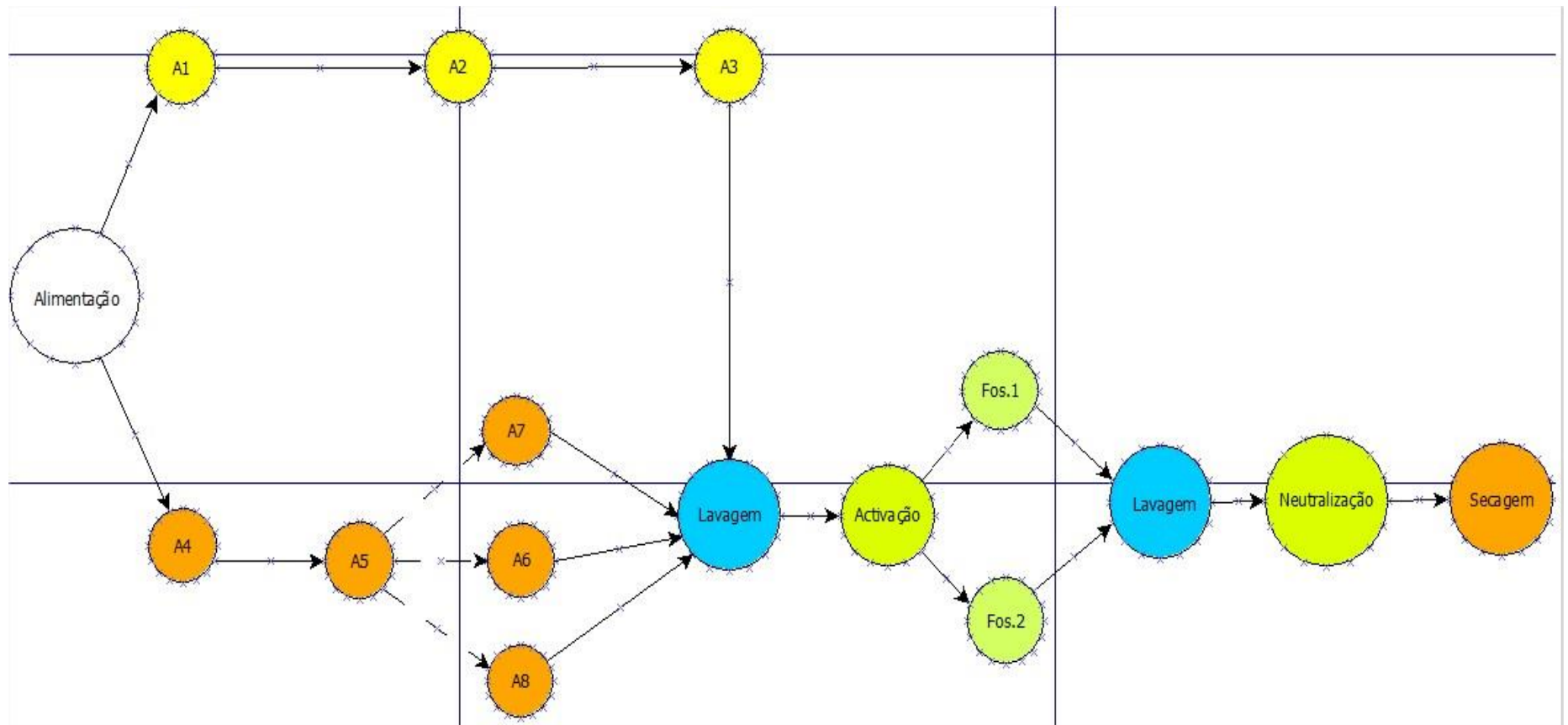


Figura 34 - Diagrama em rede da linha de produção de arame decapado (*Dia Program*).

Embora existam inúmeras condições de segurança e funcionais que inibem ou desinibem o funcionamento das pontes rolantes, as condições apresentadas anteriormente afetam diretamente o escalonamento das tarefas a designar.

Nesta etapa do projeto já se encontram definidas as condições de trabalho que garantem o processo de alimentação da linha de produção e a sequência de imersão dos rolos de arame de aço de modo a promover a decapagem, o tratamento da superfície do arame e a transição dos ganchos de suporte dos rolos desde a estrutura de saída para a estrutura de entrada.

Para estabelecer as tarefas a executar por cada uma das pontes rolantes devem ponderar-se determinadas considerações que dizem respeito aos procedimentos a executar pelos colaboradores afetos à secção como:

- a estrutura de alimentação permanece completa em todos os ciclos;
- a estrutura de saída dos rolos de arame encontra-se sempre livre para depósito de rolos de arame decapados;
- a concentração dos banhos das tinas de ácido, ativação, neutralização e fosfatação está conforme o plano definido para o controlo de banhos;
- a temperatura do banho nas tinas de fosfatação e neutralização está conforme o plano de trabalho.

Em função das considerações anteriores o processo inicia-se com a inserção do rolo na tina de ácido 4 através da ponte rolante 2 e inserção do rolo na tina de ácido 1 pela ponte rolante 1. Temos, deste modo, as tarefas 1 e 4 realizadas, como indica a figura 35.

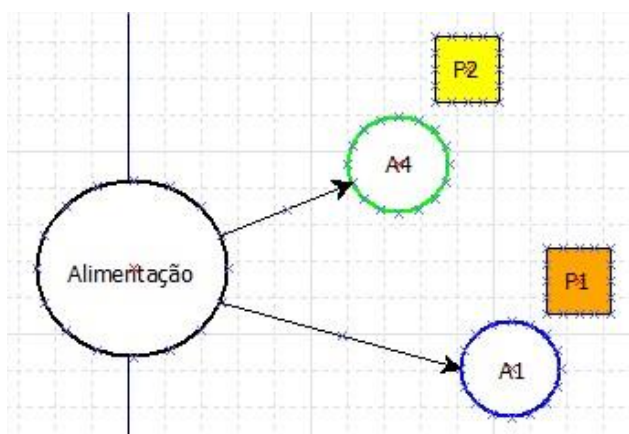


Figura 35 - Realização das tarefas 1 e 4 (Dia Program).

Decorrido o tempo de permanência no banho da tina 4 e de acordo com a figura 36, a ponte rolante transporta o rolo para a tina de ácido 5 e a ponte rolante 1 coloca um novo rolo na tina 4 que, entretanto, ficou livre.

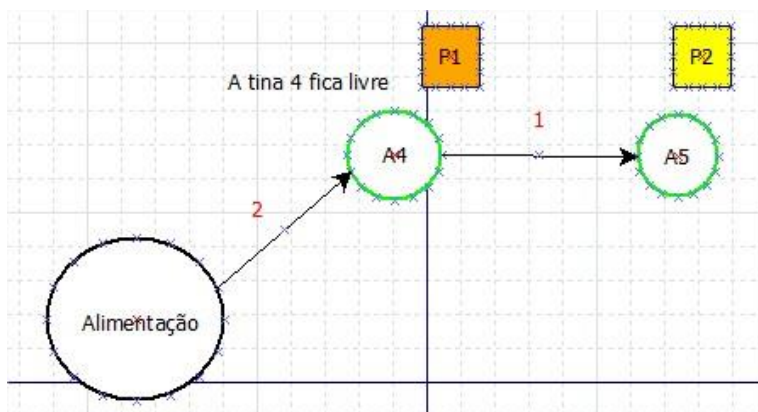


Figura 36 - Realização das tarefas 4 e 5 (*Dia Program*).

As tarefas a realizar após a tarefa 5 estar concluída, será a ponte rolante 2 realizar a tarefa 6, enquanto a ponte rolante 1 realiza as tarefas 5 e de seguida a tarefa 6, conforme ilustra a figura 37. Na fase de arranque da linha, a ponte rolante 2 tem capacidade para realizar uma vez a tarefa 7 e 8. A partir daí, terá início a etapa de tratamento da superfície do arame.

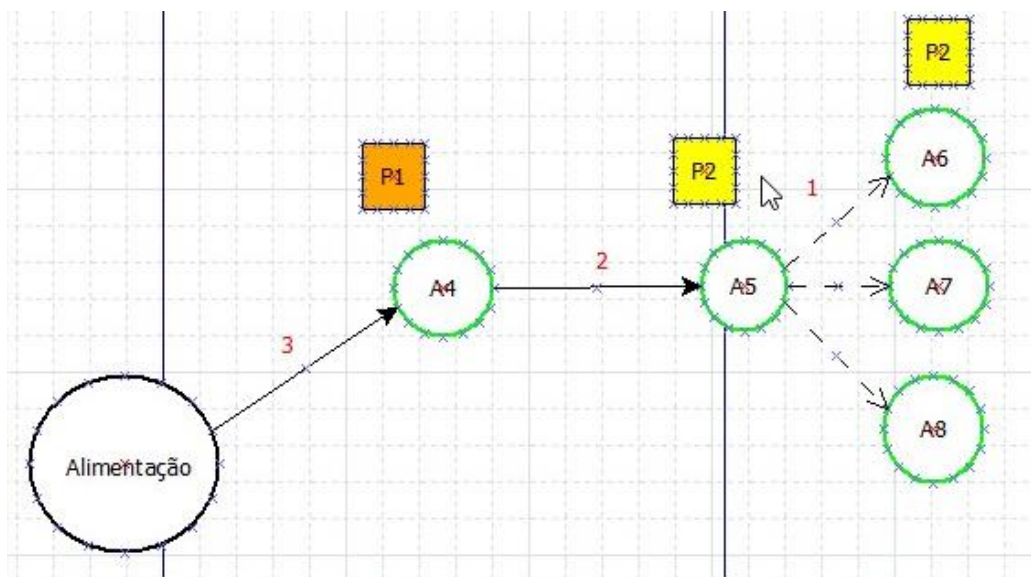


Figura 37 - Realização das tarefas 6, 5 e 4 (*Dia Program*).

De acordo com o diagrama da figura 29, enquanto a tarefa 6 é realizada, a tarefa 1 encontra-se concluída. Deste modo, a ponte rolante 2 executa o transporte do rolo para a tina de ácido 2 (tarefa 2) enquanto a ponte rolante 1 realiza a tarefa 1. Do mesmo modo, terminadas as tarefas 1 e 2, a sequência de trabalho segue o diagrama da figura 38.

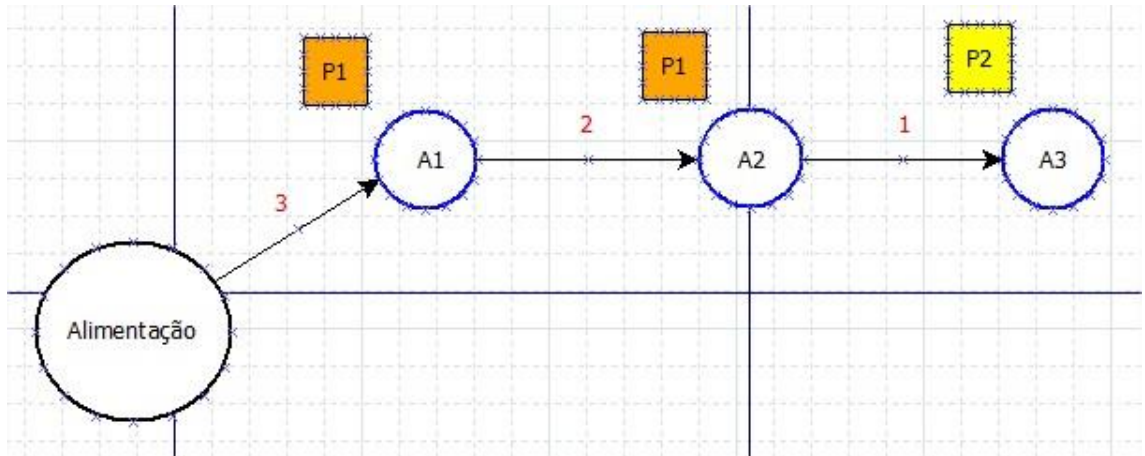


Figura 38 – Realização das tarefas 3, 2 e 1 (Dia Program).

Terminada a tarefa 6, a ponte rolante 2 executa o transporte do rolo para a etapa de lavagem e inicia-se, a partir deste momento, o tratamento da superfície do arame, conforme ilustrado na figura 39. As tarefas nesta etapa são asseguradas exclusivamente pela ponte rolante 2.

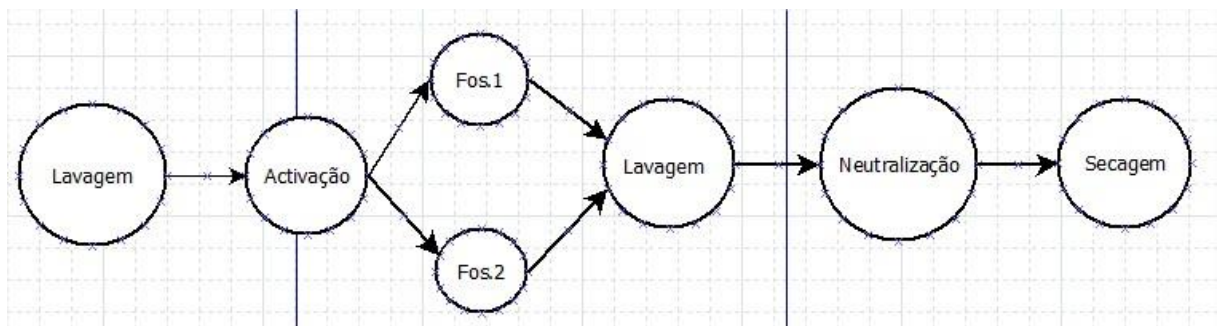


Figura 39 - Sequência de tratamento da superfície do arame (Dia Program).

As tarefas da decapagem química que antecedem o tratamento da superfície do arame são:

- a tarefa 3, onde a cada 24 minutos um rolo médio carbono é decapado;
- as tarefas 6, 7 e 8, onde a cada 9 minutos um rolo alto carbono é decapado.

6 Simulação computacional e distribuição de tarefas

Este capítulo tem como objetivo, através do *software* YASPER, simular a eficiência da instalação com o escalonamento de tarefas proposto no capítulo anterior.

6.1 Introdução ao *software* YASPER

Os modelos de processo do *software* YASPER são desenvolvidos segundo as redes de Petri. Numa primeira etapa é definida a sequência de tarefas ao longo de todo o processo e, numa fase posterior, são definidas as condições que inibem e desinibem a realização das tarefas de cada ponte rolante. Os tempos de imersão, neste *software*, são atribuídos não aos lugares, símbolo quadrado verde, mas sim ao momento do disparo de cada etapa de transição, os círculos amarelos. Na figura 40, está representado o *layout* inicial do *software*, a partir deste ponto, começa-se a construir a rede funcional à semelhança da rede principal de precedência obtida no capítulo anterior.

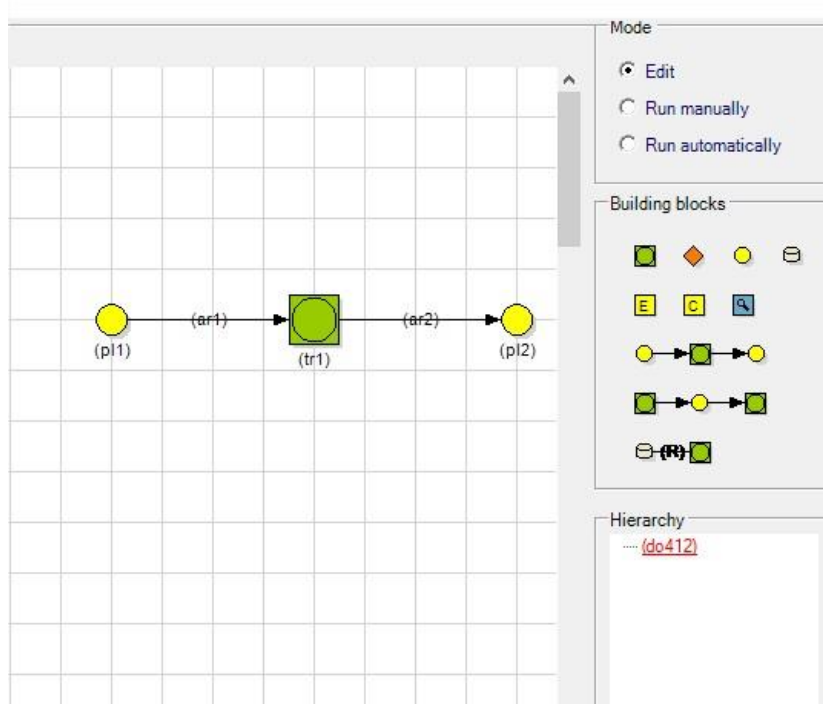


Figura 40 – *Layout software* YASPER (YASPER SOFTWARE).

O *software* YASPER permite obter as etapas de um processo e as condições que existem entre cada uma. O planeamento das tarefas através da esquematização em diagrama de rede permite trajetos alternativos e paralelos, isto é, simultâneos, repetições de tarefas e concentração de recursos entre as tarefas. O diagrama proposto pelo *software* modela com exatidão as restrições de cada tarefa e da interação entre elas o que permite executar simulações computacionais do sistema de rede desenvolvido (Yasper, 2016).

No diagrama Petri da figura 41 encontram-se definidas as sequências de todas as tarefas do processo em estudo.

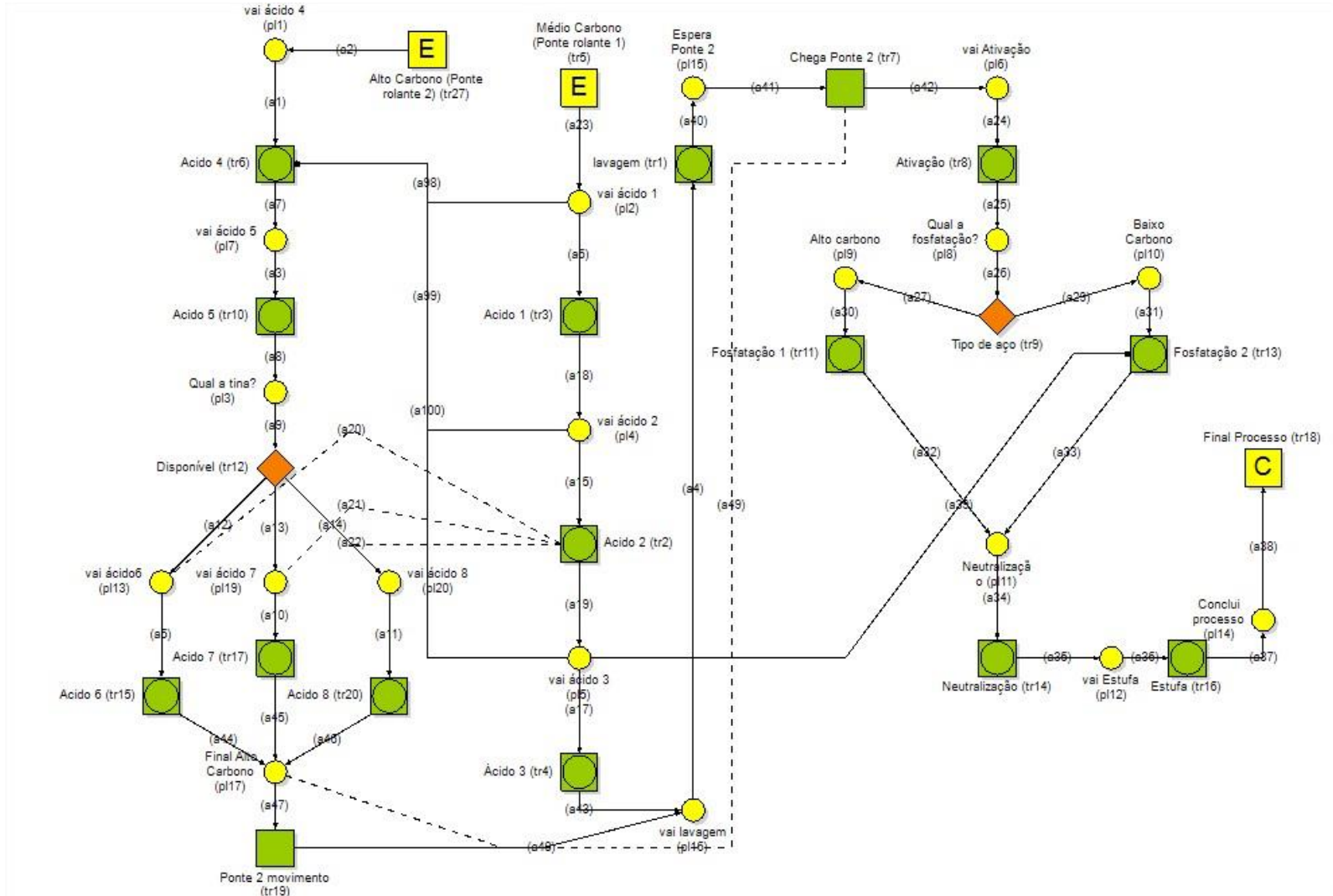


Figura 41 - Escalonamento de tarefas em rede Petri (YASPER SOFTWARE)

A utilização das redes de Petri permite configurar que tipo de lugar de destino e o tipo de transição entre eles. Na figura 42 pode verificar-se a identificação na rede de cada uma das tarefas, isto é, o percurso entre cada tina e a transição associada. No canto superior direito da mesma figura está definida uma etapa de transição “vai ácido 4” e o local de destino “Ácido 4 (tr6)”. Seguindo o mesmo arco pode verificar-se que este rolo de aço é de alto carbono e que é a ponte rolante 2 que está a realizar a tarefa.

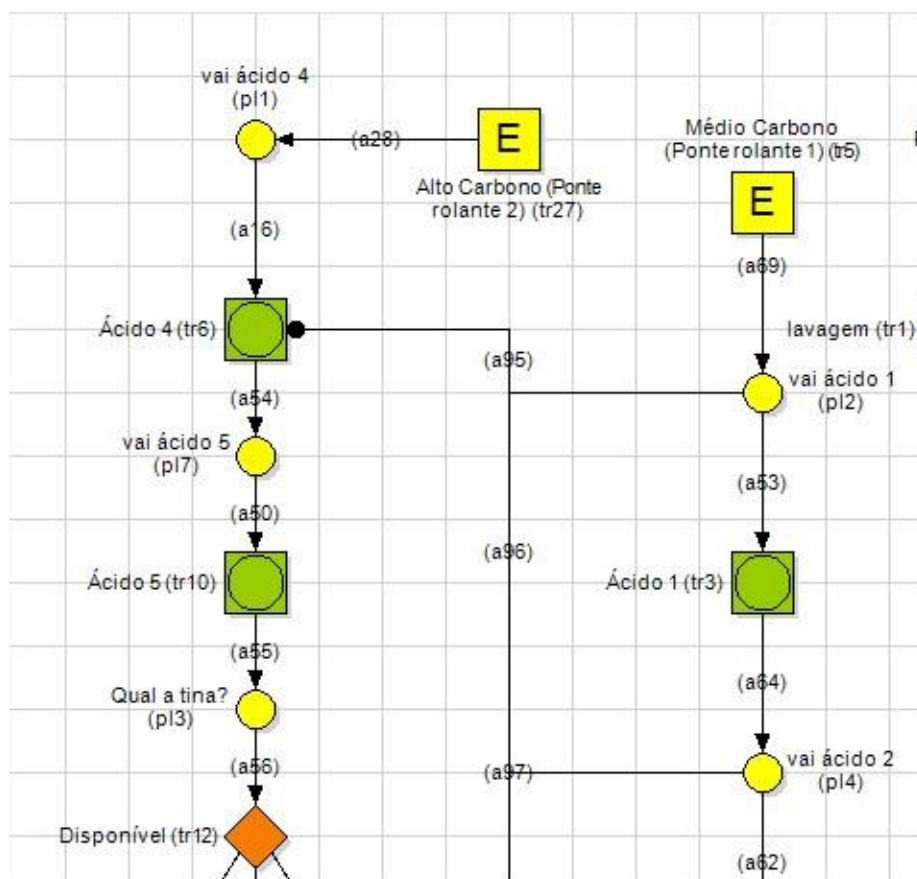


Figura 42 - Caraterização da rede (YASPER SOFTWARE).

As tarefas associadas ao processo de decapagem e tratamento de superfície não são tarefas independentes, isto é, a realização de uma tarefa depende do estado de uma ou mais tarefas.

Em cada lugar criado na rede Petri é possível definir quais as funções que provocam o disparo da transição associada “Places Flushed by firing” e quais as condições que bloqueiam o disparo da mesma “Places thah Block Firing”. No exemplo da figura 43 está garantida a situação de continuidade do sistema. No caso em que a ponte rolante 2 estiver ocupada a realizar uma tarefa ou na tina 6, 7 ou 8 (devido ao fato destas 3 tinas terem acontecimentos independentes umas das outras) a ponte rolante 1 dá continuidade ao sistema (Yasper, 2016).

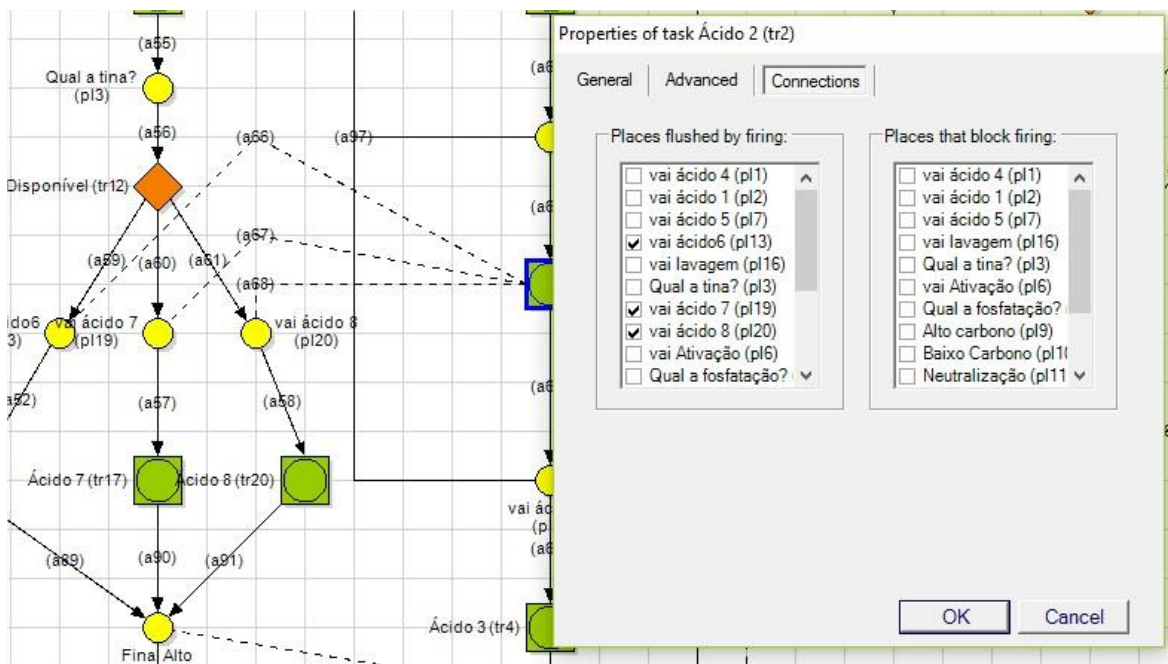


Figura 43 - Exemplo de restrições ao disparo das transições (YASPER SOFTWARE).

Embora a complexidade na caracterização da rede e do conjunto de funções do programa YASPER ser limitado, em relação a outros softwares o programa ainda permite associar, de forma indireta, ações de segurança e funcionamento. Quando “dizemos” que um determinado lugar só pode ser ocupado por um token, isto é, o disparo da transição para esse lugar só é dado se este estiver livre, na prática está-se a simular a presença de gancho com rolo numa determinada tina. Deste modo, se por motivos alheios ao funcionamento normal da instalação, ocorre uma anormalidade no circuito de contagem de tempos de imersão, mesmo que a condição temporal provoque o disparo da transição, esta vai ficar bloqueada até que não haja “presença de rolo na tina”.

6.2 Caracterização da rede

No âmbito da simulação, é necessário definir o início e o fim da rede. O início da rede terá de ser a função do programa que crie e emita tokens que, consoante as condições já referidas, vão “avançar” até atingir o final da rede que é dada pela função coletor de tokens. Na figura 44 pode verificar-se que a ponte rolante 1 e a ponte rolante 2 são definidas como geradoras e emissoras de tokens onde, na prática, simulam a entrada de rolos de arame de aço no processo de decapagem. Dada a restrição de apenas poder existir um token em cada lugar, cada ponte rolante vai criar e emitir tokens no momento em que existe um lugar não ocupado.



Figura 44 – Emissores de *tokens* (YASPER SOFTWARE).

De forma análoga, é necessário definir um lugar final que representa a saída de rolos de arame decapados do sistema. A função coletor realiza a contagem do número de *tokens* que finalizaram a rede com sucesso como evidencia a figura 45.

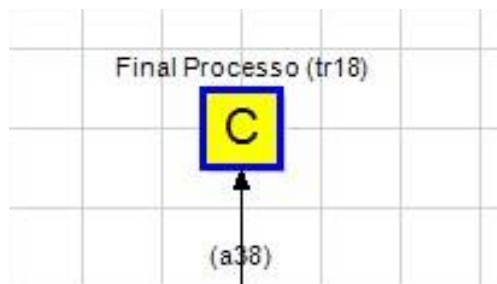


Figura 45 – Coletor de *tokens* (YASPER SOFTWARE).

A condição referida na figura 37 é definida com a função ponto de decisão. Dependendo da disponibilidade das tarefas, o *token* é disparado para o lugar onde não existe nenhum *token*, isto é, a ponte rolante transporta um rolo de arame de aço para a tina que se encontra disponível, como ilustrado na figura 46.

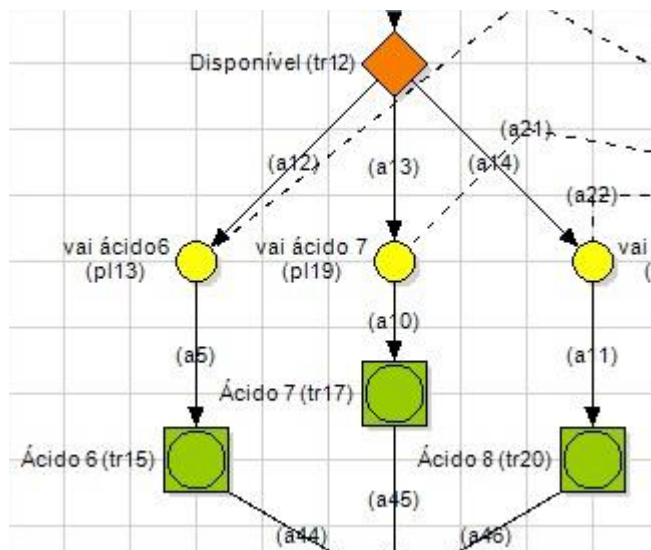


Figura 46 – Ponto de decisão de tarefas (YASPER SOFTWARE).

A partir do diagrama em rede da figura 34, constrói-se a rede de Petri de todo o sistema, desde a criação e emissão de *tokens* aos pontos de decisão e divergência de tarefas até ao final do processo, o coletor de *tokens*. Dada a rede principal, torna-se necessário implementar as condições que provocam e impedem o disparo das transições. As condições que permitem o disparo das transições são, principalmente, o tempo entre cada tarefa e a disponibilidade de executar as tarefas seguintes. Aquelas condições que bloqueiam o disparo das transições dizem respeito a condições de segurança da instalação, tais como:

1. A ponte rolante 2 pode executar a tarefa 4 se e só se a ponte rolante 1 não se encontrar a executar as tarefas 1, 2 ou 3, como demonstra a figura 47;

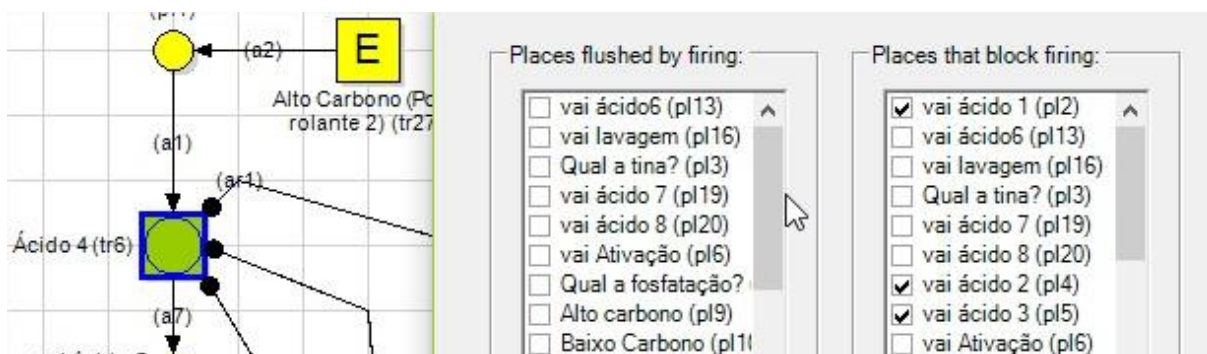


Figura 47 – Ponto de decisão de tarefas (YASPER SOFTWARE).

2. As tarefas 11 e 12, correspondentes à imersão do rolo de arame na tina de fosfatação, só são realizadas caso as tarefas de imersão dos rolos de arame nas tinas de ácido estejam em curso. Esta restrição é representada na figura 48 pelo círculo preto junto ao lugar;

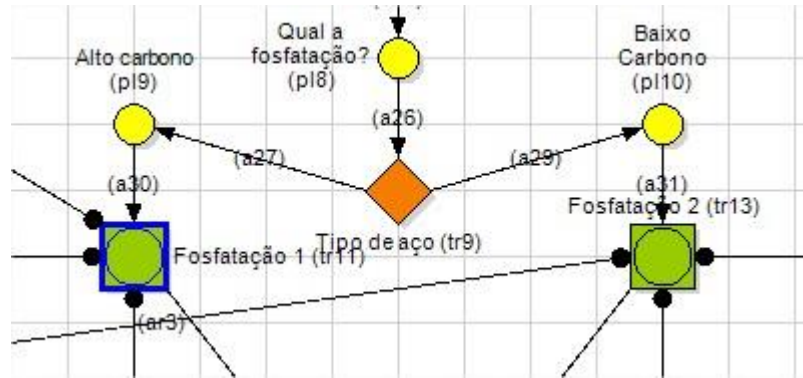


Figura 48 – Ponto de decisão de tarefas (YASPER SOFTWARE).

3. A tarefa 9, atinente à lavagem do rolo de arame após o período de imersão do rolo no ácido, é prioritária em relação às restantes tarefas. Tal como representado na figura 49, a ponte rolante 2 tem de se encontrar disponível para realizar a tarefa 10 logo que a tarefa 9 seja concluída de modo a evitar a oxidação da superfície do arame. Esta condição de restrição é representada na figura 49 pela linha a tracejado;

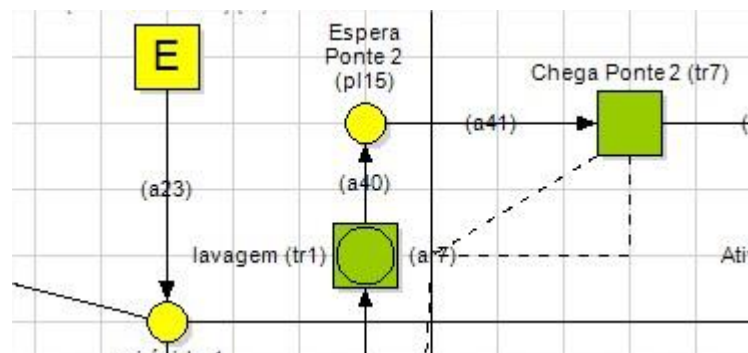


Figura 49 – Ponto de decisão de tarefas (YASPER SOFTWARE).

7 Sistema de extração de ar contaminado

A decapagem química é um processo cuja extração de ar contaminado assume um caráter prioritário. Na imersão ou transição de rolos de arame, forma-se uma nuvem de ácido e ar que, caso não seja extraído de forma eficaz, prejudica a saúde dos colaboradores afetos à seção como também a vida útil dos equipamentos.

7.1 Proposta de melhoria do sistema de extração de ar

Atualmente a seção dispõe de duas unidades separadas de extração de ar:

- no processo de decapagem química;
- na etapa de tratamento da superfície do arame.

Deste modo, os vapores que se formam nas tinas de ácido e nas tinas dos banhos de fosfatação tendem a ser encaminhados para filtros independentes. O fato de, num futuro próximo, a totalidade das tinas possuírem portas implica que no momento de abertura das mesmas, e enquanto ficam abertas, é vital garantir que o ar poluído seja encaminhado para o exterior da seção. Torna-se, deste modo, importante garantir a efetiva extração de ar.

Na figura 50 a estrutura no topo da tina é denominada de capota. Esta capota encontra-se em comunicação com as capotas instaladas em cada tina de ácido e convergem para um tubo coletor principal. O tubo coletor principal é a conduta de ventilação onde o ar é extraído para ser filtrado.



Figura 50 - Sistema de extração de ar contaminado (*Fapricela, S.A.*).

A desvantagem deste processo é que o ar contaminado não é forçado a dirigir-se para a capota de extração de ar. O mesmo acontece à extração do ar contaminado na etapa de tratamento de superfície do arame.

Nos dias em que a humidade relativa do ar aumenta, o ar torna-se mais denso e, por conseguinte, a concentração de ar contaminado na seção cresce (dentro de determinados valores admissíveis) pois a eficiência do grupo de extração decresce.

Devido à movimentação das pontes rolantes, e ao próprio processo de per si, não é possível a instalação de condutas que envolvam toda a área da tina. Do mesmo modo, as dimensões da estrutura de suporte das pontes invalidam a realização do processo dentro de um espaço condicionado e estanque. Assim, uma solução poderá constar de um sistema de ar forçado que encaminhe o ar contaminado para as capotas de extração. Este sistema só pode ser instalado no lado oposta à capota de extração devido à abertura das portas. O mecanismo de abertura das portas irá colocar a porta perpendicular à tina no momento de abertura e extração do rolo de arame de aço.

O sistema de insuflação de ar, embora tenha como objetivo forçar o ar contaminado a dirigir-se para a capota de extração, possui uma desvantagem significativa. Sendo o regime de deslocação do fluido - ar - um regime turbulento implica que o ar contaminado seja projetado em diferentes vetores opostos à conduta de extração. Para minimizar esta situação, propõe-se o prolongamento e derivação da tubagem de extração de ar para que, no lado oposto à capota, também seja possível extrair o ar contaminado. Assim, e observando a figura 51, a conduta seria instalada no lado oposto à capota. A derivação da conduta principal seria realizada num só ponto, devido à escassez de espaço disponível, e as condutas de extração estariam interligadas em série, isto é, a conduta principal tem ligação direta ao primeiro grupo de extração e o segundo grupo de extração tem apenas ligação ao grupo que o antecede e daí por

consequente. O dimensionamento da estrutura de extração deverá garantir a não perda de carga à medida que as condutas se afastam da derivação principal.



Figura 51 - Estudo de extração de ar contaminado (*Fapricela, S.A.*).

7.1.1 Instalação de registos de regulação de caudal

O aumento da capacidade de extração de ar contaminado é diretamente proporcional ao consumo de energia elétrica e às perdas de carga do circuito de exaustão. A ramificação do circuito de extração de ar tem de ser acompanhada pela instalação de registos móveis de controlo manual de caudal em cada ponto de derivação para cada tina tal como ilustra a figura 52.

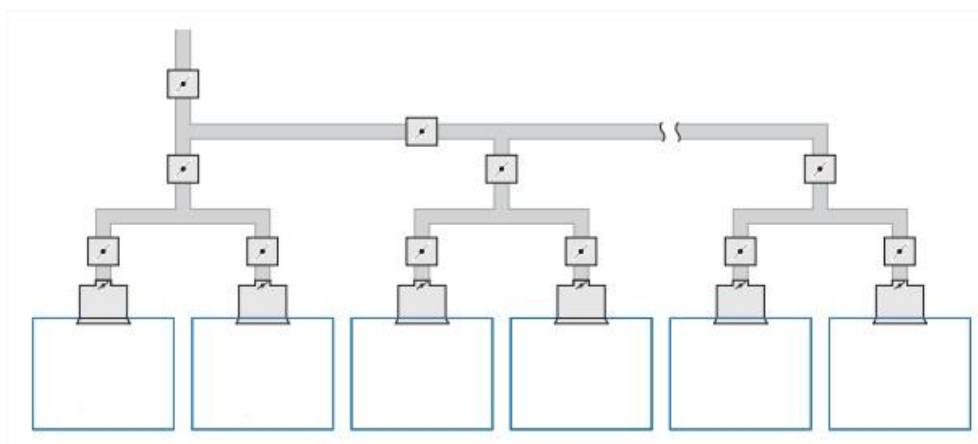


Figura 52 – Registos de controlo de caudal.

Deste modo, propõe-se a regulação de um caudal pré-determinado independente das alterações de pressão da conduta principal. A escolha dos caudais terá de ser efetuada pelo colaborador afeto à secção tendo em conta diversos fatores como:

- o número de tinas de banhos de ácido em funcionamento;
- o nível de concentração de ácido nas tinas de decapagem. A concentração dos banhos de ácido é diretamente proporcional ao ar contaminado libertado no momento em que se dá a entrada ou saída de rolos de arame;
- a temperatura e concentração principalmente dos banhos fosfatação, onde a libertação de vapores aumenta quanto maior for a temperatura e concentração dos banhos;
- as condições meteorológicas, desde a humidade relativa do ar à temperatura ambiente.

O sistema proposto permite equilibrar a capacidade de extração de ar contaminado em cada ponto consoante as condições descritas.

8 Conclusões e trabalhos futuros

8.1 Conclusões

A sequência de imersão dos rolos de arame de aço e os tempos de imersão nas tinas permite calcular a cadência máxima de rolos de arame, ou seja, um valor de produção que é o valor referência a atingir. Deste modo, os cálculos serão em função da quantidade de rolos produzidos por períodos (turnos laborais) de 8 horas correspondentes a 480 minutos.

A capacidade máxima da instalação para este tipo de produção pode ser dada pelo número de rolos que, num período de 480 minutos, podem ser imersos na tina de ácido 3 e na tina de ácido 8 que correspondem às tinas que antecedem a etapa de tratamento de superfície para o médio carbono e alto carbono, respetivamente, como indicado, resumidamente, na tabela 3.

Tabela 3 - Capacidade máxima da instalação

	Médio Carbono	Alto Carbono		
	Tina Ácido 3	Tina Ácido 6	Tina Ácido 7	Tina Ácido 8
Tempo imersão (min)	24	27	27	27
Nº de rolos (em 480 min)	20	53		
Total de rolos possíveis	73			

Através da construção da tabela 3 verifica-se que a capacidade máxima da instalação é de 73 rolos de arame. Decorridos cada 24 minutos, um rolo de arame de aço médio carbono transita para a etapa de tratamento de superfície; enquanto que para o arame alto carbono verifica-se uma cadência de 1 rolo a cada nove minutos.

A partir da tabela 4, que apresenta os tempos de imersão no tratamento de superfície, pode verificar-se que a etapa de tratamento de superfície do arame ocupa a ponte rolante 2 durante 10,70 minutos. Como a cadência de saída de rolos de arame mais curta é de 9 minutos, verifica-se que a ponte rolante 2 apenas pode auxiliar o processo de colocação de rolos nas tinas

de ácido no início do processo, isto é, em situações em que ocorreu o esvaziamento de todas as tinas. Verifica-se, deste modo, outra condição de restrição de funcionamento da ponte rolante 2 na rede Petri a simular.

Tabela 4 - Tempos de imersão no tratamento de superfície

Designação	Tarefa	Tempo de Imersão (min)	Tempo total (min)
LA2	9	0,8	10,7
AC	10	1,3	
F2	11	2,5	
F3	12	2,5	
LI	13	0,017	
N	14	1	
Se	15	2,5	

As figuras 53 e 54 representam, respetivamente, as condições de realização da simulação automática e o modo de relatório do *software* YASPER que não atribui ao utilizador a possibilidade de exportação de relatórios e dados da rede efetuada.

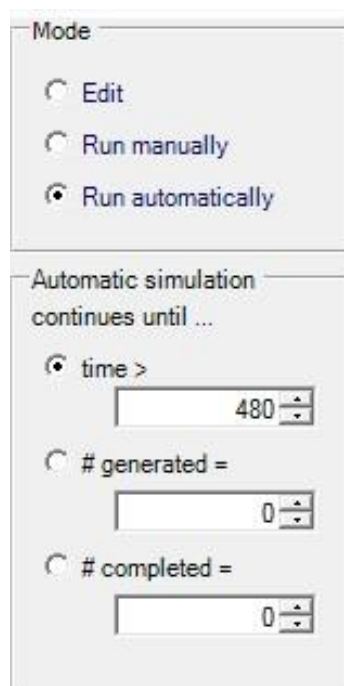


Figura 53 - Menu simulação automática (YASPER SOFTWARE)

Como o período de tempo para a duração da simulação é de 480 ciclos, em analogia ao período de turnos laborais de 480 minutos e não permitindo a estrutura da rede de Petri, a existência de mais do que um *token* em cada lugar, as saídas geradas pelo programa e que são completadas respeitam as condições e restrições do sistema, como tal pode concluir-se que a proposta de funcionamento estudada e simulada aproxima-se do modelo ideal.

report per emitor-collector pair							
from	to	collected	completed	wait time	cycle time	work time	cost
Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	55	55	0	45,66	45,66	0
Médio Carbono (Ponte rola	Final Processo	22	22	0	66,66	66,66	0

case list							
case	from	to	completed?	wait time	cycle time	work time	cost
5211	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5214	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5258	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5197	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5255	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5193	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5264	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5191	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5220	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5213	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5272	Alto Carbono (Ponte rolant	Alto Carbono (Ponte rolant	no	0	0	5	0
5261	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5274	Alto Carbono (Ponte rolant	(nulo)	no	0	0	0	0
5254	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5216	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5234	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5194	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5190	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5246	Médio Carbono (Ponte rola	Final Processo	yes	0	66,66	66,66	0
5210	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5267	Alto Carbono (Ponte rolant	Disponível	no	0	12	39	0
5268	Alto Carbono (Ponte rolant	Disponível	no	0	12	39	0
5237	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5196	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5235	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0
5199	Médio Carbono (Ponte rola	Final Processo	yes	0	66,66	66,66	0
5240	Alto Carbono (Ponte rolant	Final Processo	yes	0	45,66	45,66	0

Automatic simulation	
continues until ...	
<input checked="" type="radio"/> time >	480
<input type="radio"/> # generated =	0
<input type="radio"/> # completed =	0

Figura 54 - Esquema de relatório da simulação (YASPER SOFTWARE)

A tabela 5 resume e compara os valores teóricos da capacidade máxima e os valores obtidos pelo relatório de simulação.

Tabela 5 - Comparação n° de rolos efetivos e simulados

	Médio Carbono	Alto carbono
Capacidade máxima	20	53
Modelo proposto	23	55

A diferença, por excesso, entre os dois grupos de dados é explicada pelo próprio funcionamento da simulação. A simulação decorre durante 480 ciclos, no entanto, no instante em que a simulação termina, caso os *tokens* gerados que se encontram em condições de serem concluídos, o programa executa e valida essas saídas, prolongando, por um determinado período de tempo, o tempo de ciclo de processo conforme representado na figura 55.

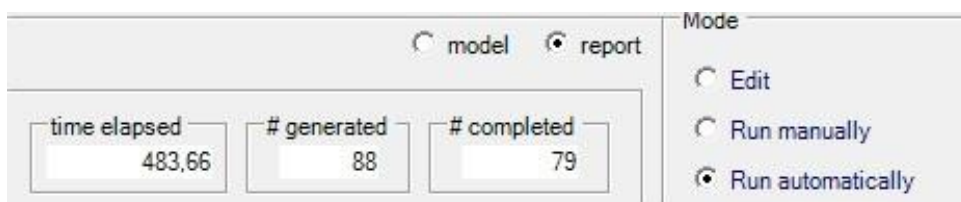


Figura 55 – “ Bugg ” do ciclo de simulação automática (YASPER SOFTWARE)

A implementação das pontes rolantes automatizadas e o aumento da capacidade da instalação garantiram um aumento da cadência de preparação de rolos de arame em maior número e com um acréscimo na qualidade do produto final, conforme foi demonstrado pelo laboratório de controlo de qualidade da Fapricela, SA.

Relativamente ao sistema de extração de ar, a implementação do sistema carece de decisão da organização. Terá de ser efetuado um estudo prévio à capacidade e eficiência do atual grupo de extração e, deste modo, quantificar o rendimento dos ventiladores de extração. Dependendo do rendimento efetivo do sistema de ventilação serão dimensionadas as estruturas auxiliares ao sistema principal.

As principais vantagens do processo de regulação dinâmica do caudal de extração são, principalmente, a facilidade de ajuste dos caudais em cada registo e a compensação localizada de perdas de carga. Sendo as principais desvantagens:

- os custos do revestimento das condutas e registos em material antiácido;
- a limpeza das condutas e dos circuitos de regulação;
- o ruído provocado pela deslocação de ar nos registos.

8.2 Utilidade das redes de Petri na indústria

O desenvolvimento das redes de Petri no âmbito deste projeto surgiu pela necessidade de especificar e sincronizar determinadas tarefas que dependem umas das outras.

Uma rede de Petri, como estudado anteriormente, é um conjunto de nós e arcos que representam o estado do sistema e a ocorrência de tarefas.

Na indústria, a aplicação deste modelo permite definir os lugares que poderiam representar operações, como por exemplo, processos de fabrico, transporte de cargas, alocação de recursos humanos e consumíveis, entre outros. As transições representam acontecimentos, desde a produção de produtos, procedimentos de produção e manutenção até a falhas e avarias ocorridas nos equipamentos.

Existem diferentes tipos de redes de Petri. As redes de Petri temporizadas, são úteis para modelar variáveis onde o tempo de processamento e o tempo de transição entre variáveis são parâmetros que “comunicam” e interagem uns com os outros.

O desenvolvimento das redes de Petri na indústria, desde o processo de gestão de recursos até à atividade de produção permitem:

- Avaliar e comparar diferentes planos de produção, de acordo com as prioridades da empresa;
- Interpretar e monitorizar indicadores de desempenho para implementação de projetos de melhoria contínua;
- Testar diferentes cenários possíveis: alteração de parâmetros, tal como os tempos de produção, planos de produção, alternativas a investimentos e decisões operacionais.

8.3 Trabalhos futuros

Como projetos futuros, em relação ao processo de decapagem e tratamento de superfície do arame, será importante otimizar o tempo de imersão em cada etapa do processo de modo a aumentar a capacidade da instalação. Esta diminuição de tempo de imersão terá de ser efetuada a partir dos reagentes utilizados e das concentrações das soluções de cada tina.

Outro aspeto relevante é a distribuição do tipo de matéria-prima a decapar na estrutura de alimentação. Atualmente, esta estrutura é dividida em 6 unidades de alimentação onde 2 são exclusivas para o arame médio carbono e as restantes 4 para o arame alto carbono. Neste

contexto, seria importante definir se esta relação fixa de distribuição de tipos de arame na estrutura de alimentação é a mais indicada para o processo e, verificar, se esta etapa não influencia a cadência de produção.

Por último, mas não menos importante, no âmbito da gestão de operações e do alocamento de tarefas será importante analisar a instalação como um todo e verificar se existe alguma tarefa ou operação que de *per si*, ou em conjunto, represente um estrangulamento ao processo. Esta análise é revestida de grande importância pois se a causa do estrangulamento de um processo não for identificada e tomadas medidas que conduzam à sua eliminação a cadência de produção estará sempre comprometida e as metas esperadas nunca atingidas.

9 Referências Bibliográficas

Hue, X. (1997). "Genetic algorithms for optimization: Background and applications". University of Edinburgh, Edinburgh Parallel Computing Centre, Scotland.

Avitzur, B (1983). "Handbook of Metal Forming Processes". Wiley New York.

Tavares, L. V., Oliveira, R. C., Themido, I. H., & Correia, F. N. (1996). "Investigação Operacional". Mc-Graw-Hill de Portugal, Lda

Aalst, Wil; Stahl, Christian (2011). "Modeling Business Processes: A Petri Net-Oriented Approach". Massachusetts Institute of Technology.

MengChu Zhou, Kurapati Venkatesh (1999) "Modeling, Simulation, and Control of Flexible Manufacturing Systems: A Petri Net Approach". World Scientific

C. Girault, R. Valk (2002). "Petri Nets for Systems Engineering: A Guide to Modeling, Verification, and Applications". Springer-Verlag.

Moura, Henrique (2013). "PMP Sem segredos". Elsevier Editora Ltda.

Stephens, Mathew P. (2010). "Productivity and Reliability-Based Maintenance Management". Purdue University Press.

Ramachandran, R.S. (2016). "Steel Wire Drawing in Practice". Ane Books Pvt. Ltd.

Bernhoeft, C.P. (1961). "The fundamentals of wire-drawing: with particular reference to aluminum and aluminum alloy". The Wire Industry.

<http://www.yasper.org/> Acesso em: 1/06/2016

<http://www.fapricela.pt/> Acesso em: 15/06/2016

<http://grif-workshop.com/> Acesso em: 27/11/2016

<http://www.fapricela.pt/> Acesso em: 15/06/2016

